



Diplomová práce

Možnost využití čedičové vaty a krátkých vláken jako částečné náhrady cementu v kompozitech

Studijní program:

N0723A270001 Textilní inženýrství

Autor práce:

Bc. Radka Litvinová

Vedoucí práce:

Ing. Alžbeta Samková

Katedra materiálového inženýrství

Konzultant práce:

Ing. Miroslava Pechočiaková, Ph.D.

Katedra materiálového inženýrství

Liberec 2023



Zadání diplomové práce

Možnost využití čedičové vaty a krátkých vláken jako částečné náhrady cementu v kompozitech

<i>Jméno a příjmení:</i>	Bc. Radka Litvinová
<i>Osobní číslo:</i>	T19000049
<i>Studijní program:</i>	N0723A270001 Textilní inženýrství
<i>Zadávací katedra:</i>	Katedra technologií a struktur
<i>Akademický rok:</i>	2019/2020

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování literární rešerše na téma: vlákna a plniva (částice) pro vyztužení stavebních materiálů (cementová omítka), jejich vlastnosti a použití, využití kompozitních materiálů ve stavebnictví.
2. Návrh a realizace experimentu pro omítky vyztužené čedičovými vlákny a recyklovanou čedičovou vatou.
3. Testování mechanických vlastností zhotovených kompozitních vzorků: 3PB, Charpy, případně další.
4. Základní statistické vyhodnocení výsledků, formulace a interpretace výsledků.

Rozsah grafických prací: dle potřeby
Rozsah pracovní zprávy: cca 50 stran
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická
Jazyk práce: čeština

Seznam odborné literatury:

- [1] Bodnárová, L. Kompozitní materiály, učební opora Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební.
- [2] Svoboda L. a kol. Stavební hmoty. Jaga Bratislava, 2004. 471 s. ISBN 80-8076-007-1.
- [3] Militký, J., Křemenáková, D.: Anorganická vlákna pro technické aplikace, TUL 2016.
- [4] Databáze internetových a vědeckých časopisů (Web of Science, Scopus, ...)
- [5] Zahraniční a tuzemské odborné časopisy a sborníky z vědeckých symposií.
- [6] České a zahraniční technické normy.

Vedoucí práce: Ing. Alžbeta Samková
Katedra materiálového inženýrství

Konzultant práce: Ing. Miroslava Pechočiaková, Ph.D.
Katedra materiálového inženýrství

Datum zadání práce: 18. dubna 2020
Předpokládaný termín odevzdání: 2. června 2023

doc. Ing. Vladimír Bajzík, Ph.D.
děkan

L.S.

doc. Ing. Brigita Kolčavová Sirková,
Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracovala samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědoma toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědoma následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

Poděkování

Chtěla bych poděkovat vedoucí práce Ing. Alžbetě Samkové za odborný dohled nad mou diplomovou prací. Mé poděkování také patří konzultantce diplomové práce Ing. Miroslavě Pechočiakové, Ph.D. za spolupráci a věcné připomínky k tématu. Velké díky patří моým rodičům a ostatním rodinným příslušníkům za podporu při studiu.

Anotace

Tato závěrečná práce zkoumá možnosti využití odpadní čedičové vaty jako plniva v cementových potěrech. Práce se zaměřuje na hodnocení vlastností potěrů s čedičovou vatou prostřednictvím testů tříbodého ohybu, tlaku a houževnatosti. Výsledky těchto testů ukazují, že rozdíl ve výsledcích mezi potěry s čedičovou vatou a potěry bez čedičové vaty lze považovat za statisticky nevýznamný. To naznačuje, že přidání čedičové vaty jako plniva nemá signifikantní vliv na mechanické vlastnosti potěrů. Tato zjištění jsou důležitá pro průmyslové aplikace a potvrzují možnost úspěšného využití odpadní čedičové vaty v cementových potěrech jako udržitelné alternativy plniv.

Klíčová slova

Kompozity, Cementové kompozity, Cementové potěry, Čedičová vlákna, Čedičová vata, Čedič, Cement, Pevnost, Tlak, Houževnatost, Recyklace

Annotation

This final thesis examines the possibilities of using waste basaltic rock wool as a filler in cementitious screeds. The study focuses on evaluating the properties of screeds with basaltic rock wool through three-point bending, compression, and toughness tests. The results of these tests indicate that there is no statistically significant difference between the results of screeds with basaltic rock wool and those without it. This suggests that adding basaltic rock wool as a filler does not have a significant impact on the mechanical properties of the screeds. These findings are important for industrial applications and confirm the potential successful utilization of waste basaltic rock wool in cementitious screeds as a sustainable alternative filler.

Keywords

Composites, Cement composites, Cementitious screed, Basalt fibers, Basalt cotton wool, Basalt, Cement, Strength, Pressure, Toughness, Recycling

Obsah

1	Úvod.....	11
2	Rešeršní část.....	12
2.1	Problematika stavebního odpadu a jeho recyklace	12
2.2	Stavební odpady v ČR.....	13
2.3	Způsoby využití odpadu z čedičové vaty	14
3	Kompozitní materiály.....	17
3.1	Kompozity a jejich dělení	17
3.2	Druhy kompozitů a způsoby dělení.....	20
3.3	Výztuž - čedič	22
3.3.1	Složení čediče.....	23
3.3.2	Čedičová vlákna.....	23
3.3.3	Čedičová vata	25
3.4	Cement.....	27
3.4.1	Dělení cementů	27
3.5	Matrice - Cementové potěry	27
3.5.1	Dělení cementových potěrů	28
3.5.2	Požadavky na mechanické vlastnosti potěrů	31
3.6	Kamenivo.....	32
3.7	Cementové kompozity vyztužené vlákny	32
3.8	Mechanické vlastnosti.....	33
3.8.1	Pevnost v tahu za ohybu.....	33
3.8.2	Pevnost v tlaku	34
3.8.3	Rázová houževnatost.....	35
4	Experimentální část	37
4.1	Popis použitých materiálů	37
4.1.1	Cementový potěr Knauf BP1.....	37
4.1.2	Sekaná čedičová vlákna	37
4.1.3	Čedičová vata	38
4.2	Postup výroby vzorků	43
4.2.1	Postup přípravy vzorků.....	44

4.3	Testování mechanických vlastností.....	46
4.3.1	Pevnost v tahu za ohybu.....	46
4.3.2	Pevnost v tlaku.....	48
4.3.3	Rázová houževnatost.....	50
5	Vyhodnocení výsledků a diskuse	52
6	Závěr	54
7	Seznam literatury.....	55
8	Seznam tabulek	58
9	Seznam obrázků.....	59
10	Seznam příloh.....	61

Seznam použitých zkratek

<i>A</i>	Plocha průřezu
<i>a_{cu}</i>	Rázová houževnatost [J/mm ²]
<i>b</i>	Šířka vzorku [mm]
<i>C</i>	Označení pevnostní třídy pro pevnost v tlaku
<i>E_c</i>	Energie nárazu [J]
<i>Eurostat</i>	Statistický úřad evropských společenství
<i>F</i>	Označení pevnostní třídy pro pevnost v tahu za ohybu
<i>F</i>	Síla [N]
<i>h</i>	výška vzorku [mm]
<i>m</i>	Hmotnost [g]
<i>l</i>	Vzdálenost podpěr [mm]
<i>M_k</i>	Koeficient kyselosti
<i>ot</i>	Otáčky
<i>R_f</i>	Napětí v ohybu [MPa]
<i>R_m</i>	Pevnost v tlaku [N/mm ²]
<i>SEM</i>	Rastrovací elektronový mikroskop
<i>SDO</i>	stavební a demoliční odpad
<i>USD</i>	Americký dolar
<i>V_i</i>	Objemový podíl [kg]
<i>WHO</i>	Světová zdravotnická organizace
<i>W_i</i>	Hmotnostní podíl [-]
<i>ρ_i</i>	Hustota [kg/m ³]

1 Úvod

V současné době se problematika stavebního odpadu a jeho recyklace stává stále důležitějším tématem, které vyžaduje inovativní a udržitelná řešení. Cement je jedním z nejvíce používaných materiálů ve stavebnictví, avšak jeho výroba způsobuje významnou ekologickou zátěž v podobě emisí skleníkových plynů a spotřeby přírodních zdrojů. Proto je nezbytné hledat alternativní materiály, které by mohly částečně nahradit cement a zároveň snížit negativní dopad stavebnictví na životní prostředí.

Jedním z potenciálních materiálů, které lze využít jako částečnou náhradu cementu, jsou čedičová vata a čedičová vlákna. Čedičová vata je minerální vlákno vyrobené z čedičové horniny, které je již dnes známo pro své vynikající izolační vlastnosti v oblasti stavebnictví. Její využití jako částečné náhrady cementu v kompozitech nabízí zajímavý potenciál pro zlepšení mechanických vlastností těchto materiálů a zároveň snížení jejich ekologického otisku.

Cílem této závěrečné práce je prozkoumat možnost využití čedičové vaty a krátkých vláken jako částečné náhrady cementu v kompozitech. První kapitola práce bude zaměřena na popsání problematiky stavebního odpadu a recyklace čedičové vaty. Budou zde diskutovány aktuální trendy a výzvy spojené s recyklací stavebního odpadu a potenciál čedičové vaty jako obnovitelného materiálu ve stavebnictví.

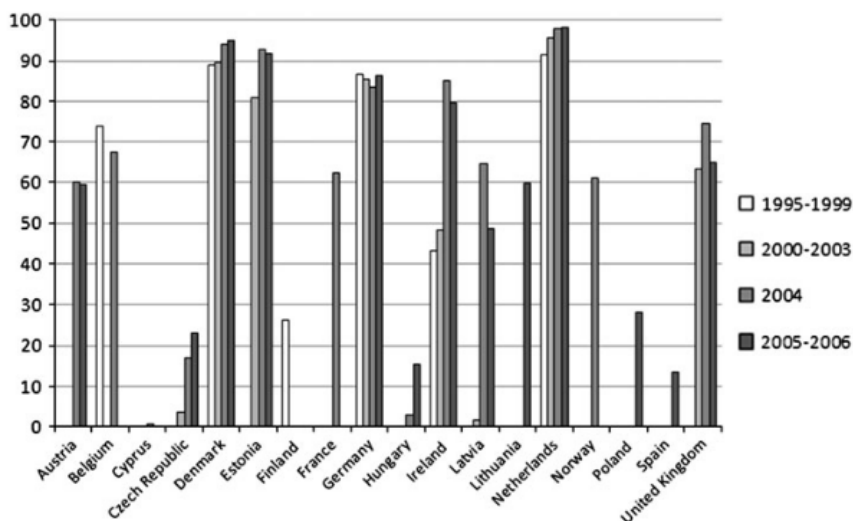
Experimentální část se bude zabývat výrobou cementových kompozitů s přidanou čedičovou vatou a porovnáním mechanických vlastností se vzorkem bez vaty a vzorkem obsahujícím čedičová vlákna. Tato srovnání umožňují zhodnotit, jaké výhody a omezení přináší použití čedičové vaty jako částečné náhrady cementu v kompozitech a jaký je její vliv na mechanické vlastnosti těchto materiálů.

Využití čedičové vaty a krátkých vláken jako částečné náhrady cementu v kompozitech by mohlo přispět k snížení negativního dopadu stavebnictví na životní prostředí a poskytnout ekologicky šetrnější alternativu pro budoucí konstrukční materiály.

2 Rešeršní část

2.1 Problematika stavebního odpadu a jeho recyklace

V rámci Evropské unie se podíl recyklovaného stavebního odpadu liší napříč zeměmi, ty nejlepší recyklují více než 90 %, zatímco jiné recyklují pouze 20 % odpadu, podrobnější hodnoty o jednotlivých státech jsou uvedeny v obrázku 1.1. Jedná se o údaje získané z národních statistik zveřejněné jednotlivými zeměmi [1].



Obrázek 2.1: Recyklace odpadu ve členských státech EU a Norsku [1]

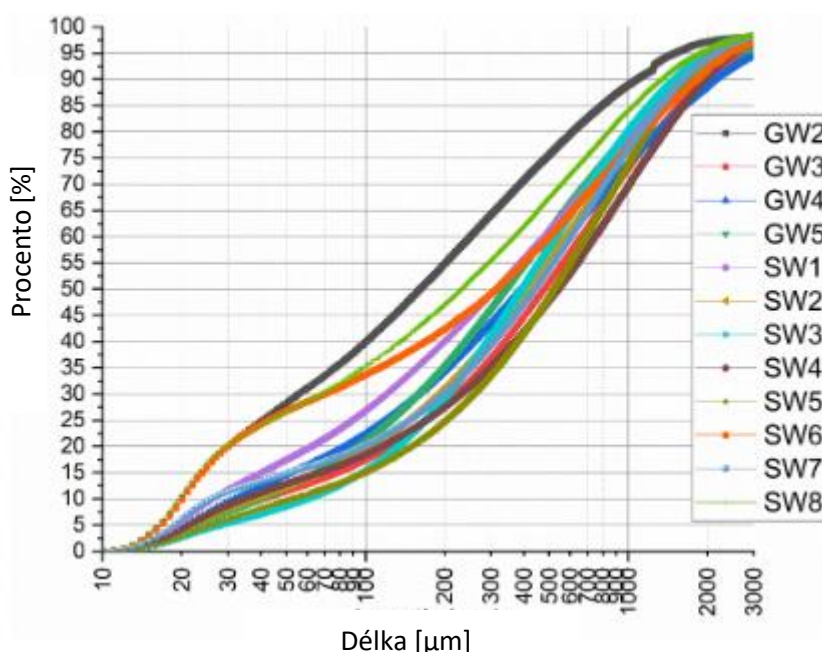
Eurostat uvádí, že ročně se v Evropě vyprodukuje přes 820 milionů tun stavebního odpadu, to činí 46 % z celkově vyprodukovaného odpadu na území Evropské unie. Vytváření stavebního a demoličního odpadu (SDO) je celosvětově rostoucím problémem. Z výzkumu vyplývá, že průměrná životnost betonové budovy je pouze 40 let [2]. Využíváním stavebního odpadu v druhotném zpracování dochází k recyklaci materiálů, které by jinak skončily na skládkách. Další nespornou výhodou využití recyklátu je úspora prvotních surovin a menší zatížení pro životní prostředí země.

Z výše uvedených 820 milionu tun SDO bylo přes 2,3 milionu tun z kategorie minerálních vln. Toto množství se zdá být z celkového objemu zanedbatelné, přece jen se jedná o méně než jedno procento. Ovšem vzhledem k nízké hustotě ($20\text{--}200\text{ kg/m}^3$), tuhosti a vysoké pružnosti jde o materiál těžko stlačitelný, což zvyšuje náklady na dopravu a likvidaci a negativně ovlivňuje stabilitu v tělese skládky.

Důležitým aspektem ovlivňujícím recyklovatelnost čedičové vaty je splnění aktuálních požadavků na biologickou rozpustnost, tento parametr je dle WHO jedním ze základních ukazatelů karcinogenity. Na základě rozhodnutí Evropské unie jsou všechny minerální vaty

vyrobené před rokem 1998 zařazeny do kategorie zvané „možná karcinogenita pro člověka“ [3] a to zejména kvůli špatné biologické rozložitelnosti.

Tým univerzity v Oulu se zabýval odpadem ze skleněné a čedičové vaty a zkoumal na vzorcích různého původu a stáří několik parametrů, jedním z nich byly i rozměry vláken. Výsledkem této studie bylo zjištění, že množství vdechnutelných vláken bylo až 50 %. Do kategorie vdechnutelných vláken spadají dle směrnice Evropské unie vlákna delší než 5 μm a s poměrem stran větším než 3:1 [4]. Při recyklaci je nutné vzít v úvahu tato zjištění a vlákna získaná ze stavebního odpadu otestovat na biologickou rozpustnost. Dalším ze závěrů studie je, že střední délka vláken minerálních vln je několik stovek mikrometrů a šířka odpovídá přibližně 10 μm . Jak můžeme vidět z grafu (Obrázek 2.2) rozložení délek vláken je napříč různými vzorky velice podobné [5]. Toto zjištění dává dobrý základ pro další recyklaci minerálních vln.



Obrázek 2.2: Rozložení délek vláken [5].

2.2 Stavební odpady v ČR

Na základě dat Českého statistického úřadu lze konstatovat, že největším zdrojem odpadu v ČR je právě stavební průmysl. V roce 2018 se v České republice vyprodukovalo celkem 28,3 milionu tun odpadu. Ze statistiky vyplývá, že více než 55 % tohoto objemu tvořil stavební a demoliční odpad, tedy 15,7 milionu tun, podrobněji v tabulce 1.1. Veškerý komunální odpad vytvořený domácnostmi ve stejném roce činil pouze 2,8 milionu tun, což je méně než 10 % celkového množství odpadu [6].

Je pochopitelné, že při výstavbě a údržbě staveb dochází k tvorbě odpadů, cílem by však mělo být tento odpad v co možná nejvyšší míře omezovat a nezbytné odpady druhotně využít.

Jedním ze způsobů, jak eliminovat odpady při demolicích, je tzv. dekonstrukce. Tento proces je možné chápat jako opak stavby, kdy dochází k postupnému rozebírání budovy, což umožňuje zachování co největšího množství materiálu pro druhotné zpracování. Příkladem znovu využitelných materiálů je například železobeton, asfaltobeton a také kovové nosníky [6].

Takto získané materiály lze následně využít k recyklaci neboli použít na tvorbu druhotných surovin. V roce 2018 se v České republice vyprodukovalo celkem 22,2 milionu tun takzvaných druhotných surovin. Nejvyšší podíl v daném roce tvořily produkty vzniklé z energetických procesů. Ačkoli druhý největší podíl recyklovaných materiálu tvořily druhotné suroviny vzniklé z SDO, celkem se jednalo o 5,4 milionu tun (24 %). Většina těchto materiálů byla využita pouze k zasypávání inženýrských sítí nebo jako podkladní vrstva inženýrských staveb [6].

Tabulka 2.1: *Produkce stavebních a demoličních odpadů v ČR roce 2018* [6].

	Kód odpadu	[kg]
Produkce stavebních a demoličních odpadů celkem v roce 2018		15 785 260
z toho:		
beton, cihly, tašky a keramika	17 01	2 724 127
asfaltové směsi, dehet a výrobky z dehtu	17 03	734 974
zemina (včetně vytěžených zeminy z kontaminovaných míst), kamení a vytěžená hlušina	17 05	9 944 896
jiné stavební a demoliční odpady	17 09	390 221

2.3 Způsoby využití odpadu z čedičové vaty

Důležitou vlastností čediče je jeho tavitelnost, ta dává možnosti jej opakovaně využívat a přetvářet v jiný druh výrobků v téměř nezměněné kvalitě materiálu, stejně jako je tomu například u skla. Proces tavení je ale energeticky velice náročný, a proto se velké množství výzkumů zabývá novými způsoby, jak použít již hotový výrobek novým způsobem, ale s menší energetickou náročností. Jelikož se čedičová vata používá ve stavebnictví a řadí se mezi konstrukční a demoliční odpad, je i mnoho výzkumů zaměřených na opětovné použití vaty ve stavebním průmyslu.

Jedním z těchto výzkumů zaměřujících se na opakované použití odpadní čedičové vaty ve stavebnictví je práce zabývající se možností ekologičtější výroby lehkého kameniva z minerální vaty. Lehké kamenivo je druh hrubého kameniva, které se používá při výrobě produktů z lehkého betonu, jako je betonový blok, konstrukční beton a dlažba. Ve výzkumu byly testovány možnosti výroby kameniva jak z čedičové, tak i ze skelné vaty, vzorky vaty byly rozmělněny na prášek pomocí kulového mlýnu. Prášek byl následně doplněn o 20 % sepiolitu¹,

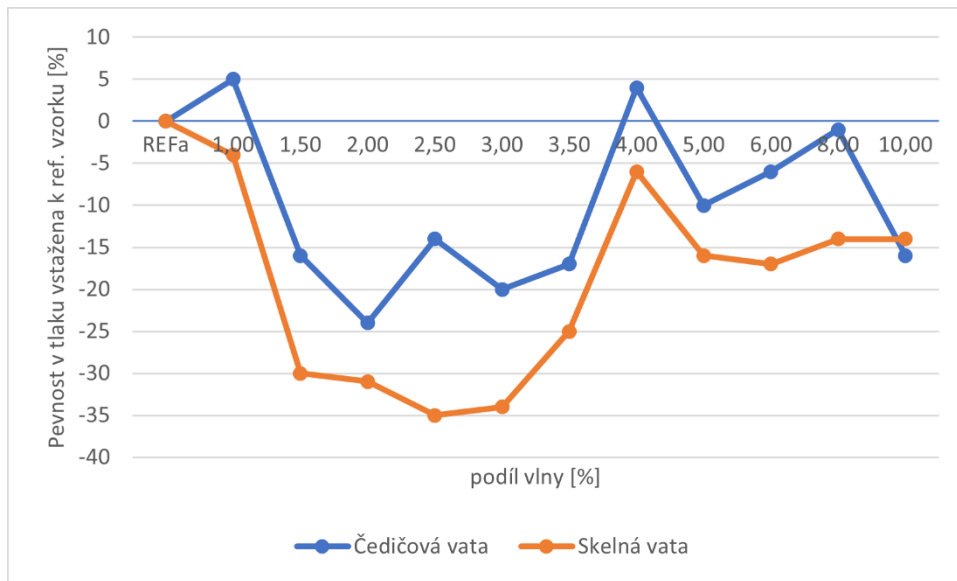
¹ Sepiolit je druhotný minerál, surovina pro výrobu speciální keramiky a stavebních hmot.

který minerálnímu prášku dodal potřebnou plasticitu, a destilovanou vodu. Výsledná směs byla tvarována do kuliček o průměry 9,3 mm a poté vypálena v rotační trubkové peci [7].

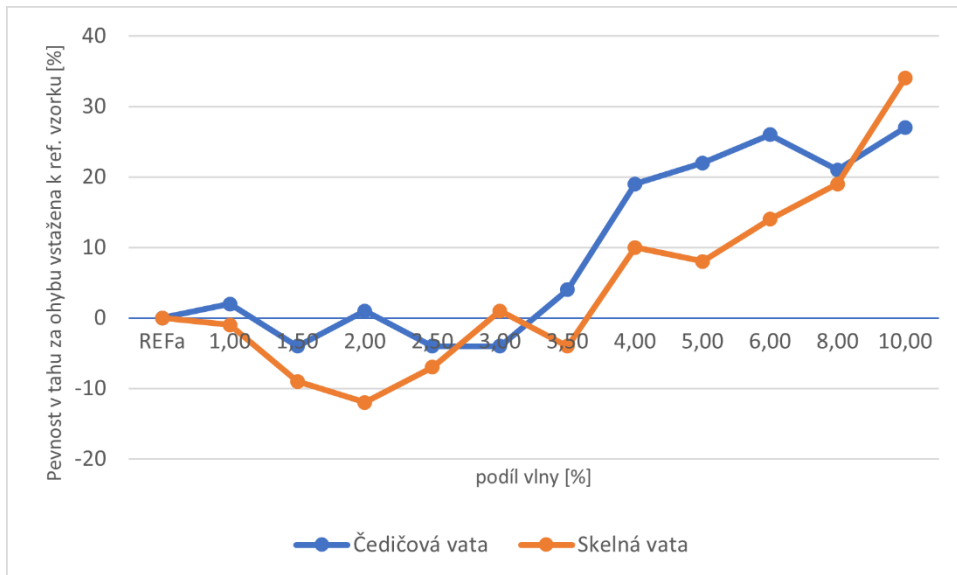
Výzkum se však nezaměřoval pouze na možnost výroby, ale také ekologickými dopady či přínosy zkoumaného produktu. Jedním z navrhovaných způsobů, jak snížit ekologickou zátěž, byla úprava teploty, kdy se kamenivo vypalovalo při 700 °C až 1180 °C místo obvyklých 1200 °C. Právě snížení teploty by totiž mělo pozitivní vliv i na ekonomickou stránku výroby. Studie přišla se zajímavým způsobem využití odpadních minerálních vat při výrobě lehkého kameniva, které je schopno svými vlastnostmi konkurovat tradičním výrobkům a snížit ekologické dopady výrobku. Nejvíce se v tomto ohledu osvědčilo kamenivo se skelnou vatou, kdy optimální závěry ukazují na redukci zátěže pro životní prostředí až o 60 % [7].

Zajímavý nápad na využití čedičové vaty představil tým Finské univerzity v Lappeenratě. Vatu použili ve svém výzkumu jako plnivo do dřevopolypropylenového kompozitu. V kontrolním vzorku činilo dřevo 64 % hmotnosti, v dalších bylo částečně nahrazováno čedičovou vatou, která byla zastoupena ve vzorcích 20–40% podílem. Zkoušky kompozitu na pevnost v tahu a ohybu ukázaly zhoršení mechanických vlastností po přidání čedičového vlákna, tento jev si autoři vysvětlují slabou adhezí mezi čedičovými vlákny a polypropylenovou maticí. Dalším faktorem, který mohl vést k ovlivnění výsledků, byla orientace vláken. Teorii o nerovnoměrné adhezi následně podpořili i snímky rastrovacího elektronového mikroskopu. Dále byla u materiálu testovaná rázová houževnatost, při které došlo pouze k mírnému zlepšení. Přidání recyklované minerální vlny však znatelně zlepšilo vlastnosti kompozitů vůči vlhkosti. Absorpce vody se snížila o 32,5–67,4 %, když bylo do kompozitů přidáno 20–40 % recyklované minerální vlny. Bobtnání tloušťky prokázalo podobná zlepšení, snížení bylo mezi 27,1 % a 73,2 %. V závěru studie autoři uvádějí, že při použití správného vazebního činidla, by se mohl vyřešit problém s adhezí vláken a polypropylenové matrice, což by vedlo ke zlepšení mechanických vlastností. Poté by mohl být kompozit vhodnou alternativou pro komerční výplňkové materiály.[8]

Výzkum prováděný Soniou Romaniego Piñeiro na Technické univerzitě v Madridu se zabýval využitím čedičových a skleněných vláken v sádrových kompozitech. Rozmělněné vaty byly přidávány do sádrové směsi v poměru 1–10 % a následně byly testovány jejich mechanické vlastnosti a porovnávány s kontrolním vzorkem bez vláken. Ačkoli výsledné hodnoty pevnosti v tlaku jsou ve srovnání s kontrolním prázdným vzorkem nižší, všechny naměřené hodnoty se pohybují nad hranicí 6 MPa, tedy nad stanovenou normou UNE-EN 13279-1. Dále byla u vzorků testována pevnost v ohybu, kde jsou naměřené hodnoty srovnatelné s kontrolním vzorkem nebo vyšší, celkový přehled z měření nalezneme v obrázku 1.3 a 1.4. [9]



Obrázek 2.3: Porovnání pevnosti v tlaku u sádrových kompozitů vyztužených čedičovou a skelnou vatou [9].



Obrázek 2.4: Porovnání pevnosti v ohybu sádrových kompozitů s čedičovou nebo skelnou vatou [9].

Na základě grafů je možné usoudit, že čedičová vata dosahovala ve všech oblastech měření lepších výsledků, avšak použití obou druhů minerálních vláken se vzhledem k výsledkům ukazuje jako možné, například v sádrokartonových blocích. Omezení zde představuje pouze množství vláken ve směsi, kdy už 10 % vláken významně ovlivňovalo zpracovatelnost. [9]

3 Kompozitní materiály

3.1 Kompozity a jejich dělení

Ve chvíli, kdy existující dostupné materiály nemají vlastnosti, které by splňovaly naše náročné požadavky, přicházejí na řadu kompozitní materiály. Ty jsou složeny z několika běžně se vyskytujících materiálů tak, aby výrazně podpořily požadované vlastnosti a jejich slabé stránky byly potlačeny.

Tento princip můžeme nalézt i v přírodě, například dřevo, kosti nebo lastury živočichů, vždy se jedná o kombinaci pevných a pružných vrstev, které nově vzniklým materiálům dodávají výjimečné vlastnosti. Výrazné vylepšení vlastností kombinací dvou různorodých materiálů se nazývá synergický efekt, který se dá vyjádřit jednoduchou nerovnicí $1 + 1 = 3$. Výsledkem spojení dvou složek je nově vzniklý materiál, jehož vlastnosti nejsou pouhým součtem vlastností vstupních elementů, ale jsou výrazně lepší. [10]

V celé lidské historii můžeme nalézt spoustu příkladů vytváření umělých kompozitních materiálů, již 800 let př. nl. se do hlíny s jílem přidávaly kousky slámy, ze kterých se tvarovaly cihly, které byly následně sušeny na slunci. Takto vyztužené cihly měly pevnost až 7 MPa. Dalším příkladem využití kompozitů jsou mongolské luky nebo čepele nožů z damascénské oceli. [11]

Nejvíce se však začala upínat pozornost na kompozitní materiály v minulém století. Mimo jiné byl zaznamenán velký pokrok ve stavebnictví díky nově vzniklým materiálům, jako jsou například beton vyztužený ocelí, azbestocementové výrobky, plasty vyztužené vlákny a další [10]. I nadále se zkoumají možnosti výroby a použití kompozitních materiálů vedoucích ke zlepšení vlastností, například na univerzitě Nanjing Forestry University v Číně se vědci zabývali zlepšením tlumících vlastností betonu pomocí polyuretanovo-cementového kompozitu. [12] Dalším zajímavým směrem se ubíral výzkum věnující se vývoji cementového kompozitu s použitím silika aerogelu, který vedl k materiálu s dobrými mechanickými vlastnostmi a snížení tepelné vodivosti výsledného materiálu. [13]

Kompozitní materiály je možné definovat jako heterogenní materiály složené ze dvou nebo více fází, které se vzájemně liší svými mechanickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Obvykle je jedna fáze spojitá, tu nazýváme matrice, a jedna nespojitá, která se označuje jako vyztuž a má v porovnání s matricí obvykle výrazně lepší mechanické vlastnosti. [11]

Dnes existuje mnoho kompozitních materiálů a neustále přibývají další, které lépe vyhovují náročným požadavkům. Mezi těmito požadavky jsou [11]:

- zvýšení tuhosti,
- zvýšení pevnosti,

- zvýšení rozměrové stability,
- zvýšení houževnatosti,
- zvýšení teplotní stability,
- zvýšení mechanického tlumení,
- snížení propustnosti pro kapaliny a plyny,
- snížení ceny,
- redukce hmotnosti,
- snížení zátěže životního prostředí,
- modifikace elektrických vlastností,
- snížení pro kapaliny nebo plyny,
- zvýšení korozní nebo chemické odolnosti,
- snížení nasákavosti,
- a další.

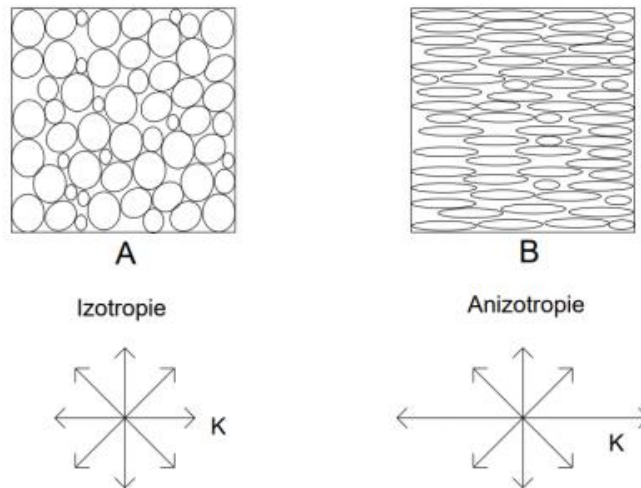
Základní vlastnosti kompozitních materiálů

Homogenita a nehomogenita

Ačkoli je kompozit složen z několika různorodých fází a měl by být tedy považován za nehomogenní materiál, z technického hlediska o něm mluvíme jako o homogenním materiálu. Vyznačuje se stálým tvarem i rozměry a jeho rovnoměrně rozptýlené složky jsou jednoduše nedělitelné. [11]

Izotropie a anizotropie

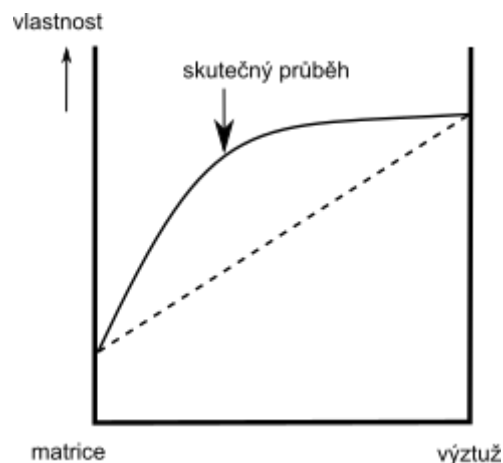
Převážná část technických materiálů je izotropní mají ve všech směrech stejné vlastnosti (obrázek 2.1 A), naproti tomu typickou vlastností většiny kompozitů je silná anizotropie, v každém směru mají jinou vlastnost (obrázek 2.1 B). Nejtypičtější vlastností pro kompozitní materiály je *příčná izotropie*, která má izotropní vlastnosti v určité rovině. Tyto vlastnosti jsou symetrické podle této roviny a dvou rovin na ni i na sebe vzájemně kolmých. [11]



Obrázek 3.1: grafické znázornění izotropie a anizotropie [14]

Synergický efekt

Jak již bylo popsáno výše, synergický efekt (Obrázek 3.2), je výsledkem vzájemného působení pozitivních vlastností daných složek tak, že celek přesahuje poměrný součet složek. Při výrobě kompozitu se snažíme dosáhnout co největší synergie pozitivních vlastností a potlačit ty negativní. [10]



Obrázek 3.2: Synergický efekt [15]

Parametry ovlivňující vlastnosti kompozitů:

1. Vlastnosti fází, tj. mechanické vlastnosti fází a jejich poměr a anizotropie vlastností jednotlivých fází.
2. Objemové zastoupení fází, jejich geometrický tvar a geometrické uspořádání v systému včetně pórů.

3. Interakce jednotlivých fází a vlastnosti styku, tedy schopnost přenosu zatížení z matrice do vyztužující části a naopak, soudržnost na kontaktu fází.
4. Interakce s okolním prostředím.
5. Historie materiálů i fází.

3.2 Druhy kompozitů a způsoby dělení

Kompozity se nejčastěji dělí dle typu matrice a výztuže (disperze) do různých kategorií.

Podle typu matrice

Kompozitní materiály s kovovou matricí se vyznačují tvárností a houževnatostí. Mezi nejdůležitější zástupce této kategorie patří slitiny hliníku, hořčíku a titanu.

Kompozitní materiály s polymerní matricí jsou díky své nízké hustotě využívány například při konstrukci letadel. Mezi jisté nevýhody patří nízká tepelná stabilita polymerů.

Kompozitní materiály s keramickou matricí jsou obvykle lehké, velmi tvrdé a odolávají vysokým teplotám, jejich nevýhodou je však křehkost. Tyto kompozity mohou být oxidické i neoxidické povahy. [11]

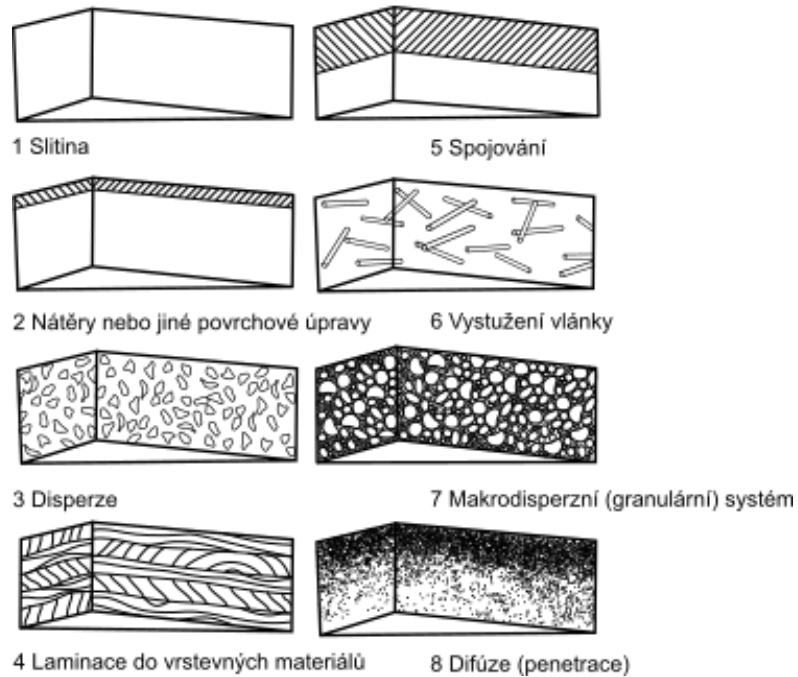
Podle disperzní fáze (výztuže)

Kompozit prvního typu obsahuje pevnou disperzi, jedná se o nejrozšířenější druh kompozitu, a proto se mu věnuje největší pozornost.

Kompozit druhého typu obsahuje kapalnou disperzi. Jedná se o málo používaný druh kompozitu, spadají sem pórovité struktury vyplněné mazacím olejem.

Kompozit třetího typu obsahuje plynnou disperzi. Do této kategorie spadají všechny pěnové materiály, například kovové pěny. [11]

Možnosti vytvoření kompozitu



Obrázek 3.3: Možnosti vytvoření kompozitu [10]

Podle tvaru disperze

Částicové

Základní jednotka dané disperze má všechny rozměry stejného řádu. Tyto částice mohou být rozličných tvarů (kulovitý, destičkový, tyčinkový). Různé druhy disperze jsou graficky znázorněny v obrázku 2.4.

Kompozit

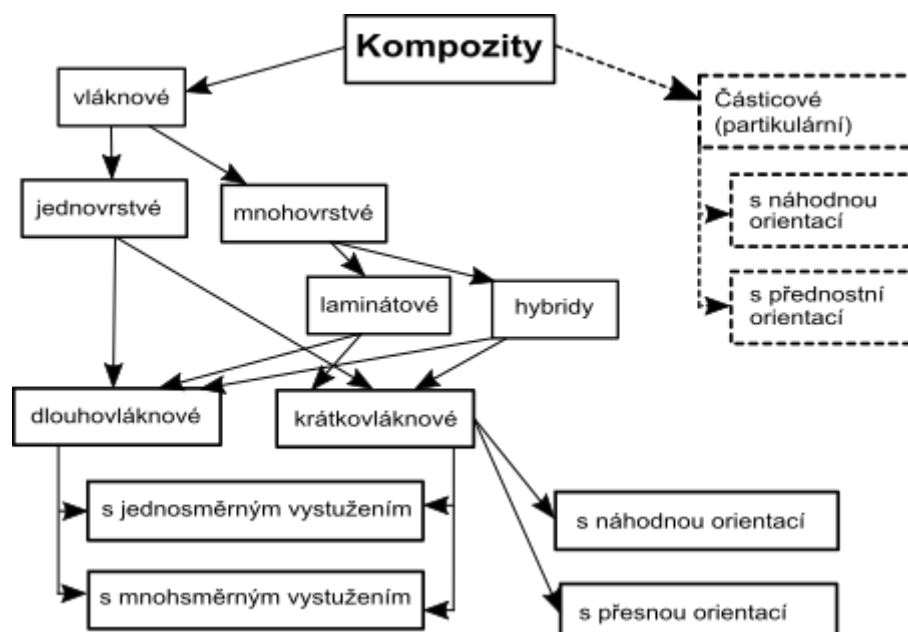


Obrázek 3.4: Kompozity s různými druhy disperze [15]

Vláknové

Základní jednotka dané disperze, tedy vlákno, má délku mnohonásobně větší než ostatní rozměry. Vlákňové kompozity se dále dělí (Obrázek 3.5) dle délky vláken a uspořádání na:

- Krátká vlákna – jsou kratší než kritická délka a při lomu jsou vytažena, obvykle je těžké řídit jejich uspořádání v kompozitu.
 - Jednoosé uspořádání
 - Dvojose uspořádání – náhodně rozložena v rovině
 - Trojose uspořádání – náhodně rozložena v prostoru
- Dlouhá vlákna – jsou delší než je kritická délka a při lomu dochází k přetržení.
 - Jednoosé uspořádání
 - Dvojose uspořádání – náhodně rozložena v rovině
 - Trojose uspořádání – náhodně rozložena v prostoru
- Spojitá vlákna – vlákna jsou vedena přes celou délku kompozitu bez přerušení, obvyčejně se předpokládá, že vlákna jsou hlavní nosnou složkou ve směru namáhání, zatímco matrice má funkci ochrannou a spojovací.
 - Jednoosé uspořádání
 - Dvojose uspořádání (např. tkanina) [11].



Obrázek 3.5: Dělení vláknových kompozitů [10]

3.3 Výztuž - čedič

Čedič je generický název pro skupinu hornin, které obsahují kysličníky, rudné materiály a zejména sklo. Jedná se o horninu sopečného původu, přesněji o ztuhlou lávu. Jde o nejhojnější magnetickou horninu na zemském povrchu, mezi světově nejvýznamnější naleziště patří Sibiřské trapy, oblast řeky Columbia, dále pak Havajské ostrovy a Island. V České republice lze čedič nalézt v třetihorních útvarech Českého středohoří. Většina tuzemských nalezišť je tvořena alkalickým čedičem a jeho deriváty, tento typ však není vhodný pro výrobu čedičových vláken.

3.3.1 Složení čediče

Čedič je tvořen vyrostlicemi, jako jsou pyroxeny (50 hm %), plagioklas (30 hm %), olivín (15 – 20 hm %) a magnetit (10 hm %). [16]

Pyroxen je horninotvorný nerost, pro nějž je typická pravouhlá štěpnost a dobrá tavitelnost. Jedním z nejznámějších představitelů je augit. Augit tvoří krátké krystaly, které mají v průřezu osmiúhelníkový tvar, jejich barva je černohnědá až hnědá a obsahuje kysličníky kovů SiO_2 . [16]

Plagioklas neboli sodnovápenatý živec je směsí albitu ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) a anoritu ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$). Tento nerost je tvořen většími krystaly, u kterých lze pozorovat vícenásobné změny ve složení od středu ke kraji jednotlivých krystalů. [16]

Olivín je nerost žlutohnědé až olivově zelené barvy se skelným leskem a krystalovým povrchem. Jedná se o těžce tavitelný křemičitan s proměnlivým poměrem hořčíku a železa [16].

Magnetit se stejně jako olivín řadí mezi těžce tavitelné nerosty. Má černý lesklý vzhled a zrnitou strukturu, jedná se o směs FeO a Fe_2O_3 , je znám pro své magnetické vlastnosti. [16]

Čedič lze dělit do tří hlavních skupin, a to podle obsahu SiO_2 . Čediče s obsahem SiO_2 do 42 % se nazývají alkalické, slabě kyselé čediče obsahují od 43 % do 46 % SiO_2 a mezi kyselé se počítají všechny ty, které mají více než 46 % SiO_2 . Pro výrobu vláken se používají pouze kyselé čediče, přičemž dalšími důležitými požadavky jsou: schopnost tání bez pevných zbytků, optimální viskozita směsi a schopnost tuhnutí bez výrazné krystalizace.

Základním technologickým kritériem pro selekci čediče k výrobě vláken je tzv. koeficient kyselosti M_k . Technologicky ideální hodnota pro výrobu vláken je $M_k = 1.65$, lze ale použít i čediče, jejichž hodnota je v rozmezí 1.1 až 3. [16]

$$M_k = (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{CaO} + \text{MgO}) \quad (1)$$

3.3.2 Čedičová vlákna

Čedičová vlákna vznikají stejně jako vlákna skleněná tavením silikátových minerálů, které se vyskytují v přírodě, a můžeme je tak řadit mezi vlákna anorganická. Byla patentována již ve 30. letech 20. století, ale jejich rozmach začal až v 60. letech 20. století při snaze nacházet nové odolné materiály [17].

Složení a vlastnosti

Hlavní tavnou horninou jsou v současné době bazaltoidy, také se však mohou využívat fonolity, grafity a opuky. Druhotné suroviny využívané pro zpracování v tavenině jsou především metalurgické strusky. Nejvyužívanější bazalty jsou neovulkanické bazické výlevné horniny, které jsou tvořeny horninotvornými minerály. Největší zastoupení v hornině má bazický plagioklas

a druhým minerálem je monoklinický pyroxen. Dalšími minerály, které se mohou v bazaltoidu vyskytovat, je olivín, rombický pyroxen, amfibol nebo biotit. [16]

Výroba vláken

Hlavní surovinou pro výrobu čedičových vláken je přírodní čedič, který je třeba rozdrtit na kamenivo o velikosti 8–10 cm pro klasickou pec a o 0,6–0,8 cm pro mikrovlnou pec. Čedičová vlákna se vyrábějí tavným zvlákňováním při teplotách 1500 až 1700 °C, vlákna lze dále dlužit při teplotách okolo 1300 °C. Kvalitu výsledného produktu ovlivňuje hlavně technologické zařízení a technologický postup výroby, je třeba sledovat tři hlavní fyzikálně-chemické vlastnosti roztavené horniny, a to viskozita taveniny, teplota liquidu a schopnost krystalizace. [16]

Viskozita taveniny je vlastnost, která ovlivňuje chladnutí a silicifikaci roztavené horniny. Viskozita má vliv na vývoj krystalické fáze, což je nežádoucí jev, také má vliv na proces tvarování vláken. Čím vyšší má surovina viskozitu, tím nižší je schopnost krystalizace taveniny. [16]

Teplota liquidu je taková teplota, při které nedochází ke spontánní krystalizaci v silotvorných soustavách. Z technologického pohledu by měla teplota liquidu být udržována v rozmezí od 50 do 100 °C. Obecně lze říci, že čedičové taveniny mají vyšší teploty liquidu. [16]

Krystalizace jako taková je při tvorbě čedičových vláken nežádoucí, při výrobě je třeba zachovat amorfní skelný stav bez krystalické fáze. Z tohoto důvodu se při výrobě vláken teplota zvyšuje na teplotu liquidu, čímž dochází k ničení krystalizačních zárodků. [16]

Při použití klasických pecí na výrobu čedičových vláken se využívají převážně odstředivé způsoby výroby nebo tzv. rozfukování, výsledným produktem jsou poté krátká vlákna. Multifilové čedičové hedvábí se získává dvěma způsoby, buď využitím pecí s odporovým ohřevem a následným tažením tryskami s malým průměrem, produkt se poté navíjí na kotouč. Nebo s ohřevem za pomoci mikrovlnné technologie. Hlavní výhodou mikrovlnné pece je vedení tepla ze středu k povrchu, tím pádem nedochází k úniku tepla, což vede k urychlení procesu tavení. Ve srovnání s klasickou pecí, kdy po pěti minutách lze pozorovat první známky změny v tavení, v mikrovlnné peci je po pěti minutách hornina téměř roztavená. [16]

Vlastnosti čedičových vláken

Pevnost čedičových vláken se pohybuje v rozmezí od 1,1 do 1,5 GPa a tažnost bývá kolem 2 %. Hlavním vlivem, ovlivňujícím pevnost vláken, je teplota vyšší než 700 °C, mnohem menší vliv potom má chemické prostředí a působení vody. Dalším významným faktorem je stáří vláken, které souvisí s nedokonalostí povrchu vláken, prachovými částicemi a absorbovanou vlhkostí.

Čedičová vlákna jsou velmi odolná vůči vlhkosti, neovlivňuje je ani teplá nebo studená voda. Vlákna také velmi dobře odolávají louhům, i těm s vysokou koncentrací. Oproti tomu kyseliny mají na vlákna negativní vliv a degradace vláken je patrná už po několika hodinách.

Vlákna mají také velmi dobré izolační vlastnosti. Ve srovnání s azbestem izolují čedičová vlákna trojnásobně lépe, vlákna jsou také velmi dobrým zvukovým izolantem, a to díky vysoké pórovitosti vlákněné spleti [16]. Pro své dobré mechanické vlastnosti se využívají v leteckém a automobilovém průmyslu jako ohnivzdorný textil, dále jsou vlastnosti čedičových vláken využívány v kompozitních materiálech napříč různými odvětvími včetně stavebnictví. [18]

3.3.3 Čedičová vata

Spadá do kategorie minerálních vat a spolu se skelnou vatou se jedná o jeden z nejběžněji používaných materiálů pro zateplování budov. Se stále se zvyšujícími nároky na snižování emisí CO₂ a stavbě pasivních domů je jasné, že i poptávka po minerální vatě bude dále stoupat. V roce 2020 byl trh s minerální vatou oceněn na 1,4 miliardy USD a předpokládá se, že v roce 2030 bude dosahovat 2,2 miliard USD [19].

Výroba čedičové vaty

Obecně je čedičová vata vyráběna ze směsi tvořené asi 75–80% čediče a 20–25% strusky, do obsahu čediče se také zahrnují cihly (Obrázek 3.6) tvořené rozemletými odřezky vaty vzniklými při tvarování čedičového rouna do výsledného produktu a dalšími komponenty. Využívá se zde toho, že čedič je tavná hornina, a je tedy možné jej opakovaně tavit bez změny vlastností. Připravená směs je tavena v kupolové peci o teplotě 1350–1450 °C. Tavenina následně vytéká na rozvlákňovací kotouče, kde je vlivem odstředivé síly odmrštěna a v proudu ofukovacího vzduchu přeměněna na jemné vlákno. [20]



a) Čedičová cihla z výrobního odpadu



b) Ukázka vnitřní struktury čedičové cihly

Obrázek 3.6: Čedičová cihla z technologického odpadu vznikajícího při výrobě čedičové vaty.

Kapičky, které již nemají dostatečně vysokou teplotu a nejsou plastické, odlétají od kotoučů v podobě malých zrněk tzv. granálií. Ty částečně padají dospod rozvlákňovacího stroje a jsou vráceny zpět do pece. Granálie, které nepropadnou, jsou spolu s rozvlákněnou hmotou unášeny do usazovací komory, kde je aplikován vodní roztok s pojivky, vodoodpudivými, protiplísňovými přísadami. Takto ošetřená vlákna jsou nanášena ve vrstvách na pás, který vede do vytvrzovací komory, ve které dochází k odpaření vody a vytvrzování rouna s pojivky při teplotě 180–220 °C. Následně dochází k ochlazení a vata z vytvrzovací komory kontinuálně přechází k přítlačnému zařízení, které rychlostí posunu a intenzitou podávání vytváří vrstvu o dané objemové hmotnosti, která se liší dle účelu použití výsledného produktu. Nakonec se materiál řeže na bloky a balí. [20]

Využití čedičové vaty

Díky svým vlastnostem je čedičová vata v různých svých formách používána jako izolace vnějších i vnitřních prostor domů, ale i jako izolace průmyslových objektů. Neslouží však pouze jako izolace tepelná, ale je používána rovněž jako akustická izolace a pasivní protipožární ochrana. Lehké a měkké výrobky z minerální vlny se používají v rámových domech a jiných konstrukcích s dutinami. Těžší a tvrdší desky z minerální vlny s vysokou objemovou hmotností se používají tam, kde je tepelná izolace určena k přenášení zatížení, například na podlahy nebo střechy. Minerální vlna může být také použita jako výplňový materiál k vyplnění různých dutin a prostor. Typické hodnoty tepelné vodivosti pro minerální vlnu jsou mezi 30 a 40 mW/mK. [21]

Výhody použití čedičové vlny:

- Propustnost par – umožňuje vlhkosti cirkulovat a odpařovat se. Proto se jedná o vhodnou výplň do dutých stěn.
- Stálost – v průběhu let nedochází ke změnám tepelně izolačních vlastností.
- Zvuková izolace – kromě tepelné izolace je vata schopná efektivně pohlcovat i hluk.
- Ohnivzdornost – jelikož se čedič taví při vysokých teplotách, je i vata ohnivzdorná a nehořlavá.
- Jednoduchá manipulace – možnost řezat a upravovat jednotlivé desky v místě stavby bez ztráty tepelných vlastností.
- Zdravotní nezávadnost – oproti karcinogenní azbestové vatě je zdravotně nezávadná a méně dráždivá k pokožce oproti skelné vatě. [22]

3.4 Cement

Obecně lze říci, že cement je látka sloužící jako pojivo, která má schopnost tuhnout a vázat další materiály dohromady. První zmínky o tomto materiálu pocházejí už ze starověkého Říma, kde míchali sopečný popel a pálené vápno. V moderní historii se využívání cementu datuje od roku 1824, kdy patent na výrobu portlandského cementu získal Joseph Aspdin z Anglie, odtud se výroba pojiva rozšířila po celém světě [23].

Cement se vyrábí ve vysokých teplotách, kdy se smíchá vápenec a jíla ve správném poměru. Při teplotách okolo 1450 °C dochází k tavení hornin a vzniká slínek, který má podobu tvrdých, několik centimetrů velkých valounků. Celý proces probíhá v kontinuální rotační peci. Slínek obsahuje hlavně křemičitany a hlinitany, po částečném vychladnutí se drtí a mele, výsledným produktem je potom šedivý prášek, který po smíchání s vodou vytváří hydraulickou složku betonu. [24]

3.4.1 Dělení cementů

Cementy lze dělit dle evropské normy 197-1, tato norma dělí cementy do pěti skupin:

- Portlandský cement obsahuje maximálně 5 % dalších příměsí, jeho hlavní vlastností je rychlý nárůst pevnosti a vysoké hydratační teplo.
- Portlandský směsný cement obsahuje nanejvýš 35 % jednoduchých příměsí, výsledné vlastnosti potom závisí na použitých příměsích.
- Vysokopecní cement je název třetí kategorie, zde se k základnímu, portlandskému cementu přidává větší množství vysokopecní strusky.
- Pucolánový cement obsahuje vyšší podíl pucolánu neboli sopečného popela. Hlavní výhodou potom je odolnost vůči mořské vodě a obecně vysoká odolnost v mokřém prostředí.
- Směsný cement obsahuje větší množství vysokoprocentní strusky a pucolánu nebo popílku. Tento cement se vyznačuje nízkou pevností, hodí se zejména na nenáročnou a podkladovou konstrukci. [25]

3.5 Matrice - Cementové potěry

Cementové potěry patří mezi stavební materiály s širokou škálou uplatnění v bytové i průmyslové zástavbě. Kde se využívají pro své dobré mechanické vlastnosti, odolnosti obrusu. Slouží k vyrovnání nerovností podlah, dosažení potřebné výšky nebo jako konečná úprava povrchu [24].

Základní složení cementových potěrů se neliší od klasického betonu. Základními složkami jsou:

- Cement – slouží jako pojivo, je možné využít všechny druhy cementů, ale jeho dávka by neměla být více než 450 kg/m³.
- Kamenivo – zde je důležitý výběr vhodné velikosti zrna, které je jedním z parametrů pro členění cementových potěrů. Tyto parametry jsou popsány v tabulce číslo 2.
- Voda – množství vody je doporučeno co nejnižší, pro lepší zpracovatelnost je možné použít plastifikační nebo superplastifikační přísady. [24]

3.5.1 Dělení cementových potěrů

Na základě evropské normy EN 13813 Potěrové materiály a podlahové potěry se materiál dělí dle velikostí zrn a aplikační tloušťky na stěrky a potěry [26]. V tabulce 2.1 jsou tyto definovány parametry.

Tabulka 3.1: Členění podlahových hmot dle velikostí zrn [26]

Výrobek	Slovní označení zrnitosti	Maximální zrno [mm]	Obvyklá aplikační tloušťka vrstvy [mm]	Obvyklá aplikační konzistence
Stěrky	Jemné	0,2–0,3	2–10	Plastická, samonivelační
	Střední	0,4–0,6	3–15	
	Hrubé	0,7–1,2	4–30	
Potěry	Jemné	1,2–1,6	5–35	Plastická, drolenková, samonivelační
	Střední	2,0–4,0	15–80	
	hrubé	6,0–8,0	20–100	

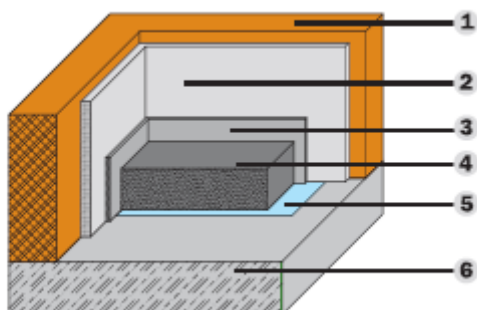
Z tabulky vyplývá, že výše uvedená norma není zcela přesná, tím pádem výrobek s maximální velikostí zrna 1,2 mm lze prodávat jak pod označením „hrubá stěrka“, tak také jako „jemný potěr“.

Použití cementových potěrů

Jak již bylo zmíněno, cementové potěry se používají jako vyrovnávací vrstva podlah jak v průmyslové, tak i bytové výstavbě. Dle způsobu použití je můžeme rozdělit do následujících kategorií:

Spojený potěr

Spřažené neboli spojené potěry se využívají jako konečná úprava podlah, kde není možné dosáhnout rovného povrchu pomocí betonu (Obrázek 3.7). Pro správné spojení je nutné očištění a zdrsnění podkladu [24].

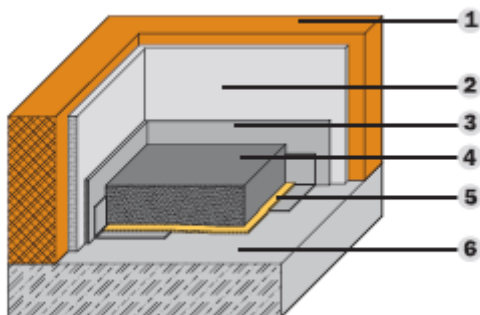


1. Stěna
2. Omítka
3. Dilatační páska
4. Samonivelační potěr
5. Penetrace
6. Nosný podklad

Obrázek 3.7: Spojený potěr [27]

Potěr na oddělovací vrstvě

Potěr na oddělovací vrstvě je takový potěr, který je oddělen od podkladu pomocí celoplošné oddělovací vrstvy, kterou je obvykle tenká fólie (Obrázek 3.8). Potěry na oddělovací mezivrstvě se zhotovují při pokládce parozábrany nebo hydroizolační vrstvy. [27]

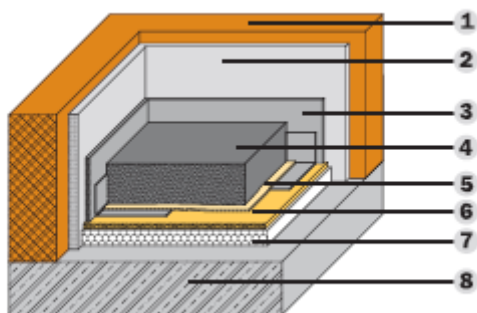


1. Stěna
2. Omítka
3. Dilatační páska
4. Samonivelační potěr
5. Separální folie
6. Nosný podklad

Obrázek 3.8: Potěr na oddělovací vrstvě [27]

Potěr na izolační vrstvě

Plovoucí potěr je potěr, který je po celé ploše zcela oddělen od podkladu pomocí izolační vrstvy (buď tepelně izolační, nebo akustické). Taktéž je oddělen od ohraničujících a prostupujících konstrukcí pomocí okrajových dilatačních pásek (Obrázek 3.9). Pevná a stabilní deska potěru spolu s izolační vrstvou vytváří systém, který dokáže tlumit vibrace a zlepšit neprůzvučnost podlahy při chůzi. [27]



1. Stěna
2. Omítka
3. Dilatační páska
4. Samonivelační potěr
5. Separační folie
6. Kročejová izolace
7. Tepelná izolace
8. Nosný podklad

Obrázek 3.9: Potěr na izolační vrstvě [27]

Dělení potěrů podle pojiva

Potěry lze dělit pomocí dvou dalších parametrů. První rozdělení vychází z použitého pojiva a dělí se na cementový, magnezitový, anhydritový a asfaltový potěr. Druhou možností je poté dělení dle způsobu zpracování, zde se jedná o rozdělení na suchý a nivelační potěr [24].

Nejstarším typem potěru je cementový potěr, jeho zpracování je náročné, a proto je v současné době nahrazován nejčastěji pojivem anhydritovým. Cementový potěr se vyrábí z písku z frakce 0 až 16 mm, cementového pojiva a vody. [24]

Magnezitové potěry se vyskytují jen zřídka. Jejich hlavní výhodou je vysoká odolnost proti mechanickému namáhání, olejům a rozpouštědlům. Hlavním využitím tohoto potěru je antistatická podlaha, díky své elektrické vodivosti. Magnezitový potěr se nejčastěji vyrábí z magnezitu, křemenné moučky a chloridu hořečnatého. [24]

Anhydritové potěry se řadí mezi nepoužívanější typy betonových podlah. Jejich hlavní výhodou je jednoduchá a rychlá aplikace. Pokud je tento potěr vystaven trvalému působení vlhkosti, dochází u něj k výrazným ztrátám pevnosti, proto se tento typ podlah využívá výhradně jen v interiérech. K výrobě se používá anhydrit, křemičitý písek frakce 0–4 mm a voda. [24]

Asfaltový potěr se řadí mezi cenově nejdražší variantu potěrů, jeho pořizovací cena je 2x až 3x vyšší než u ostatních typů. Tyto potěry se vyznačují řadou výhod, jsou vodotěsné, neobsahují dehet a také jsou bez zápachové, lze je tedy použít i v interiérech. Tyto podlahy mají také velmi dobré zvukové izolační vlastnosti. Při výrobě se jako plnivo používá písek z frakce 0 - 8 mm. [24]

Dělení potěrů podle způsobu zpracování

Suché potěry byly využívány zejména v minulosti a převážně se v nich vyskytovalo cementové pojivo. Hlavní využití těchto potěrů je pro vyrovnání betonových podkladů nebo také jako krycí

vrstva. Velkou nevýhodou suchých potěrů je jejich pevnost, která je nižší než u potěrů samonivelačních. [24]

Samonivelační potěry, také označovány jako lité, jsou využívány z důvodu jednodušší aplikace. Lité směsi se vyznačují svou vysokou tekutostí, čímž dochází k maximální hutnosti a rovinatosti. Tyto potěry mají garantovanou vyšší pevnost a také lepší tepelnou vodivost [24].

3.5.2 Požadavky na mechanické vlastnosti potěrů

Pro různé druhy potěrů jsou normami vyžadovány jiné druhy zkoušek, které odpovídají účelu použití potěru. Pro cementové potěry jsou normou ČSN EN 13813 [26] požadovány tři zkoušky, a to pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu a odolnost proti obrusu. Odolnost proti obrusu je povinná pro materiál určený pro povrch namáhaný na otěr. Dle účelu použití materiálu je možné vybrat celkem ze tří druhů zkoušek odolnosti proti obrusu.

Kromě povinných zkoušek norma udává také volitelné zkoušky, kterých je pro cementové kompozity celkem devět. Mimo jiné mezi ně patří i odolnost v rázu. [26]

Pevnost v tlaku

Udává se na základě normy EN 13892-2, vždy musí být deklarována výrobcem. (Tabulka 3.2) Označuje se *C (compression)*, jednotkou je N/mm^2 a rozděluje se do dvanácti pevnostních tříd.

Tabulka 3.2: Pevnostní třídy potěrových materiálů [26].

Třída	C5	C7	C12	C16	C20	C25	C30	C35	C40	C50	C60	C70	C80
Pevnost v tlaku [N/mm ²]	5	7	12	16	20	25	30	35	40	50	60	70	80

Pevnost v tahu za ohybu

Udává se na základě normy EN 13892-2, vždy musí být deklarována výrobcem. (Tabulka 3.3) Označuje se *F (flexural)*, jednotkou je N/mm^2 a rozděluje se do třinácti pevnostních tříd.

Tabulka 3.3: Třídy potěrového materiálu podle pevnosti v tahu za ohybu [26].

Třída	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F10	F15	F20	F30	F40	F50
Pevnost v tahu za ohybu [N/mm ²]	1	2	3	4	5	6	7	10	15	20	30	40	50

Odolnost proti obrusu

U potěrů namáhaných na obrus musí být jejich odolnost určena podle normy EN 13892-3.

Metody zkoušení odolnosti proti obrusu:

- Metoda Böhme A [$cm^3/50cm^3$], EN 13892-3
- Metoda BCA AR [μm], EN 13892-4

- Metoda zjišťující odolnost obrusu valivým zatížením RWA [cm³] EN 13892-5

3.6 Kamenivo

Kamenivo, jak je definováno sadou norem, je zrnitý materiál používaný ve stavebnictví. Může se jednat o přírodní, umělé nebo recyklované kamenivo. V praxi se kamenivo často používá jako plnivo, které se kombinuje s vhodnými pojivy pro výrobu malt a betonů. V silničním a železničním stavitelství se kamenivo využívá pro vytvoření uměle zhutněných vrstev. Hlavním účelem kameniva je vytvořit relativně pevnou a odolnou strukturu, která vzniká díky vzájemnému opření a zaklínění zrn. [24]

Přírodní kamenivo je anorganického původu a podléhalo pouze mechanickému zpracování. Jedná se o jednu z nejběžnějších stavebních surovin, která je tvořena přírodními horninami. [24]

Přírodní kamenivo se dělí na těžené a drcené v závislosti na způsobu těžby a další úpravě. Těžené kamenivo je buď ledovcového původu, nebo pochází z říčních naplavenin. Vzniká přirozeným rozpadem horniny a je těženo z vodních toků a náplavů. Vyznačuje se hlavně zaoblenými tvary zrn s přirozeně vyhlazeným povrchem díky přepravě zvětralých hornin. Vytěžený materiál se třídí a případně drtí. Podíl předdrcených zrn s alespoň jednou lomovou plochou by neměl převýšit 40 %. Drcené kamenivo se vyznačuje nepravidelným tvarem zrn, ostrými hranami a drsným lomovým povrchem. Získává se umělým drcením velkých kusů přírodních hornin a následným tříděním. [24]

Umělé kamenivo je definováno jako kamenivo anorganického původu, které bylo podrobeno tepelnému nebo jinému procesu. Vyrábí se buď z průmyslových odpadů, jako je popílek, struska nebo popílkové sbalky, nebo z upravených hornin, jako je keramzit, expandovaný perlit nebo siopor. V poslední době se stále častěji využívá recyklované kamenivo, které spadá do kategorie umělého kameniva. Norma specifikuje, že se jedná o kamenivo anorganického původu, které bylo dříve užito v konstrukci. Ve většině případů se jedná o rozdrcené cihly a beton. [24]

3.7 Cementové kompozity vyztužené vlákny

Materiály na bázi cementu jsou poměrně křehké, proto se často vytvářejí cementové kompozity s různými druhy vláken, které zabraňují šíření trhlin a prodlužují životnost. Nejčastěji se můžeme setkat s kovovými vlákny, dále se používají vlákna skleněná, čedičová, polypropylenová, nylonová nebo uhlíková vlákna. Použití různých vláken v cementových kompozitech je neustále předmětem zájmu vědců, kteří zkoumají vliv přítomnosti vláken a jejich orientace na vlastnosti výsledného materiálu.

Vědci z univerzity Hebei v Číně proto v roce 2023 vydali souhrnnou studii shrnující výsledky aktuálních výzkumů na téma cementových kompozitů s různými druhy vláken. Závěry výzkumů ukazují, že výsledky všech studií se shodují na pozitivním vlivu přítomnosti vláken ve vzorku na mechanické vlastnosti. U zkoumaných vzorků se zlepšila pevnost v tahu, ohybu i ve smyku. Je však velmi důležitá správná příprava vzorků, jelikož právě distribuce vláken a jejich orientace ve vzorku je pro pozitivní výsledky klíčová. Pokud nejsou vlákna rozmístěna rovnoměrně, vznikají shluky vláken a hluchá místa, což vede ke zhoršení mechanických vlastností, které se navíc mohou výrazně lišit v různých částech vzorku. Dále výsledky studií dokazují významný vliv orientace vláken na mechanické vlastnosti, kdy vlákna jednosměrně orientovaná dosahovala v pevnosti v ohybu lepších výsledků než vlákna orientovaná náhodně. [28]

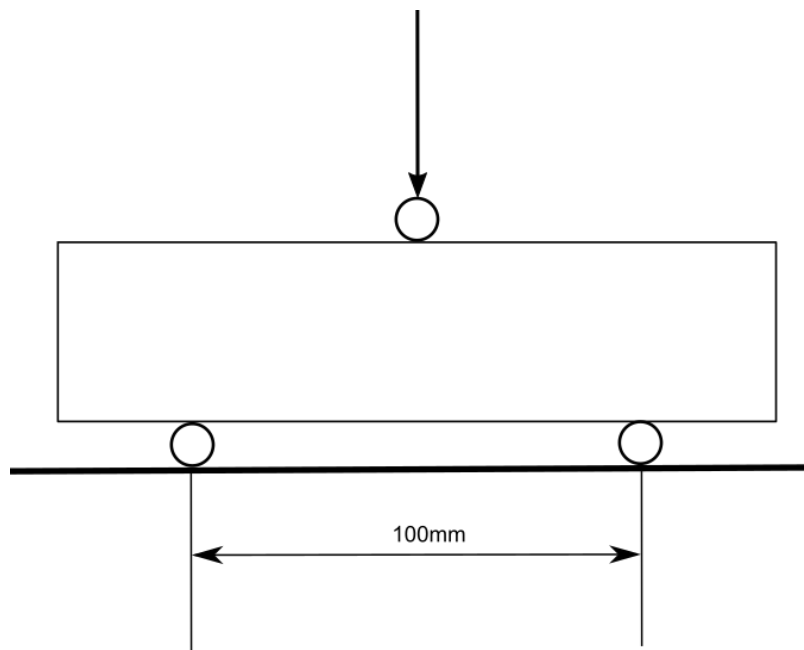
Hodnocením mechanických vlastností cementového kompozitu vyztuženého pomocí čedičových vláken se zabýval tým laboratoře Yellow river. Z jejich zkoumání vyplývá, že nejlepšími výsledky, z hlediska mechanické pevnosti, dosahují vzorky s 1 % příměsí čedičových vláken. Délka těchto vláken byla v rozmezí 12–20 mm a průměr 10–20 μm . Studie dále dokazuje, že přimíchání čedičových vláken výrazně zvyšuje lomovou houževnatost a maximální průhyb betonu. Čedičová vlákna také, na rozdíl od polypropylenových a polyvinylalkoholových vláken, zvyšují betonovou nepropustnost iontů, čímž dochází ke zvýšené odolnosti materiálu proti erozivním vlivům vnějšího prostředí. Z mikrostrukturální analýzy vychází, že přidáním čedičových vláken ve správném poměru dochází ke snížení pórovitosti, je však třeba brát v potaz, že při nadměrném přidání vláken dochází k jejich shlukování, což má nakonec negativní vliv na pevnost betonu. [29]

3.8 Mechanické vlastnosti

Zásadním faktorem určujícím možnost použití materiálu k danému účelu. Pro cementové kompozity jsou nejdůležitějšími vlastnostmi pevnost v tahu za ohybu, pevnost v tlaku a odolnost proti obrusu.

3.8.1 Pevnost v tahu za ohybu

Zkouška pro pevnost v tahu za ohybu je definována normou EN 13892-2 a je prováděna na trámcích o rozměrech 40x40x160 mm. K testování dochází po 28 dnech, po vyzrání vzorků. Testovací přístroj je vybaven třemi válcovými opěrami o průměru 10 mm, které tvoří tři působící body. Dvě z těchto opěr působí na zkušební trámeček zespodu a jsou od sebe vzdáleny $100 \pm 0,5$ mm. Třetí opěra je umístěna přesně v polovině vzdálenosti mezi spodními opěrami a působí naopak shora, princip zkoušky můžeme vidět na obrázku 2.10.



Obrázek 3.10: Uspořádání zatížení pro stanovení pevnosti v tahu za ohybu.

Samotná zkouška pevnosti v tahu za ohybu musí být provedena na přístroji odpovídajícímu normě, jedná se například o Tiratest T2400, a její průběh je následovný: zkoušený trámeček je umístěn na spodní opěry, postupně je zatěžován, dokud nedojde k jeho destrukci a přelomu. Pevnost v tahu za ohybu je stanovena v okamžiku lomu. Aby byla zkouška vyhodnocena jako úspěšná musí dojít k porušení vzorku do 90 s. Výsledkem je maximální síla, při které došlo k porušení vzorku. [24]

Pro získání napětí v ohybu je potřeba dosadit výslednou maximální sílu získanou při testu do vzorce spolu s rozměry vzorku.

$$R_f = \frac{3Fl}{2bh^2} \quad (2)$$

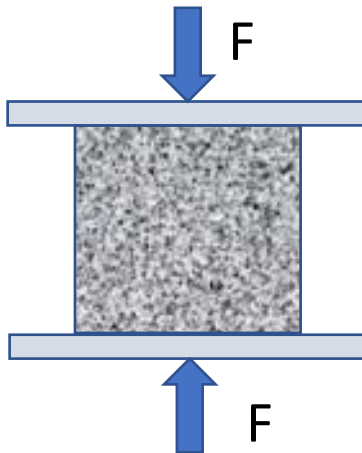
Kde R_f [MPa] je napětí v ohybu, F [N] je síla, L [mm] je vzdálenost podpěr, b [mm] šířka vzorku a h [mm] je výška vzorku.

3.8.2 Pevnost v tlaku

Při stanovování pevnosti v tlaku betonových kompozitů využíváme jednu polovinu zkušebních trámků o rozměrech 40x40x160 mm a řídí se stejnou normou EN 13892-2 jako pevnost v tahu za ohybu. Zkoušky se provádějí po 28 dnech od doby, kdy beton začal tuhnout.

Trámky, které již byly předtím zlomeny při zkoušce pevnosti v tahu za ohybu, jsou nyní použity k určení jejich pevnosti v tlaku. Pro zkoušku je možné využít různá zařízení, splňující požadované parametry testu, jedním z nich je například přístroj Tiratest T2400 v režimu tlaku.

Po ověření správného uložení trámů a nastavení přístroje provádíme samotnou zkoušku pevnosti v tlaku (Obrázek 3.11). Postupně zatěžujeme vzorek tak, že na začátku měření dochází k rychlejšímu nárůstu síly působící na plochu vzorku, který však brzy zpomaluje, k ukončení zkoušky dojde v momentě rozrušení vzorku. Celá zkouška by měla trvat minimálně 10 sekund. [24]



Obrázek 3.11: Princip testování pevnosti v tahu

Výsledkem je maximální síla, která byla potřebná pro rozrušení vzorku. Pro výpočet tlaku je nutné tuto hodnotu podělit plochou průřezu vzorku. Rovnice pro výpočet tlaku je:

$$R_m = \frac{F}{A} \quad (3)$$

kde R_m [N/mm²] je tlak, F [N] je síla a A [mm²] plocha průřezu vzorku.

3.8.3 Rázová houževnatost

Rázová houževnatost je důležitou materiálovou charakteristikou, vyjadřující schopnost materiálu odolávat iniciaci a šíření trhliny, a je spojena s měrnou energií, kterou materiál dokáže absorbovat před porušením. Rázová houževnatost se obvykle testuje pomocí standardizovaných zkoušek, které zahrnují dynamické namáhání kyvadlovým kladivem nebo padajícím závažím. Pro cementové potěry je odolnost proti rázu definována normou EN ISO 6272.



Obrázek 3.12: Testovací přístroj LabTest CHK 50J

K měření rázové houževnatosti se často využívá Charpyho kladivo (Obrázek 3.122). Při Charpyho testu je zkušební těleso umístěno vodorovně na dvou podpěrách a je přeráženo kyvadlem uprostřed mezi nimi. Tato metoda se nazývá třibodový systém. Zkušební těleso je vystaveno rázovému namáhání a měří se absorbovaná energie při porušení. Tento postup umožňuje stanovit rázovou houževnatost materiálu a poskytuje užitečné informace o jeho chování při dynamickém namáhání [30].

Provedením testu získáme množství energie, které je těleso schopné absorbovat před porušením. Pro získání rázové houževnatosti je pak nutné tuto energii vztáhnout na plochou průřezu vzorku.

$$a_{cU} = \frac{E_c}{bh} \quad (4)$$

Kde a_{cU} [J/mm²] je rázová houževnatost, E_c [J] je energie, kterou kladivo narazí na vzorek, b [mm] je šířka vzorku a h [mm] je tloušťka vzorku.

4 Experimentální část

Cílem této diplomové práce je vytvoření cementového kompozitu s odpadní čedičovou vatou a porovnání mechanických vlastností s cementovým kompozitem se sekanými čedičovými vlákny. Také bude zkoumáno, zda částečné nahrazení cementu bude mít vliv na výsledné mechanické vlastnosti kompozitu. Nejprve se experimentální část bude zabývat přípravou čedičové vaty pro použití v kompozitu a výrobou vzorků. Dále budou popsány zkoušky mechanických vlastností a jejich vyhodnocení.

4.1 Popis použitých materiálů

Následující část práce se zabývá podrobným popisem komponentů použitých při výrobě vzorků cementových kompozitů.

4.1.1 Cementový potěr Knauf BP1

Pro výrobu vzorků byla použita směs cementového potěru značky Knauf obsahující 20 % portlandského cementu, který je vhodný pro vnitřní i vnější konstrukce a také je možné jej použít pro výrobu menších betonových dílů a drobné betonářské práce. Technické parametry potěru můžeme najít v tabulce 3.2 níže. Dle udávané hrubosti můžeme tuto směs zařadit mezi jemné stěrky. [31]

Tabulka 4.1: Vlastnosti cementového potěru [31]

Pevnost v tlaku	Min. 30 MPa
Pevnost v tahu za ohybu	6 MPa
Zrnitost	0,0–4,0 mm
Spotřeba vody	1 l/10 kg
Sypná hmotnost	1700 kg/m ³
Doporučená minimální vrstva potěru	20 mm
Doporučená maximální vrstva potěru	50 mm
Doba zpracovatelnosti	2 hod.
Doba mísení	3–5 min
Doba zrání	Min. 28 dnů

4.1.2 Sekaná čedičová vlákna

Vlákna použitá pro výrobu vzorků byla zakoupena již nasekaná v délce 10–12 mm. Nebylo je tedy nutné dále nijak upravovat. V tabulce 3.3 jsou popsány parametry použitých vláken.

Tabulka 4.2: Parametry použitých čedičových vláken [18].

Parametr	Hodnota	Jednotka
Průměr	13–19	μm
Délka	10–12	mm
Průměrná pevnost	0,512	N/tex
Obsah lubrikace	1,0–1,5	%
Obsah spalitelných látek	0,69	%
Obsah vlhkosti	0,061	%
Počet zákrutů	0	1/m

4.1.3 Čedičová vata

Čedičová vata (Obrázek 4.1) sloužící k zateplování budov je nejčastěji distribuována ve velkých blocích různé objemové hustoty a rozměrů, což je nepraktické pro jakoukoli manipulaci a skladování. Před přípravou betonových vzorků je nutné vatu rozmělnit na malé a málo soudržné částice. Dobře rozmělněná vata je základem pro kvalitně zpracované vzorky bez shluků vláken. Vatu lze rozmělnit pomocí rotačního čepelového mixéru, planetového mlýnku a kolového mlýnu.



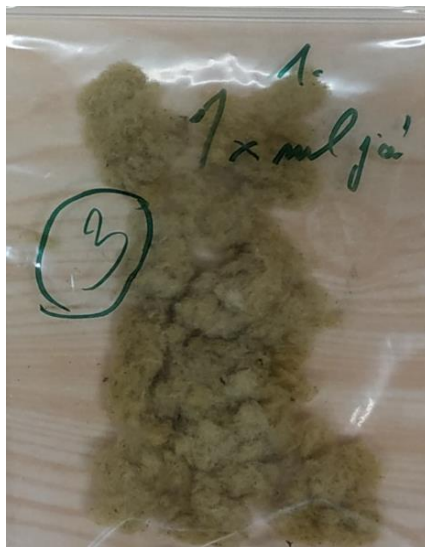
Obrázek 4.1: Ukázka čedičové vaty poskytnuté firmou Isover.

Rotační čepelový mixér

Jedná se o klasický ruční rotační čepelový mixér. Skládá se z plnicí nádoby, dvou čepelového nože umístěného uprostřed, vrchního víka a násadného motoru s ovládáním.

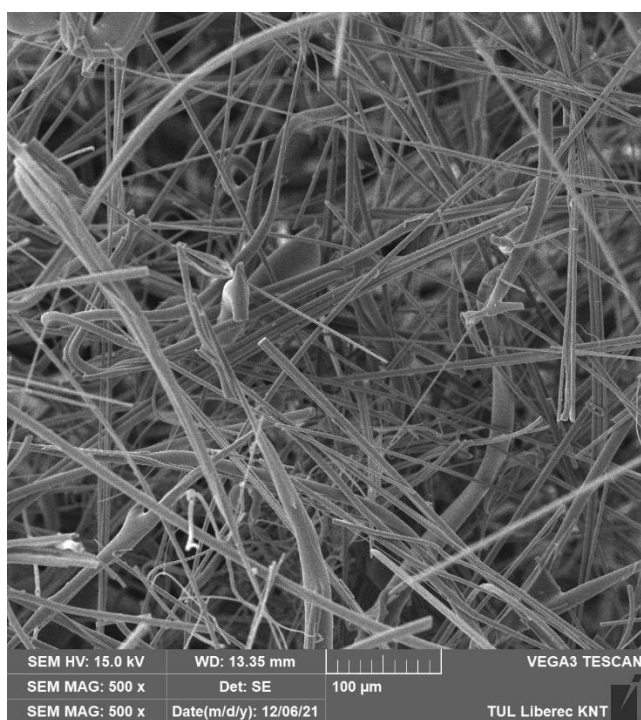
Vzhledem k objemu plnicí nádoby bylo v jednom cyklu mleto 25 g vláken (Obrázek 4.2). Mletí probíhalo na nejvyšší rychlost ve třech kolech, každé po třech minutách. Mezi jednotlivými koly byl obsah nádoby promíchán ještě ručně, aby se zajistilo co nejlepší rozmělnění vzorku.

Celkem bylo mletí podrobena pět vzorků čedičové vaty s různou objemovou hustotou. Výsledný produkt se lišil v závislosti na objemové hustotě vstupní suroviny, avšak obecně můžeme říci, že výkon mixéru byl příliš slabý a nedokázal efektivně rozmělnit vatu na malé ojednocené chomáčky.



Obrázek 4.2: Čedičová vata rozmělněná pomocí mixéru.

Na obrázku 3.3 můžeme vidět SEM snímek vaty rozmělněné pomocí čepelového mixéru zvětšený 500krát. Vlákna jsou dlouhá a do sebe propletená, což dále potvrzuje tvrzení o neefektivnosti mlecí metody.



Obrázek 4.3 SEM snímek čedičové vaty mleté pomocí čepelového mixéru.

Planetový mlýnek Pulverisette 7 – premium line

Další z metod, které byly testovány je mletí čedičové vaty pomocí planetového mlýnku. Jedná se o laboratorní zařízení sloužící k mletí tvrdých, středně tvrdých a vláknitých materiálů pro další laboratorní účely až do velikosti nanočástic.

Přístroj Pulverisette 7 – premium line (Obrázek 4.4) od firmy Fritsch dosahuje, díky vysokému výkonu, počtu otáček v rozmezí 100–1100 ot/min. Součástí zařízení jsou dvě mlecí misky s ocelovým pouzdem o objemu 20, 45 nebo 80 ml, do misek se vkládají kuličky o průměru 0,5–20 mm. Do mlecí nádoby je možné vložit maximálně 70 ml materiálu a rozmělnit jej suchým nebo mokrým procesem, konečná jemnost po umletí může dosahovat až 0,1 μm .



Obrázek 4.4: Planetový mlýnek Pulverisette 7 – premium line.

K rozmělnění vaty pro přípravu vzorků byla do mlecích misek vložena čedičová vata již předem nalmetá v ručním mixéru s kuličkami o průměru 10 mm. Přístroj byl nastaven na jeden cyklus mletí v délce 3 minut a rychlosti 829 ot/min. Jak můžeme vidět na obrázku 3.5 nedošlo k rozmělnění vaty, ale pouze k jejímu stlačení do většího chomáče. Tento proces byl opakován celkem třikrát, vždy se stejným výsledkem.



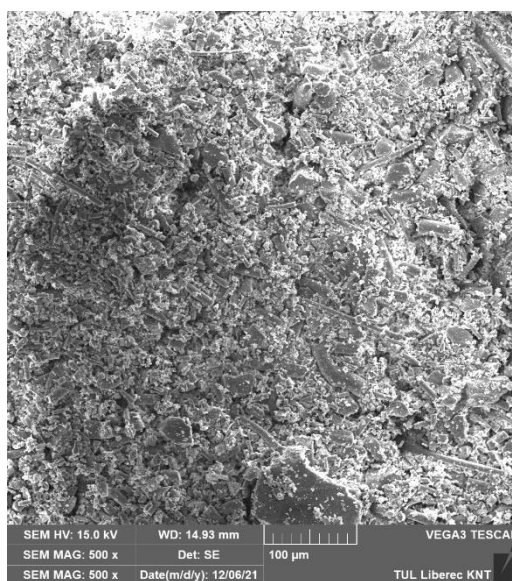
Obrázek 4.5: Výsledky mletí čedičové vaty přede mleté v ručním mixéru.

Proto jako další možnost byly mísící misky naplněny vatou přede mletou v kolovém mlýně, kde byla rozdrčena na menší částičky, s předpokladem dosažení lepšího výsledku mletí. Příklad měl při mletí nastavené stejné parametry jako u předchozí zkoušky. Na obrázku 3.6 můžeme vidět, že v tomto případě již došlo k rozemletí materiálu.



Obrázek 4.6: Výsledky mletí čedičové vaty předemleté kolovým mlýnem.

Výsledkem mletí vaty předem rozmělněné pomocí kolového mlýnu byl jemný prach, můžeme pozorovat, jak způsob předchozího rozmělnění vaty změnil výsledný produkt z planetového mlýnku. Avšak ani jeden z výstupů nepředstavovaly vhodný produkt do cementového kompozitu, jelikož je nutné, aby si vata zachovala alespoň částečně vláknitou strukturu. Další nevýhodou planetového mlýnku je možnost mletí pouze malého množství materiálu. (Obrázek 4.7)



Obrázek 4.7: SEM snímek vaty rozmělněné v planetovém mlýnku.

Kolový mlýn

Průmyslovým zařízením používajícím se k drčení a rozměňování velkého objemu materiálu je právě kolový mlýn. Jeho široká litinová kola o průměru 1 m se otáčí podle vodorovné osy a jsou umístěny na čepu, který je pojí se svislou středovou osou, čímž je zajištěn pohyb kol po obvodu mlýnu. Spodní část mlýnu tvoří síto s otvory, kterým propadávají namleté částice, jejichž velikost je ovlivněna velikostí otvorů v sítu. Dále je mlýn vybaven lopatkami, které slouží k odhrnování materiálu od okraje.

Vzorky namleté čedičové vaty pro účely této práce poskytla firma Isover Častolovice, která se zabývá výrobou minerálních vat pro zateplování budov. V závodě takto zpracovávají odpad, jako jsou například odřezky vznikající při výrobě zateplovacích panelů. Takto namletá vata je použita jako jedna z komponent pro výrobu cihel, které se následně používají při výrobě nové dávky čedičové vaty.



a) Jeden cyklus mletí

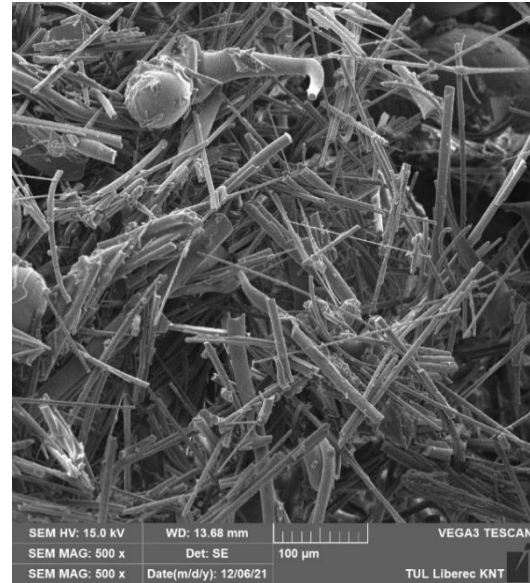
b) Dva cykly mletí

Obrázek 4.8: Vzorky čedičové vaty mleté v kolovém mlýnu.

Na obrázku 3.8 můžeme vidět vzorky vaty namleté v kolovém mlýnu. Na obrázku 3.8 a) je vata, která prošla jedním cyklem mletí, můžeme vidět, že došlo k rozmělnění panelu z čedičové vaty na chomáče, které jsou však stále poměrně velké a soudržné. Zatímco na obrázku 3.8 b) je vata po dvou cyklech mletí. Chomáče jsou již výrazně menší a i jejich vzájemná soudržnost je narušena.



a) Jeden cyklus mletí



b) Dva cykly mletí

Obrázek 4.9: SEM snímky čedičové vaty mleté kolovým mlýnem.

Na snímcích, pořízených pomocí rastrovacího mikroskopu, je patrný rozdíl v délce vláken. Na snímku vzorku, který prošel dvěma cykly mletí, je vidět větší množství krátkých vláken, zatímco na obrázku a) jsou vlákna mnohem delší. (Obrázek 4.9)

Cílem mletí bylo získat z panelu čedičové vaty dostatečně malé částice, tak aby se při zpracování cementového kompozitu rovnoměrně rozptýlily a netvořily chomáče uvnitř vzorku. Dalším z požadavků bylo zachování vlákněné struktury čediče. Z výše popsaných metod, těmto parametrům nejvíce vyhovovala vata dvakrát mletá v kolovém mlýnu, proto byla použita pro výrobu vzorků cementových kompozitů. (Obrázek 4.10)



Obrázek 4.10: Vzorky čedičové vaty mleté různými způsoby, zleva: kolový mlýn jeden cyklus, kolový mlýn dva cykly, rotační čepelový mixér, planetový mlýnek.

4.2 Postup výroby vzorků

V tabulce níže je rozepsáno množství vzorků s uvedenou váhou vláken v každém vzorku. Pro každý test bylo vytvořeno celkem pět vzorků od každého procenta a druhu vlákna, také byla

vytvořena jedna sada kontrolních vzorků pouze z vody a cementového potěru. Přidáním vaty nebo vláken do cementového potěru dojde ke snížení podílu cementu ve směsi.

Množství vláken ve vzorku bylo vypočítáno pomocí hmotnostního zlomku:

$$w_i = \frac{V_i * \rho_i}{\sum V_i \rho_i} \quad (5)$$

kde w_i [-] je hmotnostní podíl, V_i [kg] je objemový podíl a ρ_i je hustota [kg/m³] (Tabulka 4.3)

Tabulka 4.3: Rozpis vzorků pro mechanické testy s uvedeným množstvím vláken ve vzorku.

Surovina	Vzorek	Hmotnostní procento vláken [%]	Váha na 1 kg cementové směsi [g]	Počet vzorků pro rázovou houževnatost [-]	Počet vzorků pro pevnost v tlaku a ohybu [-]
Čedičová vata	VL1	1	15,2	5	5
	VL2	2	30,2	5	5
	VL3	3	45,1	5	5
	VL4	4	59,8	5	5
Čedičové vlákno	VK1	1	15,2	5	5
	VK2	2	30,2	5	5
	VK3	3	45,1	5	5
	VK4	4	59,8	5	5
Kontrolní vzorek	V01	0	-	5	5

4.2.1 Postup přípravy vzorků

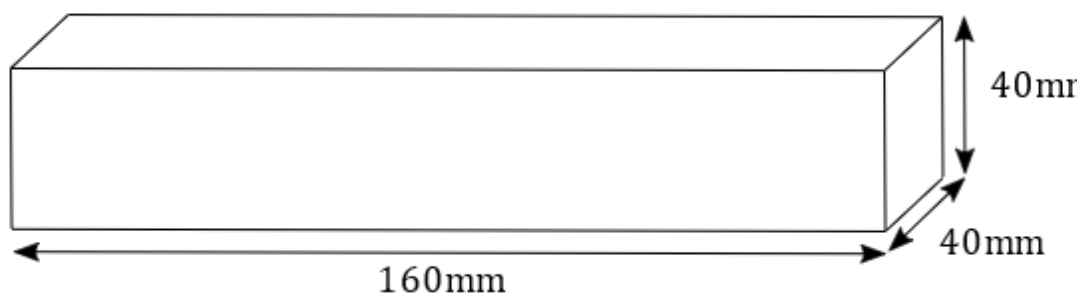
Nejprve byla společně promísená vlákna s cementovou směsí, tento proces trval 5 min. Poté byla do směsi vláken a cementového potěru přidávána postupně voda dle poměru uvedeného výrobcem potěru. Na 1 kg suché směsi bylo použito 0,1 l vody. Po přidání odpovídajícího množství vody pokračovalo promíchávání ještě 15 minut, vždy v pětiminutových intervalech, mezi kterými byla směs promíchána ručně pomocí stěrky. Tento proces měl zajistit dostatečné promísení tak, aby byla přidaná vlákna distribuována rovnoměrně celou hmotou, a tím byly zajištěny stejné mechanické vlastnosti v celém vzorku (Obrázek 4.11). Při mísení cementového potěru s čedičovými vlákny došlo k dobrému rozptýlení vaty a po přidání vody vznikla homogenní a dobře zpracovatelná hmota i při přípravě směsi se 4 hm% čedičové vaty.

Příprava vzorku s vlákny byla komplikovanější, jelikož při mísení cementového potěru se čedičová vlákna začala ojednocovat a nabývat na objemu. Při přípravě vzorků se 4 hm% vláken již čedičová vlákna nabyla takového objemu, že bylo velice problematické směs zpracovat do homogenní hmoty a bylo nutné přidat do směsi více vody.



Obrázek 4.11: Příprava cementové směsi se sekanými čedičovými vlákny.

Výsledná hmota byla nalita do předem připravené formy, která byla před použitím vystříkaná silikonovým olejem pro lepší vyndávání zatvrdlých vzorků. Jedná se o kovovou formu skládající se ze spodní desky se šrouby na bocích, jednotlivých bočnic a přepážek. Forma je tedy kompletně rozebíratelná, což umožňuje lepší vyjímání vzorku a čištění. (Obrázek 4.12)



Obrázek 4.12: Nákres výsledného vzorku z formy

Poslední krok zahrnoval odstranění vzduchu z hmoty, vzduchové komůrky ve vzorku vytvářejí slabá místa a narušují celkovou homogenitu materiálu. Pro získání co nejlepších vlastností je tedy nutné vždy odstranit co nejvíce vzduchu. Naplněné formy byly umístěny na vibrační pošinu a díky vibracím začal na povrch stoupat vzduch, který se do kompozitu dostal

během míchání. Tento proces pokračoval, dokud se na povrchu neobjevovaly žádné další bublinky, což obvykle trvalo 2-3 minuty.

Takto připravené vzorky byly následně umístěny do laboratoře, kde za konstantních klimatických podmínek zrály, zatvrdlé vzorky byly po pěti dnech vyndány z forem. Výsledkem bylo pět hranolků z jedné formy o rozměrech 40x40x160 mm, které dále zrály v laboratorním prostředí dle příslušné normy, po 28 dnech bylo možné začít provádět měření. (Obrázek 4.13)



Obrázek 4.13: Hotový vzorek pro testování mechanických vlastností.

4.3 Testování mechanických vlastností

Všechny mechanické vlastnosti byly testovány pomocí destrukčních zkoušek v souladu s danými normami. Jedná se o základní parametry řadící cementový potěr do příslušné pevnostní kategorie.

4.3.1 Pevnost v tahu za ohybu

Pro testování pevnosti v tahu za ohybu u cementových potěrů byl využit přístroj Tiratest T2400 v režimu tlaku. Testování probíhalo při rychlosti zatěžování 30 N/min. Cílem testování bylo dosáhnout porušení vzorku do 90 sekund.

Testování probíhalo na několik etap, aby byly vzorky testované vždy po 28 dnech. Nejprve byly testované kontrolní vzorky bez čedičového plniva. Jako další byly testované vzorky s čedičovou vatou a nakonec vzorky s čedičovými vlákny. Průběh zkoušek probíhal srovnatelně u všech vzorků až na vzorky se 4 hm% čedičových vláken, které byly málo pevné a k porušení došlo záhy po zahájení testu.

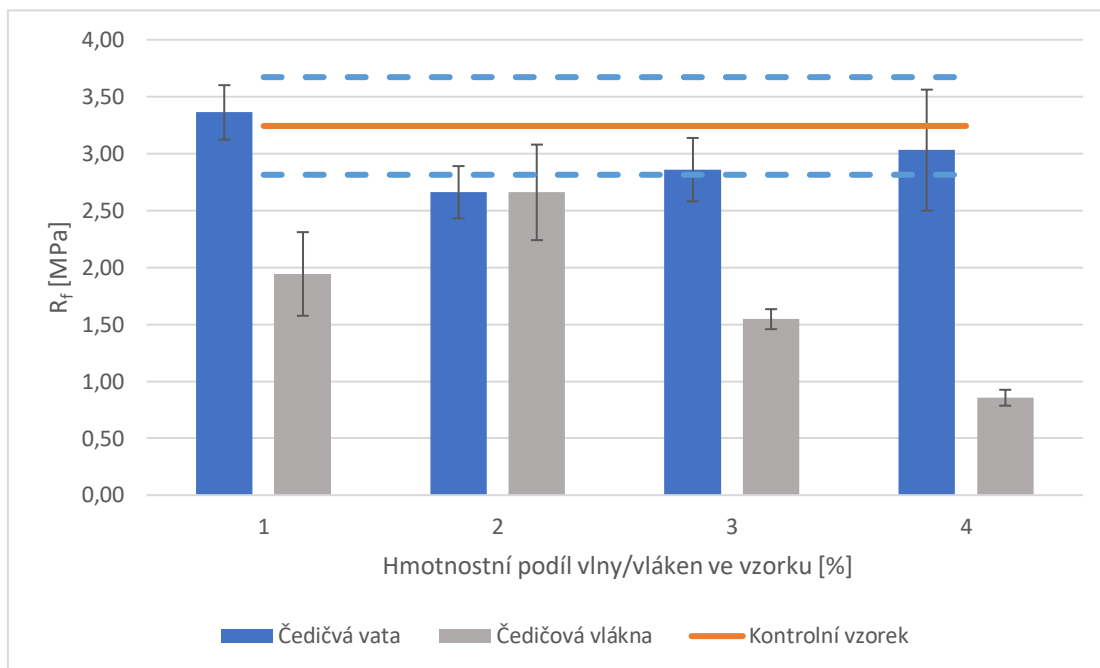
Výsledné hodnoty síly byly následně přepočítány na napětí v ohybu a z každé sady byl spočítán průměr (Tabulka 4.4).

Tabulka 4.4: Průměrné napětí v ohybu po jednotlivé sady vzorků.

Surovina	Hmotnostní procento vaty/vláken [%]	Průměrné napětí v ohybu [MPa]
Čedičová vata	1	3,36
	2	2,66
	3	2,86
	4	3,03
Čedičové vlákno	1	1,94
	2	2,66
	3	1,55
	4	0,86
Kontrolní vzorek	0	3,24

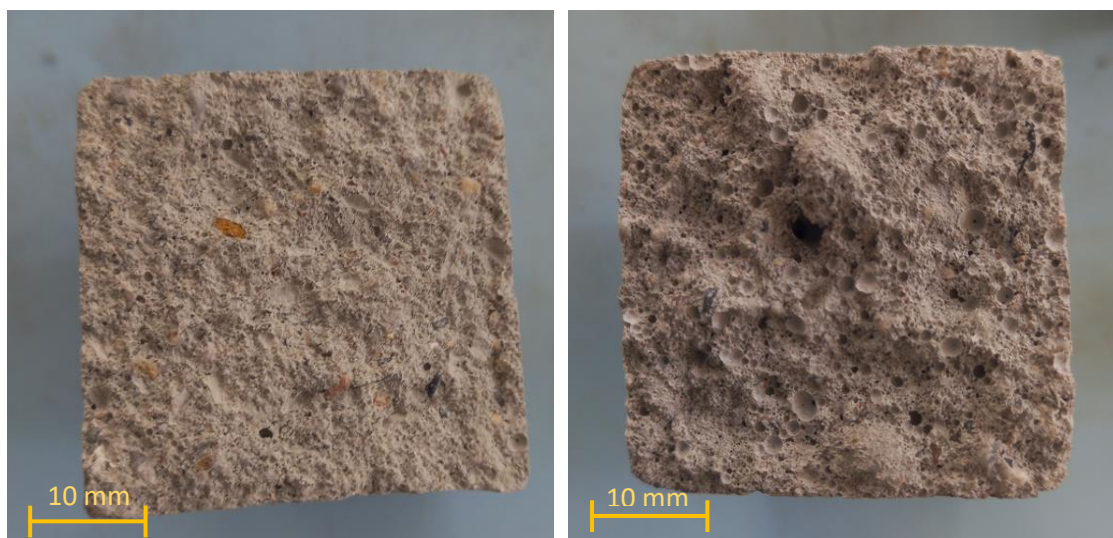
Pro lepší pochopení dat byly výsledky dány do grafu (Obrázek 4.14), s 95% intervalem spolehlivosti. Jak můžeme vidět, tak pouze vzorky s jedním procentem čedičové vaty dosáhl většího napětí než průměr kontrolních vzorků. Avšak k překrytí intervalů spolehlivost došlo u všech vzorků s čedičovou vatou a kontrolním vzorkem. Proto můžeme říci, že rozdíly v napětí v ohybu jsou statisticky nevýznamné.

Při porovnání výsledného napětí v ohybu vzorků s čedičovými vlákny a kontrolním vzorkem. Musíme konstatovat, že pouze vzorky se 2 hm% vláken vykazují stejnou odolnost jako vzorky s čedičovou vatou a podobnou statistickou odolnost jako kontrolní vzorek. Ostatní vzorky s čedičovými vlákny jsou výrazně horší než kontrolní vzorek i než vzorky s čedičovými vlákny. Vzorek se 4 hm% vláken je oproti kontrolnímu vzorku horší o více než 70 %. Důvodem takto výrazného poklesu je pravděpodobně příliš velké množství vláken v potěru, kdy byl problém již se samotnou zpracovatelností hmoty, kvůli čemuž tedy nedošlo k rovnoměrnému promísení všech komponent. Zároveň mohlo dojít ke špatnému propojení vláken a matrice.



Obrázek 4.14: Výsledky pevnosti v tahu za ohybu.

Takto výrazné rozdíly mezi vzorky s čedičovou vatou a vlákny lze zdůvodnit rozdílnou vnitřní strukturou vzorku (Obrázek 4.15). Trámek se 3 hm% vaty je mnohem více kompaktní a bez vzduchových bublin, zatímco vzorek s vlákny je velmi pórovitý. Tato pórovitost má pak negativní vliv na některé mechanické vlastnosti včetně pevnosti v ohybu.



a) Vzorek s 3 hm% čedičové vaty

b) Vzorek s 3 hm% čedičových vláken

Obrázek 4.15: Ukázka lomových ploch trámků.

4.3.2 Pevnost v tlaku

Přístrojem Tiratest T2400 v režimu tlaku byla testována pevnost v tlaku. Pro testování se používala vždy polovina vzorků, které byly rozlomeny při testování pevnosti v tahu za ohybu. Vzorek byl položen na střed destičky tak, aby se vrchní stranou dotýkal přítlačné desky. Rychlost

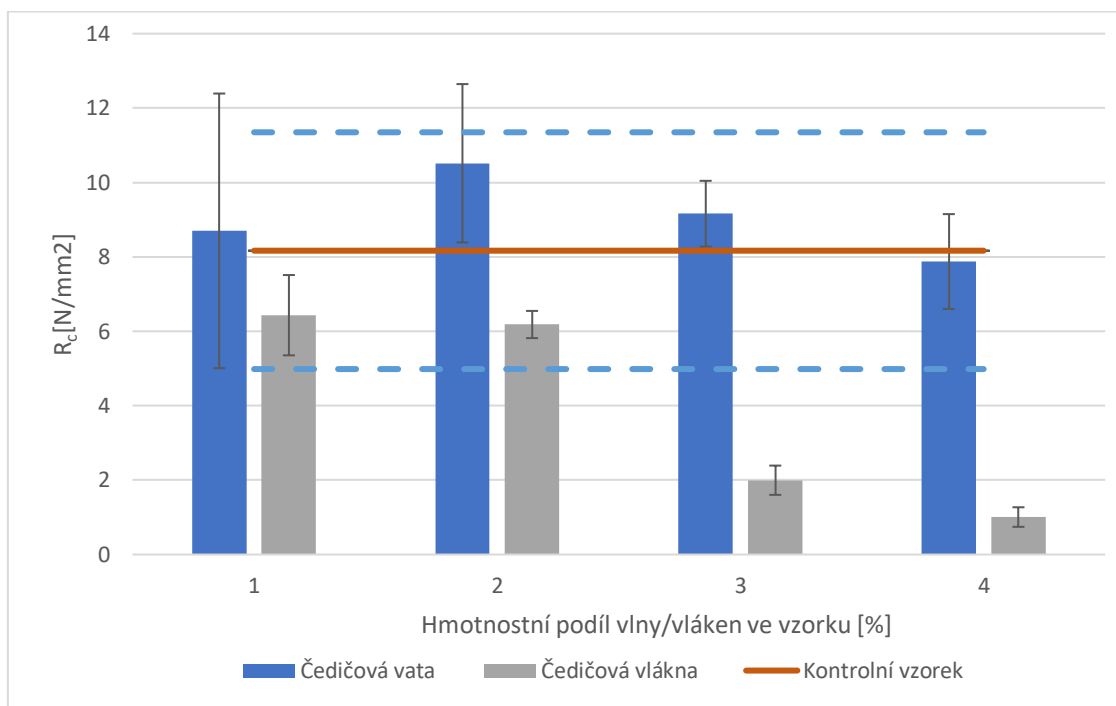
stlačení byla nastavena na 6 mm/min a konec zkoušky byl nastaven tak aby k porušení došlo v rozmezí 30-90 sekund po zahájení. Získané hodnoty pak byly pomocí vzorce na pevnost v tlaku přepočteny na sílu potřebnou k porušení vzorku na jedem mm² a pro každou sadu byl vypočítán průměr (Tabulka 4.5).

Tabulka 4.5: Průměrná pavnost v tlaku pro jednotlivé sady vzorků.

Surovina	Hmotnostní procento vaty/vláken [%]	Průměrná pevnost v tlaku [N/mm ²]
Čedičová vata	1	8,70
	2	10,52
	3	9,16
	4	7,88
Čedičové vlákno	1	6,43
	2	6,18
	3	2,00
	4	1,01
Kontrolní vzorek	0	8,17

Jak je patrné z Tabulky 3.6, u čedičové vaty došlo ke zvýšení průměrné pevnosti v tlaku (oproti kontrolnímu vzorku) u všech sad vzorků čedičové vaty kromě sady se 4 hm% vaty. U sady vzorků s 2 hm% čedičové vaty došlo ke zlepšení průměrné pevnosti v tlaku o 28 %, jedná se tedy o více než čtvrtinový nárůst.

Vzhledem k širokým hranicím intervalu spolehlivosti u kontrolního vzorku můžeme konstatovat, že i rozdíly mezi vzorky s jedním a dvěma procenty vláken jsou v porovnání s kontrolním vzorkem statisticky nevýznamné, přestože průměrná hodnota u vzorků vláken je o 20 % nižší než u kontrolního vzorku. (Obrázek 4.16)



Obrázek 4.16: Výsledky pevnosti v tlaku.

4.3.3 Rázová houževnatost

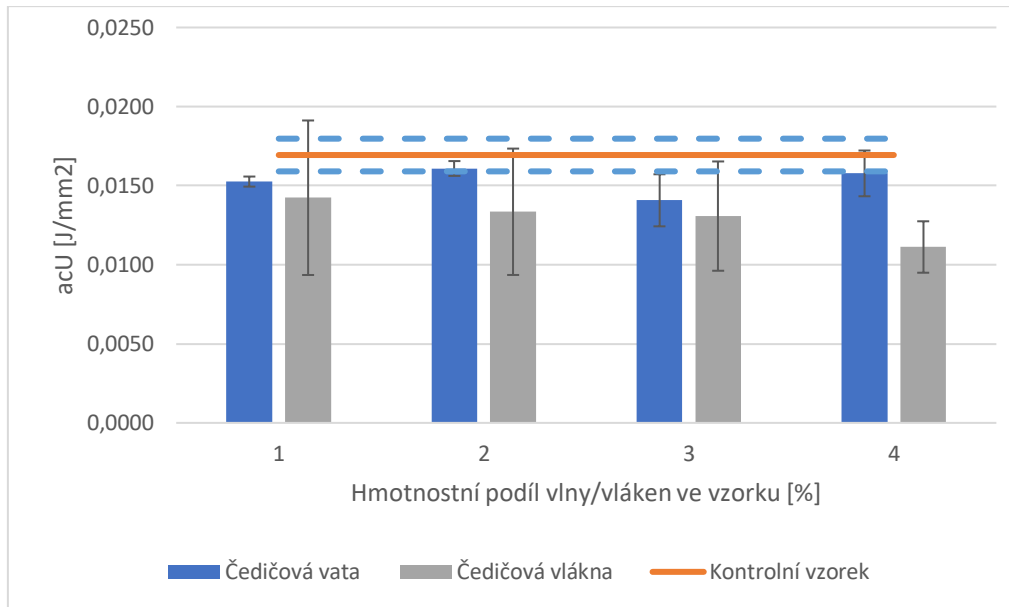
Rázová houževnatost byla testována na přístroji Lab Test CHK 50J a výsledné hodnoty byly pomocí rovnice přepočítány na energii na mm² a pro každou sadu pak byl vypočítán průměr (Tabulka 4.6) a 95% interval spolehlivosti.

Tabulka 4.6: Proměrná houževnatost pro jednotlivé sady vzorků.

Surovina	Hmotnostní procento vaty/vláken [%]	Průměrná rázová houževnatost [J/mm ²]
Čedičová vata	1	0,015
	2	0,016
	3	0,014
	4	0,016
Čedičové vlákno	1	0,014
	2	0,013
	3	0,013
	4	0,011
Kontrolní vzorek	0	0,017

V tomto případě ani jedna sada s vlákny nebo vatou nedosáhla srovnatelných průměrných hodnot jako kontrolní vzorek (Obrázek 4.17). Nejvíce se houževnatosti kontrolního vzorku přiblížila sada s 2 hm% čedičové vaty, kde je rozdíl pouze 5 %.

Horní hranice intervalů spolehlivosti všech vzorků se překrývají se spodní hranicí intervalu spolehlivosti kontrolního vzorku, rozdíly tedy nejsou statisticky významné. Hranice intervalů kontrolního vzorku a vzorků s čedičovou vatou jsou poměrně úzké. To značí, že mezi naměřenými hodnotami nebyly v daných sadách velké rozdíly, zatímco pro vzorky s čedičovými vlákny jsou intervaly široké a ukazují na velký rozptyl mezi naměřenými hodnotami.



Obrázek 4.17: Výsledky rázové houževnatosti.

5 Vyhodnocení výsledků a diskuse

Cílem experimentální části práce bylo vytvoření cementového kompozitu s odpadní čedičovou vatou a porovnání jeho mechanických vlastností s kompozitem se sekanými čedičovými vlákny.

Experimentální část práce se nejprve zaměřovala na přípravu čedičové vaty pro použití v kompozitu. Byly použity různé metody mletí, včetně rotačního čepelového mixéru, planetového mlýnku a kolového mlýnu. Ukázalo se, že rozmělnění vaty pomocí čepelového mixéru nedosáhlo požadovaného rozmělnění a chomáče byly stále příliš objemné pro použití v kompozitu. Planetový mlýnek neumožňuje mletí většího množství materiálu a také nedosáhl požadovaného výsledku (vata byla buď stlačena do větších chomáčků, nebo naopak rozemleta na prach). Nakonec byl použit kolový mlýn, který umožnil rozmělnění čedičové vaty na menší částice, a po druhém cyklu mletí bylo dosaženo dostatečně malých nesoudržných chomáčků vhodných pro použití v kompozitu.

Vzorky pro testování mechanických vlastností se skládaly z jemného cementového potěru s 20 hm% portlandského cementu, vody a čedičové vaty nebo sekaných čedičových vláken. Množství sekaných vláken nebo vaty ve směsi bylo 1, 2, 3 a 4 hm%.

První testovanou vlastností byla pevnost v tahu za ohybu, která patří mezi základní vlastnosti cementových potěrů. Výsledky měření každé sady vzorků byly zprůměrovány a byl vypočítán 95% interval spolehlivosti. Ke zlepšení napětí v ohybu oproti kontrolním vzorkům došlo pouze v případě vzorků s 1 hm% čedičové vaty. Avšak všechny vzorky s čedičovou vatou vykazují statisticky nevýznamné rozdíly oproti kontrolnímu vzorku. Vzorky s vlákny dopadly v porovnání s kontrolním vzorkem hůře a pouze sada se 2 hm% vláken je ve statisticky srovnatelné hladině se sadou kontrolních vzorků.

Další testovanou vlastností byla pevnost v tlaku. Výsledky prvních třech sad vzorků s čedičovou vatou překonaly průměrnou pevnost v tlaku kontrolního vzorku a všechny sady s čedičovou vatou nevykazovaly statisticky významné rozdíly oproti kontrolní sadě. V případě sady se 2 hm% čedičové vaty došlo ke zlepšení dokonce o 28 %. U sekaných vláken žádná ze sad nepřekonala pevnost v tlaku kontrolní sady. A pouze sady s 1 a 2 hm% vláken byly na hladině statistické nevýznamnosti (díky širokým intervalům spolehlivosti u kontrolních vzorků).

Poslední zkoumanou vlastností byla rázová houževnatost testovaná pomocí Charpyho kladiva. Žádná ze sad s vlákny nebo vatou nepřekonala houževnatost kontrolního vzorku. Nejvyšší houževnatost vykazovala sada se 2 hm% čedičové vaty, která se od kontrolního vzorku lišila pouze o 5 %. Rozdíly mezi jednotlivými sadami jsou malé a i ve srovnání s kontrolním vzorkem jsou statisticky nevýznamné díky překrývajícím se hranicím intervalu spolehlivosti.

Sady vzorků s vlákny si vedly obecně hůře jak při výrobě, kdy směs se 4 hm% vláken byla téměř nezpracovatelná, tak i v porovnání mechanických vlastností se vzorky s čedičovou vatou. Při zpracování cementového potěru docházelo při mísení směsi s vlákny k jejich ojednocování, čímž nabíraly na objemu, a do hmoty se tak dostávalo větší množství vzduchu, které nebylo při mísení směsi s vodou a následně na vibrační plošině odstraněno. Tuto teorii podporuje i následné zkoumání vzorků rozlomených během testování pevnosti v tahu za ohybu. Při bližším prozkoumání lomových ploch trámů byla zjištěna velká pórovitost, která má negativní vliv na mechanické vlastnosti. Dalším důvodem negativně ovlivňujícím mechanické vlastnosti může být špatná adheze mezi vlákny a cementovým potěrem což by mohlo být dáno nevhodnou povrchovou úpravou vláken.

Z výsledků můžeme upozorovat, že k největšímu zhoršení vlastností došlo u sad se 3 a 4 hm% vláken, na základě toho je možné usoudit, že vlákna je možné použít jako plnivo, ale jejich obsah by neměl překročit 2 hm% ve směsi. Při přípravě je navíc nutné postupovat tak, aby se co nejvíce eliminovala pórovitost materiálu.

Využití čedičové vaty jako plniva pro cementové kompozity přineslo pozitivní výsledky ukazující, že i s nahrazením části potěrové směsi mletou čedičovou vatou je možné získat stejné a v některých případech i lepší mechanické vlastnosti. Předpokladem pro tyto výsledky je použití dobře rozemleté vaty na malé ojednocené chomáčky a poté promísení s potěrovou směsí tak, aby došlo k vytvoření jednolitě směsi.

Využití odpadní čedičové vaty jako náhrady části cementu přináší možnosti nejen pro efektivní využití materiálu, který je původně určen ke skládkování, ale také pro snížení množství používaného cementu. Cementová výroba je známá svou vysokou energetickou náročností a přispívá k vytváření emisí skleníkových plynů. Využitím čedičové vaty jako alternativního materiálu lze snížit uhlíkovou stopu cementových potěrů, což má pozitivní vliv na životní prostředí.

6 Závěr

Tato diplomová práce byla zaměřena na vlastnosti cementových potěrů s využitím odpadní čedičové vaty a čedičových vláken jako plniv. Provedená měření a analýzy ukázaly, že oba typy plniv nemají statisticky významný vliv na výsledné vlastnosti kompozitu.

To naznačuje, že jak odpadní čedičová vata, tak čedičová vlákna mohou být úspěšně použity jako plniva v cementových potěrech bez negativního dopadu na jejich mechanické vlastnosti. Tato zjištění otevírají nové možnosti pro využití odpadních materiálů, jako je čedičová vata, ve stavebním průmyslu.

Další studie a analýzy jsou ovšem potřebné, aby bylo možné detailněji prozkoumat dlouhodobé vlastnosti těchto potěrů. Dále by mohli být zkoumané jejich akustické a termické charakteristiky. Takové rozšířené zkoumání by poskytlo komplexnější a důkladnější pochopení potenciálu a možností využití odpadní čedičové vaty a čedičových vláken v cementových potěrech.

7 Seznam literatury

- [1] C. Fischer and M. Werge, "EU as a Recycling Society Present recycling levels of Municipal Waste and Construction & Demolition Waste in the EU European Topic Centre on Sustainable Consumption and Production Højbro Plads 4 DK-1200 Copenhagen K," 2009. [Online]. Available: <http://scp.eionet.eu.int>
- [2] J. L. Gálvez-Martos, D. Styles, H. Schoenberger, and B. Zeschmar-Lahl, "Construction and demolition waste best management practice in Europe," *Resour Conserv Recycl*, vol. 136, pp. 166–178, Sep. 2018, doi: 10.1016/J.RESCONREC.2018.04.016.
- [3] T. Sattler, R. Pomberger, J. Schimek, and D. Vollprecht, "Mineral wool waste in Austria, associated health aspects and recycling options," *Detritus*, vol. 9, no. March, pp. 174–180, 2020, doi: 10.31025/2611-4135/2020.13904.
- [4] Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2009/148/ES ze dne 30. listopadu 2009 o ochraně zaměstnanců před riziky spojenými s expozicí azbestu při práci (kodifikované znění). 2019. Accessed: Mar. 19, 2023. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2009/148/oj>
- [5] J. Yliniemi *et al.*, "Characterization of mineral wool waste chemical composition, organic resin content and fiber dimensions: Aspects for valorization," *Waste Management*, vol. 131, pp. 323–330, Jul. 2021, doi: 10.1016/J.WASMAN.2021.06.022.
- [6] Ing. Lenka Strnadová, "<https://www.czso.cz/csu/czso/produkce-vyuziti-a-odstraneni-odpadu-2018>," *Produkce, využití a odstranění odpadů - 2018*, Apr. 10, 2023.
- [7] A. B. López-García, M. Uceda-Rodríguez, S. León-Gutiérrez, C. J. Cobo-Ceacero, and J. M. Moreno-Maroto, "Eco-efficient transformation of mineral wool wastes into lightweight aggregates at low firing temperature and associated environmental assessment," *Constr Build Mater*, vol. 345, p. 128294, Aug. 2022, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.128294.
- [8] O. Väntsi and T. Kärki, "Utilization of recycled mineral wool as filler in wood–polypropylene composites," *Constr Build Mater*, vol. 55, pp. 220–226, Mar. 2014, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.01.050.
- [9] S. R. Piñeiro, M. Del, R. Merino, and C. P. García, "New Plaster Composite with Mineral Wool Fibres from CDW Recycling," 2015, doi: 10.1155/2015/854192.
- [10] L. Bodnárová, *Kompozitní materiály ve stavebnictví*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002.
- [11] K. Daďourek, *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007.

- [12] C. Li, W. Zhang, G. Sun, Y. Li, and Y. Zhang, "Research on damping properties and microscopic mechanism of polyurethane cement-based composites," *Constr Build Mater*, vol. 365, p. 130137, Feb. 2023, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.130137.
- [13] Z. Zhang, B. Li, Z. Wang, W. Liu, and X. Liu, "Development of reduced thermal conductivity ductile cement-based composite material by using silica aerogel and silane," *Journal of Building Engineering*, vol. 65, p. 105698, Apr. 2023, doi: 10.1016/J.JOBE.2022.105698.
- [14] Ester Musilová, "HYDRAULICKÉ PARAMETRY ZVODNĚNÝCH SYSTÉMŮ," <https://slideplayer.cz/slide/3210412/>, Mar. 28, 2023.
- [15] B. Kratochvíl, V. Švorčík, and D. Vojtěch, *Úvod do studia materiálů*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005.
- [16] J. Militký, *Textilní vlákna*, 2., vol. 374. Liberec: Technická univerzita, 2012.
- [17] "http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/tavene_horniny.html#pojmy."
- [18] "Zpracování nekonečných čedičových vláken do technických výrobků." http://www.basaltex.cz/cedic/cedic_charakteristika_cz.htm
- [19] N. M. E. P. Raushan K, "EMA Rockwool Market by Product Type (Rolled, Panels, and Others) and End-use Industry (Building & Construction, Transportation, Industrial & Appliances, and Others): Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2021-2030," Jun. 2022.
- [20] U.S. Environmental Protection Agency, *Source Category Survey: Mineral Wool Manufacturing Industry*. 2013.
- [21] M. S. Al-Homoud, "Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials," *Build Environ*, vol. 40, no. 3, pp. 353–366, Mar. 2005, doi: 10.1016/J.BUILDENV.2004.05.013.
- [22] "Insulation-info.co.uk," *Rock wool insulation*, Apr. 10, 2023. <https://www.insulation-info.co.uk/insulation-material/rock-wool> (accessed Jun. 01, 2023).
- [23] J. P. Oleson, C. Brandon, S. M. Cramer, R. Cucitore, E. Gotti, and R. L. Hohlfelder, "The ROMACONS project: A contribution to the historical and engineering analysis of hydraulic concrete in Roman maritime structures," *International Journal of Nautical Archaeology*, vol. 33, no. 2, pp. 199–229, Oct. 2004, doi: 10.1111/J.1095-9270.2004.00020.X.
- [24] Luboš Svoboda, *Stavební hmoty*, 4th ed., vol. 1000. Praha, 2018.
- [25] *Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití*. 2012.
- [26] *ČSN EN 13813 Potěrové materiály a podlahové potěry - Potěrové materiály - Vlastnosti a požadavky*. 2003.
- [27] "Baumit podlahové potěry a stěrky - Technologický předpis," chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://baumit.cz/files/cz/Technicke_do

kumenty/Technologicke_predpisy_a_prirucky/Technologicke_predpisy/TP_Potery_03_2019.pdf, Mar. 01, 2019.

- [28] L. Qing, H. Sun, Y. Zhang, R. Mu, and M. Bi, "Research progress on aligned fiber reinforced cement-based composites," *Constr Build Mater*, vol. 363, p. 129578, Jan. 2023, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.129578.
- [29] Y. Zheng, Y. Zhang, J. Zhuo, Y. Zhang, and C. Wan, "A review of the mechanical properties and durability of basalt fiber-reinforced concrete," *Constr Build Mater*, vol. 359, p. 129360, Dec. 2022, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.129360.
- [30] Ing. Richard Klement, "Dynamické zkoušky rázové a vrubové houževnatosti plastů," <https://www.techportal.cz/33/dynamicke-zkousky-razove-a-vrubove-houzevnatosti-plastu-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4EqUkSFod1GxjXYYvvykix0/>, Jun. 01, 2015.
- [31] Knauf Praha, "Cementové potěry a stěrky Technický list PM 31.cz," Praha, Jan. 2015.

8 Seznam tabulek

Tabulka 1.1: Produkce stavebních a demoličních odpadů v ČR roce 2018 [6]	14
Tabulka 2.1: Členění podlahových hmot dle velikostí zrn [26]	28
Tabulka 2.2: Pevnostní třídy potěrových materiálů [26].....	31
Tabulka 2.3: Třídy potěrového materiálu podle pevnosti v tahu za ohybu [26].	31
Tabulka 3.2:Vlastnosti cementového potěru [31]	37
Tabulka 3.3: Parametry použitých čedičových vláken [32]	38
Tabulka 3.4: Rozpis vzorků pro mechanické testy s uvedeným množstvím vláken ve vzorku.	44
Tabulka 3.5: Průměrné napětí v ohybu po jednotlivé sady vzorků.	47
Tabulka 3.6: Průměrná pavnost v tlaku pro jednotlivé sady vzorků.....	49
Tabulka 3.7: Proměrná houževnatost pro jednotlivé sady vzorků.	50

9 Seznam obrázků

Obrázek 1.1: Recyklace odpadu ve členských státech EU a Norsku [1]	12
Obrázek 1.2: Rozložení délek vláken[5].	13
Obrázek 1.3: Porovnání pevnosti v tlaku u sádrových kompozitů vyztužených čedičovou a skelnou vatou [9].	16
Obrázek 1.4: Porovnání pevnosti v ohybu sádrových kompozitů s čedičovou nebo skelnou vatou [9].	16
Obrázek 2.1: grafické znázornění izotropie a anizotropie [14].....	19
Obrázek 2.2: Synergický efekt [15]	19
Obrázek 2.3:Možnosti vytvoření kompozitu [10]	21
Obrázek 2.4:Kompozity s různými druhy disperze [15]	21
Obrázek 2.5:Dělení vláknových kompozitů [10]	22
Obrázek 2.6: Čedičová cihla z technologického odpadu vznikajícího při výrobě čedičové vaty..	25
Obrázek 2.7: Spojený potěr [27].....	29
Obrázek 2.8: Potěr na oddělovací vrstvě [27]	29
Obrázek 2.9: Potěr na izolační vrstvě [27].....	30
Obrázek 2.10:Uspořádání zatížení pro stanovení pevnosti v tahu za ohybu.	34
Obrázek 2.11: Princip testování pevnosti v tahu	35
Obrázek 2.12: Testovací přístroj LabTest CHK 50J	36
Obrázek 3.1: Ukázka čedičové vaty poskytnuté firmou Isover.....	38
Obrázek 3.2: Čedičová vata rozmělněná pomocí mixeru.....	39
Obrázek 3.3 SEM snímek čedičové vaty mleté pomocí čepelového mixéru.	39
Obrázek 3.4: Planetový mlýnek Pulverisette 7 – premium line.....	40
Obrázek 3.5: Výsledky mletí čedičové vaty přede mleté v ručním mixeru.	40
Obrázek 3.6: Výsledky mletí čedičové vaty předemleté kolovým mlýnem.....	41
Obrázek 3.7: SEM snímek vaty rozmělněné v planetovém mlýnku.....	41
Obrázek 3.8: Vzorky čedičové vaty mleté v kolovém mlýnu.	42
Obrázek 3.9: SEM snímky čedičové vaty mleté kolovým mlýnem.....	43
Obrázek 3.10: Vzorky čedičové vaty mleté různými způsoby, zleva: kolový mlýn jeden cyklus, kolový mlýn dva cykly, rotační čepelový mixér, planetový mlýnek.	43
Obrázek 3.11: Příprava cementové směsi se sekanými čedičovými vlákny.	45
Obrázek 3.12: Nákres výsledného vzorku z formy	45
Obrázek 3.13: Hotový vzorek pro testování mechanických vlastností.	46
Obrázek 3.14: Výsledky pevnosti v tahu za ohybu.....	48

Obrázek 3.15: Ukázka lomových ploch trámků.	48
Obrázek 3.16: Výsledky pevnosti v tlaku.	50
Obrázek 3.17: Výsledky rázové houževnatosti.	51

10 Seznam příloh

Příloha 1: Výsledky tříbodého ohybu	62
Příloha 2: Výsledky měření tlaku	63
Příloha 3: Výsledky měření rázové houževnatosti	64

Příloha 1: Výsledky tříbodého ohybu

Tříbodý ohyb		
Vzorek	F_{max} [N]	R_f [MPa]
V0_1	1171,1	2,74
V0_2	1403,74	3,29
V0_3	1557,82	3,65
V0_4	1319,47	3,09
V0_5	1465,58	3,43
VL1_1	1337,1	3,13
VL1_2	1425,01	3,34
VL1_3	1394,9	3,27
VL1_4	1558,45	3,65
VL1_5	1456,5	3,41
VL2_1	1064,82	2,5
VL2_2	1118,15	2,62
VL2_3	1058,32	2,48
VL2_4	1220,37	2,86
VL2_5	1215,18	2,85
VL3_1	1241,94	2,91
VL3_2	1255,25	2,94
VL3_3	1317,28	3,09
VL3_4	1224,19	2,87
VL3_5	1060,69	2,49
VL4_1	1154,58	2,71
VL4_2	1144,9	2,68
VL4_3	1288,18	3,02
VL4_4	1596,55	3,74
VL4_5	1279,95	3
VK1_1	942,31	2,21
VK1_2	830,26	1,95
VK1_4	946,48	2,22
VK1_5	642,07	1,5
VK1_3_2	783,64	1,84
VK2_1	1225,36	2,87
VK2_2	1327,67	3,11
VK2_3	1045,79	2,45
VK2_4	1110,69	2,6
VK2_5	963,84	2,26
VK3_1	688,29	1,61
VK3_2	680,3	1,59
VK3_3	610,94	1,43
VK3_4	655,55	1,54
VK3_5	662,73	1,55
VK4_1	324,87	0,76
VK4_2	389,53	0,91
VK4_3	369,47	0,87
VK4_4	371,81	0,87
VK4_5	369,73	0,87

Příloha 2: Výsledky měření tlaku

vzorek	Tlak	
	$F_{max}[N]$	$R_m [N/mm^2]$
V0_1A	16919,21	10,57
V0_2A	16709,57	10,44
V0_3A	14256,23	8,91
V0_4A	8612,86	5,38
V0_5A	8837,316	5,52
VL1_1A	12800,56	8,00
VL1_2A	22213,42	13,88
VL1_3A	10679,15	6,67
VL1_4A	13010,69	8,13
VL1_5A	10902,3	6,81
VL2_1A	15712	9,82
VL2_2A	17101,6	10,69
VL2_3A	14872,4	9,30
VL2_4A	21466,6	13,42
VL2_5A	14982,6	9,36
VL3_1A	14941,1	9,34
VL3_2A	14756,1	9,22
VL3_3A	14745,8	9,22
VL3_4A	15996,8	10,00
VL3_5A	12841,1	8,03
VL4_1A	12047,6	7,53
VL4_2A	10364,5	6,48
VL4_3A	12785,3	7,99
VL4_4A	14916	9,32
VL4_5A	12888,5	8,06
VK1_1B	9122,7	5,70
VK1_2B	9181,4	5,74
VK1_3B	12283,1	7,68
VK1_4B	11189,5	6,99
VK1_5B	9688	6,06
VK2_1A	9699,6	6,06
VK2_2A	10843,4	6,78
VK2_3A	10345,7	6,47
VK2_4A	10393	6,50
VK2_5Aa	8179,1	5,11
VK3_1A	2941,7	1,84
VK3_2A	3113,4	1,95
VK3_3A	2822	1,76
VK3_4A	3020,7	1,89
VK3_5A	4081,6	2,55
VK4_1A	1756,6	1,10
VK4_2A	1842,3	1,15
VK4_3A	1044,8	0,65
VK4_4A	1859,4	1,16
VK4_5A	1557,6	0,97

Příloha 3: Výsledky měření rázové houževnatosti

Vzorek	Rázová houževnatost			
	Výška [mm]	Šířka [mm]	Energie [J]	rázová houževnatost [J/mm ²]
V01	40	35,5	24,98	0,018
V02	39,97	38,2	24,58	0,016
V03	39,91	37,43	25,06	0,017
V04	39,85	34,89	25,01	0,018
V05	39,74	38,22	24,64	0,016
VL1.1	40,19	39,78	25,03	0,016
VL1.2	39,87	40,99	24,83	0,015
VL1.3	40,02	41,2	25,1	0,015
VL1.4	40,1	41	25,1	0,015
VL1.5	40,81	40,86	24,92	0,015
VL2.1	39,63	37,53	24,86	0,017
VL2.2	40,01	38,75	24,75	0,016
VL2.3	39,81	39,14	25,08	0,016
VL2.4	39,83	39,19	24,87	0,016
VL2.5	40,34	39,11	24,8	0,016
VL3.1	40	39,6	17,8	0,011
VL3.2	40,16	40,89	24,82	0,015
VL3.3	40,58	40,83	24,86	0,015
VL3.4	39,91	40,72	25,09	0,015
VL3.5	39,78	39,5	21,32	0,014
VL4.1	39,82	36,31	24,97	0,017
VL4.2	39,83	38,5	24,59	0,016
VL4.3	40,33	40,04	24,81	0,015
VL4.4	39,9	38,39	24,68	0,016
VL4.5	39,87	40,71	22,87	0,014
VK1.1	39,9	37,98	24,89	0,016
VK1.2	40,5	38,75	23,27	0,015
VK1.3	39,87	39,44	11,49	0,007
VK1.4	39,87	37,87	25,05	0,017
VK1.5	39,95	39,01	24,98	0,016
VK2.1	41,09	42,03	25,04	0,014
VK2.2	40,01	39,8	12,11	0,008
VK2.3	40,24	41,52	25,09	0,015
VK2.4	40,01	41,5	24,82	0,015
VK2.5	40,92	41,55	24,94	0,015
VK3.1	39,77	37,81	24,91	0,017
VK3.2	40,09	41,19	24,56	0,015
VK3.3	39,92	41,09	21,89	0,013
VK3.4	39,85	41,02	16,83	0,010
VK3.5	39,88	41,5	17,03	0,010
VK4.1	39,95	40,83	16,9	0,010
VK4.2	41,09	40,72	17,51	0,010
VK4.3	40,01	39,5	15,68	0,010
VK4.4	40,24	38,31	20,25	0,013
VK4.5	40,01	38,5	18,05	0,012