

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 LEHKÝCH IZOLAČNÍCH KOMPOZITŮ NA BÁZI PĚNOVÉHO SKLA S VYUŽITÍM VE STAVEBNICTVÍ

DEVELOPMENT OF LIGHTWEIGHT COMPOSITES BASED ON FOAM GLASS WITH
UTILIZATION IN CIVIL ENGINEERING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Bubeník

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ ZACH, Ph.D.

BRNO 2019



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Jan Bubeník
Název	Vývoj lehkých izolačních kompozitů na bázi pěnového skla s využitím ve stavebnictví
Vedoucí práce	doc. Ing. Jiří Zach, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2018
Datum odevzdání	11. 1. 2019

V Brně dne 31. 3. 2018

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
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] ŠTASTNÍK, 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] 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.
- [5] ČSN EN 13055-1 Pórovité kamenivo – Část 1: Pórovité kamenivo do betonu, malty a injektážní malty,
- [6] ČSN EN 13055-2 Pórovité kamenivo pro asfaltové směsi a povrchové úpravy a pro nestmelené a stmelené aplikace.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Práce se bude věnovat vývoji lehkých kompozitů na bázi pěnového skla s velmi dobrými tepelně izolačními vlastnostmi. Konkrétně se bude jednat o možnosti využití kameniva na bázi pěnového skla vyráběného z odpadní skleněné moučky pro výrobu lehkých betonů s velmi dobrým poměrem tepelně izolačních a mechanických vlastností. Cílem bude na vrhnout a vyrobit lehké betony (včetně mezerovitých betonů) s objemovou hmotností do 600 kg/m³ a tepelnou vodivostí nižší než 0,1 W/ (m.K). Na těchto betonech dále stanovit základní fyzikálně mechanické vlastnosti a vyhodnotit jejich uplatnitelnost na stavebním trhu.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ 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 diplomové práce

ABSTRAKT

Teoretická část diplomové práce se zabývá progresivním stavebním materiálem, a to kamenivem z pěnového skla. V práci jsou zahrnuty suroviny pro výrobu, popis výroby, vlastnosti kameniva a jeho použití. Součástí práce je výroba lehkého mezerovitého betonu, jeho vlastnosti, rizika při výrobě a použití ve stavební praxi. V praktické části byl vyroben lehký mezerovitý beton, který byl vyroben z kameniva na bázi pěnového skla pojeným cementem. Na vyrobených zkušebních vzorcích bylo provedeno zkoušení požadovaných vlastností.

KLÍČOVÁ SLOVA

Sklo, pěnové sklo, lehký mezerovitý beton.

ABSTRACT

Theoretical part of diploma thesis deals with progressive building materials, namely with aggregate from foam glass. Resources for production, description of production, properties of aggregate and its utilization are included. Production of lightweight gapping concrete, its properties, risks during its production and utilization in building practice are part of diploma thesis as well. Lightweight gapping concrete was made during practical part. It was produced by combining aggregate from foam glass and cement. Testing of required properties was carried out on these made samples.

KEYWORDS

Glass, foam glass, lightweight gapping concrete.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Jan Bubeník *Vývoj lehkých izolačních kompozitů na bázi pěnového skla s využitím ve stavebnictví*. Brno, 2019. 88 s., 4 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 SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Vývoj lehkých izolačních kompozitů na bázi pěnového skla s využitím ve stavebnictví* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 9. 1. 2019

Bc. Jan Bubeník
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

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

Obsah

I. TEORETICKÁ ČÁST	10
ÚVOD	10
CÍL PRÁCE	11
1 SKLO	12
1.1 HISTORIE	12
1.2 VÝROBA	13
1.3 POUŽITÍ A VLASTNOSTI SKLA	14
1.4 RECYKLACE SKLA.....	15
2 PĚNOVÉ SKLO	17
2.1 HISTORIE	17
2.2 MATERIÁLY NA BÁZI PĚNOVÉHO SKLA.....	18
2.2.1 VÝROBA KAMENIVA NA GRANULAČNÍM TALÍŘI.....	19
2.2.2 VÝROBA KAMENIVA NA ROUNU	20
2.3 VÝROBCI PĚNOVÉHO SKLA V ČR.....	22
2.4 VLASTNOSTI KAMENIVA Z PĚNOVÉHO SKLA	23
2.5 POUŽITÍ KAMENIVA NA BÁZI PĚNOVÉHO SKLA.....	25
3 LEHKÝ BETON	28
3.1 KAMENIVO	29
3.2 POJIVO	31
3.3 VODA	32
3.4 VLÁKNA DO BETONU	33
3.4.1 VLÁKNA Z RECYKLOVANÝCH PET LÁHVÍ	34
3.4.2 CELULÓZOVÁ VLÁKNA.....	35
3.4.3 VLÁKNA Z KAMENNÉ VLNY	36
3.5 PÓROVITOST LEHKÉHO BETONU	36
3.6 ASR – ALKALICKO KŘEMIČITÁ REAKCE, TRVANLIVOST	37
3.7 POUŽITÍ LEHKÉHO MEZEROVITÉHO BETONU	39
II. PRAKTICKÁ ČÁST	42
4 CÍL PRÁCE.....	42
5 METODIKA PRÁCE	42
5.1 VÝBĚR VSTUPNÍCH SUROVIN	42
5.2 ZKUŠEBNÍ RECEPTURY	46

5.3	VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES.....	48
5.3.1	ZKUŠEBNÍ TĚLESA	50
5.4	STANOVENÍ POŽADOVANÝCH VLASTNOSTÍ	52
5.4.1	STANOVENÍ KONZISTENCE SEDNUTÍM KUŽELE	52
5.4.2	STANOVENÍ OBJEMOVÉ HMOTNOSTI V ČERSTVÉM STAVU	53
5.4.3	STANOVENÍ OBJEMOVÉ HMOTNOSTI VE ZTVRDLÉM STAVU	53
5.4.4	STANOVENÍ PEVNOSTI V TLAKU ZKUŠEBNÍCH TĚLES.....	54
5.4.5	STANOVENÍ SOUČiniteLE TEPELNÉ VODIVOSTI	55
5.4.6	AKUSTIKA – ČINITEL ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI	56
6	VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ	58
6.1	RECEPTURY BEZ VLÁKEN	58
6.2	RECEPTURY S VLÁKNY NAMFLEX A CLIMASTONE – S	63
6.3	RECEPTURY S VLÁKNY F8000	68
6.4	POROVNÁNÍ RECEPTUR NAVZÁJEM	73
7	DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	77
7.1	KONKURENCE SCHOPNOST NA TRHU.....	80
8	ZÁVĚR.....	81
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	82
	SEZNAM PŘÍLOH.....	86
	SEZNAM OBRÁZKŮ	86
	SEZNAM TABULEK	87
	SEZNAM GRAFŮ	87

I. TEORETICKÁ ČÁST

ÚVOD

I přes veškeré snahy o recyklaci a eliminaci vzniku odpadů se v současnosti jeho produkce nedaří snížit. Když už odpad vznikne, tak je snaha tento materiál efektivně využít, například ve stavebnictví. Jednou velkou částí, kterou se české odpadové hospodářství zabývá je skleněný odpad. Skleněné střepy se dají výborně recyklovat ve sklárnách jako náhrada vstupních surovin. Díky zavádění nových technologií ve sklářské výrobě vzniká množství odpadů, který sklárny nedokáží zpracovat kvůli špatné čistotě nebo malé velikosti zrn. Vzhledem k nevyužitelnosti tohoto materiálu se musí v nemalém množství vyvážet na skládky. Tak započaly první výroby pěnových skel, které pro svou výrobu využijí jakoukoliv skleněnou surovinu. [1]

Pěnové sklo je tepelně izolační materiál vyrobený ze stoprocentně recyklovatelného skla. Tento progresivní stavební materiál se vyznačuje skvělými tepelně izolačními vlastnostmi, velmi nízkou objemovou hmotností a poměrně vysokou mechanickou odolností. Oproti tradiční tepelným izolantům se pěnové sklo řadí mezi moderní izolace, které jsou ekologické a nezatěžují životní prostředí. Pěnové sklo se na trhu vyskytuje ve formě granulátu a desek. [2]

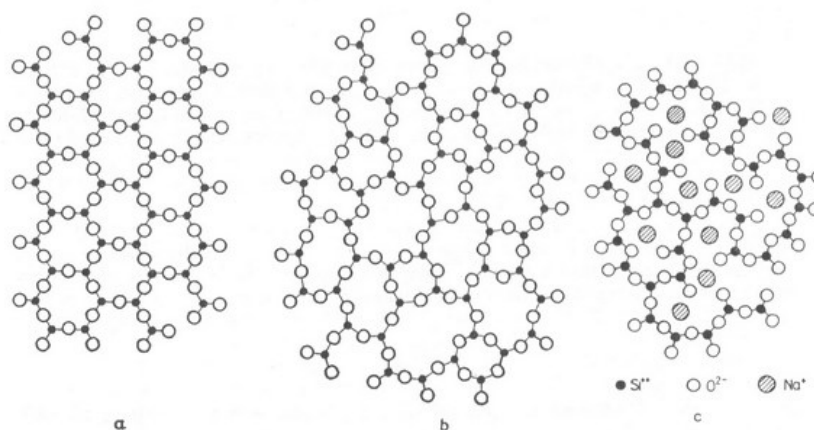
Aby bylo možné splnit nároky a požadavky inženýrů, je potřeba čelit náročnějším konstrukčním návrhům a je nutnost hledat nová řešení. Spolehlivý, trvanlivý a odolný materiál, který má zároveň výborné tepelně izolační vlastnosti. To je důvod zabývat se vývojem tepelně izolačního lehkého betonu a prosazování jeho použití. Diplomová práce se věnuje použití kameniva na bázi pěnového skla do cementových kompozitů a hodnocení jeho vlastností. Vzhledem k přednostem tohoto materiálu vůči konkurenčním, má tento výrobek obrovský potenciál. Velkou nevýhodou je vyšší cena samotného kameniva z pěnového skla, ale ta by výrazně poklesla při větším odbytu a poptávce po něm. Se zvyšujícím se tlakem na tepelnou ochranu budov a recyklovatelnost stavebních materiálů v posledních letech má výroba pěnového skla v budoucnu jistotu využití.

CÍL PRÁCE

Práce se bude věnovat vývoji lehkých kompozitů na bázi pěnového skla s velmi dobrými tepelně izolačními vlastnostmi. Konkrétně se bude jednat o možnosti využití kameniva na bázi pěnového skla vyráběného z odpadní skleněné moučky pro výrobu lehkých betonů s velmi dobrým poměrem tepelně izolačních a mechanických vlastností. Cílem bude navrhnout a vyrobit lehké betony (včetně mezerovitých betonů) s objemovou hmotností do 600 kg/m^3 a tepelnou vodivostí nižší než $0,1 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Na těchto betonech dále stanovit základní fyzikálně mechanické vlastnosti a vyhodnotit jejich uplatnitelnost na stavebním trhu.

1 SKLO

Sklo je amorfnní nekystalická látka, která bývá často průhledná a má rozmanité praktické, technologické a dekorativní využití. Ve stavebnictví se nejčastěji využívá k zasklívání okenních a dveřních otvorů. Významné uplatnění má i při vytváření interiérů a exteriérů. [3]



Obrázek 1: Plošné znázornění rozdílů mezi: a – strukturou křemene, tj. krystalického SiO_2 , b - skelného SiO_2 , c - sodnokřemičitého skla. Podle Hlaváče (1988). [4]

1.1 HISTORIE

Sklo, jako jeden z nejpoužívanějších materiálů ve stavebnictví, byl v minulosti velice vyhledávaným a cenným předmětem na celém světě. V počátcích se přírodní sklo (vulkanický obsidián) používal na výrobu zbraní a nástrojů pro opracování ostatních materiálů. [5]

První důkazy o výrobě skla jsou z dob starověkého Egypta a Mezopotámie (3500 let před našim letopočtem), jednalo se však o jednoduché nástroje. V pozdní době bronzové se sklářství rozvíjelo a roztavené sklo skláři nalévali do připravených nádob (forem). Proces byl pomalý a neefektivní. V prvním století před našim letopočtem se v Sýrii objevili první dělníci, kteří objevili technologii foukání skla. Tím došlo k šíření technologie po celém světě a sklo se stalo dostupným a snadno vyrobitelným materiálem. Bezpečnostní sklo bylo vyrobeno v roce 1903 Eduardem Benedictusem. [5]

1.2 VÝROBA

V technologii sklářství se zajímáme o několik technologií výroby skla jako jsou ploché sklo, lisované, foukané a další. Ve všech případech se připravuje skleněná tavenina z křemičitého písku a jiných surovin jako například vápno, dolomit, soda a skleněné střeby (viz recyklace skla). Pro výrobu speciálních a technických skel se přidávají do surovinové vsázky řady oxidů kovů pro zlepšení námi požadovaných vlastností. Oxidy a sulfidy kovů se používají i jako barvicí či odbarvovací činidla.

Nejběžnější používaná pec pro výrobu skleněné taveniny je nepřetržitá regenerační, která je napojena na výměníky tepla. Roztavené sklo se v závislosti na konečném výrobku stlačuje ve formě, vyfukuje, válcuje nebo naplavuje na roztavený kov. Poškozené výrobky se vrací zpět do výrobního procesu.

Mezi nejdůležitější paliva na vyhřívání pece patří zemní plyn, těžké topné oleje a zkapalněný ropný plyn. Elektřina se často instaluje jako doplňkové vytápění. Požadavky na spotřebovanou energii se pohybují v rozmezí 3,7 až 6,0 kilojoulu na tunu výrobku (kJ/t). [6]

Tabulka 1: Technologie výroby výrobků ze skla [7]

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

1.3 POUŽITÍ A VLASTNOSTI SKLA

Na světě se vyskytuje několik druhů skla. Druhy závisí na přidaných oxidech do vsázky a tím i charakterizují použití daného skla. Mezi nejvíce zastoupené druhy patří:

- sodné nebo sodnovápenaté – výroba sklenic, lahví, plochého skla,
- křemenné – halogenové žárovky, zářivky, fluorescenční mikroskopy,
- draselnovápenaté (křišťálové) – chemické sklo,
- olovnaté – využití v optice díky vysokému indexu lomu,
- borokřemičité – v laboratořích, farmaceutický průmysl, varné nádoby,
- draselné – výroba zkumavek a optických přístrojů,
- vodní sklo – pojivo tmelů, žáruvzdorných materiálů, geopolymérů. [7]

Tabulka 2: Vlastnosti skla [7]

Vlastnost	Hodnota
Hustota	2200–6000 kg/m ³
Pevnost v tlaku	700–1200 MPa
Pevnost v tahu	30–90 MPa
Pevnost v ohybu	40–190 MPa
Modul pružnosti	50–90 GPa
Součinitel délkové teplotní roztažnosti	6 až 9.10 ⁻⁶ K ⁻¹
Součinitel tepelné vodivosti	0,9 – 1,38 W/(m·K)
Poissonův součinitel	0,16 – 0,24 (-)
Tvrдость podle Moshovy stupnice	6–7 (odpovídá tvrdosti křemene a živce)

1.4 RECYKLACE SKLA

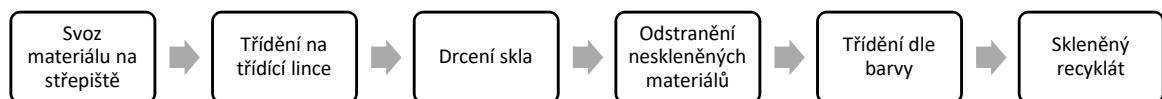
Recyklace odpadů je definována jako jakýkoliv způsob využití odpadů, kterým je odpad znovu zpracován na výrobky, materiály nebo látky pro původní nebo jiné účely jejich použití, včetně přepracování organických materiálů. V posledních letech je recyklace stavebních materiálů velmi důležitým bodem ve stavebním průmyslu.

Na rozdíl od ostatních stavebních materiálů má sklo výhodu, že má dokonalou recyklační schopnost a může se recyklovat téměř do nekonečna. Použité, rozbité a nepotřebné sklo je tím pádem škoda ukládat na skládky, a proto se u skla recyklace řeší. Sklo se recykluje v následujících krocích: [8] [54]

- převoz materiálu na střepiště,
- třídění na třídící lince,
- drcení na střepy,
- separace,
- třídění skla dle barvy.



Obrázek 2: Symbol recyklace[9]



Obrázek 3: Schéma recyklace odpadního skla [9]

První zastávkou skla na cestě k recyklačním linkám je tzv. **střepiště**. Tam se sváží obsah z kontejnerů a jiné sklo. Jde o speciálně upravené plochy, které jsou vyhrazeny pro manipulaci s ostrými střepy. Na tomto místě čeká sklo na převoz k dotřídění.

Po svozu skleněného odpadu do **třídíček** putuje sklo na tzv. předčištění. Pracovníci ručně odstraní na dotřídovací lince zbytky komunálního odpadu a ostatní nežádoucí odpad.

Následuje **drcení** na střepy o velikosti přibližně od 3 mm do 2,5 cm. Drcení podléhá přísným požadavkům norem. Vyjma povolených nečistot, nesmí drcené sklo obsahovat žádný netavitelný materiál.

Po nadrcení skleněných střepů přichází ke slovu tzv. **separátory**. Jde o několikafázový proces, kdy jsou pomocí magnetů a laserů postupně ze střepové drti odstraněny kovy, keramika, kamení, porcelán, olovnaté sklo a netavitelné sklo.

Dále oddělí **separátory** bílé sklo od barevného a v poslední fázi procesu dochází k rozdělení na sklo zelené a hnědé. Zásadní jsou požadavky skláren, se kterými každá třídíčka komunikuje v souvislosti s tím, jaké má sklárna potřeby druhotných surovin. Podle toho se ze skla pak vyrábí nové produkty. [9]

Ve stavebnictví se dá využít skleněný recyklát například pro výrobu pěnového skla, skleněných cihel, obkladových materiálů, podlahových krytin, po úpravě (mletí, drcení) lze použít jako plnivo do omítkových materiálů, lepidel, dalších stěrkových hmot a barev. Dále se využívají v silničním stavitelství pro dosažení požadovaných optických vlastností povrchu. Skleněný recyklát se používá také při výrobě kanalizačních trub, v zemních pracích se využívají do zásypových materiálů, ve strojírenství na výrobu mazadel a má i spoustu dalšího využití. [9]

2 PĚNOVÉ SKLO

Pěnové sklo je moderní tepelně izolační a nehořlavý stavební materiál vyráběný ze surovin používaných běžně ve sklářské výrobě, ale hlavní surovinou je recyklovatelné sklo (až 98 %), které sklárny nechtějí nebo jej neumí ekonomicky využít. Díky značnému využití recyklovaného skla jsou pěnová skla klasifikována jako "zelené" výrobky, neboť přispívají k podstatně nižším emisím CO₂ a menšímu znečištění životního prostředí v procesu výroby ve srovnání s jinými výrobními procesy obsahující recyklované sklo jako surovinu. Pěnové sklo se dodává ve formě tepelně izolačních desek nebo jako granulát (kamenivo). [10] [11]

V dnešní době se stává nutností používání efektivní tepelné izolace, která přispívá k úsporám energie. Při výběru tepelné izolace je nutné zohlednit řadu kritérií, které nám výběr zúží. Poměr mezi ekonomikou a ekologií, životnost izolace, ztráta vlastností v čase a další. Z výše uvedených vlastností se tepelná izolace z pěnového skla jeví jako velice zajímavá volba. [12]

2.1 HISTORIE

Za počátek pěnového skla se považují čtyřicátá léta dvacátého století. První myšlenky byly použít pěnové sklo při stavbě lodí a tím nahradit dosud nenahraditelný korek. Po druhé světové válce započala větší průmyslová výroba v USA. V roce 1962 založila společnost Pittsburgh Corning první závod v Belgii, který je dnes jeden z největších a nejmodernějších na světě. V šedesátých až osmdesátých letech se vyrábělo pěnové sklo i v Československu pod obchodní značkou SPUMAVIT. První použití u nás bylo na izolaci chladíren, mrazíren a zároveň na stavební izolaci významných staveb. [12]

2.2 MATERIÁLY NA BÁZI PĚNOVÉHO SKLA

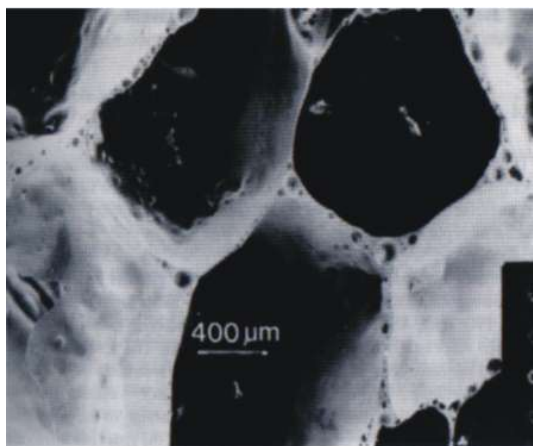
Pěnové sklo se vyrábí ve formě granulátu (štěrku) nebo ve formě desek. V České republice se výrobou tepelně izolačních materiálů na bázi pěnového skla zabývají společnosti:

- PITTSBURGH CORNING CR spol. s. r.o. (FOAMGLAS)
- REC GROUP spol. s.r.o. (A-GLASS)
- REFAGLASS a.s. (REFAGLASS)

Kamenivo na bázi pěnového skla je v podstatě umělé kamenivo vyrobené recyklací odpadního skla. Z důvodu velkého množství nevyužitelných jemných střepů se u nás začalo hovořit o výrobě kameniva z pěnového skla. Granulát je velice porézní, lehký materiál použitelný v mnoha stavebních aplikacích. Základní surovinou je odpadní sklo (smíšené recyklované sklo, odpadní ploché sklo, vyřazené CRT obrazovky z televizí a monitorů), dále se používají pěnidla (glycerin, karbid křemíku, uhličitan vápenatý, v minulosti uhelný prach), plniva a tavící přísady. Při různé kombinaci vstupních surovin vznikají vzorky pěnových skel odlišných vlastností dle budoucí aplikace.

Z hlediska technologie výroby kameniva na bázi pěnového skla existují 2 způsoby:

- výroba kameniva ve formě sbalků na granulačním talíři s výpalem v rotační peci,
- výroba na rounu s výpalem v tunelové peci a následné drcení na požadované frakce (jsou-li frakce kameniva požadovány). [11] [7]



Obrázek 4: Mikroskopická struktura pěnového skla [13]

2.2.1 VÝROBA KAMENIVA NA GRANULAČNÍM TALÍŘI

Nahromaděné sklo se vytrídí od nečistot a nežádoucích příměsí pomocí třídiček a magnetických separátorů. Skleněné střepy se pomelou na požadovanou frakci (10 až 50 mikrometrů). Skleněná moučka se zamíchá s vodou, pojící přísadou a pěnotvorným činidlem. Připravená směs se nanese v daném množství na granulační talíř a probíhá výroba sbalků podobně jako u agloporitu. Sbalky se nechají na sbalkovacím talíři do vzniku požadovaných velikostí. Následně se sbalky nechají odležet. Dalším krokem výroby je výpal v rotační peci na 900 °C, při kterých materiál expanduje a získává své finální vlastnosti. Po výpalu se výrobky třídí na jednotlivé frakce a kontroluje se jejich kvalita a rozměry výsledných kuliček kameniva. Vyrobené kamenivo se prodává v pytlech o velikosti 55 l, velkorozměrových pytlech 1,5 m³ a 2,5 m³ nebo jako volně ložené v cisternách a silech. [14]

Takto vyrobené kamenivo má jedinečné vlastnosti. Při sypné hmotnosti pouze 190 až 530 kg/m³ je velice odolné v tlaku. Dle velikosti zrna se pevnost v tlaku pohybuje od 1,4 až 2,8 MPa. Uzavřená struktura buněk zajišťuje velmi nízkou tepelnou vodivost 0,07 W/(m·K). Díky kulovitému tvaru zrn se kamenivo dobře dopravuje, dávkuje a zajišťuje vynikající tekutost směsi. Granulát z expandovaného skla absorbuje zvuk a tím zvyšuje akustickou účinnost stavebních materiálů, zároveň materiál není hořlavý a neuvolňuje škodlivé plyny.

Při této výrobě jsou šetřeny přírodní zdroje a tím se zvyšuje ochrana k životnímu prostředí. Materiál je inertní a ze 100 % recyklovatelný. [14]



Obrázek 5: Detail kameniva z pěnového skla vyrobeného na granulačním talíři [14]

Kamenivo vyrobené na granulačním talíři má široké využití. Může se využít jako volně sypaná tepelně izolační výplň pro netlakové zatížení. U tlakového zatížení se granulát může pojít pojivy na bázi cementu či pryskyřic. Další využití je do světlých betonů. Jedná se o lehké betony LWC, které jsou nehořlavé, zvukotěsné, úsporné a dá se využít pro novou výstavbu i rekonstrukce starších budov. Dále se kamenivo používá do suchých maltových a omítkových směsí, na výrobu panelů nižších hmotností, do polymerbetonů, barev, v autoprůmyslu, při 3D tisku a dalších aplikacích. [14]

2.2.2 VÝROBA KAMENIVA NA ROUNU

Materiál pro výrobu tohoto typu pěnového skla je obdobný jako u technologie na granulačním talíři. Zdrojem skleněného odpadu bývají firmy pracující se sklem (sklářny), ale i odpadní kontejnery se sklem. Sklo se vyčistí od nežádoucích látek (cihly, beton, kameny a železné prvky). Skleněné střepy se pomelou v kulovém mlýně na frakci potřebnou pro nanesení na roundo 10 až 90 mikrometrů. Vznikne nám skleněná moučka, která má vždy stejnou barvu (šedobílou) a přitom nezáleží na barvě vstupních surovin. Podle americké studie je vhodné použití odpadních keramických frit jako základního prvku při výrobě.

Při použití keramických frit vzniklo pěnové sklo s lepšími fyzikálními i chemickými vlastnostmi. Procentuálním zastoupením frit se dá v materiálu měnit další řada vlastností jako hustota, pevnost, tepelná vodivost, nehořlavost a tepelná roztažnost.

Skleněná moučka se následně smíchá s napěňovací přísadou (glycerin, uhlíkový prach, čistý karbid křemíku nebo uhličitán vápenatý). Vytvořená směs se nanese na speciální rouno ve vrstvě asi 10 centimetrů a poté jede “nekonečný” pás do pece o teplotě okolo 800 °C. Díky zvýšené teplotě a pěnové látce dojde k expanzi materiálu v peci. Při výjezdu rouna z pece dochází k tepelnému šoku a materiál popraská na velikost od 10 do 60 mm. Dále míří k drtiči, kde se drtí na požadované frakce. Po podrcení kamenivo putuje na skládku kameniva. Při vyhoření pěnidla v peci vzniká díky této technologii šedé kamenivo. Výroba jedné várky materiálu (100 kg) trvá cca 50 minut.

Vědci v USA zjistili, že zvýšení teploty v peci z 800 °C na 900 °C ničí buněčnou strukturu pěnového skla. Už zvýšení na 850 °C způsobuje nežádoucí deformaci v mikrostruktuře. Snaha je o použití pěnivých činidel, díky kterým dosáhneme maximálního výkonu při jejich minimálním použití. Karbid křemíku jako pěnidlo se používá u tmavších výrobků, pro světlejší se používají jiná činidla. V budoucnosti je snaha o vývoj barevných pěn pomocí přídavku keramických pigmentů. [15] [16] [11]



Obrázek 6: Tunelová pec pro výrobu pěnového skla

Pro získání materiálů výjimečných vlastností je vhodné použití tavicích přísad. Mezi nejpoužívanější tavicí přísady se používají: uhličitan vápenatý (vysoká pevnost a pórovitost, nízká sypná hmotnost), oxid manganičitý (rovnoměrné rozložení pórů), boritan sodný (zvýšení mechanických vlastností), oxid uhličitý (homogenní distribuce pěny při napěnění), uhličitan sodný (snížení teploty skelného přechodu), nitrid hliníku (nízká sypná hmotnost a dobré mechanické vlastnosti). [17] [18] [19] [20] [21] [22]



Obrázek 7: Skládka vyrobeného kameniva

2.3 VÝROBCI PĚNOVÉHO SKLA V ČR

Americká společnost Pittsburgh Corning s.r.o. vyrábějící izolace z pěnového skla pod obchodní značkou FOAMGLAS. Od července 2017 je společnost součástí jiné společnosti Owens Corning, která se zabývá vývojem, výrobou a prodejem izolací, střešních krytin a kompozitů ze skelných vláken. Společnost vyrábí v pěti závodech po celém světě. Závody se nachází v Belgii, České republice, Číně a dva v USA. Od roku 2008 funguje výrobní závod společnosti v České republice v Klášterci nad Ohří. Značka FOAMGLAS nabízí veškeré tepelně izolační materiály a příslušenství pro celou obálku budovy. Společnost míří směrem výrob tepelně izolačních desek a společně s deskami dodávají celé systémy (lepidlo, omítka).

Jejich nejnovější výrobek je základací blok, který výrazně eliminuje vznik tepelných mostů. [12]

Česká společnost RECIFA a.s. je rodinná česká firma, která na trhu působí více jak dvacet let. Společnost má dvě dceřiné společnosti. AMT s.r.o. v Příbrami, která se zabývá zpracováním a recyklací odpadů. Druhou společností je REFAGLASS s.r.o., který je znám výrobou stejnojmenných výrobků z pěnového skla. Výroba v obci Vintířov u Karlových Varů byla zahájena v roce 2009 a nyní mají výrobní linku s kapacitou 72 000 m³ pěnového skla ročně. Mezi základní výrobky společnosti patří štěrk z pěnového skla v těchto frakcích (0-63 mm; 16-32 mm; 4-16 mm; 0-4 mm). Dalšími výrobky jsou desky vyráběné v tloušťkách 40 až 120 mm. Posledním produktem je skelná moučka, která má využití v řadě odvětví. [2]

Firma A-GLASS Recycling s.r.o. je druhou českou firmou vyrábějící granulát z pěnového skla. Výrobky nesou obchodní označení A-GLASS. Společnost funguje na trhu krátkou dobu, teprve od roku 2015. Sortiment je obdobný jako u firmy REFAGLASS. Pěnový štěrk pouze jedné frakce 0-63 mm a desky mající tloušťku od 40 do 140 mm. [16]

2.4 VLASTNOSTI KAMENIVA Z PĚNOVÉHO SKLA

Díky napěnění vznikne ve struktuře pěnového skla mnoho pevně spojených skleněných můstků, které mezi sebou vytváří velmi malé uzavřené dutinky. Tyto prostory zamezují šíření tepelného toku v materiálu a díky nim se pohybuje hodnota součinitele tepelné vodivosti v rozmezí 0,065 – 0,095 W/(m·K) (v závislosti na frakci a sypané hmotnosti kameniva). [16] [2]

Kamenivo na bázi pěnového skla má dobrou zvukovou pohltivost, a proto ho lze úspěšně použít pro výrobu protihlukových stěn a zvukových absorberů s vysokou zvukovou pohltivostí.

Kamenivo má částečně uzavřenou pórovou strukturu. Nasákavost kameniva je závislá především na složení vstupní suroviny a režimu výpalu v peci. Pěnové sklo se tváří jako nenasákavý materiál, ale díky jeho otevřené pórovitosti činí

celková nasákavost přibližně 19 % (záleží na frakci). Ovšem vnitřní nasákavost zrn je 0 %, tudíž nám pěnové sklo plave na hladině a nepotopí se. Kamenivo je mrazuvzdorné a vykazuje relativně velmi dobré mechanické vlastnosti. Pevnost (odpor při stlačování dle ČSN EN 13055) se pohybuje od 0,25 - 3,00 MPa, záleží na frakci, pórovitosti a zhutnění kameniva. [16] [2]

Při stanovení objemové hmotnosti si musíme uvědomit, že uvnitř materiálu je velké množství vzduchu. Proto je ideální pro stanovení objemové hmotnosti pomletí materiálu na jemnou frakci a poté vyhodnotit. Díky tomuto problému nás objemová hmotnost moc nezajímá a řešíme sypanou hmotnost, která se v závislosti na frakci pohybuje v rozmezí 130 až 460 kg/m³. [16] [2]

Pěnové sklo je inertní materiál, nevyučuje žádné látky a nemá negativní vliv na životní prostředí. Je odolné vůči chemickému namáhání a nenapadají ho žádné plísně, hmyz, hlodavci, houby a je zdravotně nezávadné. Díky výrobě ze skla je pěnové sklo neustále recyklovatelné a můžeme využít jeho opakované použití. Jedná se o jeden z mála izolačních materiálů, který se snadno recykluje a dá se dostat zpět do výroby. Kamenivo odolává vůči stárnutí a nepodléhá degradaci. Desky z pěnového skla se díky podobné tepelné roztažnosti jako beton a ocel mohou celoplošně lepit k materiálům bez vytváření dilatačních vrstev. [16] [2]

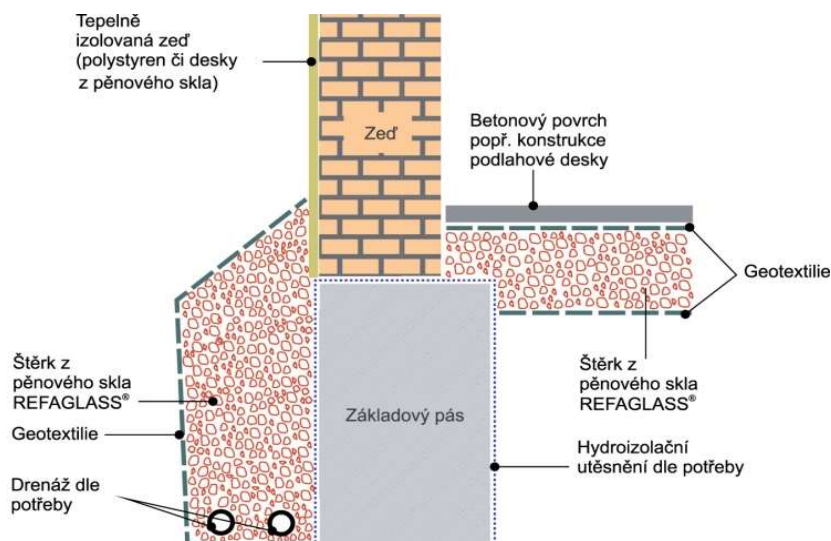
Podle normy ČSN EN 13501-1 je pěnové sklo zaříděno do kategorie A1. To znamená, že materiál je považovaný jako nehořlavý, protože je vyroben pouze z anorganických složek (skla, uhlíku, glycerínu). Bod měknutí materiálu je nad 700 °C. Při požáru pěnové sklo nevytváří žádný kouř ani škodlivé látky a díky neprodyšnosti nepropouští kyslík potřebný k hoření okolních materiálů. Díky uzavřené struktuře a nulové vnitřní nasákavosti kamenivo nepodléhá degradaci vlhkostí a tím jsou zamezeny objemové změny. Pěnové sklo je neprodyšné podobně jako tabulové sklo, koeficient difuzního odporu se blíží nekonečnu a je parotěsné pro všechny plyny včetně vodní páry a radonu. [16] [2]

Tabulka 3: Vlastnosti kameniva na bázi pěnového skla [16] [2]

Vlastnost	Hodnota	Jednotky
Sypná hmotnost	130–460	kg/m ³
Součinitel tepelné vodivosti	0,065 – 0,095	W/(m·K)
Měrná tepelná kapacita	840	J/(kg·K)
Odpor při stlačování	0,25 – 3,0	MPa
Modul pružnosti	800–1500	MPa
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	A1	-

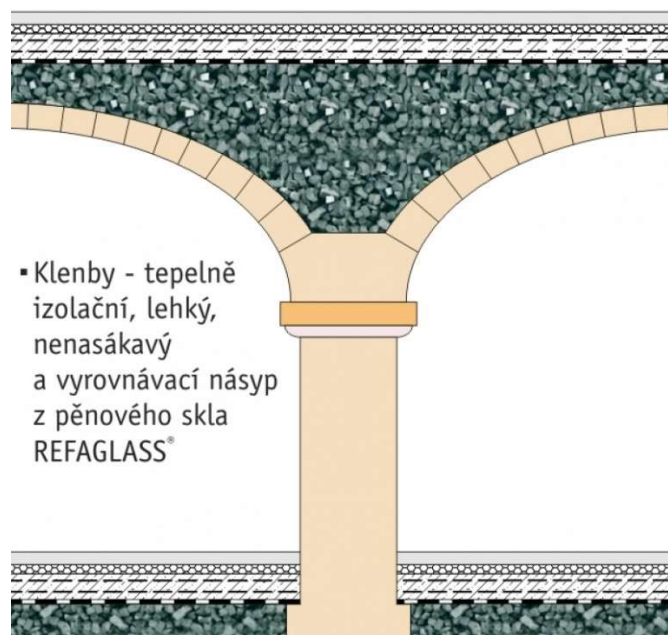
2.5 POUŽITÍ KAMENIVA NA BÁZI PĚNOVÉHO SKLA

Ideální použití štěrku z pěnového skla je pro zakládání staveb na tepelně izolačním podsypu pod základovou deskou. Odizolování už pod samotnou stavbou objektu je vhodné pro dřevostavby, zděné domy i objekty z tvárnic. Díky celoplošnému provedení podsypu je dokonale postaráno o odvětrání podzákladí vůči radonu a vlhkosti. Současně díky tepelně izolačním vlastnostem štěrku je zajištěno opatření proti promrzání. Kvůli mezerovitosti štěrku je snadný odvod srážkové vody do drenážních systémů. Podobné výhody lze využít při obsyech suterénních stěn, kdy kamenivo slouží pro transport srážkové vody k drenážím. Kamenivo zajišťuje velmi dobrou tepelnou izolaci sklepních prostor a omezuje promrzání do vyšších hloubek v zimě. [23]



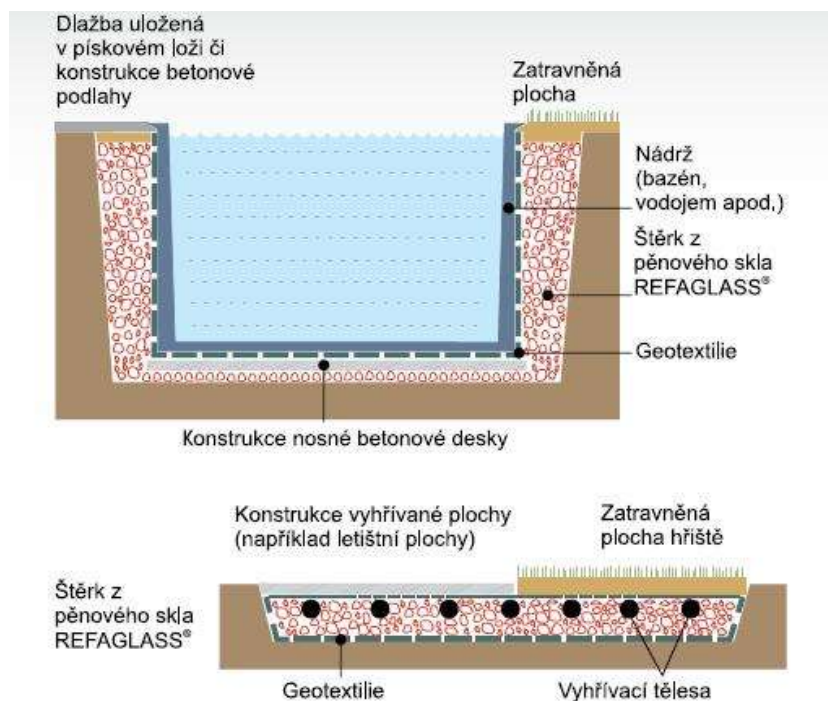
Obrázek 8: Použití kameniva z pěnového skla na obsypy a podsypy objektů [26]

Další velké použití kameniva z pěnového skla je při rekonstrukcích. U rekonstrukcí využíváme hlavních výhod pěnového skla, a to je velmi nízká sypná hmotnost a zároveň přiměřeně velká pevnost tepelně izolačního materiálu. Nejčastější využití je při rekonstrukci starých podlah, nahrazení stávajících násypů (většinou škváry) a vytvoření tak souvislé tepelně izolační vrstvy. Při rekonstrukci stropních konstrukcí historických budov se kamenivo používá jako náhrada stávajících zásypů kleneb, trámových stropů a podlah. Většinou probíhá náhrada za tradiční materiály (polystyren, škvára, písek, expandované jíly). Štěrka ve většině případů odlehčí konstrukci, zvýší únosnost stavby a požární odolnost. [23]



Obrázek 9: Odlehčení klenby a vyrovnání podlahy pomocí lehkého kameniva [23]

Časté využití je jako izolace střešních konstrukcí (pochůzných, pojízdných) a v dnešní době se čím dál častěji nachází při provedení zelených střech. Jedinečné použití je v extrémních podmínkách, kde je materiál vystaven vysokým nebo nízkým teplotám. Izolace potrubí, ve kterých kolují média s extrémními teplotami, izolace průmyslových nádrží. Speciální aplikace jako izolace v sendvičových panelech, izolace jímek, bazénů, teras, tunelů, do gabionů protihlukových stěn a v zahradní architektuře pro vytvoření členitosti terénu. [24] [25]



Obrázek 10: Kamiv z pěnového skla jako izolace bazénů a do vyhřívanych podlah [26]

3 LEHKÝ BETON

Lehký mezerovitý beton není nikde popsán v normě, takže se musíme řídit normami pro lehký beton a pro mezerovitý beton zvlášť. Dle ČSN EN 206 + A1 je lehký beton definován jako kompozitní materiál, jehož objemová hmotnost v suchém stavu se pohybuje v rozmezí 800 kg/m^3 až 2000 kg/m^3 .

Vylehčení betonu se provádí přímými a nepřímými metodami. Nepřímo lehčené betony se vytváří substitucí klasického hutného těžného či drceného kameniva kamenivem pórovitým (přírodním či umělým). U přímo lehčených betonů je principem vytvoření pórů přímo ve hmotě. Dle velikosti pórů se betony dělí na makropórovité (pěnobetony) a mikropórovité (pórobetony). Základní vlastnosti hutných kameniv se zkouší podle ČSN EN 1097 Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva. V červnu 2017 byla aktualizovaná norma ČSN EN 13055 Pórovité kamenivo, týkající se vlastností pórovitého kameniva (LWA). Mezerovitý beton je definován v ČSN 73 6124-2 jako vrstva vytvořená ze stejnozrnného cementového betonu s velkým objemem mezer vyrobeného

z frakcí hrubého kameniva, drobného kameniva, cementu, vody a případně přísad. Pevnou kostru betonu tvoří frakce hrubého kameniva, drobné kamenivo, cement, voda a přísady tvoří maltu pro obalení a spojení jednotlivých zrn kostry z hrubého kameniva. Tato norma pro mezerovitý beton se zabývá použitím betonu ve vozovkách a označujeme jej MCB. Pro zjištění objemu mezer se na zatvrdlé zkušební těleso ve formě 150 x 150 x 150 mm leje voda až po okraj. Podle spotřeby vody pro zaplnění formy s betonem se stanoví množství mezer v betonu. Díky spojení výhod lehkého a mezerovitého betonu dostaneme kompozitní materiál, který má vynikající tepelně a zvukově izolační vlastnosti. Použití tohoto betonu je vhodné do konstrukcí, kde je potřeba výrazně zvýšit hodnoty těchto vlastností a zároveň díky nízké objemové hmotnosti dojde k značnému odlehčení celkové konstrukce. [27] [28] [29]

Tabulka 4: Třídy lehkého betonu dle objemové hmotnosti [28]

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

3.1 KAMENIVO

Kamenivo je definováno jako přírodní nebo umělá látka anorganického původu použitelná pro stavební účely s maximální velikostí zrna do 63 mm. Kamenivo je v betonu podstatná složka, jelikož zabírá 75 až 80 % jeho celkového objemu. Základní dělení kameniva je dle vzniku, frakce, objemové hmotnosti a petrografie. Těžená kameniva (nejčastěji z vody) vznikají přirozeným rozpadem hornin a po transportu bývají zrna zaoblená. Drcené kamenivo vzniká drcením větších kusů hornin v lomech na čelistových, kuželových a jiných drtičích. Drcené kamenivo má obvykle oproti těženému horší tvarový index (poměr stran).

Norma ČSN EN 12620+A1 Kamenivo do betonu se zabývá vlastnostmi kameniva a fileru jako kameniva, získaného úpravou přírodních, umělých, recyklovaných materiálů nebo jejich směsí pro použití v betonu. Tato norma

se zabývá hutnými kamenivý, které mají objemovou hmotnost zrn vysušených v sušárně větší než 2000 kg/m^3 . Tato kameniva mají využití u všech druhů betonů, včetně pro betony na vozovky, jiné pojižděné plochy i prefabrikáty. Dále se norma věnuje recyklovanému kamenivu s objemovou hmotností zrn od 1500 kg/m^3 do 2000 kg/m^3 . [30]

Dle velikosti zrna kamenivo dělíme (D = horní a d = dolní síto frakce kameniva):

- a) hrubé kamenivo, $D > 11,2 \text{ mm}$ a $D/d > 2$ nebo $D < 2$,
- b) směs kameniva (štěrkopísek, štěrkodrt), $D < 63 \text{ mm}$ a $d = 0 \text{ mm}$,
- c) drobné kamenivo (písek), $D < 4 \text{ mm}$ a $d = 0 \text{ mm}$,
- d) filery jsou zrna kameniva do velikosti $0,125 \text{ mm}$. [30]

Typickým ukazatelem kvality kameniva je jeho granulometrie. Zkoušení geometrických vlastností kameniv podléhá normě ČSN EN 933. Norma má deset částí a každá z nich se věnuje jiné vlastnosti. První a zásadní částí je stanovení zrnitosti pomocí síťového rozboru. Zrnitost kameniva nám určuje velikost a tvar jednotlivých zrn. Síťový rozbor je zkouška, která nám ukáže podílové zastoupení zrn v kamenivu dle velikosti. Podíl zrn zachycených na síti se nazývá frakce. Dle normy kamenivo prochází sestavou sít, které mají tyto rozměry ok: $0,063-0,125-0,25-0,5-1-2-4-8-16-32-63-125 \text{ mm}$. Pro zajištění maximální hutnosti betonu se používají takzvané plynulé křivky zrnitosti (zastoupena většina zrn). Například u mezerovitého betonu se prostřední frakce vynechává pro zajištění vzniku mezer, to se nazývá přerušovaná křivka zrnitosti. Mezi základní dělení křivek zrnitosti se řadí křivky dle Fullera, Empa I, Empa II a další. [30]

Pórovité kamenivo (LWA)

Použití tohoto kameniva se zabývá norma ČSN EN 13055 Pórovité kamenivo. Tato norma určuje vlastnosti pórovitého kameniva a jeho filerů získaného zpracováním přírodních či umělých materiálů nebo jejich směsí pro použití do betonu, malty, injektážní malty, asfaltových směsí, povrchových úprav a do hydraulicky stmelených a nestmelených směsí. Oproti klasickému hutnému kamenivu se norma zabývá kamenivem o objemové hmotnosti menší než 2000 kg/m^3 nebo hodnota sypné hmotnosti nepřesahuje 1200 kg/m^3 . Norma zahrnuje:

- a) přírodní pórovité kamenivo,
- b) pórovité kamenivo vyrobené z přírodních materiálů,
- c) pórovité kamenivo vyrobené z vedlejších produktů průmyslových procesů nebo z recyklovaných materiálů,
- d) pórovité kamenivo jako vedlejší produkt průmyslových procesů

Mezi přírodní pórovitá kameniva řadíme tufy, tufity, spongility, diatomity, přírodní pemza, a lehká láva. Průmyslově vyráběná pórovitá kameniva jsou například keramzit, cihloporit, kavitit, expandit, vermikulit a perlit. [31]

3.2 POJIVO

Pro pojení kameniva na bázi pěnového skla se nabízí spousta organických pojiv (živice, pryskyřice), anorganických pojiv (cement, vápno) nebo alternativních pojiv jako jsou pucolány (popílek, metakaolín). Z hlediska dostupnosti a použitelnosti byl po náš výzkum zvolen cement, který bude sloužit pro výrobu lehkého mezerovitého betonu.

Cement

Cement je hydraulická prášková látka, která slouží pro pojení kusových prvků ve stavebnictví za vzniku betonu. Jedná se o jemně mletý anorganický materiál, který po smíchání s vodou vytváří kaši, která pomocí hydraulické reakce tuhne a tvrdne na vzduchu i pod vodou. Základní surovinou je vápenec, který se mele společně s jíly v kulových mlýnech. Cement se vyrábí výpalem na vysokou teplotu (1450 °C) v rotačních pecích. Vypálený slínek se mele na požadovaný měrný povrch, který nám určuje jeho reaktivitu. Dle ČSN EN 197-1 dělíme cement do těchto tříd podle složení:

- CEM I – portlandský cement,
- CEM II – portlandský cement směsný,
- CEM III – vysokopeční cement,
- CEM IV – pucolánový cement (v současné době se v České republice nevyrábí),
- CEM V – směsný cement.

Základní dělení cementů je podle pevnostních tříd na 32,5; 42,5; 52,5 MPa. Další dělení je podle doby náběhu pevnosti na normální (N) a rychlovazné (R). V praxi se používá více druhů cementů (speciální cementy), které jsou specifické svým použitím v daných typech konstrukcí (silniční, síranovzdorný a další). [32] [33]

3.3 VODA

Voda má v čerstvé betonové směsi dvě funkce. Hlavní funkcí vody je, že se spolupodílí na hydrataci cementové matrice a druhou funkcí se rozumí vliv množství vody na zpracovatelnost čerstvého betonu. Při smíchání vody s cementem dochází k chemické reakci, která se nazývá hydratace. Díky tomuto ději dochází v řádu několika minut k růstu krystalů CSH fází a tím betonová směs začíná tuhnout později tvrdnout. Voda potřebná pro hydrataci je minimálně 25 až 35 % z hmotnosti cementu. Poměr vody ku cementu se nazývá vodní součinitel.

Vyšší množství vody logicky zlepšuje zpracovatelnost, ale na druhou stranu má několik negativních účinků. Ve ztvrdlém betonu zvětšuje množství kapilár a pórů, snižuje výsledné pevnosti a díky většímu množství pórů je beton méně odolný vůči vlivům prostředí.

Norma ČSN EN 1008 - Záměsová voda do betonu nám určuje požadavky na vodu, která je vhodná pro výrobu betonu, který vyhovuje evropské normě ČSN EN 206+A1 a popisuje metody, pro posouzení její vhodnosti jako záměsové vody. [34] [35]

3.4 VLÁKNA DO BETONU

Vlákna různých materiálů jsou složkou betonové směsi, která se přidává do čerstvé směsi za účelem vylepšení vlastností betonu v čerstvém i zatvrdlém stavu. Důležité vlastnosti, které vlákna vylepšují jsou zvýšení pevnosti v tahu, zamezení vzniku smršťovacích trhlin, vylepšení požární odolnosti a další. Podle účelu vláken v zabudované konstrukci (vzorku) se dělí do dvou základních skupin na vlákna konstrukční a protismršťovací. Podle materiálu dělíme vlákna do následujících skupin: [36]

- vlákna ocelová,
- vlákna polymerní (syntetická),
- vlákna skleněná,
- vlákna azbestová,
- vlákna přírodní.

Tabulka 5: Fyzikální a mechanické vlastnosti vláken [36]

vlákna	průměr [mm]	měrná hmotnost [kg/m ³]	modul pružnosti [GPa]	pevnost v tahu [MPa]	přetvoření [%]
ocelová	0,15 - 1,0	7840	200	345 - 2100	0,5 - 3,5
polymerní (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	-

V praktické části diplomové práce byla použita vlákna z recyklovaných PET láhví, celulózová vlákna z recyklovaného novinového papíru a vlákna z kamenné vlny.

3.4.1 VLÁKNA Z RECYKLOVANÝCH PET LÁHVÍ

PET láhve většina lidí nenávidí, ale stejně je všichni používají. Odborníci varují před používáním PET láhví jako obalového materiálu pro nápoje z důvodu nepříliš prozkoumaného uvolňování škodlivých látek z plastu (polyethylenu) do obsahu láhví. Nicméně PET láhve jsou všudypřítomné a používají se stále více, a proto je dobré je v co největším množství třídít a zaměřit se na použití jejich recyklátu. [44]

Odpad z plastových PET láhví patří k odpadům, které se nejlépe recyklují. Vyrobený recyklát (drcené PET láhve) patří k žádaným komoditám na trhu. Málokdo ví, že se z recyklované drti dá vyrobit spousta zajímavých věcí (koberce, oblečení a další). Recyklát z PET láhví má i uplatnění v automobilovém průmyslu (textilie, plastové součástky aut). [44]

Recyklace se provádí dvěma způsoby, a to jsou fyzikální a chemická reakce. Pro výrobu vláken se využívá fyzikální mokrá recyklace. Základem je, že se zalisované balíky PET láhví zbaví nečistot pomocí speciálního rotačního třídícího systému a společně s vodou dochází k jejich drcení. Pomocí frikční pračky

se oddělí etikety a papírky z láhví. Při flotaci se oddělují poslední nečistoty. Čistý recyklát ve formě plastových vloček je oddělen pomocí odstředivky a má zbytkovou vlhkost 1,5 %. Takto vyrobený recyklát se balí do přepravních pytlů a je připraven k expedici na konkrétní využití. [44]

3.4.2 CELULÓZOVÁ VLÁKNA

Při recyklaci starých papírů jde o jediný cíl, a to o vznik celulózových vláken, která nám ušetří spotřebu primárních surovin (dřeva) pro výrobu papíru. Recyklace papíru je velice náročná průmyslová operace, při které vzniká značné množství vedlejších produktů (odpady, odpadní vody a velká spotřeba energie). Při recyklaci se používá velké množství vody.

Na začátku se papír vytřídí a sveze k recyklační lince. Recyklační linka začíná dlouhým širokým pásem, kde dochází k dotřídění od nečistot, popřípadě papírů, co se recyklovat nedají nebo jsou pro recyklaci nevhodné (kopíráky, křídový papír, voskovaný a další). Tyto papíry se musí použít jako palivo nebo se odstraní jiným způsobem.

Z pásu se papír dostává do rozvláknovacího zařízení, kde se papír máčí asi 20 minut ve vlažné vodě. Pomocí máčení vznikne papírová kaše, ze které se magneticky odstraní kovové součásti. Následně se kaše musí dekontaminovat, zbaví se inkoustu a barev. To se provádí tak, že se do kaše pumpuje vzduch, který vytváří na povrchu bubliny, kde se inkoust a barvy zachytí. Vzniklá pěna se odstraní a tento vzniklý odpad se musí odstranit ve spalovně.

Recyklační proces je u konce. Kaše se rozvrství mezi sadu válců, které ždímají vodu a následná vzniklá surovina se suší. Tímto jsme získali poměrně čisté celulózové vlákno, které lze použít pro výrobu dalšího papíru, popřípadě v jiných aplikacích. Vlákna, která nelze recyklovat na nový papír slouží k výrobě izolačních výplní. Poté co bylo omezeno použití azbestových vláken se celulózová vlákna používají do brzdových obložení. [46]

3.4.3 VLÁKNA Z KAMENNÉ VLNY

Výroba čedičové (kamenné) vlny je založena na přírodních surovinách jako čedič, bazalt nebo gabro. Díky svému přírodnímu původu je vlna recyklovatelná a podílí se tak na snižování dopadu průmyslové výroby na životní prostředí. [45]

Na výrobu kamenné vlny se nejdříve musí odměřit správné množství surovin, které putují do kupolové pece. Nejčastějším palivem je koks, který nám vyvodí teplotu až 1500 °C, kdy dochází k přechodu minerálního kameniva na lávu. Tekutá hmota vytéká ústím pece na rotující disky (dosahující rychlosti až 1000 otáček za minutu). Díky vysoké rychlosti disky rozstříkují tekoucí lávu a vytváří z nich vlákna, která se poté chladí vzduchem. [45]

Takto vyrobená vlákna se dají využít, ale nejčastěji v technologickém procesu pokračují pro výrobu tepelně izolačních desek. Při rozvláknování tekuté lávy dochází ke vstřikování pojiva (pryskyřice) a hydrofobní látky mezi vlákna. Poté se vzorky stlačí a upraví na požadovaný tvar. Dále vzorky putují do vytvrzovací komory, kde je teplota okolo 200 °C. Posledním krokem je ochlazení materiálu a řezání desek do požadovaných velikostí. [45]

3.5 PÓROVITOST LEHKÉHO BETONU

Lehký beton (LWC) obsahuje póry (prázdné prostory uvnitř materiálu), které mohou odpovídat i několika desítkám procentům z celkového objemu. Porozita je důsledkem použití porézního kameniva, ve kterých může být množství pórů až 65 %. V lehkém betonu se vyskytují dva typy pórů otevřené a uzavřené. Otevřené póry jsou vzájemně spojeny s povrchem materiálu, tudíž jsou propustné pro kapaliny a plyny. Uzavřené póry jsou izolované od okolí a nejsou s ním propojeny. LWC obsahující pouze uzavřené póry jsou nepropustné pro kapaliny a plyny, proto se běžně používají jako tepelná a akustická izolace.

Póry v materiálu mají značný dopad na jeho mechanické vlastnosti, které se snižují se zvyšující se pórovitostí. Zkoumání hustoty a pórovitosti je proto

rozhodujícím parametrem v řízení výrobních procesů a kvalitě finálních výrobků. Množství a velikost prostoru mezi zrny závisí na obsahu pórů agregátního skeletu a množství malty obklopující agregované zrno a vyplnění pórů. Nejvyšší pórovitost se dosáhne, když se použije jedna nebo maximálně dvě frakce hrubého kameniva, a zároveň snížíme množství cementové malty na minimum. Pórovitost lehkého kameniva je vázána strukturou a tvarem zrna.

Pórovitost nám zaručuje lepší tepelně a akustické vlastnosti. Ve výsledku nám díky nižší objemové hmotnosti dokáží snížit celkovou hmotnost konstrukce až o 35 %. Dále díky lehkým betonům mohu být zmenšeny průřezy konstrukcí, tím pádem omezení vyztužení, takže i snížení celkových nákladů. Výroba a vytvrzování lehkých betonů lze zkoumat podobně jako u tradičních betonů. [37]

3.6 ASR – ALKALICKO KŘEMIČITÁ REAKCE, TRVANLIVOST

Vzhledem k vysokému obsahu amorfního křemíku v kamenivu na bázi pěnového skla je nutné důkladné zkoumání možných škodlivých reakcí (ASR) a zhodnocení jaký mají vliv na vlastnosti betonu. Problém ASR je zkoumán po mnoho let. Některé studie jsou navzájem v rozporu. V dnešní době chybí jasné stanovisko ohledně bezpečnosti použití pěnového skla do cementových kompozitů. Díky těmto výsledkům je potřeba studovat ASR v lehkých betonech s kamenivem na bázi pěnového skla.

Vědci v Rusku popisovali pěnové sklo jako silikátový materiál vyrobený termoplastickými metodami. Po provedení XRF a XRD analýzy zjistili, že obsah amorfního oxidu křemičitého v pěnovém skle je asi 70 %. Díky těmto výsledkům musel být zkoumán vliv v alkalické cementové matici.

Mechanismus interakce reaktivních porézních agregátů s cementovým kompozitem byl popsán ve výzkumu. Mechanismus ASR v LWC se liší oproti normálnímu betonu. V běžném betonu se ASR vyskytuje v zóně interakce zrna kameniva a cementu. Soli kyseliny křemičité, pokrývající povrch agregátu spolu s povlakem obsahující vysoký obsah vápníku, který absorbuje vodu, expanduje

a následně vytváří vnitřní pnutí v betonu. Na rozdíl u betonu s pěnovým sklem je ASR způsobená mikrostrukturní přeměnou křemičitého agregátu v povrchové vrstvě na hydrát křemičitanu vápenatého. Soli kyseliny křemičité se mohou hromadit uvnitř pórů agregátu bez tvorby reakčních produktů v interakční zóně agregátu a cementového kamene. Proto ASR v cementovém kompozitu z kameniva na bázi pěnového skla nevede k výskytu vnitřního osmotického tlaku. Přispívá pouze v jeho částečném zničení uvnitř porézních agregátních částic.

Dalším bodem výzkumu bylo zkoumání preventivních opatření vzniku ASR. Prvním opatřením bylo použití nízkoalkalického cementu s přídavkem popílku a mikrosiliky. Dle výsledků bylo zjištěno, že nejefektivnější bylo použití mikrosiliky. Podle mikrostrukturní studie zlepšila modifikace betonu mikrosilikou mikroskopickou rovnoměrnost kontaktní zóny mezi agregátem a cementovým kamenem, snížil se počet smršťovacích trhlin pórovitých stěn, snížil se objem hydrogelu z oxidu křemičitého vytvořeného v granulovaných pórech. Betony modifikované mikrosilikou vykazují vyšší pevnost v tlaku, nízkou tepelnou vodivost a dobrou trvanlivost vůči ASR. [38]

V současnosti se zkoumá modifikace materiálů uhlíkovými nanotrubicemi (CNT) jako slibná metoda. I přes skutečnost, že se vliv CNT na strukturu, vlastnosti a korozní procesy špatně studuje, výsledky výzkumu ukazují dobré vyhlídky při použití jako modifikační přísady. Je to díky používání CNT v nízkých koncentracích (tisíciny množství pojiva) a vysoké účinnosti. Pevnost betonu v tlaku se po přidání daného množství CNT dokáže zvýšit až o 30 %. V určitém rozsahu je účinek CNT podobný pucolánovým příměsím. Studie ukázaly, že zavedení CNT do betonu přispívá k růstu mikrokrytalů CSH gelů. To vede ke snížení pórovitosti struktury a tím pádem navýšení pevnosti betonu.

Při testu mrazuvzdornosti u betonu po 75 cyklech nebyly detekovány žádné povrchové vady a po 130 cyklických změnách nebylo poškození povrchu větší než 5 g/dm^2 . Je třeba poznamenat, že přidání pěnového skla nezmenšilo mrazuvzdornost pěnového betonu oproti obyčejnému. [39]

Reaktivnost kameniva s alkáliemi se stanovuje dle ČSN 72 1179 těmito metodami:

- chemická zkouška kameniva,
- dilatometrické zkoušky.

Chemická zkouška (petrografický rozbor) samotného kameniva, u které se zjišťuje množství kysličníku křemičitého, který přešel z kameniva do roztoku alkalického roztoku hydroxidu za podmínek zkoušky. Dále se sleduje úbytek zásaditosti tohoto hydroxidu při reakci.

Dilatometrické zkoušky se provádí na principu rozpínání malty z daného kameniva cementu na trámečcích uložených v předepsaném prostředí. Provádí se dvě zkoušky, a to modifikovaná dilatometrická zkouška podle ASTM C-1260-14 a modifikovaná dilatometrická zkouška podle ČSN 72 1179. [40]

3.7 POUŽITÍ LEHKÉHO MEZEROVITÉHO BETONU

Lehké mezerovité betony jsou charakteristické svými vlastnostmi. Nízká pevnost, velmi nízká objemová hmotnost, dobré tepelně a zvukově izolační vlastnosti. Použití je nejčastější pro konstrukce s vyššími akustickými nároky.

Použití lehkého mezerovitého betonu je vhodné pro **podlahy, stropy** a **střechy** v novostavbách i rekonstrukcích. Největší výhodou je především u rekonstrukcí odlehčení stropu pod podlahou a tím celé konstrukce. Další výhodou jsou výborné tepelně a zvukově izolační vlastnosti. Díky těmto vlastnostem může sloužit betonová mazanina zároveň jako tepelně izolační vrstva.

U **podlah** se nejčastěji využívá k eliminaci výškových rozdílů. V případě umístění tažených rozvodů v podlaze (elektroinstalace, topení a další) lze použít beton pro zalití těchto rozvodů. Díky jednodlotnosti monolitu nám odpadá náročné vyřezávání polystyrenových desek, nebo desek minerální vlny, kdy mohou vznikat tepelné mosty. [23]



Obrázek 11: Izolační vyrovnávací vrstva pro vedení instalací

Při rekonstrukcích **půdních** vestaveb, kde u nejčastěji trémových stopů vznikají značné výškové rozdíly musíme tyto rozdíly vyrovnat. Díky kladným vlastnostem nám lehký mezerovitý beton splní více požadavků najednou. Nezatíží nám stropní konstrukci jako obyčejný hutný beton, vyrovná nerovnosti, zateplí a odhluční půdu zespodu. Stejně efektivně lze vyřešit **vyrovnání klenebních pásů** do roviny. U tradičních hurdiskových stropů se namísto zasypu může použít právě lehký mezerovitý beton. Lze použít i na stropy z ocelových trapézových plechů pro vytvoření lehké podlahové konstrukce. [23]



*Obrázek 12: Použití pro vytvoření lehké roznášecí, vyrovnávací vrstvy podlah (rekonstrukce)
[23]*

U **plochých střech** vytvoříme spádovou tepelně izolační vrstvu pomocí lehkého mezerovitého betonu nejnižších objemových hmotností. Pro navýšení tepelného odporu lze na tuto konstrukci pokládat desky z klasických tepelně izolačních materiálů. Použitelnou alternativou se jeví zelené střechy, u kterých přitížíme hydroizolaci, a tak bráníme pronikání UV záření a zvyšujeme tím životnost hydroizolace. [23]

Systém protihlukových betonových stěn zajišťuje vysoce účinnou ochranu před nežádoucími účinky hluku ze stále rostoucího dopravního zatížení. Nejčastější použití různých systémů protihlukových stěn je na odhlučnění frekventovaných dopravních úseků (železnic, dálnic, silnic I. třídy), hlučných provozů průmyslových či zemědělských závodů. Na rozdíl od ostatních protihlukových systémů, má ten betonový životnost minimálně 50 let. Stěny lze vytvářet s různým řešením povrchu, absorpční vrstvy či tvaru a díky tomu lze vytvořit zajímavý, účinný architektonický prvek.

Základní výhody betonových protihlukových stěn jsou vysoká akustická účinnost, snadná montáž, minimální požadavky na údržbu, dlouhá životnost nepodléhající degradaci vysokými teplotami ani působením UV, nepodléhání vlhkosti (vznik plísní) a široká variabilita architektonických řešení. [41]



Obrázek 13: Absorpční vrstva z lehkého mezerovitého betonu v protihlukových stěnách, detail stěny [41]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 CÍL PRÁCE

Dle zadání, je cílem diplomové práce vývoj lehkých kompozitů na bázi pěnového skla s velmi dobrými tepelně izolačními vlastnostmi. Konkrétně se jedná o možnosti využití kameniva na bázi pěnového skla vyráběného z odpadní skleněné moučky pro výrobu lehkých betonů s velmi dobrým poměrem tepelně izolačních a mechanických vlastností. Cílem bylo navrhnout a vyrobit lehké betony (včetně mezerovitých betonů) s objemovou hmotností do 600 kg/m^3 a tepelnou vodivostí nižší než $0,1 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Na těchto betonech se stanovily základní fyzikálně mechanické vlastnosti a vyhodnotila se jejich uplatnitelnost na stavebním trhu.

5 METODIKA PRÁCE

Diplomová práce se zabývá vývojem lehkých tepelně izolačních mezerovitých betonů a navazuje na výsledky vyplývající z bakalářské práce [55]. Cílem bylo vytvořit lehký cementový kompozit, který má vynikající poměr mechanických a tepelně izolačních vlastností. Praktická část byla rozdělena do těchto částí:

- výběr vstupních surovin,
- návrh zkušebních receptur,
- výroba zkušebních těles,
- stanovení požadovaných vlastností,
- vyhodnocení a diskuze výsledků.

5.1 VÝBĚR VSTUPNÍCH SUROVIN

Na základě požadavků na vyvíjené materiály plynoucí ze zadání práce a na základě výsledků provedených experimentů v rámci bakalářské práce a teoretické rešerše bylo zvoleno pojivo pro daný typ kompozitu, čímž byl portlandský cement. Konkrétně se jednalo o cement CEM I 42,5 R z výroby Mokrý,

který slouží pro zajištění požadované pevnosti betonu a je stabilní ve vlhkém i mokrém prostředí.

Kamenivo REFAGLASS 4-16 mm

Kamenivo bylo použito od firmy REFAGLASS frakce 4-16 mm (tato firma jako jediná v ČR drtí a třídí kusové kamenivo z pěnového skla do frakcí), které zajišťuje požadovanou mezerovitost, vylehčení a tepelně izolační vlastnosti. Dále byla do betonu přidána vývojová vlákna od firmy CIUR (tato vlákna již byla použita v rámci předcházející bakalářské práce) a pro snížení vodního součinitele byla použit plastifikační přísada MURAPLAST FK 19.

Cement CEM 42,5 R Mokrý

Primární složkou tohoto cementu je portlandský slínek s maximálním obsahem doplňujících složek do 5 %. Cement je charakteristický rychlým náběhem pevností, vysokými počátečními pevnostmi, vysokými konečnými pevnostmi, rychlým vývinem hydratačního tepla a jeho větším celkovým množstvím. Cement se používá pro betony běžných i vyšších pevnostních tříd, pro předpínané betony, suché omítkové směsi a další. Více o cementu v jeho technickém listu, který je přílohou této práce. [42]

MURAPLAST FK 19

MURAPLAST FK 19 je superplastifikační přísada do betonu od firmy MC-Bauchemie. Tato přísada se vyznačuje snížením vodního součinitele v betonu díky silné plastifikaci, mírným zpomalení tuhnutí, dobrou homogenitou a dalšími vlastnostmi. Příklad je vhodná pro použití se všemi normovanými cementy. Do betonu se přidává s posledním množstvím záměsové vody nebo po celkovém množství vody. Použití je pro transportbetony, silniční betony, masivní konstrukce a další. Informace o skladování, bezpečnosti ekologických informacích jsou uvedeny v bezpečnostním listě. Více informací o přísadě najdeme v technickém listě, který je přílohou této práce. [43]

Vlákna z recyklovaných PET láhví (NAMFLEX)

Vlastnosti takto vyrobených vláken velice závisí na technologii recyklace a samotné výrobě těchto vláken. Tloušťka vláken se pohybuje v rozmezí 10 až 15 μm a délka od 6 do 6,5 mm. Při důkladnějším zkoumání pod mikroskopem se vlákna jevila jako bezbarvá s tmavými okraji. Co se týká rovinnosti byla vlákna ve větší míře rovná až lehce zvlněná. [52]



Obrázek 14: Vlákna z recyklovaných PET láhví

Vlákna z kamenné minerální vlny (Climastone-S)

Vlákna CLIMASTONE-S mají tloušťku okolo 6 μm a délku přibližně 0,5 mm. Pod mikroskopem byla vlákna žlutohnědá s tmavým obrysem. Jednalo se o rovné kusy jednotlivých vláken s hladkými neroztřepenými konci. [52]



Obrázek 15: Vlákna z čedičové (kamenné) vlny

Vlákna z recyklovaného novinového papíru (F 8000)

U těchto celulózových vláken se tloušťka pohybuje okolo 20 μm a délka mezi 1 a 1,5 mm. Průřez vláken byl proměnlivý s černým obrysem a uvnitř byla šedá tečkovaná textura. Vlákna byla rovná až mírně zakřivená. Pod mikroskopem se při zkoumání vždy vyskytovaly i prachové částice a byly viditelné zbytky útržků novinového papíru. [52]



Obrázek 16: Celulózová vlákna používaná pro foukané izolace

5.2 ZKUŠEBNÍ RECEPTURY

Zkušební receptury byly navrženy na základě požadavků uvedených v zadání práce. Při návrhu se vycházelo z bakalářské práce [55], která se touto problematikou zabývala. Snaha byla minimalizovat množství pojiva (cementu) a tím výrazně snížit cenu výsledného produktu při zachování požadovaných vlastností. V předchozí provedené bakalářské práci se jevílo použití celulózových vláken velice efektivně, tudíž ve větším množství receptur diplomové práce jsou použita právě tato vlákna. Vlákna z recyklovaného novinového papíru (celulózová) se jeví zajímavě i z ekonomického hlediska, kdy jejich pořizovací náklady jsou minimální. Pro částečné srovnání vlivu ostatních dvou výše uvedených vláken byly namíchány dvě další receptury.

Na zkušebních recepturách bylo odzkoušeno, jaký vliv má množství cementu, vláken a druh vláken na výsledné vlastnosti lehkého mezerovitého betonu. Maximální množství cementu bylo stanoveno 130 kg/m^3 , jelikož při větším množství cementu ve směsi docházelo k jeho sedimentaci na dno formy a tím pádem k nehomogenitě výsledného výrobku. Minimální dávka cementu byla 60 kg/m^3 , a to z důvodu, že při dalším snížení jeho množství docházelo při manipulaci s výrobky k jejich destrukci. U vybraných receptur jsme jako vyztužení zvolili výše popsaná vlákna, která jsme dávkovali 5 % z hmotnosti cementu u méně vyztužených receptur a 7,5 % u více vyztužených receptur. Pro srovnání vlivu vláken byly namíchány obdobné receptury (se stejným množstvím cementu) nevyztužené vlákny. Celkově jsme v experimentální části diplomové práce namíchali 12 receptur, na kterých byly porovnány mechanické, tepelně a zvukově izolační vlastnosti.

Tabulka 6: Receptury na 1 m³ lehkého mezerovitého betonu

Vstupní složka		Vlákna												
		Bez vláken				Namflex	Climastone – S	F 8000						
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
		1 m ³												
Cement CEM I 42,5 R Mokrý	[kg]	130	100	80	60	100	100	100	100	100	80	80	60	60
Kamenivo	4–16 mm REFAGLASS	[l]	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Voda		[l]	53	51	50	40	65	58	76	100	88	100	80	92
Plastifikační přísada MURAPLAST FK 19		0,8 % z m _c [g]	1000	800	640	480	800	800	800	800	640	640	480	480
Množství vláken		5 % z m _c [kg]	-	-	-	-	5	5	5	-	4	-	3	-
		7,5 % z m _c [kg]	-	-	-	-	-	-	-	7,5	-	6	-	4,5
Vodní součinitel		[-]	0,41	0,51	0,63	0,67	0,65	0,58	0,76	1	1,1	1,25	1,3	1,5

Tabulka 7: Receptury na příslušné namíchané objemy

Vstupní složka		Vlákna												
		Bez vláken				Namflex	Climastone – S	F 8000						
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
		39 l	35 l	30 l	25 l	33 l	33 l	33 l	25 l					
Cement CEM I 42,5 R Mokrý	[kg]	5,07	3,5	2,4	1,5	3,3	3,3	2,5	2	2	1,5	1,5	1,5	
Kamenivo	4–16 mm REFAGLASS	35	39	25	25	33	33	25	25	25	25	25	25	
Voda		[l]	2,07	1,8	1,5	1	2,25	2,5	2,5	2,2	2,5	2	2,3	2
Plastifikační přísada MURAPLAST FK 19		0,8 % z m _c [g]	41	28	19	12	27	27	20	16	16	12	12	12
Množství vláken		5 % z m _c [g]	-	-	-	-	165	165	-	100	-	75	-	75
		7,5 % z m _c [g]	-	-	-	-	-	-	187,5	-	150	-	112,5	-
Vodní součinitel		[-]	0,41	0,51	0,63	0,67	0,58	0,76	1	1,1	1,25	1,3	1,5	1,3

5.3 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES

Cílem práce bylo navrhnout optimální směs, která bude vyhovovat tepelně izolačním a mechanickým požadavkům. Jednou z klíčových surovin pro návrh receptur je určitě pojivo. Pro pojení štěrku z pěnového skla mohou být použita pojiva na anorganické bázi (cement, vápno) nebo organické bázi (pryskyřice, živice). Vzhledem k cílenému použití ve stavebnictví se nám pro jeho jedinečné vlastnosti jeví nejlépe cement. Díky jeho vysoké ceně se snažíme jeho množství ve směsi eliminovat na minimum, ale muselo jej být dostatek, pro dokonalé obalení a spojení jednotlivých zrn, aby byly zachovány i potřebné mechanické vlastnosti. Větší množství cementu není vhodné použít, protože už by se nejednalo o mezerovitý beton (všechny mezery by byly vyplněny cementovou maltou).

Pro výrobu směsi bylo použito laboratorní míchací zařízení s nuceným oběhem, které nám směs dokonale promíchalo. Nejprve jsme si objemově nachystali kamenivo z pěnového skla, hmotnostně cement, vodu, vlákna a superplastifikační přísadu. Kamenivo s cementem jsme zamíchali na sucho, poté přidali množství vody. Do dobře zhomogenizované směsi jsme přidávali za stálého míchání vlákna a s posledním množstvím vody i přísadu. Množství vody se lišilo kvůli odlišné počáteční vlhkosti kameniva, množství a druhu použitých vláken.

Při snižování množství cementu však docházelo postupně k dramatickému poklesu mechanických vlastností, přičemž bylo při výrobě zkušebních těles zjištěno, že tento problém lze z velké části eliminovat vhodnou technologií vytváření těles, především optimální kombinací vibrace a přidavným lisováním.

Pro stanovení dokonalé mezerovitosti směsi byla snaha eliminovat množství cementu na minimum. Minimální dávka byla stanovena na 60 kg/m^3 , protože u nižší dávky docházelo k rozpadu vzorků. U receptur bez vláken probíhalo míchání podobně jako u tradičních betonů. Naopak u směsí s vlákny se vlákna musela nejdříve rozmísit ve vodě, kde došlo k primárnímu rozdělení vláken. Následně po přidání vláken do směsi došlo k jejich rozmísení pomocí mechanických sil nárazů kameniva do vláken.

Po namíchání byla stanovena zkouška konzistence (sednutím kužele). Jelikož se jednalo o zavlhlé směsi, sednutí bylo u všech receptur 0 mm. Nabízí se použití zkoušky VeBe pro stanovení konzistence, ale u navržených receptur se nachází minimální množství cementového tmele, a proto byla zachována zkouška sednutí kužele.

Při ukládání čerstvé betonové směsi procházela technologie postupným vývojem. Nejdříve byla čerstvá směs kladena ve třech vrstvách, které byly hutněny dusadlem s vibrací. Jako nejefektivnější byla zvolena ruční metoda vibrolisování, kdy se forma plnila ve třech až čtyřech vrstvách a pokaždé se zatížila razníkem se závažím o hmotnosti 5 kg. Závaží bylo určeno experimentálně, postupně se zvyšovalo zatížení po 1 kg, kdy u každého navýšení docházelo k efektivnějšímu zhutnění. Jako největší možné zatížení bylo zvoleno závaží o hmotnosti 5 kg, protože po překročení této meze docházelo k drcení zrn a tím snížení mezerovitosti výsledného betonu. Rovinnost povrchů, hlavně u deskových vzorků bylo zajištěno přitlakem a zahlazením ocelovými deskami. Po celou dobu ukládání se kladl důraz na řádné vyplnění rohů forem a rovnoměrnosti směsi v celé ploše. Při nedodržení těchto faktorů by výsledky mechanických, tepelně a zvukově izolačních vlastností nebyly relevantní. Po uložení do forem byly všechny vzorky zváženy pro stanovení objemové hmotnosti v čerstvém stavu.

Z výsledků bakalářské práce se jevílo použití vláken jako výborná záležitost pro zlepšení tížených vlastností. Byl proveden výzkum, zda má vliv i množství jednotlivých vláken na výsledné vlastnosti. Vlákna byla použita od firmy CIUR. Byly to tři druhy vláken, které stále prochází vývojem. Vlákna z recyklovaných PET láhví, čedičová vlákna a vlákna z recyklovaného novinového papíru. Vkládání vláken do míchacího zařízení při výrobě je popsáno výše. Oproti recepturám bez vláken se musely tyto směsi déle míchat pro řádné rozdělení vláken a rovnoměrné rozmístění.

Díky použití minimálního množství cementu musely vzorky déle zrát ve formě a nejdříve byly odformovávány po uplynutí 5 dnů, kdy už vzorky měly manipulační pevnost. Kvůli výrobě vzorků s velkým množstvím pórů a mezer nemohly být

používány tradiční plastové formy k jejichž odformování slouží stlačený vzduch. Pro výrobu lehkého mezerovitého betonu musí být používány ocelové rozebíratelné formy, což nám zajistí i větší rovinnost a přesnost výrobků. Po uplynutí doby 28 dnů se na zkušebních tělesech provedly zkoušky stanovení objemové hmotnosti ve ztvrdlém stavu, pevnosti v tlaku, stanovení součinitele tepelné vodivosti a zvukové pohltivosti materiálu.

5.3.1 ZKUŠEBNÍ TĚLESA

Nejdůležitějším bodem celé práce je příprava zkušebních těles. Důkladná kontrola forem, zda všechny díly sedí a je zajištěna rovinnost stěn, vymazání forem pro snadnější odformování je základ práce s betonem.

Po přípravě zařízení pro uložení nebo přípravu směsi (navlhčení všech nástrojů) se od každé receptury vyrobilo stejné množství zkušebních těles. U každé receptury byly vyrobeny 3 krychle 150 x 150 x 150 mm pro stanovení mechanických vlastností a 2 desky 200 x 200 x 35 mm (u prvních receptur 2 desky 300 x 300 x 60 mm) pro stanovení součinitele tepelné vodivosti a zvukové pohltivosti. Zmenšení rozměru desek bylo z důvodu větší přesnosti desek, menší spotřeby materiálu a snadnější manipulaci a skladnosti. Desky byly podrobeny zkouškám po vysušení v sušárně do konstantní hmotnosti.

Kostky i desky byly díky malému množství cementu odformovány až po 5 dnech od namíchání, dále byly uloženy ve vlhkém prostředí do stáří 28 dnů a poté podrobeny zkouškám na ztvrdlém betonu.

U každé receptury byla vyrobena tato zkušební tělesa:

- krychle 150 x 150 x 150 mm, 3 ks
- deska 200 x 200 x 35 mm, 2 ks



Obrázek 17: Zkušební tělesa po namíchání

5.4 STANOVENÍ POŽADOVANÝCH VLASTNOSTÍ

Na připravených zkušebních tělesech proběhlo stanovení vlastností v čerstvém a ztvrdlém stavu. V čerstvém stavu se provedla zkouška konzistence sednutím kužele a stanovila se objemová hmotnost těles.

U ztvrdlého betonu se zkoušela objemová hmotnost a pevnost v tlaku. Dále se na ztvrdlých tělesech provedlo stanovení součinitele tepelné vodivosti a činitele zvukové pohltivosti.

5.4.1 STANOVENÍ KONZISTENCE SEDNUTÍM KUŽELE

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

Pomůcky: Abramsův kužel ($h = 300$ mm, $d_s = 200$ mm, $d_h = 100$ mm), propichovací tyč ($d = 16$ mm, $L = 600$ 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 přišlipli k podkladu, připevnili násypku a plnili jsme ve 3 vrstvách. Každá vrstva byla zhutněna 25 vpichy tyčí. Druhá 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. [47]

5.4.2 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: Zvážíli 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. Přebytečný beton jsme odstranili ocelovým pravítkem. Nádobu s betonem jsme zvážili a vypočítali jeho objemovou hmotnost. [48]

Objemová hmotnost se vypočítá dle vzorce:

$$D_{\check{c}B} = \frac{m_2 - m_1}{V} \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

kde:

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

m_1 – hmotnost prázdné nádoby [kg]

m_2 – hmotnost naplněné nádoby [kg]

V – objem nádoby [m³]

5.4.3 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. [49]

Objemová hmotnost se vypočítá dle vzorce:

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

kde:

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

m – hmotnost zkušební tělesa [kg]

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

5.4.4 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 ± 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 MPa. [50]

Pevnost v tlaku se vypočítá dle vzorce:

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

kde:

f_c – pevnost v tlaku [MPa]

F – maximální síla při porušení vzorku [N]

A – tlačná plocha [mm²]



Obrázek 18: Stanovení pevnosti v tlaku a porušení zrn po provedení zkoušky

5.4.5 STANOVENÍ SOUČINITELE TEPELNÉ VODIVOSTI

Stanovení součinitele tepelné vodivosti se provádí dle ČSN EN 12667: Stanovení tepelného odporu metodami chráněné topné desky a měřidla tepelného toku dle ISO 8301.

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 tepelného toku, teplotního spádu a tloušťky zkušební vzorku. [51]

Postup zkoušení: Pro stanovení součinitele tepelné vodivosti u vzorků 300 x 300 x 60 mm byl použit přístroj Lambda 2300, Holometrix Micromet a u vzorků 200 x 200 x 35 mm byl použit přístroj Lasercomp FOX 200 Vacuum. Před zkoušením byly vzorky změřeny a vysušeny při 65 °C a poté při teplotě 105 °C. [47]

Hustota tepelného toku q_d :

$$q_d = U \cdot k_m \text{ [W/m}^2\text{]}$$

kde:

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

k_m – kalibrační konstanta [W/(V.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]

5.4.6 AKUSTIKA – ČINITEL ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI

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

Princip zkoušky: Zkoušený vzorek se vloží a upevní do těsného uzavíratelného konce impedanční trubice. Sinusová zvuková vlna buzená na druhém konci trubice reproduktorem dopadá na vzorek. Superpozicí dopadající a odrážející vlny od zkušební vzorku vzniká stojatá vlna. Vyhodnocení se provádí na základě změřených hodnot akustického tlaku v tlakových minimech a maximech. Tyto hodnoty stačí pro stanovení součinitele zvukové pohltivosti.

Použité pomůcky: Impedanční (Kuntova) trubice, držák zkušební sondy, mikrofonní sondy, zařízení pro zpracování mikrofonního signálu, reproduktor, generátor signálu.

Postup zkoušení: Měření se provádí při teplotě 20 °C a tlaku 101,3 kPa. Vzorek se vloží do držáku tak, aby se dotýkal dna nástavce a nevznikala mezi vzorkem a dnem vzduchová dutina. Po zapnutí přístroje se nastaví frekvence, pro kterou chceme měřit a stanovujeme minimální a maximální hodnotu akustického tlaku, která se ukazuje na přístroji. Změnu akustického tlaku zajišťujeme pohybem sondy

po jezdící dráze. Měření bylo provedeno v třetinooktávových pásmech na frekvenčním rozsahu 250 až 6300 Hz. Vyhodnocení akustických vlastností bylo provedeno dle ČSN EN 14388 – Zařízení pro snížení hluku silničního provozu, (norma týkající se protihlukových stěn). [53]

Činitel zvukové pohltivosti byl následně stanoven z naměřených rozdílů akustických tlaků:

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

Kde:

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

6 VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ

Výsledky a jejich vyhodnocení byly v práci rozděleny do dvou skupin. Nejdříve se vyhodnotí receptury, které se mezi sebou liší množstvím cementu či množstvím vláken a následně se porovnají všechny receptury navzájem. Pro přehlednější posouzení výsledků bylo vyhodnocení rozděleno na:

- receptury bez vláken,
- receptury s vlákny Namflex a Climastone – S,
- receptury s vlákny F8000,
- porovnání receptur navzájem.

6.1 RECEPTURY BEZ VLÁKEN

Tabulka 8: Stanovené rozměry a hmotnosti vzorků bez vláken

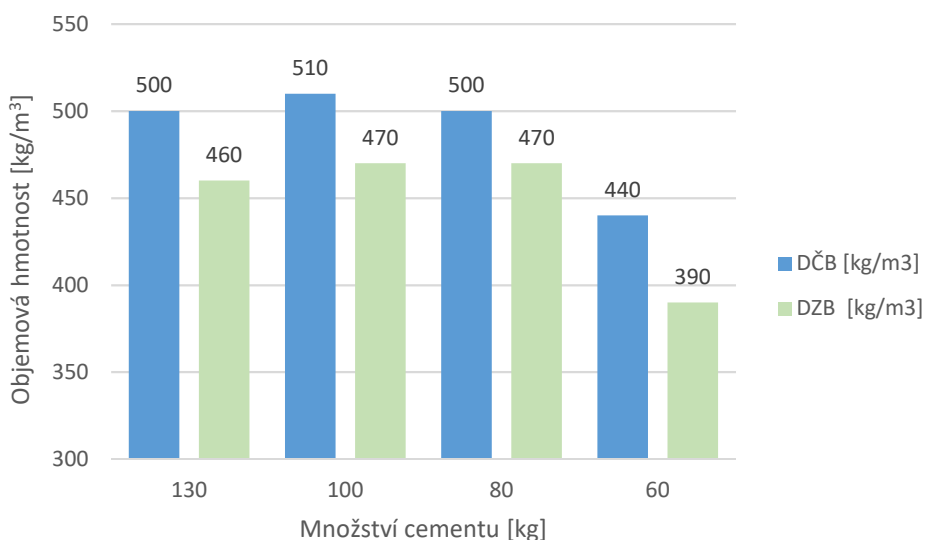
Receptura	Hmotnost ČB [kg]	Rozměry tělesa [mm]			Hmotnost ZB [kg]
		b	h	l	
1	1,76	151,14	152,50	150,73	1,60
	1,67	151,92	151,26	150,04	1,55
	1,62	151,31	151,70	150,84	1,70
	2,71	299,30	61,41	301,50	2,54
	2,65	300,26	61,23	301,15	2,47
2	1,68	150,42	151,09	149,82	1,69
	1,71	150,27	149,97	151,58	1,74
	1,74	151,34	151,49	150,42	1,73
	1,65	251,00	50,93	248,00	1,54
	1,53	252,00	52,90	249,00	1,49
3	1,67	151,01	150,26	149,84	1,61
	1,71	150,20	150,20	150,50	1,65
	1,76	151,15	150,62	150,63	1,70
	0,69	199,00	35,99	198,00	0,64
	0,72	199,00	36,43	198,00	0,65
4	1,48	150,28	150,65	150,56	1,44
	1,48	150,75	152,88	150,67	1,43
	1,47	150,53	153,41	150,73	1,39
	0,61	199,00	35,82	199,00	0,56
	0,63	199,00	36,06	198,00	0,56

Nejprve byly stanoveny objemové hmotnosti v čerstvém stavu dle ČSN EN 12350-6 a následně objemová hmotnost ve ztvrdlém stavu dle ČSN EN 12390-7.

Tabulka 9: Vypočítané objemové hmotnosti čerstvého a ztvrdlého betonu bez vláken

Receptura	1	2	3	4
Množství cementu [kg/m ³]	130	100	80	60
Objemová hmotnost v čerstvém stavu D _{čB} [kg/m ³]	500	510	500	440
Objemová hmotnost ve ztvrdlém stavu D _{ZB} [kg/m ³]	460	470	470	390

Graf 1: Závislost objemových hmotností na množství cementu u receptur bez vláken



Objemová hmotnost v čerstvém stavu byla závislá na množství cementu použitého pro výrobu zkušebních těles. U první receptury není dosažena požadovaná objemová hmotnost z důvodu, že tělesa byla vyrobena jinou technologií než ostatní. Technologie se vyvíjela od dusání směsi s vibrací až po vibrolisování, což bylo vyhodnoceno jako ideální technologie. Hodnoty se pohybují od 440 kg/m³ do 510 kg/m³.

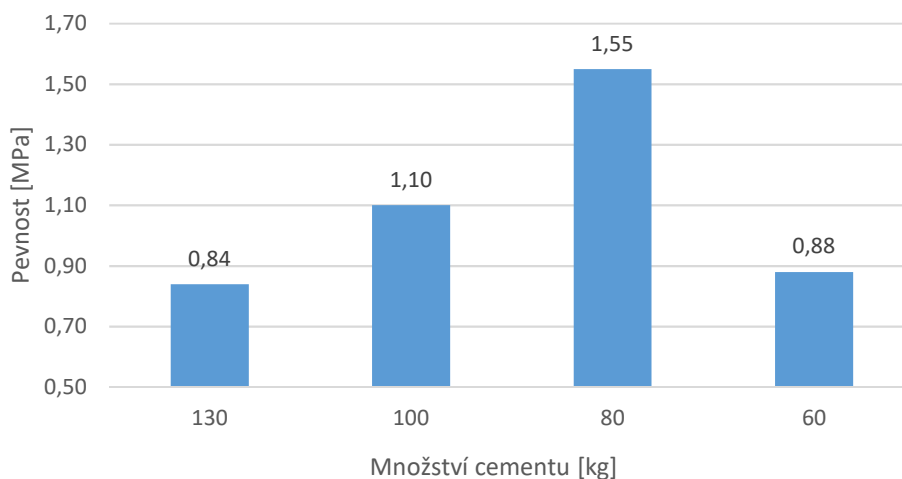
Objemová hmotnost ve ztvrdlém stavu odpovídala té v čerstvém, kdy k poklesu došlo z důvodu odchodu záměsové vody ze struktury materiálu. Hodnoty jsou v rozmezí od 390 kg/m³ do 470 kg/m³.

Další provedenou zkouškou bylo stanovení pevnosti v tlaku dle ČSN EN 12390-3.

Tabulka 10: Vypočítané pevnosti v tlaku betonu bez vláken

Receptura	1	2	3	4
Množství cementu [kg/m ³]	130	100	80	60
Pevnost f_c [MPa]	0,84	1,10	1,55	0,88

Graf 2: Závislost pevnosti v tlaku na množství cementu u receptur bez vláken



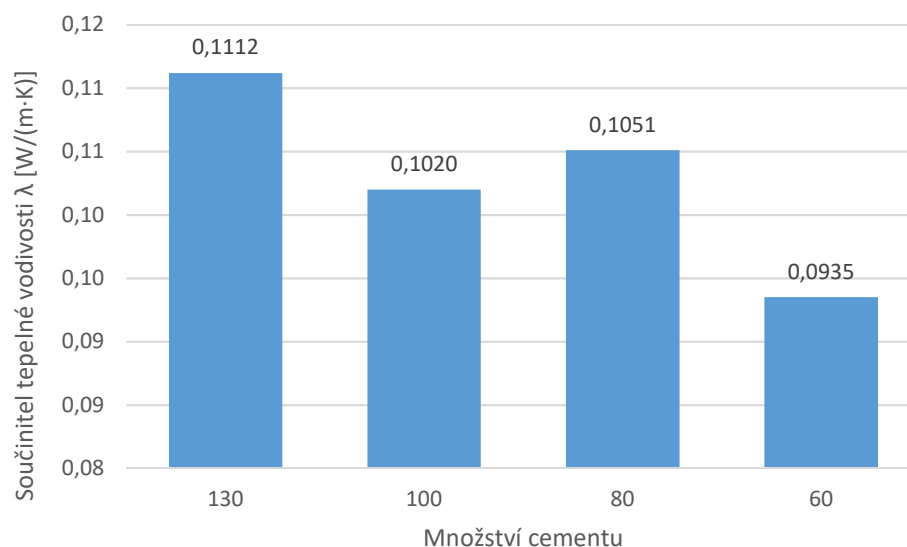
Hodnoty pevností v tlaku se očekávaly v podobné tendenci jako objemové hmotnosti. U první receptury došlo k výraznému snížení pevnosti oproti ostatním, důvodem je použití neefektivní technologie při výrobě těles. Receptura 2 měla pevnost 1,1 MPa, což nenaplnuje očekávání a příčinou tohoto snížení pevnosti je nejspíš nedokonalost či nepřesnost při výrobě. Hodnoty s 80 a 60 kg cementu se jeví dobře, jelikož je patrná závislost množství cementu na výsledné pevnosti. Tato závislost se očekává i u prvních dvou receptur. Celkově by se mělo jednat téměř o lineární závislost s klesající tendencí, ale to je pouze teoretické vyhodnocení.

Pro zjištění tepelně izolačních vlastností se stanovil součinitel tepelné vodivosti dle ČSN EN 12667.

Tabulka 11: Naměřené hodnoty součinitele tepelné vodivosti v recepturách bez vláken

Receptura	$D_{\text{VYSUŠENÉ}} [\text{kg/m}^3]$	$\lambda [\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$			$\bar{\lambda} [\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$
1	410	0,1147	0,1124	0,1116	0,1112
		0,1109	0,1093	0,1083	
2	420	0,1102	0,1094	0,1089	0,1020
		0,0936	0,0946	0,0953	
3	430	0,1041	0,1041	0,1039	0,1051
		0,1063	0,1061	0,1061	
4	390	0,0930	0,0929	0,0928	0,0935
		0,0942	0,0942	0,0941	

Graf 3: Vyhodnocení součinitele tepelné vodivosti receptur bez vláken



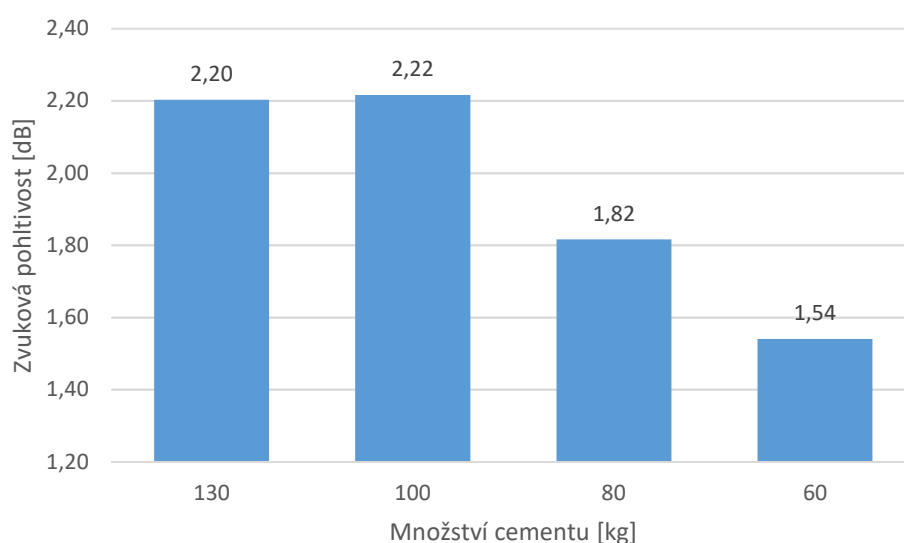
Součinitel tepelné vodivosti se pohyboval v rozmezí 0,1112 až 0,0935 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Z grafu je patrná lineární závislost mezi množstvím cementu a tepelnou vodivostí. Se snižováním množství cementu až na 60 kg jsme se dostali pod tíženou hranici 0,1 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Při dalším snižování cementu (pokud by to bylo dle mechanických vlastností možné) by se tepelná vodivost nadále snižovala v lineární tendenci.

Vyhodnocení akustických vlastností se provedlo pomocí stanovení zvukové pohltivosti dle ČSN ISO 10534-1.

Tabulka 12: Vypočítané hodnoty zvukové pohltivosti betonu bez vláken

Receptura	1	2	3	4
Množství cementu [kg/m ³]	130	100	80	60
Zvuková pohltivost [dB]	2,20	2,22	1,82	1,54

Graf 4: Závislost zvukové pohltivosti na množství cementu u receptur bez vláken



Při stanovení zvukové pohltivosti u receptur nevyztužených vláknou je patrná závislost mezi množstvím cementu (objemovou hmotností) a zvukovou pohltivostí. Se zvyšujícím se množstvím cementu či vyšší objemovou hmotností dochází k navýšení zvukové pohltivosti materiálů. Nejvyšší zvuková pohltivost je u druhé receptury, která byla 2,22 dB, a naopak nejnižší u čtvrté 1,54 dB. U první receptury se předpokládá vyšší zvuková pohltivost, než je naměřena, ale již z výše popsaných důvodů je srovnatelná s druhou recepturou, což inklinuje v závislost mezi objemovou hmotností a zvukovou pohltivostí.

6.2 RECEPTURY S VLÁKNY NAMFLEX A CLIMASTONE – S

Tabulka 13: Stanovené rozměry a hmotnosti vzorků s vlákny Namflex a Climastone – S

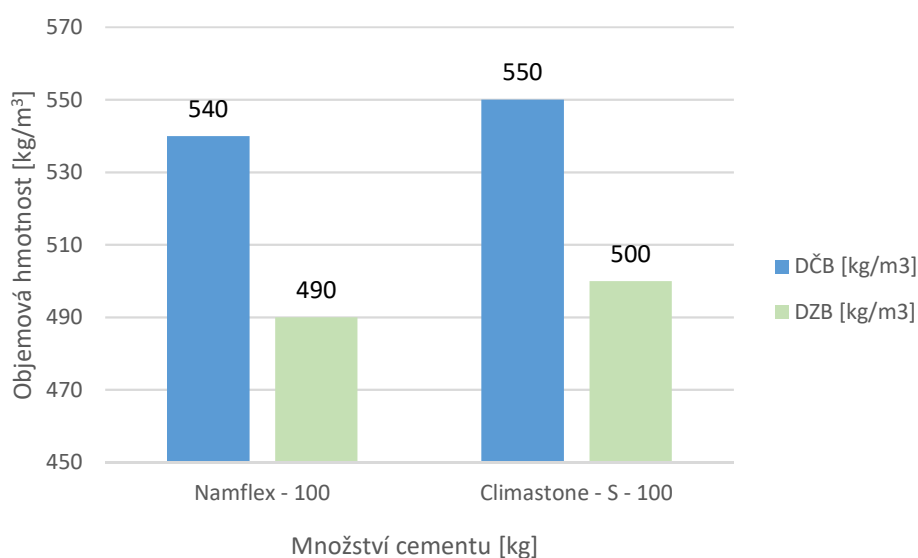
Druh vláken	Receptura	Hmotnost ČB [kg]	Rozměry tělesa [mm]			Hmotnost ZB [kg]
			b	h	l	
Namflex	5	1,83	150,73	150,80	150,20	1,71
		1,81	149,86	150,54	149,97	1,68
		1,88	150,50	152,20	150,65	1,74
		2,86	301,50	61,06	303,00	2,62
		2,89	299,50	61,40	299,50	2,70
Climastone – S	6	1,85	150,60	151,23	150,13	1,72
		1,84	149,25	150,56	150,38	1,73
		1,89	150,19	150,21	150,74	1,73
		2,86	300,00	60,50	300,00	2,61
		3,08	300,00	62,28	299,00	2,79

Nejprve byly stanoveny objemové hmotnosti v čerstvém stavu dle ČSN EN 12350-6 a následně objemová hmotnost ve ztvrdlém stavu dle ČSN EN 12390-7.

Tabulka 14: Vypočítané objemové hmotnosti čerstvého a ztvrdlého betonu s vlákny Namflex a Climastone – S

Receptura	5	6
Množství cementu [kg/m ³]	100	100
Objemová hmotnost v čerstvém stavu $D_{\text{čB}}$ [kg/m ³]	540	550
Objemová hmotnost ve ztvrdlém stavu D_{zB} [kg/m ³]	490	500

Graf 5: Závislost objemových hmotností na množství cementu u receptur s vlákny Namflex a Climastone – S



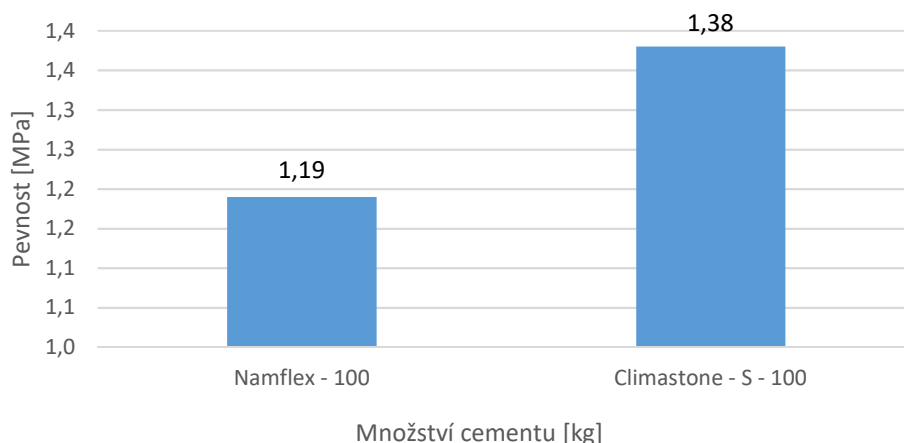
Tyto receptury byly vyrobeny jako doplňkové pro porovnání vláken mezi sebou. Při porovnání páté a šesté receptury se stejným množstvím cementu a odlišnými druhy vláken lze konstatovat, že na objemovou hmotnost mají tyto použitá vlákna (recyklované PET láhve a kamenná vlna) stejný vliv. Rozdíl v objemových hmotnostech je minimální, což mohlo být způsobeno i technologií provádění.

Další provedenou zkouškou bylo stanovení pevnosti v tlaku dle ČSN EN 12390-3.

Tabulka 15: Vypočítané pevnosti betonu tlaku s vlákny Namflex a Climastone – S

Receptura	5	6
Množství cementu [kg/m ³]	100	100
Pevnost f_c [MPa]	1,19	1,38

Graf 6: Závislost pevnosti v tlaku na druhu vláken Namflex a Climastone - S



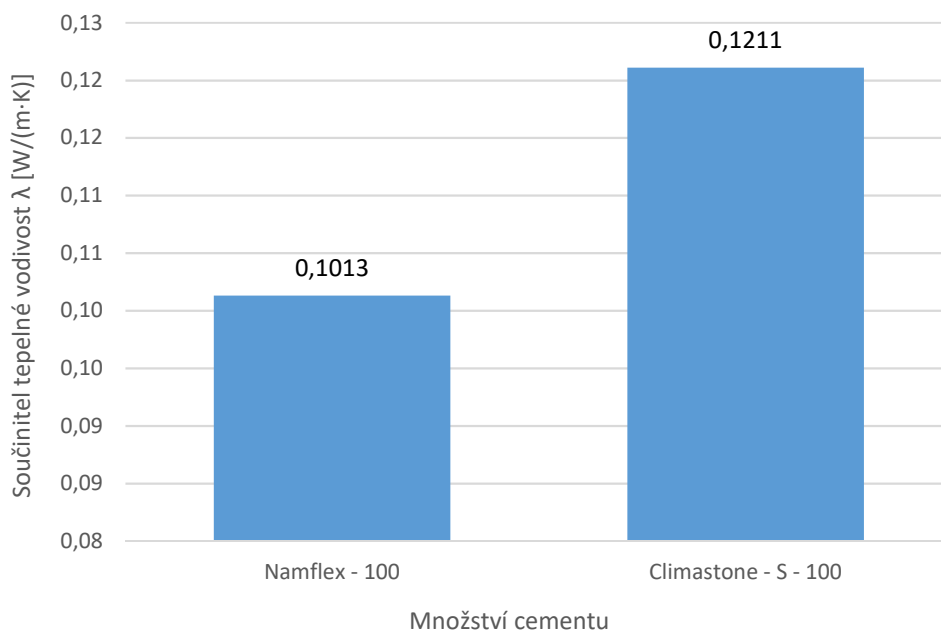
Při porovnání receptur 5 a 6, které mají stejné množství pojiva a srovnatelné objemové hmotnosti je vidět, že vlákna z kamenné vlny mají na pevnost v tlaku vyšší vliv a výsledná hodnota je přibližně o 16 % vyšší než u receptury s vlákny z recyklovaných PET láhví.

Pro zjištění tepelně izolačních vlastností se stanovil součinitel tepelné vodivosti dle ČSN EN 12667.

Tabulka 16: Součinitel tepelné vodivosti betonů s vlákny Namflex a Climastone-S

Receptura	$D_{VYSUŠENÁ}$ [kg/m ³]	λ [W/(m·K)]			$\varnothing \lambda$ [W/(m·K)]
5	420	0,1002	0,0986	0,0976	0,1013
		0,1052	0,1036	0,1027	
6	440	0,1208	0,1186	0,1178	0,1211
		0,1240	0,1228	0,1225	

Graf 7: Součinitel tepelné vodivosti betonů s vlákny Namflex a Climastone-S



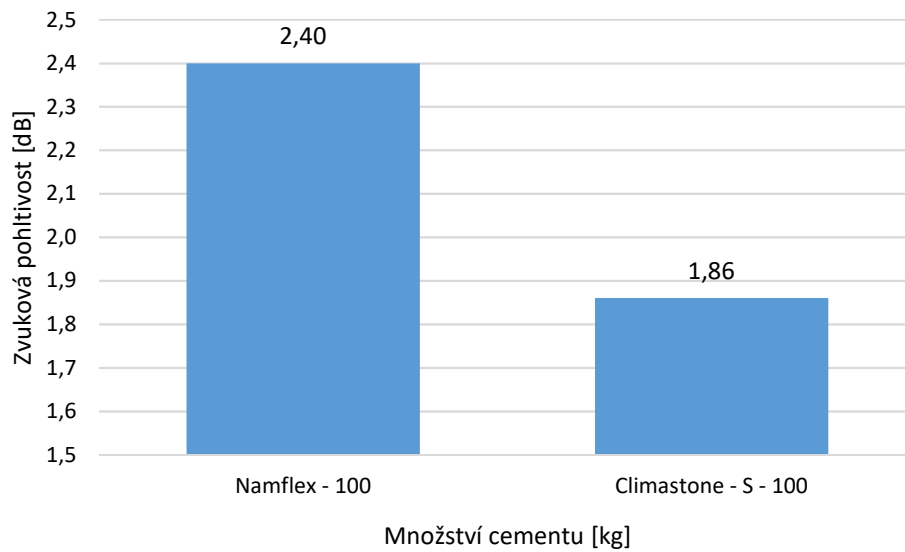
Při porovnání účinnosti druhu vláken musíme konstatovat že vlákna z recyklovaných PET láhví (Namflex) snižují tepelnou vodivost o necelých 12 %. Je patrné, že vlákna z kamenné vlny výrazně napomáhají ke zvyšování tepelné vodivosti oproti vláknům s recyklovaných PET láhví.

Vyhodnocení akustických vlastností se provedlo pomocí stanovení zvukové pohltivosti dle ČSN ISO 10534-1.

Tabulka 17: Vypočítané zvukové pohltivosti betonu s vlákny Namflex a Climastone - S

Receptura	5	6
Množství cementu [kg/m ³]	100	100
Zvuková pohltivost [dB]	2,40	1,86

Graf 8: Závislost zvukové pohltivosti na použitých vláknech Namflex a Climastone – S



Při porovnání je vidět, že vlákna z recyklovaných PET láhví mají velice pozitivní vliv na zvukovou pohltivost a zvyšují její hodnotu o téměř 30 % oproti receptuře s vlákny z kamenné vlny.

Celkově lze říci, že vlákna z recyklovaných PET láhví mají pozitivní vliv na tepelně izolační a akustické vlastnosti, naopak vlákna z kamenné vlny mají pozitivní vliv na mechanické vlastnosti.

6.3 RECEPTURY S VLÁKNY F8000

Tabulka 18: Stanovené rozměry a hmotnosti vzorků s vlákný F8000

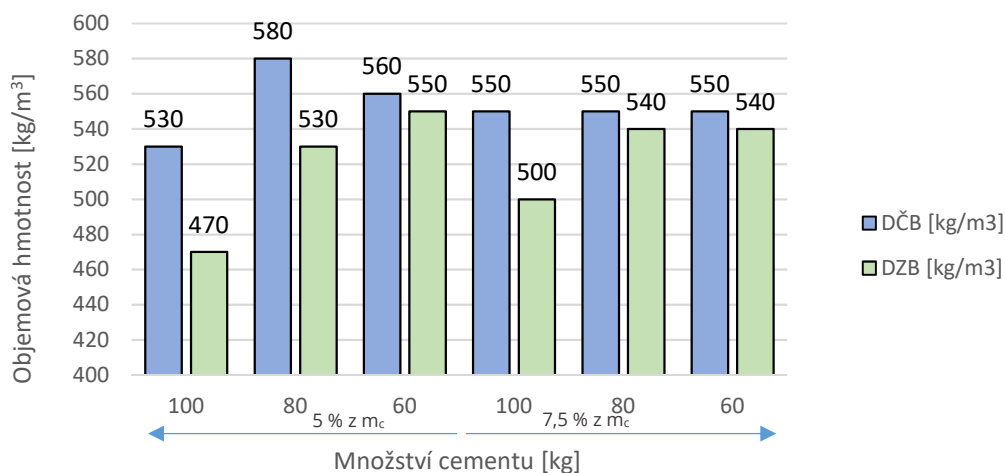
Receptura	Hmotnost ČB [kg]	Rozměry tělesa [mm]			Hmotnost ZB [kg]
		b	h	l	
7	1,78	149,97	151,66	150,24	1,63
	1,80	150,14	151,79	150,59	1,66
	1,79	150,25	151,61	150,83	1,65
	2,83	300,50	61,83	301,50	2,65
	2,81	299,50	59,77	299,00	2,49
8	1,92	150,23	150,14	150,83	1,79
	1,85	150,12	150,80	151,56	1,77
	1,81	150,27	150,24	150,22	1,76
	0,74	199,00	38,15	199,00	0,70
	0,75	199,00	35,67	200,00	0,69
9	1,94	149,97	150,25	149,82	1,80
	1,97	149,67	150,50	149,30	1,84
	1,99	150,05	150,51	150,01	1,84
	0,85	198,00	35,95	200,00	0,75
	0,79	199,00	36,41	199,00	0,73
10	1,82	150,23	151,24	151,42	1,81
	1,81	150,65	151,78	150,07	1,79
	1,82	151,62	151,14	150,17	1,82
	0,81	200,00	35,77	200,00	0,81
	0,79	199,00	35,23	200,00	0,79
11	1,88	150,22	150,73	150,52	1,91
	1,84	151,27	150,46	150,00	1,82
	1,88	151,05	150,53	150,16	1,92
	0,78	198,00	35,50	199,00	0,76
	0,79	198,50	36,96	200,00	0,85
12	1,86	150,51	151,58	151,08	1,82
	1,82	150,86	150,33	150,33	1,81
	1,92	150,17	150,81	150,81	1,90
	0,73	199,00	35,93	200,00	0,73
	0,79	199,00	35,06	199,00	0,79

Nejprve byly stanoveny objemové hmotnosti v čerstvém stavu dle ČSN EN 12350-6 a následně objemová hmotnost ve ztvrdlém stavu dle ČSN EN 12390-7.

Tabulka 19: Vypočítané objemové hmotnosti čerstvého a ztvrdlého betonu s vlákny F8000

Receptura	7	8	9	10	11	12
Množství cementu [kg/m ³]	100	100	80	80	60	60
Objemová hmotnost v čerstvém stavu D _{čB} [kg/m ³]	530	550	580	550	560	550
Objemová hmotnost ve ztvrdlém stavu D _{zB} [kg/m ³]	470	500	530	540	550	540

Graf 9: Závislost objemových hmotností na množství cementu u receptur s vlákny F8000



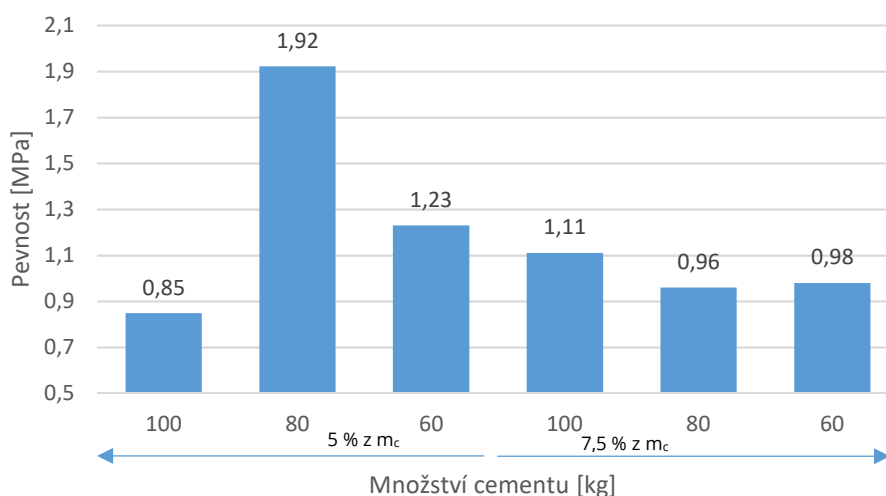
U receptur s celulóзовými vlákny vliv množství cementu na objemovou hmotnost nebyl výrazný. Mírně klesající tendence se snižujícím se množstvím cementu se objevila, ale rozdíly jsou zanedbatelné. Rozdíl mezi objemovou hmotností v čerstvém a ztvrdlém stavu je způsoben úbytkem záměsové vody. Některé vzorky při měření byly mokré, a tudíž je pokles objemové hmotnosti minimální. Při zvýšení množství vláken nenastal žádný vliv na objemovou hmotnost a z grafu je vidět, že všechny hodnoty se pohybovaly v rozmezí 470 kg/m³ až 550 kg/m³. Rozdíly v objemových hmotnostech jsou patrně způsobeny ošetřováním v průběhu zrání. U některých receptur byly vzorky mokré (vyšší objemová hmotnost).

Další provedenou zkouškou bylo stanovení pevnosti v tlaku dle ČSN EN 12390-3.

Tabulka 20: Vypočítané pevnosti betonů v tlaku s vlákny F8000

Receptura	7	8	9	10	11	12
Množství cementu [kg/m ³]	100	100	80	80	60	60
Pevnost f_c [MPa]	0,85	1,92	1,23	1,11	0,96	0,98

Graf 10: Závislost pevnosti v tlaku na množství cementu u receptur s vlákny F8000



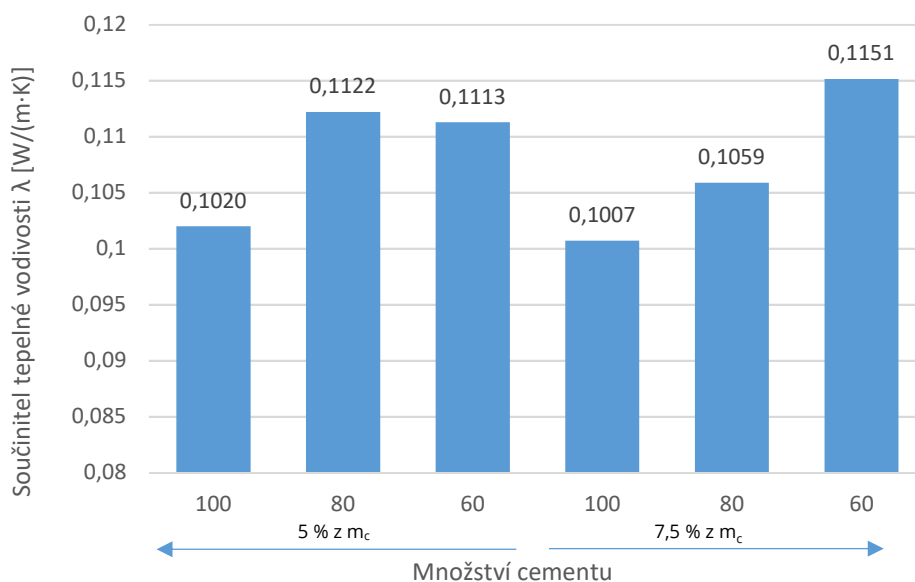
Při porovnání pevnosti v tlaku už se rozdíly v recepturách projeví výrazně. Sedmá receptura byla podobně jako jedna receptura bez vláken vyrobena starší technologií, tudíž výsledek pevnosti nelze brát korektně. U ostatních receptur je zřejmá závislost mezi množstvím cementu a pevností, kde se snižujícím se množstvím klesá i pevnost. Dalším důležitým zjištěním je, že pevnost výrazně ovlivňuje množství použitých vláken. Při zvýšení množství na 7,5 % z cementu došlo k výraznému poklesu pevností, a to až na polovinu oproti vzorkům s množstvím vláken 5 % z cementu.

Pro zjištění tepelně izolačních vlastností se stanovil součinitel tepelné vodivosti dle ČSN EN 12667.

Tabulka 21: Součinitel tepelné vodivosti u receptur s celulózovými vlákny

Receptura	$D_{\text{VYSUŠENÉ}} [\text{kg/m}^3]$	$\lambda [\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$			$\bar{\lambda} [\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$
7	460	0,1059	0,1042	0,1031	0,1020
		0,1008	0,0995	0,0985	
8	460	0,1025	0,1024	0,1024	0,1007
		0,0990	0,0989	0,0989	
9	460	0,1113	0,1112	0,1112	0,1122
		0,1131	0,1131	0,1131	
10	440	0,1089	0,1089	0,1089	0,1059
		0,1029	0,1029	0,1028	
11	350	0,1096	0,1095	0,1094	0,1113
		0,1132	0,1132	0,1131	
12	410	0,1105	0,1103	0,1103	0,1151
		0,1200	0,1200	0,1198	

Graf 11: Součinitel tepelné vodivosti u receptur s celulózovými vlákny



Při stanovení součinitele tepelné vodivosti u vzorků s celulózovými vlákny došlo k zajímavému zjištění, že u nižšího množství cementu byla vyšší tepelná vodivost. Mohlo to být z důvodu, že ve vzorcích bylo velké množství mezer, kde teplo mohlo procházet sáláním plynem v mezerách a tím se zvýšila tepelná

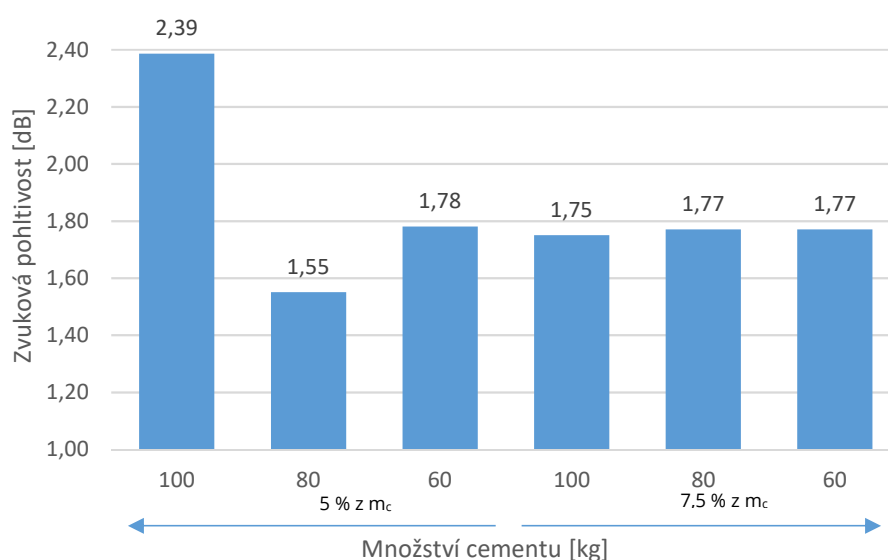
vodivost. Druhou možností je, že celulózová vlákna mohla zajistit přenos tepla prouděním skrz materiál. Poslední možností je technologie vibrolisování, která u receptur s menší dávkou cementu dokázala jednotlivá zrna kameniva více stlačit, tím vytvořit větší množství kontaktních ploch, které lépe vedou teplo.

Vyhodnocení akustických vlastností se provedlo pomocí stanovení zvukové pohltivosti dle ČSN ISO 10534-1.

Tabulka 22: Vypočítané zvukové pohltivosti betonů s vlákny F8000

Receptura	7	8	9	10	11	12
Množství cementu [kg/m ³]	100	100	80	80	60	60
Zvuková pohltivost [dB]	2,39	1,55	1,78	1,75	1,77	1,77

Graf 12: Závislost zvukové pohltivosti na množství cementu u receptur s vlákny F8000



Při vyhodnocení zvukové pohltivosti u receptur s celulózovými vlákny nelze říct, jaká mají vlákna vliv. Snad u množství 7,5 % z cementu není vidět žádný vliv a výsledky odpovídají objemovým hmotnostem. Naopak u receptur s nižším množstvím vláken je vidět náznak zvyšování zvukové pohltivosti s množstvím cementu, když připustíme, že u receptury 9 došlo k anomálii při měření a hodnota by měla dosahovat vyšších hodnot.

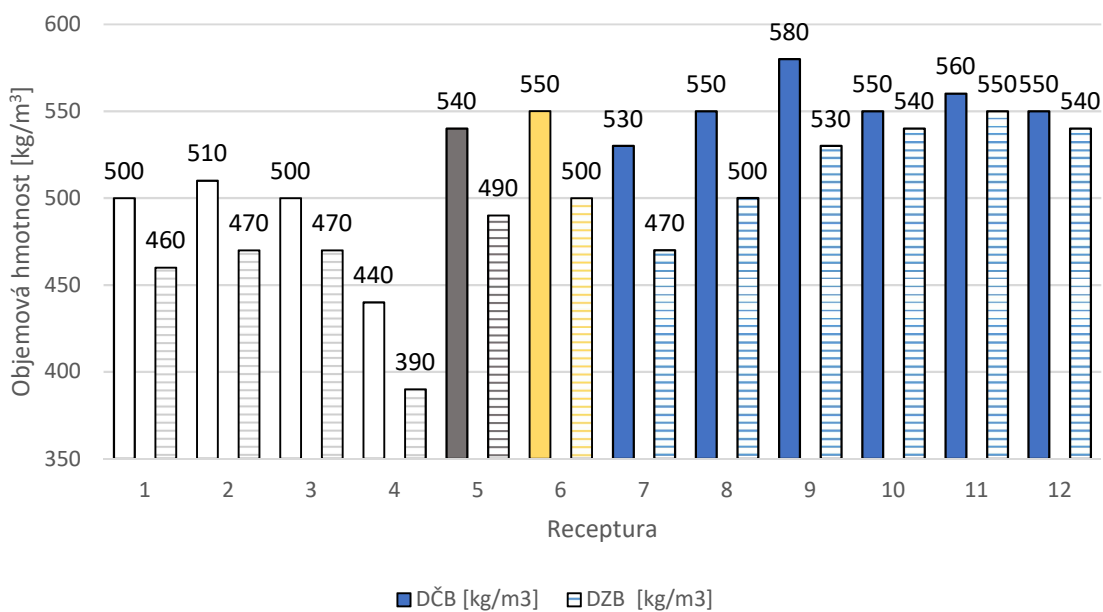
6.4 POROVNÁNÍ RECEPTUR NAVZÁJEM

Nakonec se porovnají všechny receptury mezi sebou a zjistí se vliv použitých vláken na požadované vlastnosti.

Tabulka 23: Celkové vlastnosti vyrobených receptur

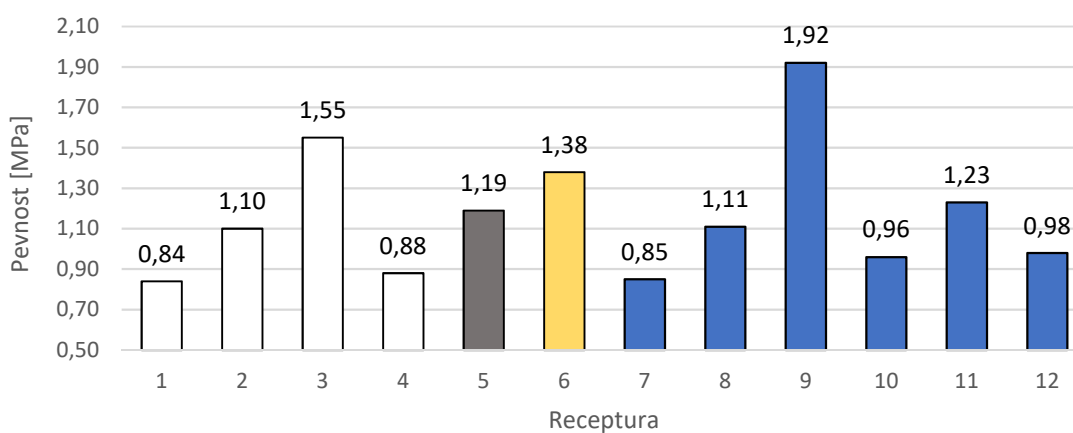
Vlákná	Receptura	D _{ČB} [kg/m ³]	D _{ZB} [kg/m ³]	f _c [MPa]	λ [W/ (m.K)]	DI _α [dB]
Bez vláken	1	500	460	0,84	0,1112	2,20
	2	510	470	1,10	0,1020	2,22
	3	500	470	1,55	0,1051	1,82
	4	440	390	0,88	0,0935	1,54
Namflex	5	540	490	1,19	0,1013	2,40
Climastone-S	6	550	500	1,38	0,1132	1,86
F8000	7	530	470	0,85	0,1020	2,39
	8	550	480	1,11	0,1007	1,75
	9	580	480	1,92	0,1122	1,55
	10	550	470	0,96	0,1059	1,77
	11	560	470	1,23	0,1113	1,78
	12	550	470	0,98	0,1151	1,77

Graf 13: Objemové hmotnosti vyrobených receptur



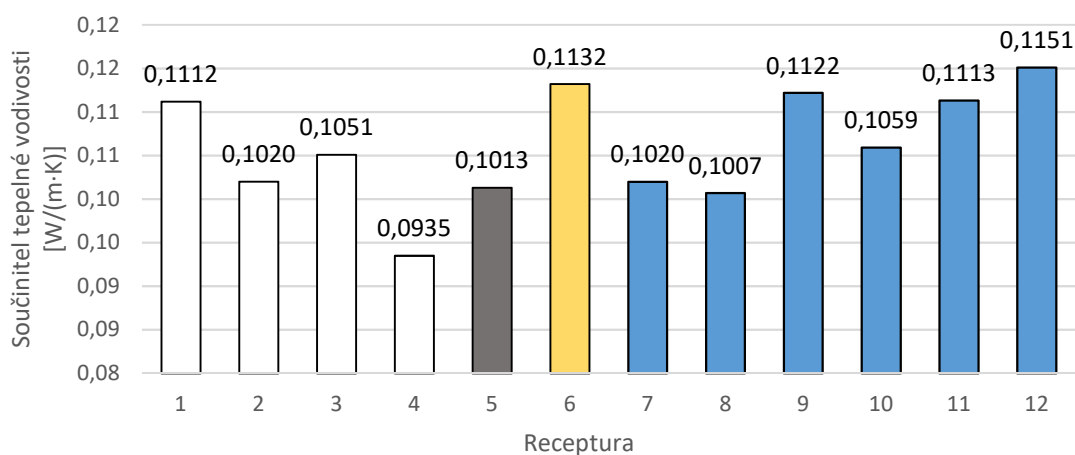
Při porovnání jednotlivých receptur s různými vlákny je patrné, že největší vliv na objemové hmotnosti má množství cementu. Při přidání jakýchkoliv vláken se objemová hmotnost v čerstvém stavu výrazně zvýší, jelikož vlákna na sebe nabalí více vody, než kdyby se ve směsi nevyskytovala. Sledovat tuto skutečnost lze díky největšímu úbytku vody, tím pádem výraznějšímu snížení objemové hmotnosti ve ztvrdlém stavu. U posledních třech receptur je snížení objemové hmotnosti nižší z důvodu mokrých vzorků při vážení.

Graf 14: Pevnosti v tlaku vyrobených receptur



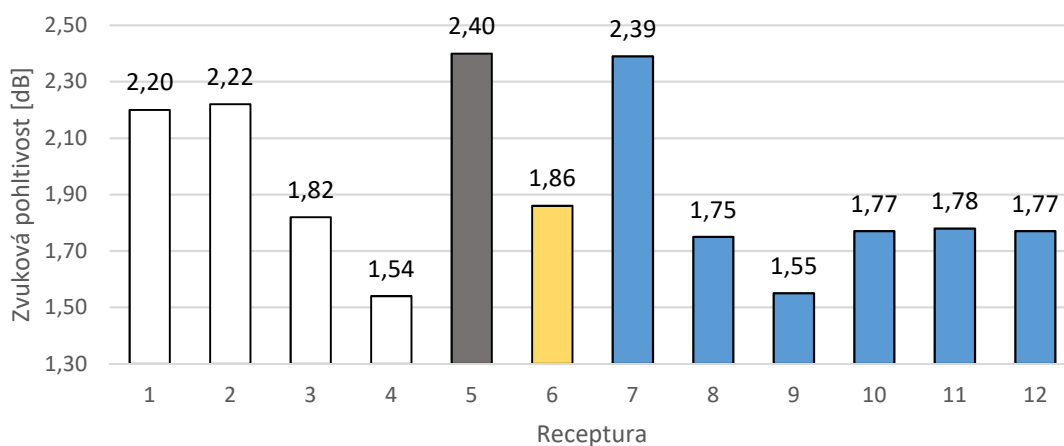
Při srovnání pevností v tlaku jsou viditelné nepovedené receptury (výroba špatnou technologií), které nám eliminují vyhodnocení této vlastnosti. U betonů nevyztužených vlákny jsou nelogické hodnoty u první a druhé receptury, kdy se očekává enormní zvýšení hodnot. Teoreticky při stejné výrobní technologii a stejných vstupních surovinách by měla být znatelná lineární závislost mezi pevností v tlaku a množstvím cementu v receptuře. U vláken z recyklovaných plastů a kamenné vlny nelze prokázat pozitivní vliv na pevnost v tlaku, naopak u celulósových vláken v množství 5 % z cementu lze vidět navýšení pevnosti o necelých 25 %. U sedmé receptury je to podobné jako u prvních dvou a hodnota pevnosti je tudíž nerelevantní.

Graf 15: Součinitel tepelné vodivosti vyrobených receptur



Receptury bez vláken měly nejnižší objemové hmotnosti, a tudíž mají i nejnižší součinitele tepelné vodivosti. Je zde patrná lineární závislost, že se snižujícím se množstvím cementu klesá objemová hmotnost a tím i součinitel tepelné vodivosti. Vlákná z kamenné vlny výrazně zvyšují tepelnou vodivost. U vláken z plastů a celulózy je pozorován vliv na tepelnou vodivost nejméně. U betonů s celulózou nebyla zaznamenána žádná závislost a tepelná vodivost tam odpovídala objemovým hmotnostem.

Graf 16: Zvuková pohltivost vyrobených receptur



Vyhodnocení zvukové pohltivosti se lišilo druhem vláken výrazně. Vlákná z kamenné vlny nám zvukovou pohltivost snižují, tudíž jsou pro akustické prvky nevhodná. Vlákná s celulózovými vlákny nám taky ve většině případů pohltivost

nezvýšila. Jen u sedmé receptury došlo mírnému zlepšení oproti betonům bez vláken. Zajímavě se jeví použití vláken z recyklovaných plastů, kde došlo k navýšení zvukové pohltivosti o téměř 10 %. Z naměřených hodnot byl vyhodnocen i číselný koeficient zvukové pohltivosti α pro obkladové materiály.

Receptura	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Číselný koeficient zvukové pohltivosti α [-]	0,4	0,4	0,4	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3

Tabulka 24: Číselný koeficient zvukové pohltivosti α

Z tohoto vyhodnocení je patrné, že nejlepší zvukovou pohltivost mají vzorky nevytlučené vlákna, nebo receptura s vlákny z recyklovaných plastů.

7 DISKUZE VÝSLEDKŮ

V zadání diplomové práce bylo vyrobít kompozit o objemové hmotnosti pod 600 kg/m^3 a součinitel tepelné vodivosti pod $0,1 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Oba tyto požadavky byly dosaženy u čtvrté receptury a tímto bylo splněno zadání diplomové práce. U receptury 2, 5, 7 a 8 byla mírně překročena hodnota součinitele tepelné vodivosti (maximálně o $0,002 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$), a proto tyto receptury po zaokrouhlení také splňují zadání.

Při stanovení konzistence čerstvé betonové směsi byla použita metoda sednutí kužele. U všech receptur bylo zjištěno sednutí 0 mm , a tudíž se jednalo o velmi suché směsi. Nabízí se použít metodu Vebe, ale z důvodu velmi malého množství cementového tmele se tato metoda nevyužila.

Při stanovení objemové hmotnosti se hodnoty pohybovaly v rozmezí 390 až 550 kg/m^3 ve ztvrdlém stavu. Tyto hodnoty splňují zadání a zároveň jsou vidět i rozdíly v jednotlivých recepturách. Na nevyztužených recepturách je znatelná lineární tendence mezi množstvím cementu a objemovou hmotností, kdy s vyšším množstvím cementu roste i objemová hmotnost. Nejnížší hodnoty objemových hmotností měly receptury, které nebyly vyztuženy vlákny (390 až 510 kg/m^3). Největší objemové hmotnosti měly receptury vyztužené vlákny (490 až 550 kg/m^3). U receptur s celulózovými vlákny byla objemová hmotnost mírně vyšší než u nevyztužených (470 až 480 kg/m^3). U posledních tří receptur jsou hodnoty objemové hmotnosti ve ztvrdlém stavu ovlivněny chybou, kdy v době před stanovením objemové hmotnosti byly vzorky namočeny (postříkány) vodou, a proto se neprojevil pokles objemové hmotnosti v době zrání. Další logické vysvětlení poměrně zajímavých výsledků objemových hmotností je zdokonalování technologie výroby, kdy od postupného dusání se přešlo až k vibrolisování, díky kterému docházelo ke většímu zhutnění, vzniku většího množství kontaktních zón mezi zrny kameniva, což mělo výrazný vliv na požadované vlastnosti.

Pevnosti v tlaku u většiny receptur odpovídaly objemovým hmotnostem. První, druhá a sedmá receptura byla vyrobena horší (starší) technologií, tudíž hodnoty

nejdou relevantní. U nevyztužených receptur bereme hodnoty jako referenční po porovnání s hodnotami receptur s vlákny. Hodnoty pevností se pohybovaly v rozmezí 0,84 až 1,92 MPa. Při dodržení stejné technologie se u výše zmíněných receptur očekával nárůst pevností v tlaku. U receptur vyztužených vlákny lze konstatovat, že pozitivní vliv na pevnost v tlaku mají pouze celulózová vlákna v množství 5 % z cementu.

Součinitel tepelné vodivosti se pohyboval v rozmezí 0,0935 až 0,1151 W/(m·K). U receptur nevyztužených vlákny byla tepelná vodivost nejnižší a odvíjela se v závislosti na objemové hmotnosti. Vlákna z kamenné vlny výrazně zvýšila tepelnou vodivost. Vlákna z recyklovaných plastů neměla na tepelnou vodivost vliv a u celulózových vláken vliv na tepelnou vodivost nebyl prokázán. Největší vliv na tepelnou vodivost má objemová hmotnost.

Při vyhodnocení akustických vlastností bylo zjištěno, že nejvyšší zvukovou pohltivost mají receptury nevyztužené vlákny a receptura s vlákny z recyklovaného plastu. Ostatní použitá vlákna nám zvukovou pohltivost snižují. Hodnoty zvukové pohltivosti se pohybují od 1,54 do 2,4 dB. U stanovení činitele zvukové pohltivosti se dospělo ke stejnému závěru a hodnoty se pohybovaly v rozmezí 0,3 až 0,4.

Jednotlivé receptury se mezi sebou méně či více lišily ve výsledcích. Díky těmto skutečnostem byla pro tuto práci zavedena veličina x , která nám bude vyjadřovat poměr mezi pevností v tlaku a součinitelem tepelné vodivosti. Čím výsledek této hodnoty bude vyšší, tím bude celkový souhrn vlastností optimálnější pro použití.

Pro stanovení receptury o optimálních vlastnostech si zavedeme veličinu:

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

kde:

x - zavedená veličina [(N/mm²) / (W/(m·K))]

f_c - pevnost v tlaku [N/mm²]

λ - součinitel tepelné vodivosti [W/(m·K)]

Tabulka 25: Zavedená veličina x

Receptura	σ_{fc} [N/mm ²]	σ_{λ} [W/(m·K)]	x [[N/mm ²]/(W/(m·K))]
1	0,84	0,1112	7,55
2	1,10	0,1020	10,78
3	1,55	0,1051	14,72
4	0,88	0,0935	9,41
5	1,19	0,1013	11,72
6	1,38	0,1132	12,19
7	0,85	0,1020	8,32
8	1,11	0,1007	11,02
9	1,92	0,1122	17,13
10	0,96	0,1059	9,07
11	1,23	0,1113	11,05
12	0,98	0,1151	8,51

Jako receptura s největším potenciálem se jeví devátá receptura, u které hodnota x přesahuje hodnotu 17. Při vyhodnocení této veličiny se musí přihlídnout k faktu, že první druhá a sedmá receptura byly namíchany pomocí starší technologie, a proto hodnoty x nejsou v očekávaných hodnotách. Jako použitelné receptury se jeví i třetí a šestá, kdy hodnota x se pohybuje od 12 do 15. Pro relevantní srovnání všech receptur by bylo vhodné nepovedené výše zmíněné receptury přemíchat pomocí nové technologie.

7.1 KONKURENCE SCHOPNOST NA TRHU

Pro porovnání vyrobených lehkých mezerovitých betonů na trhu si následně spočítáme cenu našeho výrobku. Do ceny musíme zahrnout všechny použité suroviny, náklady na výrobu a expedici. Zvolili jsme recepturu 3 z důvodu nejvyšší hodnoty x a neznámé ceny vláken, která jsou teprve ve vývoji.

Tabulka 26: Cena 1 m³ výrobku dle receptury 3

Materiál	Jednotka	Množství na 1 m ³	Cena [kč]
Cement 42,5 R	kg	80	310
Kamenivo REFAGLASS 4/16 mm	l	1000	1780
Voda	kg	5	2
Muraplast FK 19	kg	0,64	64
Cena celkem	kč	-	2156

Pro zjednodušení bylo určeno, že cena materiálu je 50 % z celkové ceny výrobku. Výsledná cena námi vyrobeného lehkého mezerovitého betonu se pohybuje okolo 4500 Kč/m³. U největšího konkurenta (Liaporbeton) se pytel o objemu 30 l prodává za 200 Kč. Po přepočtu je výsledná cena hlavního konkurenta je 6600 Kč/m³. U konkurenčního výrobku se sice jedná o pytlouvanou směs potřebnou pouze přidávek vody, ale cenová rezerva u námi vyrobené betonové směsi je výrazná. Celkové náklady na výrobu 1 m³ našeho betonu nepřevyšují náklady na 1 m³ konkurenční směsi.

8 ZÁVĚR

Pěnové sklo je moderní, progresivní stavební materiál vyskytující se ve stavební praxi stále častěji, a to z několika důvodů. Jedním z nich je, že se pěnové sklo vyrábí ze skleněného odpadu, který je pro opětovné využití ve sklárnách nepoužitelný. Dalším důvodem je šetrnost k životnímu prostředí a recyklovatelnost. Kvůli těmto důvodům a vlastnostem samotného pěnového skla se dá očekávat častější využití v nadcházejících letech.

Mezi nejvýznamnější vlastnosti pěnového skla je nízká objemová hmotnost a poměrně nízká tepelná vodivost. Pěnové sklo se vyrábí ve formě desek či kameniva. Tepelně izolační desky mohou sloužit k zateplení svislých či vodorovných konstrukcí. U kameniva na bázi pěnového skla je použití širší. Mezi nejčastější použití kameniva patří podsypy a zásypy základových konstrukcí a drenážní vrstvy. Velkou kapitolou je použití kameniva z pěnového skla pro výrobu lehkých mezerovitých betonů. V tomhle oboru existuje mezera na trhu a bylo by možné ji vyplnit námi vyráběnými betony. Hlavní konkurent vyrábějící lehké kamenivo pod značkou Liapor představil tenhle rok (2018) novinku, která se svými vlastnostmi nemůže námi vyrobeným lehkým betonům vyrovnat. Liapor beton má nejnižší objemovou hmotnost okolo 600 kg/m^3 a níže už se díky samotnému kamenivu nedostane. Námi vyrobené betony vykazují nižší objemové hmotnosti, lepší tepelně izolační vlastnosti a obdobné pevnosti v závislosti na objemové hmotnosti. Při cenovém srovnání s pytlovaným lehkým betonem (Liapor mix) vychází námi vyrobené směsi výhodněji.

V budoucnu je v použití pěnového skla obrovský potenciál. Díky jedinečným vlastnostem, šetření životního prostředí a recyklovatelnosti je očekáváno častější využívání tohoto materiálu ve stavebnictví. V České republice by mohl vzniknout nový konkurent u tradičního pórovitého kameniva (keramzitu) pro výrobu lehkých betonů a tím snížení cen a zvyšování kvality vyráběných konstrukcí či výrobků.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Produkce, využití a odstranění odpadů - 2016 | ČSÚ. Český statistický úřad | ČSÚ [online]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/produkce-vyuziti-a-odstraneni-odpadu>
- [2] Pěnové sklo | Refaglass. Refaglass – moderní izolační pěnové sklo [online]. [cit. 06.12.2018]. Dostupné z: <https://www.refaglass.cz/penove-sklo/>
- [3] Glass – Wikipedia. [online]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Glass#Physical_properties
- [4] [online]. Dostupné z: <http://www.geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/>
- [5] How Glass is Made? - Glass Manufacture. The History of Glass – Glass Facts[online]. [cit. 06.12.2018]. Dostupné z: <http://www.historyofglass.com/glass-making-process/how-glass-is-made/>
- [6] IFC – International Finance Corporation. [online]. [cit. 06.12.2018]. Dostupné z: https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/corp_ext_content/ifc_external_corporate_site/
- [7] SVOBODA, Luboš. Stavební Hmoty. 3. Praha: Jaga group, 2013. ISBN 978-80-260-4972-2.
- [8] ŘÍMANOVÁ, Dana. Zákon o odpadech č. 185/2001 Sb. včetně prováděcích předpisů s komentářem. 1. vyd. Praha: Nakladatelství Polygon, 2001. 444 s. ISBN 8072730541.
- [9] SKLO | TŘÍDĚNÍODPADU.CZ. Odpady | tříděníodpadu.cz [online]. [cit. 06.12.2018]. Dostupné z: <https://www.trideniodpadu.cz/sklo>
- [10] Pěnové sklo – Wikipedie. [online]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/P%C4%B9nov%C3%A9_sklo
- [11] YOUSEFI, Yassaman, Adam SCHNEIDER, Hassan BAAJ, Susan TIGHE a Abbas YOUSSEFI. FOAM GLASS LIGHTWEIGHT AGGREGATE: THE NEW APPROACH [online]. 2016, 8 [cit. 2018-12-06].
- [12] Pittsburgh Corning Europe N.V. [cit. 06.12.2018]. Dostupné z: <https://cz.foamglas.com/cs-cz/produkty/foamglas-informace-o-produktu/obecne-informace>
- [13] VYCHYTIL, Jan. Využití pěnového skla v provozních střeších, zásady správné aplikace, časté problémy v průběhu stavby a jejich řešení[online]. 207n. I. [cit. 2018-12-06].
- [14] Home – PORAVER® expanded glass. Home – PORAVER® Blähglas [online]. [cit. 06.12.2018]. Dostupné z: <https://www.poraver.com/en/>
- [15] Proces výroby penového skla | Penové sklo. Penové sklo – tepelnoizolačný stavebný materiál [online] [cit. 2018-12-06]. Dostupné z: <http://www.penove-sklo.com/proces-vyroby-penoveho-skla.html>
- [16] Pěnové sklo A-GLASS. Pěnové sklo A-GLASS [online]. [cit. 2018-12-06]. Dostupné z: <http://www.a-glass.cz/penove-sklo/>
- [17] 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. 2018-12-06]. Dostupné z: https://apps.webofknowledge.com/full_record.do
- [18] 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. 2018-12-06]. Dostupné z: https://apps.webofknowledge.com/full_record.do
- [19] 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. 2018-12-06]. Dostupné z: https://apps.webofknowledge.com/full_record.do
- [20] 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. 2018-12-06]. Dostupné z: https://apps.webofknowledge.com/full_record.do
- [21] 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. 2018-12-06]. Dostupné z: https://apps.webofknowledge.com/full_record.do
- [22] 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. 2018-12-06]. Dostupné z: https://apps.webofknowledge.com/full_record.do
- [23] Pěnové sklo v novostavbách či rekonstrukcích? | Stavebnictvi3000.cz. Nejvíce informací o stavebnictví v ČR | Stavebnictvi3000.cz [online]. [cit. 06.12.2018]. Dostupné z: <http://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/penove-sklo-v-novostavbach-ci-rekonstrukcich/>
- [24] SEDLMAJER, Martin, Jiří ZACH a Václav ŠENBAUER. Možnosti využití lehkého kameniva na bázi recyklovaného skla v betonu. IMateriály [online]. 2016 [cit. 2018-12-06]. Dostupné z: http://imaterialy.dumabyt.cz/rubriky/materialy/moznosti-vyuziti-lehkeho-kameniva-na-bazi-recyklovaneho-skla-v-betonu_43687.html
- [25] 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>
- [26] Tepelná izolace zdiva a základových desek – Translignum BM – polotovary ze dřeva, nátěry na dřevo. Translignum BM – polotovary ze dřeva, nátěry na dřevo [online]. [cit. 06.12.2018]. Dostupné z: <https://www.translignumbm.cz/penove-sklo/tepelna-izolace-zdiva-a-zakladovych-desek/>
- [27] HELA, Rudolf. Studijní opora pro komb. st. - Modul BJ04 – M01 Technologie betonu I. Brno, 2005. 110 s. Elektronická opora
- [28] ČSN EN 206 Beton: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. Praha: Český normalizační institut, 2014, 87 s.

- [29] ČSN 7361-2 Stavba vozovek-Vrstvy ze směsí stmelených hydraulickými pojivy-Část 2: Mezerovitý beton. Praha: Český normalizační institut, 2008, 12 s.
- [30] ČSN EN 12620+A1 – Kamenivo do betonu. Praha: Český normalizační institut, 2008, 51 s.
- [31] ČSN EN 13055 – Pórovité kamenivo. Praha: Český normalizační institut, 2017, 44 s.
- [32] Cement | eBeton – Specialista na beton. eBeton | eBeton – Specialista na beton [online]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/cement>
- [33] ČSN EN 197-1 Cement – Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití. Praha: Český normalizační institut, 2013, 25 s.
- [34] Voda | eBeton – Specialista na beton. eBeton | eBeton – Specialista na beton[online]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/voda>
- [35] ČSN EN 1008 – Záměsová voda do betonu – Specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vod získané při recyklaci v betonárně, jako záměsové vody do betonu. Praha: Český normalizační institut, 2003, 20 s.
- [36] BENTUR, Arnon; MINDESS, Sidney. Fibre reinforced cementitious composites. London: Spon press Taylor & Francis Group, 1990. 451 s. ISBN 1-85166-393-2.
- [37] KURPIŃSKA, Marzena, Tomasz FERENC, M. BORYS, Z. CZYŻ, K. FALKOWICZ, J. KUJAWSKA, M. KULISZ a M. SZALA. Effect of porosity on physical properties of lightweight cement composite with foamed glass aggregate. ITM Web of Conferences. 2017, 15. DOI: 10.1051/itmconf/20171506005. ISSN 2271-2097. Dostupné také z: <https://www.itm-conferences.org/10.1051/itmconf/20171506005>
- [38] POPOV, M, L ZAKREVSAYA, V VAGANOV, S HEMPEL a V MECHTCHERINE. Performance of Lightweight Concrete based on Granulated Foamglass. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2015, 96. DOI: 10.1088/1757/96/1/012017. ISSN 1757-8981. Dostupné také z: <http://stacks.iop.org/1757-899X/96/i=1/a=012017?key=crossref.06fbc08a5585eae5ff62405704a4f396>
- [39] VAGANOV, Victor, Maxim POPOV, Aleksandrs KORJAKINS a Genadijs ŠAHMENKO. Effect of CNT on Microstructure and Mineralogical Composition of Lightweight Concrete with Granulated Foam Glass. Procedia Engineering. 2017, 172, 1204-1211. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.141. ISSN 18777058. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705817306471>
- [40] ČSN 72 1179 - Stanovení reaktivnosti kameniva s alkáliemi. Změna Z1. Praha: Český normalizační institut, 2004, 8 s.
- [41] LIADUR – Protihlukové stěny Liadur [online]. Dostupné z: <https://www.liadur.cz/cz/betonove-protihlukove-steny-liadur>

- [42] CEM I 42,5 R | HeidelbergCement Česká republika. [online]. Dostupné z: <https://www.heidelbergcement.cz/cs/cement/volne-lozeny-cement/cemi425r>
- [43] MC-Bauchemie – Inovácia v stavebnej chémii [online]. [cit. 06.12.2018]. Dostupné z: <http://www.mcbauchemie.sk/storage/app/media/products/Muraplast%20FK%2019/>
- [44] 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>
- [45] Výroba kamenné vlny | ROCKWOOL | Izolace z kamenné vlny. Nehořlavé izolace z kamenné vlny ROCKWOOL [online]. [cit. 06.12.2018]. Dostupné z: <https://www.rockwool.cz/vyhody-kammenne-vlny/jak-se-vyrabi-kamenna-vlna>
- [46] JAK SE RECYKLUJE PAPIR | TŘÍDĚNÍODPADU.CZ. Odpady | tříděníodpadu.cz[online]. [cit. 06.12.2018]. Dostupné z: <https://www.trideniodpadu.cz/jak-se-recykluje-papir>
- [47] ČSN EN 12350-2 – Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím. Praha: Český normalizační institut, 2000, 9 s.
- [48] ČSN EN 12350-6 – Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost. Praha: Český normalizační institut, 2009, 10 s.
- [49] ČSN EN 12390-7 – Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu. Praha: Český normalizační institut, 2001, 10 s.
- [50] ČSN EN 12390-3 – Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Pevnost v tlaku zkušebních těles. Praha: Český normalizační institut, 2002, 18 s.
- [51] ČSN EN 12667 – Stanovení tepelného odporu metodami chráněné topné desky a měřidla tepelného toku dle ISO 830.1 Praha: Český normalizační institut, 2001, 60 s.
- [52] Možnosti využití vláken na bázi druhotných a snadnoobnovitelných surovin při výrobě pokročilých stavebních materiálů. Brno, 2018. Diplomová práce. VUT FAST Brno. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Zach PhD.
- [53] ČSN ISO 10534-1 – Akustika – Určování činitele zvukové pohltivosti a akustické impedance v impedančních trubcích – Část 1Metoda poměru stojaté vlny. Praha: Český normalizační institut, 1999, 30 s.
- [54] Zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech a o změně některých dalších zákonů. Dostupné z: https://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/8FC3E5C15334AB9DC125727B00339581/%24file/Z%20185_2001.pdf
- [55] Možnosti využití lehkého kameniva na bázi pěnového skla pro výrobu novodobých stavebních materiálů. Brno, 2017. Bakalářská práce. VUT FAST Brno. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Zach PhD.

SEZNAM PŘÍLOH

- A. Technický list portlandského cementu CEM I 42,5 R.
- B. Technický list plastifikační přísady Muraplast FK 19.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Plošné znázornění rozdílů mezi: a – strukturou křemene, tj. krystalického SiO_2 , b - skelného SiO_2 , c – sodnokřemičitého skla. Podle Hlaváče (1988). [4]	12
Obrázek 2: Symbol recyklace[9].....	15
Obrázek 3: Schéma recyklace odpadního skla [9]	15
Obrázek 4: Mikroskopická struktura pěnového skla [13]	19
Obrázek 5: Detail kameniva z pěnového skla vyrobeného na granulačním talíři [14]	20
Obrázek 6: Tunelová pec pro výrobu pěnového skla.....	21
Obrázek 7: Skládka vyrobeného kameniva.....	22
Obrázek 8: Použití kameniva z pěnového skla na obsypy a podsypy objektů [26]..	26
Obrázek 9: Odlehčení klenby a vyrovnání podlahy pomocí lehkého kameniva [23]	27
Obrázek 10: Kamiv z pěnového skla jako izolace bazénů a do vyhřívaných podlah [26]	28
Obrázek 11: Izolační vyrovnávací vrstva pro vedení instalací	40
Obrázek 12: Použití pro vytvoření lehké roznášecí, vyrovnávací vrstvy podlah (rekonstrukce) [23].....	40
Obrázek 13: Absorpční vrstva z lehkého mezerovitého betonu v protihlukových stěnách, detail stěny [41].....	41
Obrázek 14: Vlákna z recyklovaných PET láhví	44
Obrázek 15: Vlákna z čedičové (kamenné) vlny.....	44
Obrázek 16: Celulózová vlákna používaná pro foukané izolace.....	45
Obrázek 17: Zkušební tělesa po namíchání.....	51
Obrázek 18: Stanovení pevnosti v tlaku a porušení zrn po provedení zkoušky.....	55

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Technologie výroby výrobků ze skla [7]	13
Tabulka 2: Vlastnosti skla [7]	14
Tabulka 3: Vlastnosti kameniva na bázi pěnového skla [16] [2]	25
Tabulka 4: Třídy lehkého betonu dle objemové hmotnosti [28].....	29
Tabulka 5: Fyzikální a mechanické vlastnosti vláken [36]	34
Tabulka 6: Receptury na 1 m ³ lehkého mezerovitého betonu.....	47
Tabulka 7: Receptury na příslušné namíchané objemy	47
Tabulka 8: Stanovené rozměry a hmotnosti vzorků bez vláken	58
Tabulka 9: Vypočítané objemové hmotnosti čerstvého a ztvrdlého betonu bez vláken.....	59
Tabulka 10: Vypočítané pevnosti v tlaku betonu bez vláken.....	60
Tabulka 11: Naměřené hodnoty součinitele tepelné vodivosti v recepturách bez vláken.....	61
Tabulka 12: Vypočítané hodnoty zvukové pohltivosti betonu bez vláken.....	62
Tabulka 13: Stanovené rozměry a hmotnosti vzorků s vlákny Namflex a Climastone – S	63
Tabulka 14: Vypočítané objemové hmotnosti čerstvého a ztvrdlého betonu s vlákny Namflex a Climastone – S	63
Tabulka 15: Vypočítané pevnosti betonu tlaku s vlákny Namflex a Climastone – S	64
Tabulka 16: Součinitel tepelné vodivosti betonů s vlákny Namflex a Climastone-S	65
Tabulka 17: Vypočítané zvukové pohltivosti betonu s vlákny Namflex a Climastone – S	66
Tabulka 18: Stanovené rozměry a hmotnosti vzorků s vlákny F8000	68
Tabulka 19: Vypočítané objemové hmotnosti čerstvého a ztvrdlého betonu s vlákny F8000	69
Tabulka 20: Vypočítané pevnosti betonů v tlaku s vlákny F8000.....	70
Tabulka 21: Součinitel tepelné vodivosti u receptur s celulóзовými vlákny	71
Tabulka 22: Vypočítané zvukové pohltivosti betonů s vlákny F8000	72
Tabulka 23: Celkové vlastnosti vyrobených receptur	73
Tabulka 24: Činitel zvukové pohltivosti α	76
Tabulka 25: Zavedená veličina x	79
Tabulka 26: Cena 1 m ³ výrobku dle receptury 3	80

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Závislost objemových hmotností na množství cementu u receptur bez vláken.....	59
Graf 2: Závislost pevnosti v tlaku na množství cementu u receptur bez vláken	60
Graf 3: Vyhodnocení součinitele tepelné vodivosti receptur bez vláken.....	61
Graf 4: Závislost zvukové pohltivosti na množství cementu u receptur bez vláken	62

Graf 5: Závislost objemových hmotností na množství cementu u receptur s vlákny Namflex a Climastone – S	64
Graf 6: Závislost pevnosti v tlaku na druhu vláken Namflex a Climastone – S	65
Graf 7: Součinitel tepelné vodivosti betonů s vlákny Namflex a Climastone-S	66
Graf 8: Závislost zvukové pohltivosti na použitých vláknech Namflex a Climastone – S	67
Graf 9: Závislost objemových hmotností na množství cementu u receptur s vlákny F8000	69
Graf 10: Závislost pevnosti v tlaku na množství cementu u receptur s vlákny F8000	70
Graf 11: Součinitel tepelné vodivosti u receptur s celulóзовými vlákny.....	71
Graf 12: Závislost zvukové pohltivosti na množství cementu u receptur s vlákny F8000	72
Graf 13: Objemové hmotnosti vyrobených receptur	73
Graf 14: Pevnosti v tlaku vyrobených receptur	74
Graf 15: Součinitel tepelné vodivosti vyrobených receptur	75
Graf 16: Zvuková pohltivost vyrobených receptur.....	75