



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 KOMPOZITŮ Z KAMENIVA NA BÁZI PĚNOVÉHO SKLA

DEVELOPMENT OF LIGHTWEIGHT COMPOSITES BASED ON FOAM GLASS AGGREGATE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Michaela Szotkowská

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ ZACH, Ph.D.

BRNO 2020



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Michaela Szotkowská
Název	Vývoj lehkých kompozitů z kameniva na bázi pěnového skla
Vedoucí práce	doc. Ing. Jiří Zach, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2019
Datum odevzdání	22. 5. 2020

V Brně dne 30. 11. 2019

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

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

PODKLADY A LITERATURA

- [1] HALAHYJA, M.; CHMÚRNÝ, I.; STERNOVÁ, Z. Stavebná tepelná technika: tepelná ochrana budov. 1. vyd. Bratislava: Jaga, 1998. 253 s. ISBN 80-88905-04-4.
- [2] ŠŤASTNÍK, S., ZACH, J. Zkoušení izolačních materiálů. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2002. 95 s. ISBN 80-214-2253-X
- [3] Vaverka, J.; Chybík, J., Mrlík, F. Stavební fyzika 2, stavební tepelná technika. 1. vyd. Brno: VUTIUM, 2000. 420 s. ISBN 80-214-1649-1.
- [4] 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 Pórovité kamenivo
- [6] POPOV, M, L ZAKREVSKEYA, V VAGANOV, S HEMPEL a V MECHTCHERINE. Performance of Lightweight Concrete based on Granulated Foamglass. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2015, 96

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Práce se bude zabývat vývojem lehkých kompozitů pojených organickými pojivy s využitím lehkého ostrohranného kameniva na bázi pěnového skla. Na základě provedené literární rešerše a průzkumu trhu bude navržen optimální kompozit s využitím kameniva frakce pod 4 mm. Cílem bude navrhnout kompozit s dobrým poměrem tepelně izolačních, akustických a mechanických vlastností. Tepelná vodivost navrženého kompozitu by měla být nižší než $0,11 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ a objemová hmotnost nižší než 400 kg/m^3 . Teoreticky navržený kompozit bude v rámci práce vyroben za laboratorních podmínek a budou ověřeny jeho klíčové vlastnosti. V závěru práce bude provedeno zhodnocení výsledků včetně návrhu uplatnění navrženého kompozitu ve stavební konstrukci. (Rozsah práce 40-50 stran)

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

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

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá vývojem pojení pěnového skla organickými pojivy. V teoretické části je popsáno využití recyklovaného skla k výrobě kameniva na bázi pěnového skla. Dále je popsána jeho výroba, vlastnosti a použití ve stavebnictví. Práce se dále zaměřuje na druhy organických pojiv a jejich vlastnosti. V praktické části je navrhnout optimální poměr mezi pojivem a plnivem a následné stanovení požadovaných vlastností výsledného kompozitu.

KLÍČOVÁ SLOVA

pěnové sklo, organická pojiva, pórovité kamenivo, sklo

ABSTRACT

Bachelor's thesis is concerned of development of bonding foam glass with organic binders. The theoretical part describes the use of recycled glass to produce aggregates based on foam glass. It also describes its production, properties and use in construction. The work also focuses on the types of organic binders and their properties. In the practical part, the optimal ratio between the binder and the filler is proposed and the subsequent assessment of the required properties of the final composite.

KEYWORDS

foam glass, organic binder, porous aggregates, glass

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Michaela Szotkowská *Vývoj lehkých kompozitů z kameniva na bázi pěnového skla.*
Brno, 2020. 56 s., 5 s. příl. Bakalářská 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 bakalářské práce s názvem *Vývoj lehkých kompozitů z kameniva na bázi pěnového skla* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 22.5. 2020

Michaela Szotkowská
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Vývoj lehkých kompozitů z kameniva na bázi pěnového skla* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 22.5. 2020

Michaela Szotkowská
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěla poděkovat vedoucímu své bakalářské práce doc. Ing. Jiřímu Zachovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné připomínky a rady při vypracování práce. Dále bych chtěla poděkovat Ing. Janu Bubeníkovi za rady při zpracování. Velké díky patří také rodině a kamarádům, kteří mě po celou dobu studia podporovali.

V Brně dne 22.5.2020

.....

(podpis autora)

OBSAH

I. TEORETICKÁ ČÁST	10
1 ÚVOD	10
2 SKLO.....	11
2.1 VLASTNOSTI SKLA.....	11
2.1.1 MECHANICKÉ VLASTNOSTI.....	12
2.1.2 FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI	12
2.2 SLOŽENÍ SKLA.....	12
2.3 TECHNOLOGIE VÝROBY SKLA	13
2.4 DRUHY SKLA	14
2.5 SKLO VE STAVEBNICTVÍ	15
2.5.1 KOMPAKTNÍ SKLO	15
2.5.2 IZOLAČNÍ SKLENĚNÉ MATERIÁLY	16
2.6 ODPADOVÉ HOSPODÁŘSTVÍ.....	17
2.6.1 RECYKLACE SKLA.....	17
3 PĚNOVÉ SKLO	18
3.1 VLASTNOSTI PĚNOVÉHO SKLA.....	18
3.2 VÝROBA KAMENIVA Z PĚNOVÉHO SKLA.....	19
3.2.1 NA GRANULAČNÍM TALÍŘI	19
3.2.2 VÝROBA KAMENIVA NA ROUNU	21
3.3 VÝROBCI PĚNOVÉHO SKLA.....	22
3.4 POUŽITÍ PĚNOVÉHO SKLA VE STAVEBNICTVÍ.....	23
3.4.1 KAMENIVO Z PĚNOVÉHO SKLA	23
3.4.2 DESKY Z PĚNOVÉHO SKLA	23
4 LEHKÉ KOMPOZITY	24
4.1 ULTRA LEHKÉ BETONY	25
4.2 POJIVA	25
4.2.1 ORGANICKÁ POJIVA	25
4.2.1.1 PRYSKYŘICE.....	25
4.2.1.2 ASFALTY.....	27
4.2.2 ANORGANICKÁ POJIVA.....	29
4.2.2.1 SÁDRA A SÍRANOVÁ POJIVA	29
4.2.2.2 VÁPNA.....	29
4.2.2.3 CEMENTY	29
II. PRAKTICKÁ ČÁST	31
5 CÍL PRÁCE.....	31
6 METODIKA PRÁCE.....	31
6.1 NÁVRH VSTUPNÍCH SUROVIN.....	31

6.1.1	EPOXIDOVÁ PRYSKYŘICE.....	32
6.1.2	POLYESTEROVÁ PRYSKYŘICE.....	32
6.1.3	KAMENIVO Z PĚNOVÉHO SKLA	32
6.2	ZJIŠTĚNÍ OPTIMÁLNÍ DÁVKY POJIVA.....	33
6.3	ZKUŠEBNÍ RECEPTURY	34
6.4	ZKUŠEBNÍ TĚLESA	35
6.5	ZKOUŠENÍ VZORKŮ.....	36
6.5.1	STANOVENÍ OBJEMOVÉ HMOTNOSTI.....	36
6.5.2	STANOVENÍ PEVNOSTI V TLAKU	37
6.5.3	STANOVENÍ PEVNOSTI V TAHU ZA OHYBU A V TLAKU	39
6.5.4	STANOVENÍ TEPELNÉ VODIVOSTI.....	40
6.5.5	STANOVENÍ ČINITELE ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI.....	41
7	VÝSLEDKY ZKOUŠEK A VYHODNOCENÍ.....	43
7.1	DISKUSE VÝSLEDKŮ	50
8	ZÁVĚR.....	51
9	CITOVANÁ LITERATURA.....	52
	SEZNAM TABULEK.....	55
	SEZNAM GRAFŮ	55
	SEZNAM OBRÁZKŮ	55
	SEZNAM PŘÍLOH.....	56
	Příloha 1: Technický list NaturOut	56
	Příloha 2: Technický list Polyester 109.....	56

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ÚVOD

V dnešní době se zvyšuje celosvětová produkce odpadů, proto se čím dál víc zajímáme, jak tento odpad dále využít, a také jak zamezit vzniku dalšího odpadu. Význam recyklace skla je velmi vysoký z hlediska ekologického, energetického i technického. Jedním ze způsobů využití odpadního skla, které není možné recyklovat přímo ve sklářském průmyslu je výroba pěnového skla. V rámci této technologie je možné recyklovat skoro 100 % odpadního skla, které je v rámci klasických sklářských technologií jen velmi špatně použitelné, nebo je jeho úprava do podoby druhotné suroviny příliš finančně a energeticky náročná. Tato práce se věnuje možnosti využití kameniva na bázi pěnového skla do výrobků použitelných ve stavebnictví.

V případě pěnového skla jsou velice nízká objemová hmotnost a výborné tepelně izolační vlastnosti dány pórovitou strukturou. Tento porézní materiál se vyrábí ze skleněné moučky, která při tepelném zpracování v peci, a pomocí napěňovacích přísad, zvětšuje svůj objem a vytváří póry. Tímto pěnové sklo získává své vlastnosti, přičemž je možné vyrábět pěnová skla/kameniva různých tvarů (pomocí různých výrobních technologií) a různých vlastností (vlivem různého složení vstupních surovin a vlivem různého teplotního režimu a maximální teploty ve výrobní peci).

Cílem této bakalářské práce je vývoj lehkých kompozitů s využitím lehkého ostrohranného kameniva na bázi pěnového skla, které bude pojeno organickými pojivy. Na základě literární rešerše a průzkumu trhu bude navržen optimální kompozit. Tento kompozit by měl mít nízkou objemovou hmotnost a dobré tepelně izolační vlastnosti. Dle získaných vlastností kompozitu by mělo být provedeno zhodnocení výsledků včetně návrhu uplatnění ve stavební konstrukci.

Z praktického hlediska je cílem vytvoření takové receptury pro materiál, který by bylo možné využít ve stavební konstrukci, a který by zároveň splňoval všechny požadované nároky.

2 SKLO

Sklo je jeden z nejstarších materiálů používaných v průmyslu, stavebnictví, architektuře i umění. První zmínky o skle se datují do roku 7000 př. n. l., kde používali lidé sklo jako nástroj například na klíny a škrabky. Okolo roku 1500 př. n. l. se z něj v Mezopotámii začaly vyrábět nádoby. Díky zavedení elektronicky řízených strojů v druhé polovině 20. století, začala stoupat produkce skla. Výzkum nových metod pro výrobu skla přispívá k ochraně životního prostředí, kde sklo je jeho nedílnou součástí [1] [2] [3].

2.1 VLASTNOSTI SKLA

Vlastnosti skleněné hmoty lze ovlivnit složením sklářských surovin, zejména volbou jednotlivých složek a jejich poměrného množství. Sklo je materiál anorganický amorfni a inertní, který se vyznačuje relativně vysokou propustností světla, tuhostí a tvrdostí během běžných teplot, křehkostí, odolností vůči chemickým a povětrnostním vlivům (vůči vodě a vzduchu). Má vysokou pevnost v tlaku, je homogenní a má relativně nízkou měrnou tepelnou a elektrickou vodivost.

Sklo má výborné hygienické vlastnosti, což umožňuje použití v potravinářském průmyslu. Je odolné vůči působení kyselin kromě kyseliny fluorovodíkové, která sklo leptá. Vlastnosti obecně charakteristické pro sklo jsou uvedené v tabulce 1 [1] [4] [5].

Tabulka 1: Obecné vlastnosti skel [4]

Vlastnost	Hodnota
Hustota	2000–3600 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	$6 \cdot 10^{-6}$ – $9 \cdot 10^{-6}$ K ⁻¹
Součinitel tepelné vodivosti	0,6 – 0,9 W/(m·K)
Poissonův součinitel	0,14 – 0,32 (-)
Tvrdost podle Mohsovy stupnice	6–7

2.1.1 MECHANICKÉ VLASTNOSTI

Mechanické vlastnosti bývají hlavním parametrem jeho využití. Jedná se o tuhost a tvrdost, které umožňují použití ve stavebnictví. Nevýhodou je křehkost, která souvisí s nízkou pevností v tahu a vysokým modulem pružnosti cca 70 GPa [4].

Pro určení mechanických vlastností je potřeba znát jeho hustotu, složení skla, modul pružnosti, Poissonovu konstantu, pevnosti v tahu, tlaku, ohybu i smyku, rázovou houževnatost a další faktory. Hustota je značně závislá na složení surovin. Nejnižší hustotu má sklo křemenné 2200 kg/m³, nejvyšší hustoty dosahuje sklo olovnaté, až 6000 kg/m³. Pevnost skla závisí zejména na tloušťce skla, ale i na vlastnostech povrchu, na opracování hran a vadách ve skle [5].

2.1.2 FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI

Sklo se jeví jako tuhý homogenní materiál. Při rychlém ochlazení, změny oxidy, které tvoří strukturu (například oxidy boru, křemíku, fosforu apod.) stav z roztaveného do tuhého, aniž by krystalizovaly. Z toho plyne, že sklo nevytváří krystalickou mřížku. Vlastnosti fyzikální a chemické se mění v závislosti na přidání modifikujících složek (například oxidy hliníku nebo vápníku), které ovlivňují pevnost vazeb a strukturu [6].

2.2 SLOŽENÍ SKLA

Základními surovinami pro výrobu je tzv. sklářský kmen, čeřiva, barviva a drcené odpadní skleněné střepy. Jedná se o složení běžných skel, tj. soustav skel SiO₂–CaO–Na₂O a SiO₂–CaO–K₂O.

Do surovinové směsi sklářského kmene je CaO přidáváno za účelem chemické odolnosti a rozpustnosti skla a je přidáváno ve formě jemně mletého vápence. Další součástí jsou alkálie, které ovlivňují teplotu tavení vsázky.

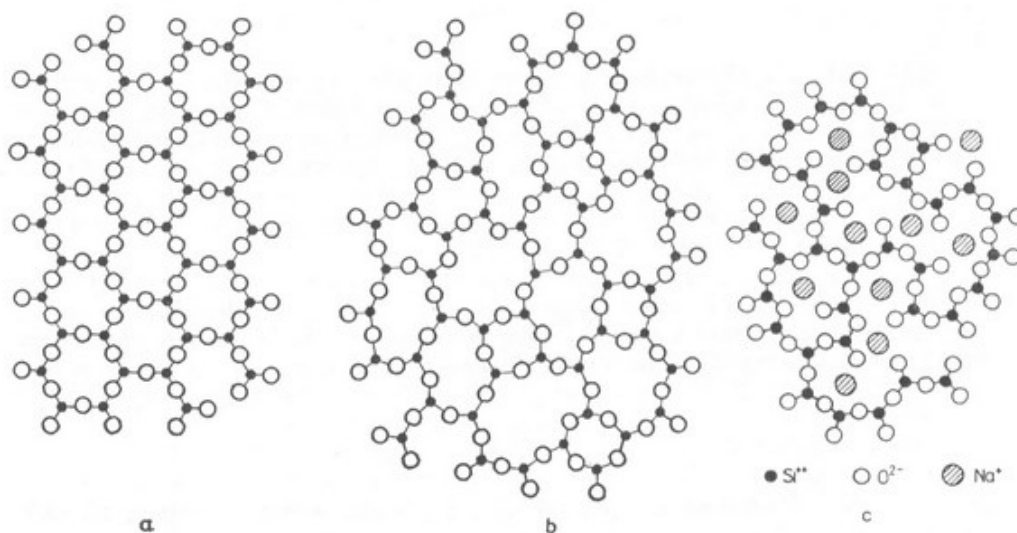
Účelem použití čeřiva je odstranění bublinek a nečistot z roztavené skloviny a zároveň její homogenizace. Používají se sírany (sodný, vápenatý, barnatý) nebo dusičnany – ledky (draselný, vápenatý, barnatý).

Mezi požadavky na sklo mimo jiné patří i zbarvení skla. Tento požadavek zajišťují barviva, která jsou po chemické stránce elementární kovy nebo oxidy a soli kovů. Jedná se například o mangan, který dává sklu ametystové zbarvení, kobalt (modré zbarvení), měď (tyrkysově nebo červené), zlato (tmavě červené) a stříbro (žluté).

Další částí vsázky je i drcené odpadní sklo (skleněné střepy), které se přidávají zejména za účelem využití a recyklace skleněného odpadu. Zároveň dochází k úspoře primárních surovin, a také ke zrychlení tavícího procesu a zlepšení počáteční homogenity roztavené skloviny [1].

2.3 TECHNOLOGIE VÝROBY SKLA

Pro výrobu skla se uplatňují čtyři technologické postupy – příprava vsázky a její dávkování, tavení, tvarování a chlazení skla. Sklářský kmen a přísady se v požadovaném poměru nadávkuje, pomelou, vysuší, zhomogenizují v mísicích zařízeních a případně dále upraví. Takto upravená směs se taví ve sklářských tavicích pecích. Tavicí proces se dělí na tři fáze – samotné tavení, čření a chlazení. Tavení probíhá za vysokých teplot v rozmezí 1400 až 1600 °C. Tvarování skla se provádí ručně nebo strojně, a to foukáním, válcováním, tažením, litím nebo lisováním. Využívá se závislosti viskozity skloviny na teplotě a nesmí nastat krystalizace. Během chlazení skla dochází k růstu viskozity na tak vysokou hodnotu, že se materiál navenek jeví jako pevná látka. Ale na rozdíl od krystalických látek, nemá pravidelnou strukturu, symetrické ani periodické uspořádání základních stavebních jednotek na delší vzdálenosti (obrázek 1). Jedná se o řízené chlazení, které probíhá v teplotním intervalu 700 – 400 °C ve speciálních chladicích pecích, za účelem odstranění nebo zabránění vnitřního pnutí [1] [5].



Obrázek 1: Znázornění rozdílů mezi strukturou křemene – krystalický SiO_2 (a), skelného SiO_2 (b) a sodnokřemičitého skla (c) [1]

Tabulka 2: Technologie výroby vybraných výrobků ze skla [5]

Název technologie	Název výrobku
Tažením, litím, válcováním	Ploché sklo
Foukáním	Duté sklo
Lisováním	Skleněné tvarovky, tašky, užítkové předměty
Rozfoukáváním	Skleněná vlákna
Odstředováním	Krátkovláknenná skleněná vlna

2.4 DRUHY SKLA

Skla můžeme dělit dle chemismu průmyslových skel na křemenné sklo, boritokřemičité sklo, křemičité sodnovápenaté sklo, křišťálové sklo a vodní sklo [1].

- KŘIŠŤÁLOVÉ SKLO

Jedná se o velmi kvalitní druh skla, které je čiré a bezbarvé. Má vysoký lesk a propouští světlo. Kdysi se jednalo o draselnovápenatý nebo draselnoolovnatý křišťál. Dnešní křišťál obsahuje více než 24 % PbO a má index lomu vyšší než 1,545. Používá se v umění a v dekoračních nebo užitkových předmětech[1].

- BORITOKŘEMIČITÉ SKLO

Obsahuje oxid boritý 10–15 %, oxid křemičitý 70–80 %, Na₂O nebo K₂O 4–8 % a Al₂O₃ 2–7 %. Sklo je velmi odolné vůči chemické korozi a teplotním změnám, má nízký koeficient tepelné roztažnosti. Používá se k výrobě laboratorního skla, farmaceutických obalů, nádobí, svítidel apod [7].

- KŘEMENNÉ SKLO

Jedná se o čistý SiO₂ ve formě křišťálu nebo žilného křemene, který se taví kolem teploty 2000 °C a používá se pro výrobu osvětlovacích výbojek, v chemickém průmyslu, pro UV aplikace a v optických kabelech [1] [8].

- VODNÍ SKLO

Rozpustné sklo Na₂O – SiO₂ se vyskytuje na trhu pod reklamním názvem vodní sklo. Vyrábí se tavením sklářského písku ve sklářské vanové peci při teplotě 1400–1600 °C za přidání alkalických tavidel, soda (uhličitan sodný) nebo potaš (uhličitan draselný). Vyrábí se dvěma způsoby, výrobou z PKS/D nebo hydrotermální reakcí. Používá se jako přísada do pracích, čistících a odmašťovacích prostředků, také jako pojivo ve slévárnách při výrobě svařovacích drátů či pískových forem. V čistírnách odpadních vod se používá jako odstraňovač těžkých kovů. Ve stavebnictví pro výrobu tmelů, suchých maltových směsí, nátěrových hmot apod [1] [9].

- SODNOVÁPENATÉ SKLO

Jedná se o Na₂O – CaO – SiO₂ a je tedy tvořeno oxidem křemičitým (71-75 %), oxidem sodným (12-16 %), oxidem vápenatým (10-15 %) a přísadami ovlivňujícími specifické vlastnosti. Používá se pro výrobu lahví, sklenic, stolního skla, plochého skla apod. Vyrábí se ve velkokapacitních tavicích agregátech s kapacitou tavení více jak 20 tun za den [7].

2.5 SKLO VE STAVEBNICTVÍ

Ve stavebnictví je sklo velmi rozšířené a v dnešní době ho najdeme snad v každé pozemní stavbě. Nejčastější je kompaktní tabulové sklo používané jako výplň oken a dveří. Kromě toho se používá ve stavebnictví i řada výrobků na bázi skla jako jsou obklady, zásypy a prosvětlovací prvky [4] [5].

2.5.1 KOMPAKTNÍ SKLO

Nejrozšířenější je ploché sklo tažené, válcované nebo float, dále pak tvarované sklo [5].

- PLOCHÉ SKLO TAŽENÉ

Pro zasklívání oken, dveří, stěn a výkladních skříní se používá především sklo o tloušťce 4 mm. Je rovné, hladké, průhledné a čiré. Dle tloušťky se dělí na tenké, střední a tlusté (viz. tabulka). Tento druh skla je výchozím materiálem pro výrobu dalších skel. Povrch skla se různě upravuje za účelem matného efektu nebo potlačení průhlednosti. Patří sem matové, ledové, determální, zrcadlové, tvrzené a vrstvené neprůstřelné sklo [5].

Tabulka 3: Druhy plochého taženého skla [5]

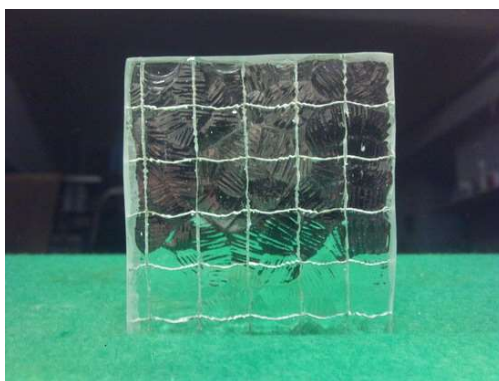
Druh skla	Tloušťka skla [mm]	Použití skla
Tenké	0,7 – 1,35	Výjimečně
Střední	2 – 4	Zasklívání oken a dveří
Tlusté	5 - 20	Zasklívání výloh

- PLOCHÉ VÁLCOVANÉ SKLO

Vyrábí se kontinuálním válcováním mezi dvěma válci jako vzorované a surové lité. Využívá se k zasklívání konstrukcí uvnitř i vně budov, jako jsou například světlíky, výplně dveří, vrat, stěnových přepážek atd. Skla jsou neprůhledná a jejich propustnost se pohybuje mezi 75 – 88 %.

Dalším druhem plochého válcovaného skla je drátové sklo, do kterého se při výrobě tabule zaválcuje drátěná síť. Tato síť zajišťuje soudržnost tabule a skla při rozbití. Drátové sklo se používá na zasklívání průmyslových hal, skladišť, balkónů, schodišť, ale také jako vnější fasádní obkladový materiál v kovových rámech.

Opakní sklo je druh plochého válcovaného skla s jednou plochou hladkou a druhou rýhovanou pro lepší přilnavost k lepicímu materiálu. Je neprůhledné, nebo slabě průsvitné a barevné. Používá se jako vnitřní obklad stěn, na které se kladou vysoké hygienické požadavky [5].



Obrázek 2: Drátové sklo [10]

2.5.2 IZOLAČNÍ SKLENĚNÉ MATERIÁLY

Do izolačních materiálů vyrobených ze skla se řadí výrobky z pěnového skla a materiály ze skleněných vláken, tedy skelná vata. Pěnovým sklem se zabývá třetí část této práce.

Skelná vata se vyrábí ze směsi písku a recyklovaných skelných stěpů, které se taví při teplotě okolo 1450 °C. Následně se tavenina přivede do rozvlákňovacího stroje, kde vznikají vlákna, která se dále pojí s pojivem a vytváří rohož, jež je protahována přes vytvrzovací pec, čímž vzniká průběžný pás skelné vaty. Ten se dále řeže na pásy nebo desky požadovaných rozměrů. Skelná vata se používá jako izolace podlah, šikmých střech, fasád a příček [11].



Obrázek 3: Skelná vata firmy ISOVER a její použití v konstrukci [12]

2.6 ODPADOVÉ HOSPODÁŘSTVÍ

Odpadové hospodářství se zabývá předcházením vzniku odpadů, nakládáním s nimi a také jejich ukládáním na skládky a jejich kontrolou. Prosazuje základní principy ochrany lidského zdraví a životního prostředí. V ČR vznikl první zákon o odpadovém hospodářství v roce 1991, jednalo se o zákon č. 238/1991 Sb. Zákon o odpadech [13] (byl nahrazen zákonem č. 185/2001 Sb. [14]).

Odpady vznikají prakticky veškerou lidskou činností. Dále vznikají průmyslovou a stavební činností, zemědělstvím i při běžném životě lidí v konzumní společnosti. Za účelem pravidelného vyhodnocení odpadového hospodářství je vedena evidence o produkci a nakládání s odpady [15].

Tabulka 4: Celková produkce všech odpadů v ČR 2012 – 2018 [15]

Rok	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Produkce odpadů [tis. t]	30 023	30 621	32 028	37 338	34 242	34 513	37 785

V roce 2018 bylo v ČR vyprodukováno celkem 37,8 milionu tun odpadů všech druhů. Nebezpečné odpady z toho činily 1,8 milionů tun a ostatní odpady 36 milionů tun. To je 166,4 kg nebezpečného odpadu a 3 389,4 kg ostatního odpadu na jednoho obyvatele ČR. Významnou skupinou jsou komunální odpady. V roce 2018 obyvatelé ČR vyprodukovali 5,8 milionů tun komunálních odpadů tj. 544 kg na jednoho obyvatele. Z toho bylo dále využito 50,3 %, materiálově 38,6 %, energeticky 11,7 % a zbytek odpadů byl uložen na skládkách (49,7 %).

Smyslem zpětného odběru výrobků je motivovat výrobce k produkci výrobků s co možná nejnižším obsahem nebezpečných látek, výrobků k opětovnému použití nebo k návrhu recyklovatelných výrobků se vznikem minimálního odpadu.

Sklo je díky skvělé recyklovatelnosti jednou z nejpoužívanějších obalových surovin. V roce 2018 bylo na území ČR vyříděno cca 176 000 tun skleněného odpadu a z toho bylo 139 000 tun skla zrecyklováno, což je 79 % [15].

Výrobní technologie pěnového skla spočívá ve zpracování odpadových střepek právě z obalového skla, kde mezistupněm výroby je skleněná moučka a konečným výrobkem pěnové sklo [16].

2.6.1 RECYKLACE SKLA

Sklo je materiál recyklovatelný a dá se opakovaně používat. Cílem perspektivního oběhového hospodářství je znova využít suroviny po skončení jejich životnosti. V dnešní době tvoří recyklované sklo více než 60 % surovinové směsi, při výrobě skla nového.

Použití recyklovaných skleněných střepek při výrobě skla má mnoho výhod. Recyklací se snižuje množství odpadu a tím se zlepšuje ekologická bilance. Spotřeba energie při tavení recyklovaného skla je menší než při tavení primárních surovin (10 %

střepů snižuje energetickou náročnost výroby o cca 3 %), tím se šetří energie i primární zdroje k výrobě skla [3] [17].

Odpadní sklo určené k recyklaci se dělí na:

- Sklo z tříděného komunálního odpadu v obcích (směsné, čiré), které má vysoký obsah organických látek (papír, plast, zbytky potravin), anorganických látek (kamení, porcelán, keramika) a kovů (hliník).
- Zelené, hnědé a bílé sklo živnostenského původu (restaurace, hotely) - kvalitní poměrně čisté sklo s obsahem papíru a hliníku.
- Výmět z výroby skleněných obalů (láhve, sklenice) - ze skláren vyrábějících obalová skla, případně ze skláren vyrábějících skla ozdobná – úplně čisté sklo bez příměsí a znečištění.
- Sklo z odpadu výroby plochých skel (pro stavební a automobilový průmysl).
- Sklo z obrazovek, zářivek, chemická skla, olovnatá skla apod. [16].

3 PĚNOVÉ SKLO

Pěnové sklo je izolační pórovitý materiál vyroben ze skla (používá se až 100 % recyklovaného skla), napěňovacích a tavicích přísad. Je tvořen jak pevnou, tak plynou fází. Pevnou fází tvoří sklo s přísadami, která uzavírá póry v struktuře. Jednotlivé póry jsou vyplněny vzduchem (plynná fáze). Tímto získává materiál unikátní vlastnosti jako je nízká objemová hmotnost, výborná tepelná izolačnost, mrazuvzdornost, požární odolnost a vysoká pevnost v tlaku v porovnání s ostatními tepelně izolačními materiály.

Pěnové sklo lze dále recyklovat, což z něj dělá ekologický materiál, který stářím neztrácí své vlastnosti.

Z pěnového skla lze vyrobit desky, které nahrazují např. funkci pěnového polystyrénu, skelné nebo minerální vaty. Desky lze použít jako izolaci plochých střech, či zateplení soklů staveb atd. Dalším výrobkem z pěnového skla je kamenivo/granulát pro použití jako kamenivo do lehkých kompozitů, na podsypy pod základové desky, zásypy kleneb nebo trámových stropů, pod podlahové konstrukce a další [5] [16] [18].

3.1 VLASTNOSTI PĚNOVÉHO SKLA

Vynikající tepelná izolačnost je zajištěna pórovitou strukturou s póry vyplněnými vzduchem. Pěnové sklo je nehořlavé dle ČSN EN 13501-1 Klasifikace podle výsledků zkoušek reakce na oheň [19] patří do třídy A1 a bod měknutí má víc jak 700 °C. Má vysokou pevnost v tlaku, dobrou tvarovou stabilitu a při hutnění se materiál vzájemně propojí a vznikne kompaktní vysoce únosná vrstva. Je odolné vůči působení chemikálií v kapalném i plynném stavu. Bez problémů odolává ropným produktům, ředidlům a běžným kyselinám, s výjimkou kyseliny fluorovodíkové. Je zdravotně nezávadné, nevyklučuje žádné škodlivé látky a nenapadají ho žádné plísně, houby či hmyz a hlodavci. Pěnové sklo je znovu recyklovatelné a časem neztrácí své vlastnosti ani kvalitu [5] [20] [21].

Tabulka 5: Vlastnosti kameniva z pěnového skla deklarované výrobci [16] [20] [22]

VLASTNOSTI KAMENIVA Z PĚNOVÉHO SKLA DEKLAROVANÉ VÝROBCI							
Výrobce	GEOCELL	A-GLASS	REFAGLASS				jednotky
Frakce	0 - 63	10 - 63	0 - 4	4 - 16	16 - 32	0 - 63	[mm]
Sypná hmotnost	150	150	460	170	160	140	[kg/m ³]
Součinitel tepelné vodivosti	0,080	0,080	0,096	0,080	0,081	0,080	[W/(m·K)]
Nasákavost	0*						[%]
Odolnost proti drcení	0,57	0,64 – 1,30	1,97	0,80	0,81	0,70	[MPa]
Třída reakce na oheň	A1						[-]

*Dle technických listů výrobců.

3.2 VÝROBA KAMENIVA Z PĚNOVÉHO SKLA

3.2.1 NA GRANULAČNÍM TALÍŘI

Proces začíná vytříděním recyklovaného skla po spotřebiteli, zbaveno nečistot a nežádoucích příměsí. Sklo je vysušeno a rozemleto v kulovém mlýně na velmi jemnou moučku <36 μm. Dalším krokem je smíchání skleněné moučky se silikátovým pojivem a nadouvadlem do viskózní kaše. Směs se postupně dávkuje na granulační talíř, kde se kašovitá směs formuje do kulovitých zrn. Velikost zrn můžeme ovlivnit průměrem talíře, úhlem sklonu sbalkovacího talíře nebo počtem otáček za minutu. K dosažení velikosti zrn pod 1 mm se používá rozprašovací sušička.

Po procesu granulace přecházejí kuličky do rotační pece, která je zahřátá na více než 900 °C. V peci expandují na 200 % objemu. Potom se takto naexpandované granule ochladí, prosejí skrz síta a vytřídí podle velikostí zrna na jednotlivé frakce, většinou od 0,04 mm do 4 mm [5] [20] [21] [23].

Tabulka 6: Chemické složení kameniva na bázi pěnového skla [23]

Složka	Množství při vysušení na 105 °C [%]
SiO ₂	70-75
Na ₂ O	10-15
CaO	7-11
Al ₂ O ₃	0,5-5
MgO	0-5
K ₂ O	0-4
Ztráta žíháním	<0,1

Kamenivo vyrobené na granulačním talíři je kvalitní výrobek s vynikajícími vlastnostmi. Podle sypané hmotnosti se součinitel tepelné vodivosti pohybuje v rozmezí od $\lambda=0,07$ do $0,096 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$. Při sypané hmotnosti 190 až $530 \text{ kg}/\text{m}^3$ má kamenivo odolnost proti drcení od $1,4$ do $2,8 \text{ MPa}$. Další vlastnosti jsou zdravotní nezávadnost, odolnost vůči mrazu, vlhkosti, teplu, stárnutí, bakteriím a hmyzu. Materiál je inertní a recyklovatelný [23].



Obrázek 4: Rozdělení na jednotlivé frakce podle velikostí zrn [23]

3.2.2 VÝROBA KAMENIVA NA ROUNU

Jako výchozí materiál se používá recyklované sklo různorodé kvality ze skláren i z tříděného komunálního odpadu. Sklo se nejdříve protřídí a pomele v kulovém mlýně na jemnou moučku s velikostí zrna 10 až 90 mikrometrů. Výsledná barva skleněné moučky je vždy šedobílá, nezávisle na vstupních barvách drcených skel.

Skleněná moučka se smíchá s napěňovací a tavící přísadou např. s vodním sklem a glycerinem a nanese se na rouno o tloušťce vrstvy cca 10 centimetrů. Tavící přísady zlepšují vlastnosti materiálu například vyšší pevnost, lepší pórovitost, nízkou sypanou hmotnost a další. Po nanesení směsi na rouno, jede rouno do pece o teplotě 800 – 850 °C, kde díky teplotě a napěňovací přísadě dojde k expanzi materiálu. Během výjezdu z pece okolo teploty 300-400 °C, dochází v důsledku rychlého ochlazení k praskání a vznikají trhliny, které umožňují rozpad vytvořené vrstvy na rounu na granulát frakce 10 až 60 mm. Celý proces od smíchání směsi až po výsledné pěnové sklo trvá cca 50 minut. [16] [20] [24].



Obrázek 5: Kamenivo z pěnového skla vyrobené na rounu [16]

Struktura pěnového skla je složena z velkého množství skleněných buněk, které jsou vyplněny vzduchem a tím brání prostupu tepla. Součinitel tepelné vodivosti volně sypaného kameniva je $\lambda=0,08 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Tento systém buněk vyplněný vzduchem zajišťuje i nízkou sypanou hmotnost, která se pohybuje okolo 150 kg/m^3 . Nasákavost ovlivňujeme počátečním složením skla, typem pěnidla a druhem tepelného zpracování [16] [20] [25] [26].

3.3 VÝROBCI PĚNOVÉHO SKLA

Výrobci pěnového skla dodávají své výrobky pod určenými obchodními názvy. Liší se v jednotlivých detailech výrobků, způsoby výroby a distribucí, ale v podstatě jde o obdobný výrobek. V ČR jsou tři hlavní výrobci pěnového skla - Foamglas, Refaglass a A-glass [27].

Firma A-GLASS vyrábí granulát z pěnového skla od společnosti A-glass Recycling s.r.o. Štěrk z pěnového skla dodává ve frakci 0 – 63 mm o sypané hmotnosti 150 kg/m³. Dalším sortimentem jsou desky, které dodávají na trh o rozměrech 800 x 600 mm v tloušťkách 40, 60, 80, 100, 120 a 140 mm. Mají vysokou únosnost v tlaku, dají se snadno opracovávat, řezat apod. s použitím například na ploché střechy, izolace podlah atd. [20].

REFAGLASS od české firmy Recifa a.s., vyrábí štěrk o čtyřech různých zrnitostech (0-63, 16-32, 4-16 a 0-4 mm). Dále dodávají na trh i desky o rozměru 800 x 600 mm v tloušťkách 40, 60, 80, 100 a 120 mm s tepelnou vodivostí 0,060 W/(m·K). Firma Refaglass dále nabízí skelnou moučku jako výchozí produkt pro výrobu pěnového skla. Skelná moučka je vyrobena z recyklovaných skleněných střepek pomletá na zrna <90 µm. Skelnou moučku lze využít v různých průmyslových oborech např. k výrobě skelné vaty, jako pojivo pro pryskyřice, přísadu do lepidel a barev nebo pro pyrotechnický a kosmetický průmysl [16].

FOAMGLAS od společnosti Pittsburgh Corning, která se zabývá dodávkami pro stavebnictví a průmysl, kromě granulátu vyrábí i desky z pěnového skla, trubkové pláště a další tvarově a rozměrově specifické segmenty. Dalšími produkty jsou příslušenství jako tmely, lepidla, kotvy, kotevní plechy, povrchové stěrky a spousta dalších [28].

Dále působí na trhu řada zahraničních výrobců. Pod jménem PORAVER vystupuje firma Dennert Poraver GmbH. Společnost Poraver se věnuje výrobě anorganických lehkých plniv se sypanou hmotností od 190 do 530 kg/m³. Granulát z expandovaného skla je dostupný ve frakcích 0,04-8 mm. Dále vyrábí i granulát z metakaolinu jako doplňkový cementový materiál pod názvem metapor, což je foukané sklo, kde se metakaolin používá jako reaktivní a pucolánové aditivum. Firma se věnuje i výrobě hasících prostředků z expandovaného skleněného granulátu [23].

GEOCELL Schaumglas BmbH vyrábí pouze pěnové sklo ve formě granulátu o velikosti 0 – 60 mm. Tento granulát se používá jako materiál pro izolaci pod základové desky [22].

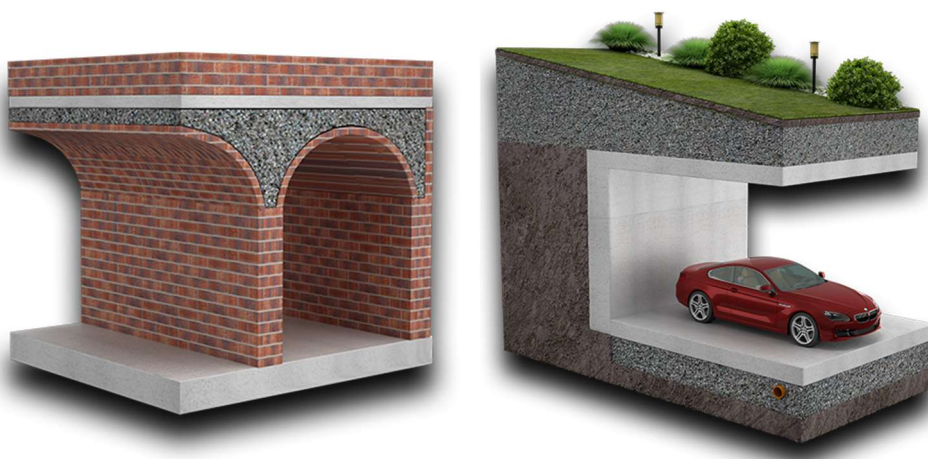
Německá firma LIAVER vyrábí granulát z expandovaného skla frakce 0,1-0,3 mm, 0,25-0,5 mm, 0,5-1 mm, 1-2 mm, 2-4 mm, 4-8 mm a 8-16 mm. Nejčastější použití granulátu je do suchých malt, lehčených omítek, lehčených betonů, izolačních betonů, násypů, prefabrikovaných produktů atd. Během tepelného zpracování je kamenivo přetaveno do desek prodáváno pod názvem Reapor. Tyto desky jsou odolné proti vlhkosti, mají výborné mechanické vlastnosti a stabilitu, jsou nehořlavé, recyklovatelné a snadno opracovatelné [24].

3.4 POUŽITÍ PĚNOVÉHO SKLA VE STAVEBNICTVÍ

3.4.1 KAMENIVO Z PĚNOVÉHO SKLA

Kamenivo vyrobeno na granulačním talíři se nejčastěji používá na suché malty, lehčené omítky, lehčené betony, izolační betony, násypy, prefabrikované produkty, protipožární desky, lehké stavební desky, těsnění vývrtů, jako spojené nebo volné pojivo a spousta dalších [20].

Kamenivo vyrobeno na rounu se využívá v pozemních stavbách jako tepelná izolace základových desek ve formě násypu. Jako izolant ve střešních konstrukcích např. u trámových stropů, ale i kleneb a zelených střech. Dále se používá pro izolaci podlah, stěn a podhledů. V porovnání s jinými tepelněizolačními materiály např. s Liaporem má obdobnou pořizovací cenu. Tudiž jím lze nahradit jiné tepelně izolační materiály. Pro izolaci na použití za extrémních jak kladných, tak záporných teplot je však nenahraditelný. Lze ho také použít na obsypy bazénů do lehkých mezerovitých betonů nebo do tepelně izolačních omítek. Díky jeho vlastnostem se používá i jako ochranný štít, tepelná izolace potrubí a teplovodů, nebo ho lze také použít jako vsyp do pozinkovaných klecí, které slouží jako protihlukové stěny [16] [20] [25] [26].



Obrázek 6: Zásyp klenby, izolace zelené střechy i základové desky z kameniva na bázi pěnového skla [20]

3.4.2 DESKY Z PĚNOVÉHO SKLA

Desky z pěnového skla se vyrábí z obdobných vstupních surovin jako kamenivo z pěnového skla. Skelná moučka je smíchána s pěnicí a tavící přísadou a v tenké vrstvě rozprostřena do ocelové formy. Formy se směsí se pálí v peci na cca 1000 °C, kde dochází k natavení skloviny a k současné expanzi směsi. Směs zvětší svůj objem cca dvacetinásobně a vyplní celou formu. Poté dochází k pomalému chlazení z pálicí teploty na 20 °C. Po vychlazení jsou bloky pěnového skla obroušeny, zbaveny povrchové vrstvy a dále řezány na desky různých formátu, nejčastěji 800 x 600 mm

s konstantní tloušťkou od 30 do 160 mm. Z vychlazených bloků se můžou dále řezat spádové desky, klíny nebo jiné tvarovky [29].

Tepelně izolační desky mají vysokou únosnost v tlaku, jsou nehořlavé, nenasákavé a odolné proti chemikáliím i hlodavcům. Dají se lehce opracovávat, řezat apod. Izolační desky se používají jako izolace plochých střech, podlah a jako zateplení stěn z venkovní i z vnitřní strany. Jsou vhodné i na izolační lemy a protipožární obklady konstrukcí [20].



Obrázek 7: Desky z pěnového skla různé tloušťky [20]

4 LEHKÉ KOMPOZITY

Kompozit je definován jako soustava, sestavená ze směsi nebo z kombinace minimálně dvou nebo více zřetelně lišících se materiálů. Vůči sobě jsou nerozpustné a liší se svým chemickým složením. Abychom mohli nazvat materiál jako kompozitní, musí splňovat tři kritéria. První kritérium se vztahuje na všechny složky materiálu, které musí být zastoupeny v dostatečných velikostech (min. >5 %). Druhé kritérium říká, že všechny fáze jednotlivých složek mají odlišné vlastnosti a v důsledku toho má konečný kompozit jiné vlastnosti než jeho složky. A poslední kritérium je, že různé kompozity jsou produkovány mícháním a spojováním jednotlivých složek různými prostředky. Základem kompozitního materiálu je minimálně jedna nespojitá fáze nebo více, rozptýlená ve fázi spojitě. Spojitě fázi se říká matrice nebo-li pojivo. Nespojitou fázi nazýváme výztuha nebo-li plnivo [30].

Kompozity se klasifikují dle materiálu matrice na:

- kompozity s organickou matricí,
- kompozity s kovovou matricí,
- kompozity s keramickou a silikátovou matricí.

Dále se dělí dle druhu zpevňujícího komponentu na:

- kompozity zpevněné vlákny (vláknové kompozity),
- kompozity zpevněné krátkými vlákny (whiskery),

- kompozity s částicemi (lehčené polymery, pěnobeton),
- disperzně zpevněné kompozity (oxidy kovů),
- eutektické kompozity, vyráběné krystalizací [31].

4.1 ULTRA LEHKÉ BETONY

Jsou definovány jako ultralehké betony s objemovou hmotností $<1200 \text{ kg/m}^3$ a označují se zkratkou ULC (z angličtiny ultra light concrete). Odvíjí se od navrhování lehkého betonu, který se dělí na tepelně izolační lehké betony, lehké betony střední pevnosti a konstrukční lehké betony. Dále se dělí podle způsobu vylehčení na hutný lehký beton, mezerovitý lehký beton, pěnobeton a pórobeton. Dosažení tak nízké objemové hmotnosti dochází většinou nahrazením hutného kameniva kamenivem pórovitým. Od běžných betonů se liší v mnoha ohledech, nejvíce ve způsobu porušení, kde se v pracovním diagramu nenachází sestupná větev. V poslední době vede vývoj ULC ke dvěma směrům. První je vývoj lehkých betonů s výbornými mechanickými vlastnostmi především pevnosti v tlaku a druhý směr vývoje vede k lehkým betonům s vynikajícími tepelně-izolačními vlastnostmi [32].

4.2 POJIVA

Pod pojmem pojiva se označují látky, které lze převést do tekuté nebo kašovitě formy, z které pak přecházejí do formy pevné. V důsledku tohoto procesu mají pojiva schopnost spojit nesoudržnou soustavu v kompaktní celek. Tento proces zpevňování se skládá ze dvou na sebe navazujících fází – tuhnutí a tvrdnutí [33].

4.2.1 ORGANICKÁ POJIVA

4.2.1.1 PRYSKYŘICE

Pojem pryskyřice označuje výměšek, který produkuje řada rostlin, zejména jehličnaté stromy obsahující uhlovodíky. Používá se například pro výrobu lepidel, laků a parfémů. Pod pojmem pryskyřice se také označují syntetické výrobky podobných vlastností např. fenolické pryskyřice, aminoplasty, epoxidové pryskyřice, polyesterové pryskyřice, silikonové pryskyřice a další [34].

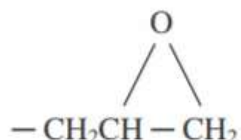
Polymery jsou plastické látky složeny z molekul atomů nebo skupin v tak velkém počtu, že při odebrání jedné nebo více konstitučních jednotek, se nezmění jejich fyzikální ani chemické vlastnosti. Dělí se na termoplasty, které mění své vlastnosti se změnou teploty a termosety, které se změnou teploty své vlastnosti nemění. Dále se dělí na elastomery a plastomery. Plasty jsou za běžných podmínek tvrdé, často i křehké a při zvýšené teplotě se stávají plastickými a taky tvarovatelnými. Termoplasty nazýváme látky, u kterých je změna z plastického stavu do stavu tuhého opakovaně vratná. Je-li tato změna nevratná jedná se o reaktoplasty, kde patří i pryskyřice [35] [36].

Epoxidové pryskyřice - EP jsou pryskyřičné látky s řetězci obsahujícími zpravidla více než jednu epoxidovou skupinu. Jedná se o velmi reaktivní skupinu, která

reaguje s velkým množstvím látek a určuje její vlastnosti a využití. Mezi jejich přednosti patří velká adheze k mnoha materiálům, chemická odolnost, objemová stálost s minimálním smrštěním během vytvrzování, dobrá tepelná odolnost a tvrdost. Používají se především jako lepidla, nátěrové, zalévací a lisovací hmoty, jako pojiva skelných laminátů, ale taky k výrobě laků. Během vytvrzování nedochází k velkému smrštění a po vytvrzení mají vynikající přilnavost ke sklu, kovů, keramice aj.

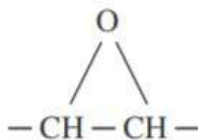
Dělí se na dvě skupiny:

- pryskyřice vzniklé reakcí epichlorhydrinu s vhodnými surovinami



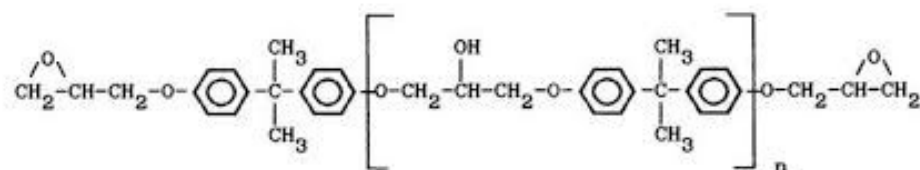
Obrázek 8: Typy obsahující glycidové skupiny [36]

- pryskyřice vyrobené epoxidací nenasycených sloučenin



Obrázek 9: Typy obsahující epoxidové skupiny [36]

Epoxidové pryskyřice jsou bezbarvé až nažloutlé látky s konzistencí kapalin až tvrdých, ale křehkých látek. Jsou prakticky neomezeně skladovatelné a nízkomolekulární typy jsou rozpustné v aromatických uhlovodících, vysokomolekulární typy v esterech a ketonech.



Obrázek 10: Idealizovaná podoba epoxidové pryskyřice [37]

Poměry mezi molekulami jednotlivých komponent ovlivňují molekulovou hmotnost a tím se ovlivňují i vlastnosti pryskyřice. Vytvrzení epoxidových pryskyřic probíhá buď polyadací sloučenin s aktivním atomem na epoxidové skupiny, polymerací epoxidových skupin nebo polykondenzací hydroxylových skupin. Jako tvrdidla se používají polyaminy, anhydridy polykarboxylových kyselin fenol-, močovino-, a melaminoformaldehydové pryskyřice. Za běžné teploty proběhne vytvrzení z větší částí během několika hodin, úplné během několika dnů. Vytvrzení se dá urychlit zvýšením

teploty. Epoxidové pryskyřice odolávají zásadám i zředěným roztokům anorganických i organických kyselin. Velký vliv na odolnost pryskyřice má druh tvrdidla. Např. tvrdidla s aromatickým jádrem zvyšují teplotní odolnost [34] [36] [37].

Furanové pryskyřice vznikají z výchozích monomerů s furanovým cyklem jako kondenzační produkty furfuralu nebo furfuryalkoholu. Jedná se o nízkomolekulární látky, kapalné až tuhé konzistence, které vytvářejí tvrdé, nerozpustné a netavitelné produkty černé barvy. Podmínkou tvorby těchto produktů je přítomnost kyselých nebo kysele reagujících solí. Vytvrzené polymery mají dobrou tepelnou odolnost, vynikající odolnost proti kyselým i alkalickým prostředím a odolávají i řadě chemikáliím a rozpouštědlům. Používají se v prostorách, které jsou náročné na chemickou odolnost a kde nevadí jejich černá barva. Využívají se jako tmely, lisovací hmoty, skelné lamináty pro potrubí i konstrukce, jako impregnační roztoky a nátěrové hmoty.

Polyestery jsou polymery s esterovými vazbami v hlavních řetězcích. Dělí se na lineární a termoplastické a na reaktoplastické, rozvětvené a zasíťované.

Polyesterové pryskyřice – UP vznikají polyesterifikací nenasycených dikarboxylových kyselin nebo z nenasycených polyesterů, rozpuštěných v monomeru, které jsou schopné kopolymerace, díky čemuž dojde k vytvrzení pryskyřice. V praxi se polyesterová pryskyřice nepřipravuje jen z nenasycených polyesterů, ale ze směsi, která obsahuje i aromatické složky (např. ftalanhydrid). Po několika hodinách při 210 °C dochází k ukončení polyesterifikace, pak se polyester ochladí na 90 °C a rozpustí se v reaktivním monomeru (např. v styrenu) v poměru 7:3. Po úplném rozpuštění je výsledkem reaktoplastická polyesterová pryskyřice, která má bezbarvou až nažloutlou barvu a konzistenci viskózní kapaliny. Vytvrzování probíhá kopolymerací, iniciuje se organickými peroxidy nejčastěji dibenzoylperoxidem a při vytvrzování za běžných teplot se přidává ještě urychlovač.

Polyesterové pryskyřice se používají k výrobě bižuterie, knoflíků, jako zalévací hmoty, jako pojivo umělého kamene z minerální drti, na výrobu obkládaček, litých podlah, plastbetonu, k výrobě výrobků vyztužených skleněnými vlákny (např. střešní krytiny) a k výrobě tmelů, lepidel a nátěrových hmot

Silikonové pryskyřice mají rozvětvené až zasíťované makromolekuly díky hydrolýzy směsi dvoj- a troj- funkčních monomerů. Z chemického hlediska se jedná o polymethylfenylsiloxany s koncovými skupinami většinou hydroxylovými. Silikonové pryskyřice se dodávají jako roztok v toluenu o koncentraci 50 % až 70 % a jejich molární hmotnost se pohybuje od 1,5 do 3 kg·mol⁻¹. Po vytvrzení tato pryskyřice dobře odolává povětrnostním vlivům, dlouhodobě odolává teplotám až 200 °C, krátkodobě i 300 °C a má dobré elektroizolační vlastnosti. Používá se jako součást motorů za vysokých teplot v podobě vypalovacích laků nebo skelných laminátů. Dále se používá v podobě nátěrů např. pekařských forem a plechů, nástrojů ke zpracování plastů, kaučuku atd. [36] [37].

4.2.1.2 ASFALTY

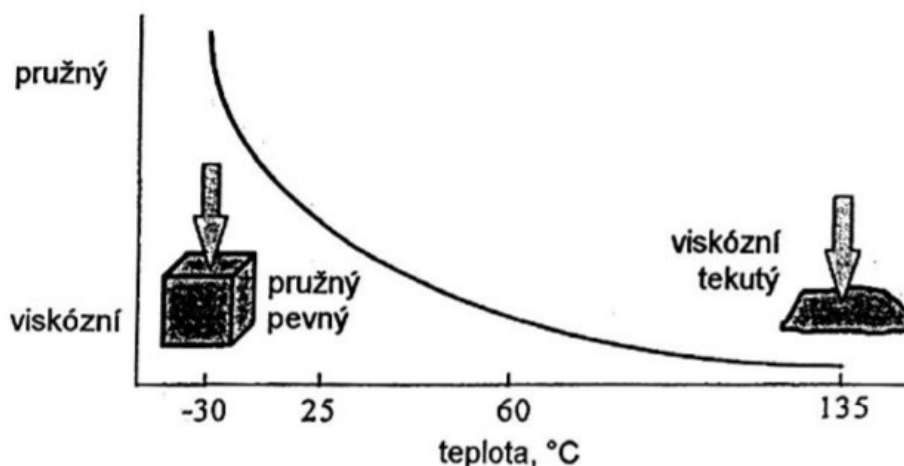
Asfaltové pojivo se definuje jako koloidní směs vysoce molekulárních uhlovodíků, kterému se se změnou teploty mění viskoelastické chování. Směs je složena až z tisíce sloučenin, které se dělí na tekuté složky označované jako maltény (např. olej, pryskyřice) a pevné složky, kterým se říká asfaltény.

Asfalty se dělí na přírodní a ropné asfalty. Přírodní asfalty se vyskytují zřídka, největším zdrojem je jezero Trinidad. Získává se zahřátím na 160 °C a zbavením hrubých nečistot a organických zbytků prosetím přes síta. Takto vzniklý asphalt je příliš tvrdý na použití jako pojivo, proto se míchá s měkkými ropnými asfalty. Ropné asfalty se vyrábí destilací ropy, které existují ve třech látkových složeních. Jsou to asfaltické ropy, poloasfaltické ropy a neasfaltické. Dle druhu výroby se asfalty dělí na destilační, polofoukané, foukané a modifikované.

Mezi nejdůležitější vlastnost asfaltového pojiva patří teplotní citlivost, proto se při jednotlivých zkouškách vždy píše teplotní údaj. Za nízkých teplot se asfaltové pojivo chová jako pružná látka a za vysokých teplot jako kapalina. Za běžných teplot má obojaké chování, tedy viskoelastické.

Na asfaltových pojivech se provádí dva druhy zkoušek, zkoušky konvenční a zkoušky funkční. Mezi konvenční zkoušky patří např. penetrace, bod měknutí, bod lámavosti, viskozita apod. a mezi funkční zkoušky patří simulace různých stavů během výroby asfaltů např. únavové vlastnosti a oxidativní stárnutí. Postupy a popisy zkoušení jsou uvedeny v normě ČSN 73 6160 – Zkoušení asfaltových směsí [38].

Se zvyšujícími požadavky se musí zvyšovat i kvalita asfaltu a běžně vyráběné asfalty nestačí se svými vlastnostmi, proto začaly vznikat modifikované asfalty. Modifikované asfalty jsou asfalty s přidanými přísadami, které zlepšují určité vlastnosti např. mají lepší přilnavost ke kamenivu, mají nižší teplotní citlivost a křehkost, vyšší bod měknutí, lepší odolnost proti vzniku stálých deformací atd. Nejběžnějším typem modifikátoru jsou polymery, které se dělí do dvou skupin na termosetické polymery a termoplastické polymery.



Obrázek 11: Chování asfaltového pojiva v závislosti na teplotě

Dalším typem asfaltů jsou ředěné asfalty vyrobené z ropného asfaltu s benzinovými nebo petrolejovými přísadami. Mezi výhody použití ředěných asfaltů patří zpracování a použití za studena a možnost použití mokrého a kyselého kameniva. Nevýhodou použití ředěných asfaltů je, že jsou neekologické [39].

4.2.2 ANORGANICKÁ POJIVA

Ve stavební praxi převažují pojiva na anorganické bázi, které lze rozdělit na pojiva mechanická (například jíly a hlíny) a pojiva chemická (například sádra, cement atd.). U mechanických pojiv nedochází během tuhnutí a tvrdnutí ke změně chemické podstaty látky, na rozdíl od chemických, kde dochází k chemickým reakcím a vznikají nové minerální fáze, respektive nové chemické sloučeniny [33].

4.2.2.1 SÁDRA A SÍRANOVÁ POJIVA

Sádra a síranová pojiva patří mezi vzdušné maltoviny. Jedná se o anorganické práškové pojivo vzniklé částečnou nebo úplnou dehydratací přírodního nebo průmyslového sádrovce $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Ke kalcinaci sádrovce může docházet například v rotačních nebo šachtových pecích, ve vařácích nebo autoklávech apod. Podle způsobu tepelného zpracování vznikají dvě formy hemihydrátu, α -sádra a β -sádra.

Nevýhodou sádry je citlivost na vlhkost, kde ve více vlhkých prostorách dochází ke snížení pevností nebo ke korozi výztuže. Sádra má nízkou tepelnou vodivost, nízkou objemovou hmotnost díky vysoké pórovitosti a malou zvukovou pohltivost. Ve stavebnictví se používá především k výrobě sádrokartonových a sádrovláknitých desek, samonivelačních potěrů a vnitřních omítek [33].

4.2.2.2 VÁPNA

Vápna dělíme na vzdušná a hydraulická. Vzdušné vápno vzniká pálením vysokoprocenních nebo dolomitických vápenců pod mez slinutí (teplota okolo 1000-1250 °C). Podle obsahu MgO dělíme vzdušné vápno na vápno vzdušné bílé (obsah $\text{MgO} < 7\%$) a dolomitické vzdušné vápno (obsah $\text{MgO} > 7\%$). Další částí výroby je hašení vápna, kde z páleného vápna CaO vzniká hydroxid vápenatý Ca(OH)_2 . Hašení lze provádět za mokra nebo za sucha.

Hydraulické vápno vzniká smícháním vzdušného vápna s vhodnými přísadami nebo pálením vápenců. Dnes se používá při rekonstrukcích historických staveb nebo při péči o památky, kde se klade důraz na použití, co nejautentičtějšího materiálu. Jinak se v dnešní době hydraulické vápno nahrazuje cementem [33].

4.2.2.3 CEMENTY

Cementy jsou v dnešní době nejpoužívanějším pojivem a jsou popsány v normě v ČSN EN 197-1 Cement – Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití [40]. Patří mezi tzv. hydraulická pojiva, tj. jemně mletá látka, která po smíchání s vodou vytváří kaši, která v důsledku hydratačních reakcí tuhne a tvrdne i pod vodou, kde si po zatvrdnutí zachovává svoji pevnost i stálost. Tvrdnutí cementu je zajištěno hydratací vápenatých silikátů a aluminátů. Jedná se tedy o účinné složky sloučenin CaO a SiO_2 , Al_2O_3 a Fe_2O_3 , kde celkový obsah aktivního oxidu vápenatého a oxidu křemičitého musí být v cementu minimálně 50 % hmotnosti.

Cementy se vyrábí z vápence nebo slínovce, který se nadrtí, pomele, zhomogenizuje a vypálí v peci okolo teploty 1450 °C. Tímto vznikne tzv. slínek, který se

po ochlazení a odležení pomele s přísadami a příměsemi na jemnou moučku, čímž vzniká cement. Dělíme je do pěti hlavních skupin na CEM I – CEM V. Dále se cement vyrábí ve třech pevnostních třídách – 32,5, 42,5 a 52,5 MPa, kde jednotlivá čísla uvádí pevnost v tlaku cementu po 28 dnech hydratace. Pokud má cement vysoké počáteční pevnosti označuje se dále písmenem R jako rychlovazný, když se jedná o cement s normální rychlostí tuhnutí označujeme ho písmenem N nebo naopak s nízkou počáteční pevností je označován písmenem L.

Do speciálních cementů patří například silniční cement, síranuvzdorný cement pro použití v prostředí s vysokou koncentrací síranových iontů, hlinitanový cement, rozpínavý cement, bílý cement, barnatý cement apod. [33].

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍL PRÁCE

Práce se zabývá vývojem lehkých kompozitů pojených organickými pojivy s využitím lehkého ostrohranného kameniva na bázi pěnového skla. Na základě provedené literární rešerše a průzkumu trhu bude navržen optimální kompozit s využitím kameniva frakce pod 4 mm. Cílem bude navrhnout kompozit s dobrým poměrem tepelně izolačních, akustických a mechanických vlastností. Tepelná vodivost navrženého kompozitu by měla být nižší než $0,11 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ a objemová hmotnost nižší než 400 kg/m^3 . Teoreticky navržený kompozit bude v rámci práce vyroben za laboratorních podmínek a budou ověřeny jeho klíčové vlastnosti. V závěru práce bude provedeno zhodnocení výsledků včetně návrhu uplatnění navrženého kompozitu ve stavební konstrukci.

6 METODIKA PRÁCE

Na základě teoretické rešerše možných pojivových systémů a po předchozích zkušenostech s pojením pěnového skla z Výzkumného ústavu stavebních hmot, a.s. [41], kde pojili frakci kameniva 4/16 z pěnového skla s polyuretanovou a epoxidovou pryskyřicí, proběhl výběr pojiva. V téhle práci byla použita frakce kameniva 2/4 mm, která vznikla odsítováním z frakce 0/4 mm dodanou firmou REFAGLASS. Jako pojivo byla použita epoxidová a polyesterová pryskyřice. Cílem je navrhnout kompozit s dobrým poměrem tepelně izolačních, akustických a mechanických vlastností.

Praktická část byla provedena v následujících krocích:

- zjištění optimálního poměru pojiva a plniva,
- návrh vstupních surovin,
- návrh zkušebních receptur,
- výroba zkušebních těles,
- stanovení vlastností zkušebních vzorků,
- vyhodnocení a diskuse výsledků.

6.1 NÁVRH VSTUPNÍCH SUROVIN

Na základě teoretické rešerše a požadavků zadání práce byly zvoleny z organických pojiv epoxidová a polyesterová pryskyřice. Obě pojiva byla dodána firmou Stachema. Jednalo se konkrétně o Polyester 109 – Polyesterovou pryskyřici (trojsložkovou) a o Epoxidovou pryskyřici NaturOut pojivo SET (dvousložkovou).

Jako plnivo bylo použito kamenivo na bázi pěnového skla frakce 2/4 mm (frakce byla odsítována z frakce 0-4 mm). Kamenivo v kompozitu zajišťuje vylehčení a tepelnou izolačnost materiálu.

6.1.1 EPOXIDOVÁ PRYSKYŘICE

NaturOut pojivo SET od firmy Stachema se používá pro pojení kamenných koberců vhodné pro venkovní zpevněné a únosné plochy. Hodí se i na realizaci pokládek u bazénů, na schodech, terasách apod. NaturOut má vysokou mechanickou odolnost a vysokou estetickou úroveň. Má čistý a přírodní vzhled. Jedná se o dvousložkovou pryskyřici, skládající se ze složky A - pojiva a složky B - tvrdidla. Složky se dávkují v poměru A:B – 7:3. Další popis výrobku a použití, které zaručuje firma Stachema je jako součást přílohy číslo 1.

6.1.2 POLYESTEROVÁ PRYSKYŘICE

Polyester 109 dodané firmou Stachema se používá k výrobě technických laminátů nebo k jejich opravám např. lodí, kapotází apod. Dále se používá k výrobě deskových materiálů z umělého nebo přírodního kamene. Tato pryskyřice je čirá až nažloutlá viskózní kapalina s charakteristickým pachem styrenu. Jedná se o trojsložkovou pryskyřici skládající se z pojiva, urychlovače a iniciátoru. Dávkují se v poměru 100:0,25:1 – pojivo:urychlovač:iniciátor. Zpracovatelnost se pohybuje okolo 8-15 minut při +20 °C a vytvrzení okolo 15-23 minut. Další vlastnosti polyesterové pryskyřice od firmy Stachema lze nalézt v příloze číslo 2.

6.1.3 KAMENIVO Z PĚNOVÉHO SKLA

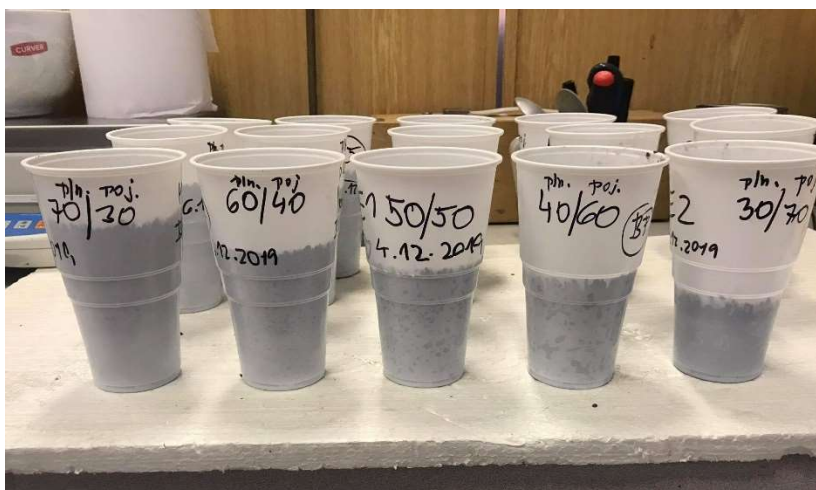
Na výrobu směsi bylo použito ostrohranné kamenivo frakce 2/4 mm, které vzniklo přesítováním frakce 0/4 mm dodané firmou REFAGLASS. Frakce 0/4 mm vzniká jako odpad při drcení pěnového skla, v praxi nemá větší využití, částečně se vrací do výroby pěnového skla. Jedná se o kamenivo ze stoprocentně recyklovaného skla. Kamenivo se do kompozitu přidává za účelem vylehčení, ke tvorbě výztuhy a taky díky němu kompozit získává lepší tepelnou izolačnost.



Obrázek 12: Pěnové sklo frakce 2/4 mm

6.2 ZJIŠTĚNÍ OPTIMÁLNÍ DÁVKY POJIVA

V prvních krocích bylo zjišťováno optimální množství pojiva a plniva a jejich vhodné dávky, které zaručí soudržnost a manipulační pevnost materiálu. Bylo zkoumáno několik kombinací plniv a pojiv za účelem stanovení jejich nevhodnějších poměrů. První vzorky byly provedeny do plastových kelímků, kde byl zachován jejich hmotnostní poměr.



Obrázek 13: Stanovení optimálního plniva a pojiva

Tabulka 7: Složení receptury s epoxidovou pryskyřicí v různých poměrech

Poměr plnivo:pojivo [% hm.]	Plnivo [g]	Pojivo		
		Složka A:B [g]		Celkem [g]
30/70	36	58,8	25,2	84
40/60	48	50,4	21,6	72
50/50	60	42,0	18,0	60
60/40	72	33,6	14,4	48
70/30	84	25,2	10,8	36

Tabulka 8: Složení receptury s polyesterovou pryskyřicí v různých poměrech

Poměr plnivo:pojivo [% hm.]	Plnivo [g]	Pojivo [g]			
		Pryskyřice	Urychlovač	Iniciátor	Celkem
30/70	36	82,96	0,21	0,83	84
40/60	48	71,10	0,18	0,71	72
50/50	60	59,26	0,15	0,59	60
60/40	72	47,41	0,12	0,47	48
70/30	84	35,56	0,09	0,36	36

Dále na těchto vzorcích byla stanovena objemová hmotnost.

Tabulka 9: Objemové hmotnosti zkoušených receptur při různých poměrech

Poměr plnivo:pojivo [% hm.]	Pryskyřice	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Pryskyřice	Objemová hmotnost [kg/m ³]
30/70	Epoxidová	670	Polyesterová	610
40/60		480		430
50/50		430		400
60/40		360		310
70/30		290		300

Po zatvrdnutí byly zhodnoceny mechanické a vizuální vlastnosti. Při poměru 30/70 a 40/60 byla u obou receptur vysoká objemová hmotnost vzorků, tím byly vzorky hned vyřazeny z výběru. Vzorky z epoxidové pryskyřice vytvořené v poměru 40/60 měly stále vysokou objemovou hmotnost, tím byly vzorky opět vyřazeny. Z polyesterové pryskyřice vzorky v poměru 50/50 měly sice limitní objemovou hmotnost, ale vyřazeny nebyly, jelikož zrna kameniva ve vyšším poměru nebyla dostatečně obalena pojivem. Tedy pro vzorky z polyesterové pryskyřice byl použit optimální poměr plniva a pojiva 50/50. Vzorky vyrobeny z epoxidové pryskyřice v poměru 60/40 a 70/30 měly splňující objemovou hmotnost a rozhodující byla vizuální kontrola množství pojiva. Zrna ve vzorku s poměrem 70/30 nebyla dostatečně obalena pojivem, projevovalo se to drobením a nekompaktností vzorku. Tedy jako nejvhodnější poměr pro výrobu vzorku z epoxidové pryskyřice, který splňoval požadavky na objemovou hmotnost a zároveň zrna kameniva byla zcela obalena pojivem, byl vybrán poměr 60/40.

6.3 ZKUŠEBNÍ RECEPTURY

Nejprve byla určena vhodná dávka pojiva, kde byla snaha minimalizovat jeho množství a tím snížit cenu výsledného produktu při zachování požadovaných vlastností. Nejvhodnějším poměrem u epoxidové pryskyřice byl tedy zvolen poměr 60/40, u polyesterové poměr 50/50, kde zrna kameniva byla dostatečně obalena pojivem bez nadbytku pojiva, čímž se snižuje i cena výsledného kompozitu.

Výsledné receptury:

Tabulka 10: Receptura s epoxidovou pryskyřicí

Vstupní složky		Receptura	
		1 m ³	
Epoxidová pryskyřice		[kg]	
složka	procentuální poměr		
A	7	85,4	122,0
B	3	36,6	
Kamenivo REFAGLASS frakce 2-4 mm		183,0	

Tabulka 11: Receptura s polyesterovou pryskyřicí

Vstupní složky		Receptura	
		1 m ³	
Polyesterová pryskyřice		[kg]	
složka	poměr		
A	100,00	150,60	152,50
B	0,25	0,38	
C	1,00	1,51	
Kamenivo REFLAGLASS frakce 2-4 mm		152,50	

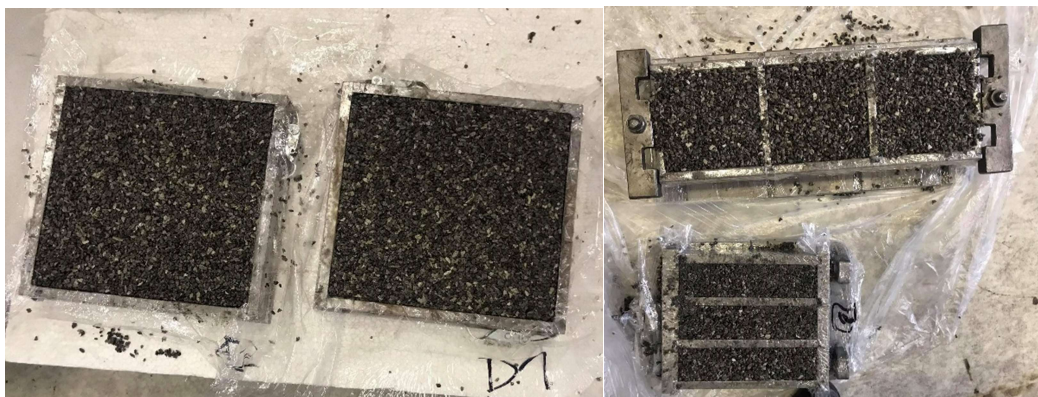
6.4 ZKUŠEBNÍ TĚLESA

Po stanovení optimálního poměru byly připraveny formy. Formy se musely opatřit tenkou polyethylenovou fólií, aby nedošlo k případnému poškození forem pryskyřicí. Po této úpravě byla namíchaná směs epoxidové pryskyřice s kamenivem a směs polyesterové pryskyřice s kamenivem. Při míchání směsi epoxidové pryskyřice se nejprve odvážilo množství kameniva, které se umístilo do větší nádoby, pak se odvážila složka A pryskyřice a pak složka B. Po důkladném smíchání složky A a B se smíchala s odváženým kamenivem. Výrobce uvádí míchání pomaloběžným míchadlem, aby nedošlo k vysokému zahřátí směsi a následné prudké exotermické reakci. Tedy směs byla míchána ručně pomocí metličky. Směs s polyesterovou pryskyřicí byla připravována obdobně, s výjimkou pryskyřice, která je trojsložková. Nejprve byla každá složka zvlášť odvážena, pak se do polyesteru vmíchal urychlovač a po důkladném smíchání se přidal iniciátor. Iniciátor a urychlovač se nesmí smíchat předem, protože by mohlo dojít k explozivnímu rozkladu.

Po důkladném promíchání, kde všechna zrna kameniva byla obalena pojivem, se formy plnily po jednotlivých vrstvách a každá vrstva se ručně hutnila dřevěným hranolem. Byly vytvořeny 3 krychle od každé receptury, na kterých byly po úplném vytvrzení stanoveny mechanické vlastnosti konkrétně pevnost v tlaku a objemová hmotnost. Dále byly vytvořeny od každé receptury 3 trámečky, které byly zatěžovány ohybem a na jejich šesti zlomcích byla stanovena pevnost v tlaku. Ze směsi epoxidové pryskyřice byly vytvořeny tři desky a ze směsi polyesterové pryskyřice dvě, na kterých byl stanoven součinitel tepelné vodivosti. Nakonec byly ze směsi vytvořeny tělesa ve tvaru válců pro stanovení akustických vlastností.

Zkušební tělesa:

- Krychle 100x100x100 mm, 6 ks
- Trámečky 40x40x160 mm, 6 ks
- Desky 200x200x35 mm, 5 ks
- Válce tloušťky 35 až 45 mm, 2 ks



Obrázek 14: Zhotovená zkušební tělesa

Odformování bylo provedeno pár dní od namíchání směsi, kdy vzorky byly už zcela zatvrdlé. Následně byla na vzorcích stanovena objemová hmotnost, pevnost v tlaku, pevnost v ohybu, součinitel tepelné vodivosti a činitel zvukové pohltivosti.



Obrázek 15: Vyhotovený zkušební vzorek

6.5 ZKOUŠENÍ VZORKŮ

6.5.1 STANOVENÍ OBJEMOVÉ HMOTNOSTI

Stanovení objemové hmotnosti bylo provedeno dle normy ČSN EN 1602: Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Stanovení objemové hmotnosti [42].

Pomůcky:

- posuvné měřítko,
- váhy.

Zkušební podmínky:

- teplota $(23 \pm 3) ^\circ\text{C}$, relativní vlhkost vzduchu $(50 \pm 5) \%$.

Postup měření:

Tělesa byla zvážena s přesností na 0,5 %, dále se změřily jejich rozměry v mm. Z rozměrů vzorků byl vypočítán objem a z těchto naměřených a vypočítaných hodnot byla stanovena objemová hmotnost vzorků dle vzorce:

$$\rho_v = \frac{m}{V}$$

kde:

m hmotnost zkušební tělesa v kg,

V objem zkušební tělesa v m³,

ρ_v objemová hmotnost v kg/m³.

6.5.2 STANOVENÍ PEVNOSTI V TLAKU

Zkouška tlakem byla stanovena dle normy ČSN EN 826: Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Zkouška tlakem [43].

Podstata zkoušky:

Podstatou zkoušky je, že tlaková síla působí danou rychlostí na plochu zkušební vzorku se stanovením maximální tlakové síly, kterou vzorek přenese. Je-li hodnota maximální síly menší jak 10 % deformace, je označována jako pevnost v tlaku a udává se příslušná deformace. Není-li žádné porušení před dosažením 10 % deformace, vypočítá se tedy napětí v tlaku při 10 % deformaci a jeho hodnota se udává jako napětí v tlaku při 10 % deformaci.

Pomůcky:

- zatěžovací stroj,
- snímač k měření posunutí,
- záznamové zařízení.

Zkušební podmínky:

- teplota (23 ± 5) °C, relativní vlhkost vzduchu (50 ± 5) %.

Zkušební tělesa:

- krychle o rozměrech 100x100x100 mm

Postup měření:

Nejdříve se změří rozměry vzorků v mm. Pak se vzorky umístí středově mezi desky zatěžovacího stroje. Zatíží se počátečním tlakem (250 ± 10) Pa, změří se tloušťka d_0 a pokud je deformace velká, může se snížit zatěžování na 50 Pa. Zatěžuje se konstantní rychlostí $v = 0,1 \cdot d_0$ za minutu. Zkouška trvá až k dosažení meze průtažnosti, čímž se stanoví pevnost v tlaku, nebo až se dosáhne 10 %, čímž se stanoví napětí v tlaku při 10% deformaci. Provede se záznam pracovního diagramu, ze kterého se stanoví poměrné stlačení.

Vyhodnocení:

Pevnost v tlaku se určí dle vzorce:

$$\sigma_m = \frac{10^3 \cdot F_m}{A_0}$$

kde:

F_m největší síla v N,

A_0 počáteční průřez zkušební vzorku v mm^2 ,

σ_m pevnost v tlaku v kPa.

Deformace ε_m se stanoví ze vztahu:

$$\varepsilon_m = \frac{X_m}{d_0} \cdot 100$$

kde:

X_m přetvoření při dosažení maximální síly v mm,

d_0 počáteční tloušťka vzorku v mm,

ε_m deformace v %.

Napětí při 10% deformaci se určí dle vztahu:

$$\sigma_{10} = \frac{10^3 \cdot F_{10}}{A_0}$$

kde:

F_{10} síla odpovídající 10% deformaci v N,

A_0 počáteční plocha zkušební vzorku v mm^2 ,

σ_{10} napětí při 10% deformaci v kPa.



Obrázek 16: Zkouška pevnosti v tlaku dle ČSN EN 826

6.5.3 STANOVENÍ PEVNOSTI V TAHU ZA OHYBU A V TLAKU

Stanovení pevnosti v tahu za ohybu bylo provedeno dle normy ČSN EN 1015-11 Zkušební metody malt pro zdivo – Část 11: Stanovení pevnosti zatvrdlých malt v tahu za ohybu a v tlaku [44].

Pomůcky:

- zatěžovací stroj,
- posuvací měřítko,
- snímač k měření síly.

Zkušební podmínky:

- teplota 23 ± 3 °C, relativní vlhkost vzduchu 50 ± 5 %.

Zkušební tělesa:

- trámce o rozměrech 40x40x160 mm

Postup měření:

Nejdříve se změří rozměry vzorků v mm. Trámce se vloží do zkušebního stroje, tak aby podélná osa trámce byla kolmo k podporám. Podpory jsou osově vzdáleny $100 \pm 0,5$ mm. Horní zatěžovací váleček je uložen tak, aby působil uprostřed podpor. Zatěžování probíhá rychlostí 10-50 N/s, tak aby došlo ke zlomení za 30-90 s. Výsledek je aritmetický průměr ze tří hodnot se zaokrouhlením s přesností na 0,1 MPa. Dále se na zlomcích provede zkouška v tlaku. Zlomky se do stroje umístí s pomocnými destičkami o tlačné ploše $16 \pm 0,1$ mm. Zatěžuje se rovnoměrně rychlostí 50-500 N/s, aby došlo ke zlomení za 30-90 s. Výsledkem je aritmetický průměr ze šesti hodnot, zaokrouhlený s přesností na 0,1MPa. Odlišuje-li se jeden výsledek o více jak 10 % od jejich průměrné hodnoty, tak se vyřadí a průměr se vypočítá ze zbývajících 5-ti měření.

Vyhodnocení:

Pevnost v tahu za ohybu se vyjádří ze vztahu:

$$R_f = \frac{1,5 \cdot F_f \cdot l}{b^3}$$

kde:

F_f zatížení při zlomení v N,

b strana čtvercového průřezu trámce v mm,

l vzdálenost mezi podporami v mm,

R_f pevnost v tahu za ohybu v MPa.

Pevnost v tlaku se vypočte ze vzorce:

$$R_c = \frac{F_c}{1600}$$

kde:

F_c největší zatížení vynaložené při porušení v N,

R_c pevnost v tlaku v MPa.



Obrázek 17: Zkouška pevnosti v tahu za ohybu dle ČSN EN 1015-11

6.5.4 STANOVENÍ TEPELNÉ VODIVOSTI

Tepelná vodivost byla stanovena dle ČSN EN 12667: Tepelné chování stavebních materiálů a výrobků – Stanovení tepelného odporu metodami chráněné topné desky a měřidla tepelného toku dle ISO 8301 [45].

Podstata zkoušky:

Jedná se o stacionární metodu, kde je nutné zajistit stálý tepelný tok. Součinitel tepelné vodivosti lze určit z průměrných hodnot účinné plochy topné desky, elektrického příkonu měrné desky, tloušťky vzorku, teploty plochy teplého povrchu vzorku a teploty chladného povrchu vzorku.

Postup zkoušení:

Vzorky byly změřeny a pomocí přístrojů a výpočtu byl stanoven jejich součinitel tepelné vodivosti, který byl vyjádřen z hustoty tepelného toku, teplotního rozdílu a tloušťky vzorku.

Vyhodnocení:

Hustota tepelného toku q_d se vypočte ze vzorce:

$$q_d = U \cdot k_m$$

kde:

U hodnota napětí na obou měřidlech hustoty tepelného toku ve V,

k_m kalibrační konstanta v $W/(V \cdot m^2)$,

q_d hustota tepelného toku v W/m^2 .

Součinitel tepelné vodivosti λ_{sam} se stanoví dle vztahu:

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

kde:

U hodnota napětí na obou měřidlech hustoty tepelného toku ve V,

k_m kalibrační konstanta v $W/(V \cdot m^2)$,

d_m tloušťka zkušební vzorku v m,

θ_{hd} hodnota povrchové teploty teplé plochy vzorku ve °C,

θ_{cd} hodnota povrchové teploty chladné plochy vzorku ve °C,

λ_{sam} hodnota součinitele tepelné vodivosti ve $W/(m \cdot K)$.

6.5.5 STANOVENÍ ČINITELE ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI

Činitel zvukové pohltivosti se stanovuje dle normy ČSN ISO 10534-1: Určování činitele zvukové pohltivosti a akustické impedance v impedančních trubcích – Část 1: Metoda poměru stojaté vlny [46].

Podstata zkoušky:

Podstata zkoušky tkví ve vytvoření stojatého vlnění v trubici, kde se na konci nachází vzorek. Činitel zvukové pohltivosti se vypočítá z maxima a minima akustického tlaku vlny. Výhoda této metody spočívá v její přesnosti i při zkoušení malých vzorků. Nevýhodou je stanovení jen kolmého dopadu rovinných akustických vln, který se v praxi moc nevyskytuje. Používá se pro kontrolu materiálů a akustických obkladů.

Pomůcky:

- Kuntova trubice složená z generátoru, analyzátoru, trubice, držák vzorku, sondy, mikrofonu, reproduktoru, vzorku a vzduchového polštáře,
- Interferometr složený z reproduktoru, kovové trubice, držáku vzorku a sondy.

Zkušební podmínky:

- teplota 20 ± 2 °C, relativní vlhkost vzduchu 50 ± 5 %, tlak $101,3 \pm 2,7$ kPa.

Zkušební tělesa:

- trámce o rozměrech 40x40x160 mm

Postup měření:

Zkoušení začíná vložením vzorku do držáku tak, aby boční strana lícovala s koncem trubice. Na generátoru se nastaví požadovaný kmitočet a akustickou sondou se pohybuje směrem ke vzorku a od vzorku, přičemž se stanoví maximální a minimální hodnota akustického tlaku.

Vyhodnocení:

Hladina akustického tlaku se stanoví:

$$\Delta L = L_{max} - L_{min}$$

kde:

L_{max} maximální hladina akustického tlaku v dB,

L_{min} minimální hladina akustického tlaku v dB.

Činitel zvukové pohltivosti se stanoví ze vztahu:

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

kde:

ΔL hladina akustického tlaku v dB,

α činitel zvukové pohltivosti [-].



Obrázek 18: Vzorčky pro zkoušku stanovení činitele zvukové pohltivosti dle ČSN ISO 10534-1

7 VÝSLEDKY ZKOUŠEK A VYHODNOCENÍ

Nejdříve byla stanovena objemová hmotnost podle normy ČSN EN 1602 na zkušebních tělesech ve formě kostek a trámečků.

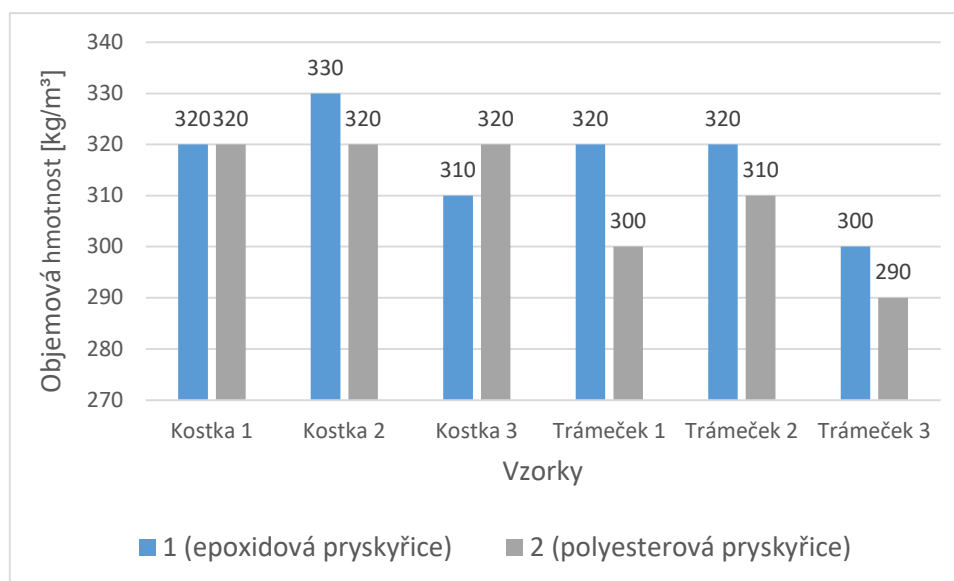


Obrázek 19: Vzorky pro stanovení objemové hmotnosti

Tabulka 12: Stanovená objemová hmotnost vzorků obou receptur dle normy ČSN EN 1602

Receptura	Vzorek	Rozměry tělesa [mm]			Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Průměrná objemová hmotnost [kg/m ³]
		b	h	l			
1 (epoxidová pryskyřice)	Kostka 1	99,24	102,70	102,70	0,33	320	320
	Kostka 2	100,18	100,18	103,36	0,34	330	
	Kostka 3	99,76	102,91	102,91	0,33	310	
	Trámeček 1	39,71	40,98	157,22	0,08	320	
	Trámeček 2	39,39	41,71	162,74	0,09	320	
	Trámeček 3	40,57	43,94	163,42	0,09	300	
2 (polyesterová pryskyřice)	Kostka 1	100,41	101,68	99,65	0,33	320	310
	Kostka 2	99,96	101,09	100,16	0,32	320	
	Kostka 3	102,29	100,51	100,06	0,32	320	
	Trámeček 1	40,71	41,15	158,32	0,08	300	
	Trámeček 2	41,13	41,65	158,35	0,08	310	
	Trámeček 3	40,87	41,44	157,63	0,08	290	

Graf 1: Zobrazení objemové hmotnosti jednotlivých vzorků receptur



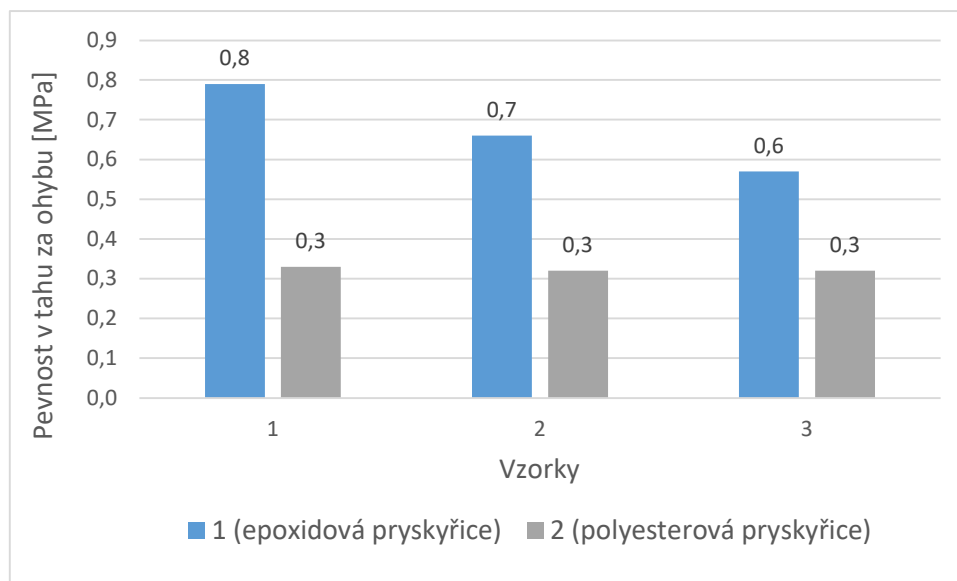
Objemová hmotnost obou zkušebních receptur se prováděla dle normy ČSN EN 1602. Výsledkem je průměrná hodnota ze tří vzorků krychlí a tří vzorků trámečků. Vzorky s epoxidovou pryskyřicí mají objemovou hmotnost 320 kg/m³ a vzorky s polyesterovou pryskyřicí mají nižší objemovou hmotnost a to 310 kg/m³. Obě receptury a z nich vytvořené vzorky splňují zadané požadavky práce.

Další zkouškou byla pevnost v tahu za ohybu, která se prováděla dle normy ČSN EN 1015-11.

Tabulka 13: Stanovená pevnost v tahu za ohybu dle normy ČSN EN 1015-11

Receptura	Vzorek	Síla [N]	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	Průměrná pevnost v tahu za ohybu [MPa]
1 (epoxidová pryskyřice)	1	350	0,8	0,7
	2	300	0,7	
	3	300	0,6	
2 (polyesterová pryskyřice)	1	150	0,3	0,3
	2	150	0,3	
	3	150	0,3	

Graf 2: Zobrazení pevnosti v tahu za ohybu jednotlivých vzorků



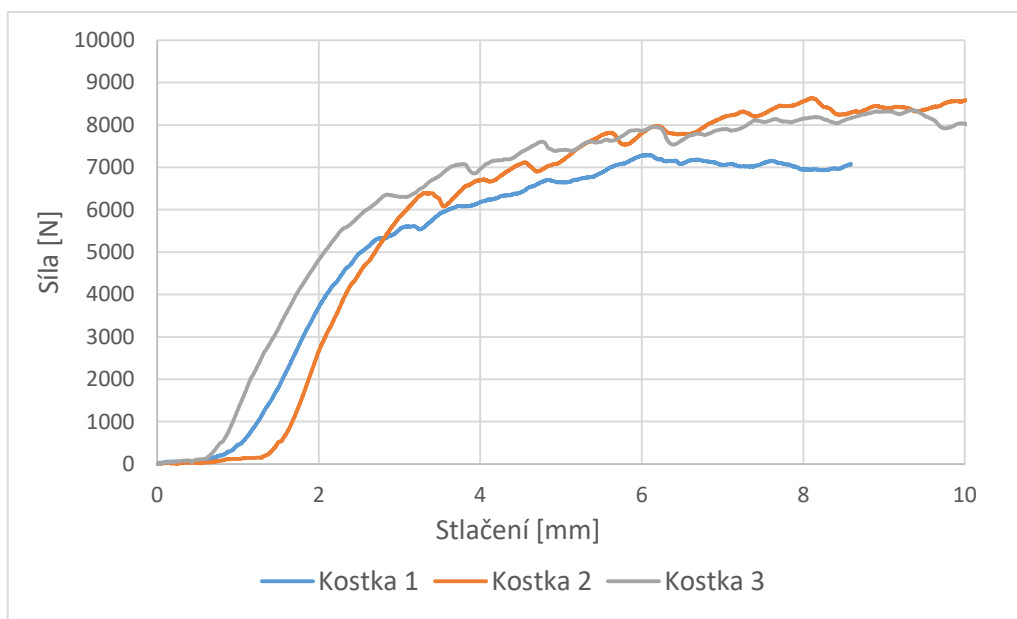
Pevnost v tahu za ohybu byla stanovována dle ČSN EN 1015-11 a jednalo se o tříbodový ohyb se vzdáleností podpor 100 mm. Receptura s epoxidovou pryskyřicí měla výslednou pevnost v tahu za ohybu 0,7 MPa, kdežto receptura s polyesterovou pryskyřicí jen 0,3 MPa.

Další prováděnou zkouškou byla zkouška pevnosti v tlaku. Vzhledem k povaze vzorku a jeho zrnitosti se použily dva postupy. První zkouška pevnosti v tlaku se prováděla na vzorcích ve formě krychlí podle normy ČSN EN 826. Druhá se prováděla na zlomcích trámečků dle normy ČSN EN 1015-11.

Tabulka 14: Přehled dosažených pevností v tlaku dle ČSN EN 826 a ČSN EN 1015-11

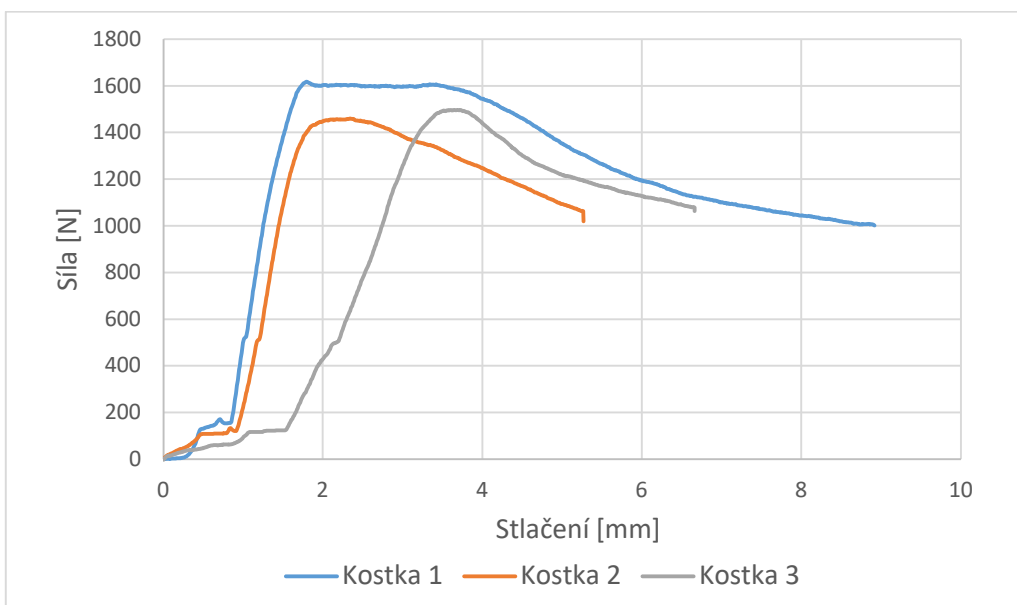
Receptura	Vzorek	Síla [kN]		Pevnost v tlaku [MPa]		Průměrná pevnost v tlaku [MPa]
1 (epoxidová pryskyřice)	Krychle 1	7,29		0,72		0,94
	Krychle 2	8,64		0,86		
	Krychle 3	8,35		0,79		
	Trámeček 1	1,35	1,60	0,8	1,0	
	Trámeček 2	1,45	1,95	0,9	1,2	
	Trámeček 3	1,60	1,85	1,0	1,2	
2 (polyesterová pryskyřice)	Krychle 1	1,62		0,16		0,21
	Krychle 2	1,46		0,14		
	Krychle 3	1,50		0,15		
	Trámeček 1	0,35	0,35	0,2	0,2	
	Trámeček 2	0,45	0,40	0,3	0,3	
	Trámeček 3	0,40	0,35	0,3	0,2	

Graf 3: Průběh zatěžování receptury s epoxidovou pryskyřicí dle ČSN EN 826



První zkouška v tlaku dle ČSN EN 826 se stanovuje na tepelně izolačních materiálech. Zjišťuje se, jestli pevnost v tlaku lze charakterizovat jako pevnost v tlaku nebo jako napětí při 10% deformaci. Z pracovních diagramů zatěžování lze vyčíst, že bylo dosažené mezní únosnosti před mezní deformací, proto lze tuto zkoušku vyjádřit pevností v tlaku a následně mohla být použita druhá zkouška pevností v tlaku stanovována na zlomcích trámečků dle ČSN EN 1015-11.

Graf 4: Průběh zatěžování s polyesterovou pryskyřicí dle ČSN EN 826



Pevnost v tlaku byla stanovována na dvou různých vzorcích a podle dvou různých norem. Prvně byla stanovována na krychlích podle normy ČSN EN 826, pak na zlomcích trámečků dle ČSN EN 1015-11. Výsledné hodnoty byly zprůměrovány z dílčích hodnot daných vzorků.

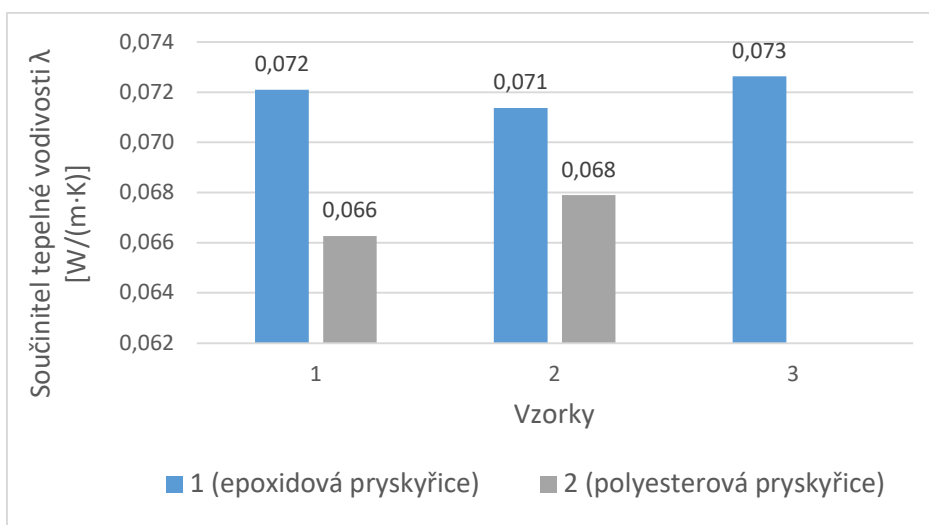
Vzorečky z epoxidové pryskyřice mají výslednou pevnost 0,94 MPa, což je více jak čtyřnásobně větší pevnost v tlaku, než mají vzorečky z polyesterové pryskyřice, které mají pevnost v tlaku 0,21 MPa.

Další zkouškou bylo stanovení tepelné vodivosti dle ČSN EN 12667 metodou tepelného toku dle ISO 8301. Zkouška byla prováděna na deskových vzorcích o rozměrech 200x200x35 mm.

Tabulka 15: Stanovený součinitel tepelné vodivosti podle ČSN EN 12667 dle ISO 8301

Receptura	Vzorek	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Součinitel tepelné vodivosti [W/(m.K)]					Průměrný součinitel tepelné vodivosti [W/(m.K)]	
1 (epoxidová pryskyřice)	1	340	0,072	0,072	0,072	0,072	0,072	0,072	0,072
	2		0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	
	3		0,073	0,073	0,073	0,073	0,073	0,073	
2 (polyesterová pryskyřice)	1	310	0,066	0,066	0,066	0,066	0,066	0,066	0,067
	2		0,068	0,068	0,068	0,068	0,068	0,068	

Graf 5: Zobrazení výsledných hodnot součinitele tepelné vodivosti daných vzorků



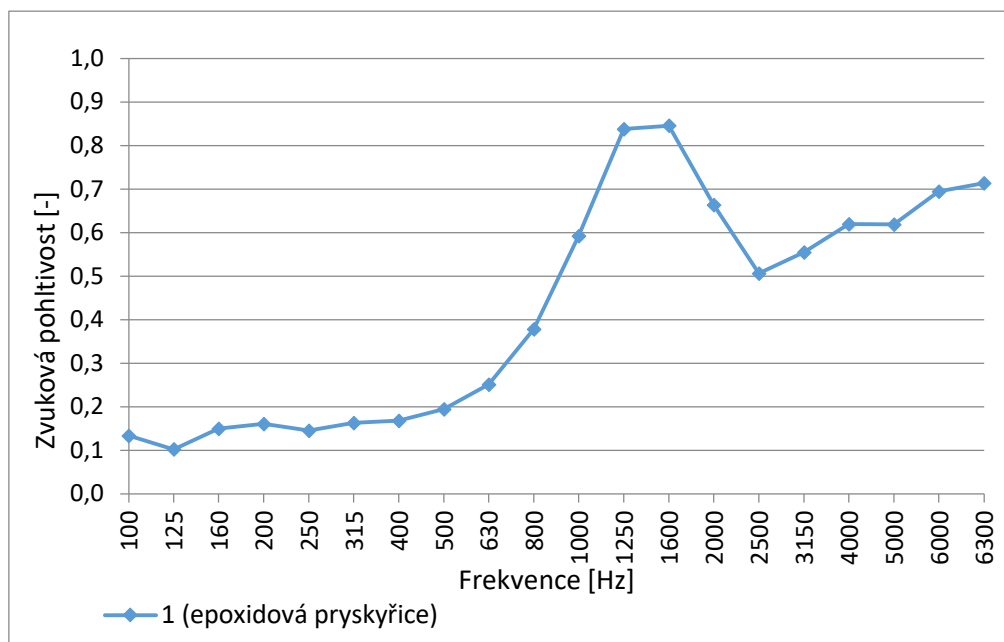
Součinitel tepelné vodivosti stanovený dle normy ČSN EN 12667 dle ISO 8301 vyšel u obou receptur okolo 0,07 W/(m·K). Tímto byl splněn požadavek práce na součinitel tepelné vodivosti <0,11 W/(m·K).

Poslední zkouškou byla zkouška stanovení činitele zvukové pohltivosti, která se zkoušela jen na receptuře s epoxidovou pryskyřicí. Receptura s polyesterovou pryskyřicí neměla dostatečné mechanické vlastnosti. Stanovení probíhalo dle normy ČSN ISO 10534-1.

Tabulka 16: Stanovený činitel zvukové pohltivosti dle normy ČSN ISO 10534-1

Receptura	Průměrná tloušťka vzorku [mm]	Frekvence [Hz]	Činitel zvukové pohltivosti [-]	Průměrný činitel zvukové pohltivosti [-]
1 (epoxidová pryskyřice)	42,92	100	0,13	0,42
		125	0,10	
		160	0,15	
		200	0,16	
		250	0,15	
		315	0,16	
		400	0,17	
		500	0,19	
		630	0,25	
		800	0,38	
	1000	0,59		
	38,18	1250	0,84	
		1600	0,85	
		2000	0,66	
		2500	0,51	
		3150	0,55	
		4000	0,62	
		5000	0,62	
		6000	0,69	
6300		0,71		

Graf 6: Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci



Činitel zvukové pohltivosti se zkoušel na vzorcích válcového tvaru, pro tloušťku 42,92 mm se používala frekvence 100 až 1000 Hz, pro tloušťku vzorku 38,18 mm se používala frekvence 1000 až 6300 Hz. Nejvyšší hodnota činitele zvukové pohltivosti byla naměřená při frekvenci 1600 Hz 0,85. Průměrná hodnota činitele zvukové pohltivosti zkoušeného kompozitu tedy vychází na 0,42.

7.1 DISKUSE VÝSLEDKŮ

Zadáním bakalářské práce bylo vyrobit kompozit s objemovou hmotností nižší než 400 kg/m^3 a tepelnou vodivostí nižší než $0,11 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. U obou zkušebních receptur, jak s epoxidovou, tak s polyesterovou pryskyřicí, byly tyto podmínky splněny.

První zkouškou bylo stanovení objemové hmotnosti, průměrné hodnoty činily 320 kg/m^3 u receptury s epoxidovou pryskyřicí a 310 kg/m^3 u receptury s polyesterovou pryskyřicí.

Další měřenou veličinou byla pevnost v tahu za ohybu. Průměrné hodnoty dosahovaly $0,7 \text{ MPa}$ u receptury s epoxidovou pryskyřicí a $0,3 \text{ MPa}$ u receptury s polyesterovou pryskyřicí. Z výsledků je patrné, že při použití epoxidové pryskyřice nabývá pevnost v tahu za ohybu dvojnásobných hodnot oproti pryskyřici polyesterové.

S objemovou hmotností rostla u většiny vzorků i pevnost v tlaku. Vzhledem k povaze vzorku a jeho zrnitosti byly použity dva postupy. První zkouška pevnosti v tlaku byla provedena na vzorcích ve tvaru krychle, druhá na zlomcích trámečků z předchozí ohybové zkoušky. Rozdílné hodnoty pevnosti v tlaku u obou těchto zkoušek jsou zapříčiněny odlišným tvarem těles i různou rychlostí zatěžování. Další vliv na dosahované hodnoty pevnosti mohl mít i průběh ručního hutnění a jím způsobené rozdíly mezi jednotlivými vzorky. Výsledné hodnoty pevnosti v tlaku jsou průměrem dílčích naměřených hodnot vzorků stejné receptury. Při použití epoxidové pryskyřice dosahovala pevnost v tlaku $0,94 \text{ MPa}$, kdežto vzorky s polyesterovou pryskyřicí dosahovaly pevnosti pouze $0,21 \text{ MPa}$.

Součinitel tepelné vodivosti se pohyboval v rozmezí od $0,066$ do $0,073 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Nižší průměrné hodnoty součinitele tepelné vodivosti dosáhla receptura s polyesterovou pryskyřicí, a to $0,067 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$.

Receptura s polyesterovou pryskyřicí měla sice lepší tepelné vlastnosti než receptura s pryskyřicí epoxidovou, nicméně mechanické vlastnosti měla mnohem horší. Z tohoto důvodu byla pro zkoušky akustických vlastností použita pouze receptura s epoxidovou pryskyřicí. Výsledná hodnota činitele zvukové pohltivosti dosáhla $0,42$.

S přihlédnutím k výsledkům zkoumaných vlastností byla, jako vhodnější receptura zvolena ta, která obsahovala epoxidovou pryskyřicí. Objemová hmotnost vzorků z této směsi činila 320 kg/m^3 a pevnost v tlaku dosahovala téměř $1,0 \text{ MPa}$.

8 ZÁVĚR

Recyklací skla vznikají skelné střepy, které nemají vždy požadovanou čistotu pro návrat do sklářské výroby. Takto vzniklý odpad neměl žádné další využití a končil na skládce. Z tohoto důvodu začaly vznikat výrobní pěnového skla.

Pěnové sklo je pórovitý materiál s nízkou objemovou hmotností a dobrými tepelně izolačními vlastnostmi. Vyrábějí se z něho desky a kamenivo. Desky se nejčastěji používají jako izolace plochých střech, podlah, na zateplení stěn nebo jako protipožární obklady.

Výhodou kameniva z pěnového skla je jeho, v porovnání s deskami, méně náročná výroba a ve stavební praxi se používá pro jednodušší účely jako jsou např. násypy a zásypy střešních konstrukcí, bazénů, vývrtů apod. Tato práce se zabývala širším využitím tohoto kameniva ve stavebnictví.

Ve výrobě pěnového skla vzniká odpad frakce 0/4 mm, který se částečně vrací do výroby. Z této frakce byla odsítována frakce 2/4 mm, která byla použita v praktické části k výrobě tepelněizolačního kompozitu. Kompozit byl pojen epoxidovou a polyesterovou pryskyřicí. Vzniklý tepelněizolační materiál s velmi nízkou objemovou hmotností a dobrými mechanickými vlastnostmi může snadno konkurovat dnešním výrobkům na trhu. Nalézt uplatnění může hned v několika odvětvích stavební praxe. Např. ho lze použít v kombinaci s minerální vatou jako akustický obklad nebo jako litou tepelnou izolaci problematických částí stavební konstrukce, například parapetů a ostění oken. Velké uplatnění může najít jako materiál in situ na různé dokončovací práce na stavbách apod.

Díky recyklovatelnosti pěnového skla, a s tím spojenými menšími dopady na životní prostředí při výrobě, ve srovnání s materiály obdobných vlastností, lze v budoucnu očekávat nárůst jeho použití. Tento materiál má vysoký potenciál, s rozsáhlými možnostmi dalšího vývoje. Je možné ho pojít různými pojivy, upravovat receptury nebo vylepšit tvarové uspořádání prvků, k docílení lepších akustických a tepelně izolačních vlastností.



Obrázek 20: Výsledný vzorek navrženého kompozitu

9 CITOVANÁ LITERATURA

- [1] SKLO: *Nerostné suroviny a jejich využití* [online]. Ostrava: Jirásek, J., Vavro, M., 2008 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/sklo.html#pojmy>
- [2] SKLO. *Trideniodpadu.cz* [online]. [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <https://www.trideniodpadu.cz/sklo>
- [3] Historie skla. *Vetropack* [online]. [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <https://www.vetropack.cz/cz/sklo/historie-skla/>
- [4] *Stavební sklo a zasklívání* [online]. Ostrava: Vysoká škola Báňská [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <http://fast10.vsb.cz/studijni-materialy/ps3/5.html>
- [5] SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty* [online]. 3. Praha: Svoboda, 2013 [cit. 2020-04-13]. ISBN 978-80-260-4972-2. Dostupné z: <http://people.fsv.cvut.cz/~svobodal/sh/SH3v1.pdf>
- [6] FANDERLÍK, Ivan. *Vlastnosti skel*. 1. Praha: Informatorium, 1996. ISBN 80-854-2791-5.
- [7] HONSKUS, Petr. *Výroba a zpracování skla* [online]. In: . s. 46 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/techniky_u_stacionarnich_zdroju_vys_tup_projektu/\\$FILE/000-Vyroba_a_zpracovani_skla_20160222.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/techniky_u_stacionarnich_zdroju_vys_tup_projektu/$FILE/000-Vyroba_a_zpracovani_skla_20160222.pdf)
- [8] Křemenné sklo. In: *UVC servis* [online]. [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <http://kremenne-sklo.cz/>
- [9] Základní informace o vodním skle. In: *Vodní sklo* [online]. [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <http://www.vodnisklo.cz/cz/clanky/zakladni-informace-o-vodnim-skle>
- [10] Drátosklo-drátěné sklo. In: *Sklenářství Praha* [online]. [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <https://www.sklenarstvi-praha.cz/dratosklo-dratene-sklo>
- [11] POKRIVČÁK, Milan. Minerální izolace a její použití. In: *ASB* [online]. [cit. 2020-05-31]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/zatepleni/mineralni-izolace-a-jeji-pouziti>
- [12] Skelná vata. *ISOVER: Saint-Gobain* [online]. [cit. 2020-05-31]. Dostupné z: <https://www.isover.cz/>
- [13] *Zákon o odpadech*. In: . 1991, 238/1991 Sb. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/1991-238>
- [14] *Zákon č. 185/2001 Sb.: Zákon o odpadech a o změně některých dalších zákonů*. In: . Praha, 2001, číslo 185. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-185/zneni-20200101>
- [15] *Ministerstvo životního prostředí: Odpadové hospodářství* [online]. [cit. 2020-05-26]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/odpadove_hospodarstvi
- [16] *REFAGLASS: Pěnové sklo* [online]. [cit. 2020-05-26]. Dostupné z: <https://www.refaglass.cz/>
- [17] HAVEL, Milan. *Recyklace odpadů* [online]. [cit. 2020-05-26]. Dostupné z: <https://www.estav.cz/cz/3065.jak-tridime-sklo-a-jak-se-dale-vyuziva>
- [18] ŠENBAUER, Václav. *Pěnové sklo v novostavbách či rekonstrukcích* [online]. [cit. 2020-05-26]. Dostupné z: <https://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/penove-sklo-v-novostavbach-ci-rekonstrukcich>

- [19] ČSN EN 13501-1. *Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb: Část 1: Klasifikace podle výsledků zkoušek reakce na oheň*. Český normalizační institut, 2007.
- [20] A-GLASS: *Pěnové sklo* [online]. [cit. 2020-05-26]. Dostupné z: <http://www.a-glass.cz/>
- [21] *Penové sklo: Proces výroby penového skla* [online]. [cit. 2020-05-26]. Dostupné z: <https://www.penove-sklo.com/proces-vyroby-penoveho-skla.html>
- [22] GEOCELL: *Pěnové sklo* [online]. [cit. 2020-05-26]. Dostupné z: <https://www.geocell-schaumglas.eu/cz/>
- [23] PORAVER: *expanded glass* [online]. [cit. 2020-05-26]. Dostupné z: <https://www.poraver.com/en/>
- [24] LIAVER [online]. [cit. 2020-05-26]. Dostupné z: <https://liaver.cz/>
- [25] ZACH, Jiří, Martin SEDLMAJER a Václav ŠENBAUER. *Možnosti využití lehkého kameniva na bázi recyklovaného skla v betonu* [online]. [cit. 2020-05-26]. Dostupné z: https://www.imaterialy.cz/rubriky/materialy/moznosti-vyuziti-lehkeho-kameniva-na-bazi-recyklovaneho-skla-v-betonu_43687.html
- [26] *Přírodní stavba: Pěno sklo* [online]. [cit. 2020-05-26]. Dostupné z: <https://www.prirodnistavba.cz/peno-sklo/>
- [27] *StavebníVzdělání.cz: Co je pěnové sklo?* [online]. [cit. 2020-05-26]. Dostupné z: <https://www.stavebni-vzdelani.cz/penove-sklo/>
- [28] FOAMGLAS [online]. [cit. 2020-05-26]. Dostupné z: <https://www.foamglas.com/cs-cz>
- [29] VYCHYTIL, Jan. *Využití pěnového skla v provozních střeších* [online]. [cit. 2020-05-26]. Dostupné z: <https://www.izolace.cz/clanky/vyuziti-penoveho-skla-v-provoznich-strechach/>
- [30] SMRČKOVÁ, M. *Hybridní kompozity kombinující krátká houževnatá vlákna a částicové plnivo v polymerní matrici*. Brno, 2011. Dostupné také z: <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/6096/final-thesis.pdf?sequence=12&isAllowed=y>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta chemická.
- [31] BODNÁROVÁ, Lenka. *Kompozitní materiály: Studijní opory: Modul M01*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2007.
- [32] KADLEC, Jaroslav. *Konstrukční vlastnosti ultralehkých betonů a jeho optimální využití v konstrukcích: Disertační práce* [online]. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2017 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=166123
- [33] JIRÁSEK, Jakub a Martin VAVRO. *Anorganická pojiva* [online]. Ostrava: Vysoká škola Báňská [cit. 2020-05-27]. Dostupné z: http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/anorganicka_pojiva.html
- [34] Pryskeřice. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2020-05-27]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Prysky%C5%99ice#Syntetick%C3%A9_prysky%C5%99ice
- [35] ŠVORČÍK, V. *Polymery* [online]. , 28 [cit. 2020-05-27]. Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/polymvsauto/Struktura%20a%20vlastnosti%20polymery%20-%20strucne_Svorcik.pdf
- [36] DROCHYTKA, Rostislav. *Plastické látky, M01: Studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia* [online]. Vysoké učení technické v Brně,

- Fakulta stavební, 2007, 161 s. [cit. 2020-06-01].
- [37] *Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití* [online]. DUCHÁČEK, V. 2. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2006, s. 280 [cit. 2020-05-27]. ISBN 80-7080-617-6. Dostupné z: http://147.33.74.135/knihy/uid_isbn-80-7080-617-6/pages-img/104.html
- [38] ČSN 73 6160. *Zkoušení asfaltových směsí*. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [39] VARAUS, MICHAL. *Pozemní komunikace II: Asfaltová pojiva* [online]. Modul 3. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební: Studijní opory, 2005, 13 s. [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/Skripta/BM02-Pozemni%20komunikace%20II/Pozemni%20komunikace%20II%20-%20Asfaltova%20pojiva.pdf>
- [40] ČSN EN 197-1: *Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria cementů pro obecné použití*. 2. Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [41] Výzkumný ústav stavebních hmot a.s.: *Možnosti pojení lehkého kameniva na bázi pěnového skla pomocí organických pojiv* [online]. Brno, 2017 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <https://www.vustah.cz/zamereni-spolecnosti/aplikovany-vav/kompozitni-materialy/>
- [42] ČSN EN 1602. *Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Stanovení objemové hmotnosti*. 2013. Dostupné také z: http://www.technicke-normy-csn.cz/727046-csn-en-1602_4_93715.html
- [43] ČSN EN 826 (72 7045). *Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví - Zkouška tlakem*. 2013. Dostupné také z: <http://www.technicke-normy-csn.cz/technicke-normy/52118-nahrady-727045-csn-en-826.html>
- [44] ČSN EN 1015-11. *Zkušební metody malt pro zdivo – Část 11: Stanovení pevnosti zatvrdlých malt v tahu za ohybu a v tlaku*. 2020. Dostupné také z: http://www.technicke-normy-csn.cz/inc/nahled_normy.php?norma=722400-csn-en-1015-11&kat=509887
- [45] ČSN EN 12667. *Tepelné chování stavebních materiálů a výrobků - Stanovení tepelného odporu metodami chráněné topné desky a měřidla tepelného toku - ISO 8301*. 2001. Dostupné také z: http://www.technicke-normy-csn.cz/730569-csn-en-12667_4_62483.html
- [46] ČSN ISO 10534-1. *Akustika - Určování činitele zvukové pohltivosti a akustické impedance v impedančních trubcích - Část 1: Metoda poměru stojaté vlny*. 1999. Dostupné také z: http://www.technicke-normy-csn.cz/730501-csn-iso-10534-1_4_54724.html

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Obecné vlastnosti skel [4].....	11
Tabulka 2: Technologie výroby vybraných výrobků ze skla [5]	13
Tabulka 3: Druhy plochého taženého skla [5].....	15
Tabulka 4: Celková produkce všech odpadů v ČR 2012 – 2018 [15]	17
Tabulka 5: Vlastnosti kameniva z pěnového skla deklarované výrobcí [16] [20] [22]	19
Tabulka 6: Chemické složení kameniva na bázi pěnového skla [23]	20
Tabulka 7: Složení receptury s epoxidovou pryskyřicí v různých poměrech	33
Tabulka 8: Složení receptury s polyesterovou pryskyřicí v různých poměrech	33
Tabulka 9: Objemové hmotnosti zkoušených receptur při různých poměrech.....	34
Tabulka 10: Receptura s epoxidovou pryskyřicí	34
Tabulka 11: Receptura s polyesterovou pryskyřicí	35
Tabulka 12: Stanovená objemová hmotnost vzorků obou receptur dle normy ČSN EN 1602.....	43
Tabulka 13: Stanovená pevnost v tahu za ohybu dle normy ČSN EN 1015-11.....	44
Tabulka 14: Přehled dosažených pevností v tlaku dle ČSN EN 826 a ČSN EN 1015-11	45
Tabulka 15: Stanovený součinitel tepelné vodivosti podle ČSN EN 12667 dle ISO 8301	47
Tabulka 16: Stanovený činitel zvukové pohltivosti dle normy ČSN ISO 10534-1	48

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Zobrazení objemové hmotnosti jednotlivých vzorků receptur	44
Graf 2: Zobrazení pevnosti v tahu za ohybu jednotlivých vzorků	45
Graf 3: Průběh zatěžování receptury s epoxidovou pryskyřicí dle ČSN EN 826	46
Graf 4: Průběh zatěžování s polyesterovou pryskyřicí dle ČSN EN 826	46
Graf 5: Zobrazení výsledných hodnot součinitele tepelné vodivosti daných vzorků	47
Graf 6: Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci.....	49

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Znázornění rozdílů mezi strukturou křemene – krystalický SiO ₂ (a), skelného SiO ₂ (b) a sodnokřemičitého skla (c) [1].....	13
Obrázek 2: Drátové sklo [10].....	16
Obrázek 3: Skelná vata firmy ISOVER a její použití v konstrukci [12].....	16
Obrázek 4: Rozdělení na jednotlivé frakce podle velikostí zrn [23].....	20
Obrázek 5: Kamenivo z pěnového skla vyrobené na rounu [16]	21
Obrázek 6: Zásyp klenby, izolace zelené střechy i základové desky z kameniva na bázi pěnového skla [20]	23
Obrázek 7: Desky z pěnového skla různé tloušťky [20]	24
Obrázek 8: Typy obsahující glycidové skupiny [36]	26
Obrázek 9: Typy obsahující epoxidové skupiny [36].....	26
Obrázek 10: Idealizovaná podoba epoxidové pryskyřice [37].....	26
Obrázek 11: Chování asfaltového pojiva v závislosti na teplotě	28
Obrázek 12: Pěnové sklo frakce 2/4 mm.....	32
Obrázek 13: Stanovení optimálního plniva a pojiva.....	33
Obrázek 14: Zhotovená zkušební tělesa.....	36
Obrázek 15: Vyhotovený zkušební vzorek.....	36
Obrázek 16: Zkouška pevnosti v tlaku dle ČSN EN 826	38
Obrázek 17: Zkouška pevnosti v tahu za ohybu dle ČSN EN 1015-11	40
Obrázek 18: Vzorky pro zkoušku stanovení činitele zvukové pohltivosti dle ČSN ISO 10534-1	42
Obrázek 19: Vzorky pro stanovení objemové hmotnosti	43
Obrázek 20: Výsledný vzorek navrženého kompozitu	51

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Technický list NaturOut

Příloha 2: Technický list Polyester 109