FAKULTA TEXTILNÍ TUL

**Disertační práce**

# Vlastnosti omítkových kompozitů s vlákennou výstuží

*Studijní program:* P3106 Textilní inženýrství
*Studijní obor:* Textilní technika a materiálové inženýrství

*Autor práce:* **Ing. Alžbeta Samková**
*Školitel práce:* Ing. Miroslava Pechočiaková, Ph.D.
Katedra materiálového inženýrství

Liberec 2023

# Prohlášení

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

Jsem si vědoma toho, že na mou disertační 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 disertační práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li disertační 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 disertační 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.

13. července 2023 Ing. Alžbeta Samková

## Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala své školitelce Ing. Miroslavě Pechočiakové, Ph.D. za podporu, trpělivost a odborné vedení při vypracování této disertační práce.

Ráda bych dále poděkovala své konzultantce Ing. Radce Pernicové, Ph.D. za odborné rady z oblasti stavebnictví a pomoc při měření.

Velké poděkování patří také Ing. Petru Kulhavému, Ph.D. a Ing. Veronice Tunákové, Ph.D. za cenné rady a konzultace.

Děkuji také všem pracovníkům a studentům doktorského studia nejen fakulty textilní, kteří mi byli nápomocni při vypracování této disertační práce.

Na závěr bych ráda poděkovala své rodině a svým blízkým za podporu a povzbuzení při studiu.

## Anotace

Tato disertační práce je zaměřena zejména na vývoj a studium omítkových kompozitů s krátko-vlákennou výztuží. Problematika omítkových kompozitů je řešena z hlediska jejich mechanických a fyzikálních vlastností, které jsou důležitou součástí jejich návrhu a spolehlivého působení ve vyrobené konstrukci. Teoretická část práce se věnuje obecným vlastnostem a výrobě vlákenné výztuže a omítkové matrice.

V experimentální části disertační práce byla nejprve stanovena délka a optimální množství krátko-vlákenné výztuže pro jednotlivé typy matric (vápeno-cementová, vápenná, sádrová, cementová). Na základě těchto experimentů a poznatků byly následně vyrobeny omítkové kompozity, které byly podrobeny základnímu mechanickému testování.

Jedním z důležitých procesů probíhajících u stavebních materiálů je sorpce vlhkosti. Vlhkost může pronikat do materiálů z okolního prostředí, například vzduchu nebo země a ovlivňovat tak mechanické a chemické vlastnosti materiálů. Z tohoto důvodu se práce zabývá i testováním transportu kapalné vody omítkovým kompozitem.

Nedostatečná akustická izolace a nekvalitní zvuková absorpce mohou vést k nadměrnému šíření hluku v budovách, a to může mít negativní dopad na lidský organismus. Tyto problémy jsou stále více diskutovaným tématem, z toho důvodu byl sledován vliv vlákenné výztuže na akustické vlastnosti omítkových kompozitů.

Mimo mechanických vlastností kompozitů ve stavebnictví je v dnešní době poměrně aktuální požadavek na schopnost stínění elektromagnetického pole. Práce se tedy zaobírá otázkou, zda může mít krátko-vlákenná výztuž pozitivní vliv také na tyto specifické fyzikální vlastnosti daných kompozitních materiálů.

**Klíčová slova:**

Akustická pohltivost, čedičové vlákno, elektromagnetické stínění, mechanické vlastnosti, omítkové kompozity, skleněné vlákno, transport kapalné vody, uhlíkové vlákno.

## Anotación

Esta tesis trata sobre el estudio de los composites de yeso con refuerzo de fibras cortas. El objetivo principal es analizar las propiedades mecánicas y físicas de los compuestos de yeso. Uno de los miemvros clave el compuesto es la cantidad y longitud óptimas de refuerzo de fibra. La determinación de estas propiedades se basa principalmente en pruebas mecánicas básicas.

La absorción de humedad en los materiales de construcción es un fenómeno común. La humedad puede penetrar materiales del entorno circundante, como el aire o el suelo. La absorción de humedad en los materiales de construcción afecta las propiedades mecánicas y químicas del material, por esta razón el trabajo también trata de probar el transporte de agua líquida a través del compuesto de yeso.

Un aislamiento acústico insuficiente y una mala absorción del sonido pueden provocar a la excesiva difusión del ruido en los edificios, y esto puede tener un impacto

negativo en el organismo humano. Estos problemas son un tema cada vez más discutido, razón por la cual se monitoreó el efecto del refuerzo de fibra sobre las propiedades acústicas de los compuestos de yeso. Además de las propiedades mecánicas de los materiales compuestos en la industria de la construcción, hoy en día existe un requisito relativamente actual para la capacidad de blindaje del campo electromagnético. Por lo tanto, el trabajo aborda la cuestión de si el refuerzo de fibras cortas también puede tener un efecto positivo en estas propiedades físicas específicas de materiales compuestos dados.

**Palabras clave:**

Absorción acústica, blindaje electromagnético, compuestos de yeso, fibra de basalto, fibra de carbono, fibra de vidrio, propiedades mecánicas, transporte de agua líquida.

## Annotation

This thesis is focused on the development and study of plaster composites with short-fiber reinforcement. The issue of plaster composites is solved in terms of their mechanical and physical properties, which are an important part of their design reliable operation in production. The theoretical part is devoted to the general properties and production of fiber reinforcement and plaster master.

In the experimental part of the dissertation were firstly determined the length and optimal amount of short - fiber reinforcement for individual master types (lime-cement, lime, gypsum, cement). On the basis of these experiments and findings, plaster composites were subsequently produced, which were subjected to basic mechanical testing.

One of the important processes taking place in building materials is humidity sorption. Humidity can get into the materials from the environment, for example the air or the ground and affect the mechanical and chemical properties of materials. For this reason, the thesis also deals with testing the transport of liquid water through the plaster composite.

Deficient of acoustic isolation and poor sound absorption can lead to abnormal spread of sound in buildings and can have a negative impact to the human organism. These issues are increasingly discussed topic, which is why the effect of fiber reinforcement on the acoustic properties of plaster composite was monitored.

Out of the mechanical properties of composites in the construction industry is also current requirement on shield ability of electromagnetic field. So this dissertation deals with the question of whether reinforcement with short fibers can also have a positive effect on these specific physical properties of given composite materials.

**Key words:**

Acoustic absorption, basalt fibres, carbon fibres, electromagnetic shielding, glass fibres, liquid water transport, mechanical properties, plaster composites.

# Obsah

1 ÚVOD ..... 11
1.1 Předmět a cíle disertační práce ..... 12
1.2 Přehled současného stavu problematiky ..... 12
2 KOMPOZITY ..... 16
2.1 Vlákenná výztuž ..... 17
2.1.1 Čedičová vlákna ..... 17
2.1.2 Uhlíková vlákna ..... 19
2.1.3 Skleněná vlákna ..... 21
2.2 Matrice - omítky ..... 23
2.2.1 Vzdušná pojiva ..... 24
2.2.1.1 Vzdušné vápno ..... 24
2.2.1.2 Sádra a sádrová pojiva ..... 26
2.2.2 Hydraulická pojiva ..... 28
2.2.2.1 Hydraulické vápno ..... 28
2.2.2.2 Cement ..... 29
2.3 Testování vlastností kompozitů ..... 32
2.3.1 Mechanické vlastnosti ..... 33
2.3.2 Sorpční vlastnosti ..... 34
2.3.3 Akustická pohltivost ..... 37
2.3.4 Elektromagnetické stínění ..... 39
2.3.5 Užitná hodnota ..... 43
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST ..... 44
3.1 Použité matrice ..... 44
3.2 Výztužný materiál ..... 46
3.3 Stanovení délky a množství vláken ..... 48
3.4 Příprava vzorků ..... 50
3.5 Základní mechanické vlastnosti ..... 51
3.5.1 Pevnost v tahu za ohybu ..... 51
3.5.2 Pevnost v tlaku ..... 55
3.5.3 Rázová houževnatost ..... 58
3.6 Sorpční vlastnosti ..... 61
3.6.1 Transport kapalné vody ..... 61

3.6.2 Vliv množství vlákenné výztuže na transport kapalné vody ..... 62
3.6.3 Vliv typu matrice na transport kapalné vody ..... 69
3.6.4 Vliv typu vlákna na transport kapalné vody ..... 74
3.6.5 Transport vodní páry ..... 80
3.7 Akustické vlastnosti ..... 84
3.7.1 Vliv množství vlákenné výztuže na akustickou pohltivost omítkového kompozitu ..... 85
3.7.2 Vliv matrice na akustickou pohltivost omítkového kompozitu ..... 92
3.8 Hodnocení schopnosti materiálu stínit elektromagnetické pole ..... 98
3.8.1 Vliv množství vlákenné výztuže na schopnost stínit elektromagnetické pole 98
3.8.2 Vliv typu matrice na schopnost stínit elektromagnetické pole ..... 101
3.8.3 Vliv vlhkosti na schopnost stínit elektromagnetické pole ..... 103
3.8.4 Mechanismus elektromagnetického stínění ..... 107
3.8.5 Vliv tloušťky omítkového kompozitu na schopnost stínit elektromagnetické pole ..... 109
3.9 Stanovení užitné hodnoty pro omítkové kompozity ..... 111
3.9.1 Stanovení užitné hodnoty omítkových kompozitů pro speciální účely (EMS) ..... 112
4 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ ..... 114
5 ZÁVĚR ..... 119
6 Literatura ..... 121

# Seznam použitých symbolů a zkratek

## Zkratky

| Symbol | Název |
|---|---|
| 3D | Třírozměrný |
| EMS | Elektromagnetické stínění |
| FM | Frekvenční modulace |
| GPS | Global Positioning System |
| LOI | Limitní kyslíkové číslo |
| NPD | No performance determined |
| PAN | Polyakrylonitril |
| pH | Potenciál vodíku |

## Fyzikální symboly

| Symbol | Název | Jednotka |
|---|---|---|
| $A$ | Absorpce el. mag stínění | dB |
| $A1$ | Reakce s ohněm | - |
| $A_\omega$ | Rázová houževnatost | $J \cdot mm^{-2}$ |
| $b$ | Šířka vzorku | mm |
| $c$ | Skutečná rychlost zvuku | $m \cdot s^{-1}$ |
| $d$ | Tloušťka | m |
| $D$ | Součinitel difúze vodní páry | $m^2 \cdot s^{-1}$ |
| $D_a$ | Součinitel difúze vodní páry ve vzduchu | $m^2 \cdot s^{-1}$ |
| $d_{vl}$ | Průměr vláken | mm |
| $E$ | Modul pružnosti | Pa |
| $E_c$ | Kinetická energie | J |
| $E_i$ | Intenzita elektrického pole dopadajícího na přepážku | $V \cdot m^{-1}$ |
| $E_t$ | Intenzita elektrického pole - prošlá | $V \cdot m^{-1}$ |
| $F$ | Lomové zatížení | N |
| $f$ | Frekvence vlnění | Hz |
| $F_c$ | Nejvyšší zatížení při porušení | N |
| $h$ | Výška vzorku | mm |
| $H_i$ | Intenzita magnetické pole v místě přepážky | $A \cdot m^{-1}$ |
| $H_t$ | Intenzita magnetického pole - prošlá | $A \cdot m^{-1}$ |
| $I_1$ | Intenzita zvuku vlny odražené | dB |
| $I_2$ | Intenzita zvuku vlny pohlcené | dB |
| $I_3$ | Intenzita zvuku vlny vyzářené za stěnu celkem | dB |
| $I_4$ | Intenzita zvuku vlny prošlé za stěnu otvory a póry | dB |

| | | |
|---|---|---|
| $I_5$ | Intenzita zvuku vlny, kterou stěna vyzáří v důsledku svého ohybového kmitání do druhého poloprostoru | dB |
| $I_6$ | Intenzita zvuku vlny, která je vedena ve formě chvění | dB |
| $I_7$ | Intenzita zvuku přeměněná ve stěně na teplo | dB |
| $k_0$ | komplexní vlnové číslo | - |
| $K_s$ | Koeficient stínění | - |
| $l$ | Efektivní délka | mm |
| $l/d$ | Poměr délky vlákna/průměru vlákna | - |
| $l_c$ | Kritická délka | mm |
| $L_p$ | Vzdálenost válcových podpěr | mm |
| $M$ | Změna hmotnosti | % |
| $M_0$ | Počáteční hmotnost | g |
| $M_{H_2O}$ | Molární hmotnost vody | $kg \cdot mol^{-1}$ |
| $M_R$ | Mnohonásobný odraz elektromagnetického záření | dB |
| $M_t$ | Naměřená hodnota hmotnosti v čase $t$ | g |
| $n$ | Porozita materiálu | - |
| $P_i$ | Výkonová hustota pole | $W \cdot m^{-2}$ |
| $P_t$ | Výkonová hustota propuštěná stíněním | $W \cdot m^{-2}$ |
| $R$ | Odraz | dB |
| $R_c$ | Pevnost v tlaku | MPa |
| $R_f$ | Pevnost v tahu za ohybu | MPa |
| RH | Relativní vlhkost | % |
| $R_{mV}$ | Pevnost vláken | MPa |
| $R_p$ | Univerzální plynová konstanta | $J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$ |
| $S_d$ | Ekvivalentní difúzní tloušťka | m |
| $SE$ | Účinnost elektromagnetického stínění | dB |
| $SE_A$ | Složka absorpce elektromagnetického stínění | - |
| $SE_R$ | Složka odrazu elektromagnetického stínění | - |
| $SE_T$ | Složka prostupu elektromagnetického stínění | - |
| $t$ | Čas transportu hmotnosti vodní páry | s |
| $T$ | Absolutní teplota | K |
| $V_i$ | Objemový podíl i-té složky | % |
| $w/c$ | Poměr voda/cement | - |
| $w_i$ | Hmotnostní podíl i-té složky | % |
| $x$ | Aktuální naměřená hodnota | - |
| $x_1$ | Vzdálenost mezi vzorkem a vzdálenějším mikroskopem | m |

| | | |
|---|---|---|
| $Z$ | Akustická impendace | $Pa \cdot s \cdot m^{-1}$ |
| $Z_0$ | Vlnová impedance pro vakuum nebo suchý vzduch | Ω |
| $Z_1$, $Z_2$ | Rozhraní s akustickou impedancí | $Pa \cdot s \cdot m^{-1}$ |
| $Z_M$ | Vlnová impedance pro vodivé prostředí | Ω |
| $\alpha$ | Činitel zvukové pohltivosti | - |
| $\beta$ | Činitel zvukové odrazivosti | - |
| $\Delta m$ | Množství vodní páry prodifundované vzorkem | kg |
| $\Delta p_p$ | Rozdíl parciálních tlaků vodní páry | Pa |
| $\delta$ | Hloubka vniku elektromagnetického pole | m |
| $\delta_p$ | Součinitel propustnosti pro vodní páru | $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-1}$ |
| $\mu$ | Faktor difúzního odporu | - |
| $\mu_m$ | Magnetická permeabilita | $H \cdot m^{-1}$ |
| $\lambda$ | Tepelná vodivost | $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ |
| $\rho$ | Měrná hmotnost | $kg \cdot m^{-3}$ |
| $\rho_i$ | Měrná hmotnost i-té složky | $kg \cdot m^{-3}$ |
| $\rho_m$ | Měrná hmotnost materiálu | $kg \cdot m^{-3}$ |
| $\rho_{vz}$ | Měrná hmotnost vzduchu při aktuální teplotě | $kg \cdot m^{-3}$ |
| $\sigma$ | Elektrická vodivost | $S \cdot m^{-1}$ |
| $\tau_m$ | Pevnost rozhraní mezi vláknem a matricí | MPa |

**Matematické symboly**

| Symbol | Název | Jednotka |
|---|---|---|
| $H$ | Horní hranice definující zcela vyhovující hodnoty | - |
| $H_{12}$ | Přenosová funkce mezi mikrofony 1 a 2 | - |
| $H_I$ | Přenosová funkce pro dopadající vlnu | - |
| $H_R$ | Přenosová funkce pro odrážející se vlnu | - |
| $i$ | Imaginární jednotka | - |
| $j$ | Sumační index | - |
| $L$ | Dolní hranice definující nevyhovující hodnoty | - |
| $m$ | Celkový počet vlastností | - |
| $QI$ | Index kvality | - |
| $w_j$ | Odpovídající váha dané vlastnosti | - |
| $\alpha_p$ | Aspektní poměr | - |

# 1 ÚVOD

Vzhledem k neustále rostoucí potřebě materiálů s vysokou měrnou tuhostí, pevností a možností cíleně ovlivnit jejich klíčové vlastnosti, zažívají v současné době kompozitní materiály velký rozmach napříč všemi průmyslovými odvětvími. Vlastnosti kompozitních materiálů lze přizpůsobit potřebám současných konstrukčních aplikací, které umožňují efektivní technická řešení v náročných a měnících se provozních podmínkách. V současnosti se kompozitní materiály staly součástí i stavebního průmyslu. Běžně se využívají pro stavbu mostů, fasád, střešních konstrukcí, tunelů a dalších staveb. Stále častěji se v takovýchto kompozitech využívá vlákenná výztuž, která má za úkol zvýšit pevnost, odolnost a trvanlivost konstrukcí vůči statickým a dynamickým zatížením.

U některých v přírodě se vyskytujících organických materiálů, jako je dřevo nebo schránky korýšů, existují struktury tvořené matricí a vlákennou disperzí, které odolávají vysokému namáhání a zatěžování. Naprostá většina knih či článků o kompozitní tématice začíná tématy sahajícími až do dob před naším letopočtem. Jedná se o luky ze dřeva, vláken a zvířecích šlach, hliněné cihly vyplněné slámou nebo rákosím. Přelomovým obdobím novodobého rozvoje kompozitů byla první polovina dvacátého století, především v období světových válek. Výzkum a reálný vývoj probíhal ve vojenské technice, zejména v letectví. V dnešní době se již kompozitní materiály zcela neodmyslitelně uplatňují v mnoha oborech jako je kosmonautika, automobilový a stavební průmysl. Využívají se v konstrukci zařízení pro výrobu větrné energie, v elektronice, medicíně, ale také ve sportovním odvětví.

Aplikace kompozitních materiálů se neustále rozšiřují do nových oblastí. Ve stavebním průmyslu dochází v posledních letech k vývoji nových kompozitů především s křehkou matricí na bázi cementu. Nejvíce využívanými konvenčními stavebními materiály jsou cementové pasty, malty a betony. Současnou hi-tech technologií je využití těchto materiálů pro 3D tisk. Jejich obecně kvazikřehká povaha je ovšem náchylná na praskání, zároveň mají nízkou houževnatost a pevnost v tahu, což vede ke špatné trvanlivosti a vysokým nákladům na údržbu. Trendem je využívat cementové materiály vyztužené ocelovými tyčemi, vlákny či různými plnivy. Velmi slibným je především stále intenzivnější výzkum v oblasti vlákenných výztuží cementových kompozitů. Vlákenné výztuže nabízejí velmi dobré zvýšení mechanických vlastností a prodloužení životnosti v kombinaci s možností využití materiálů šetrných k životnímu prostředí (možnost recyklace a opětovného použití) či materiálů odpadních.

## 1.1 Předmět a cíle disertační práce

Téma disertační práce je motivováno snahou vytvořit krátko-vlákenné omítkové kompozity v současné době z běžně používaných omítek, které by optimalizovaly stěžejní fyzikální vlastnosti omítek a zároveň by měli pozitivní vliv na jejich životnost a tím přispěli ke snížení neustále narůstajících enviromentálních problémů. Jedním z podnětů k tomuto výzkumu jsou současné požadavky na opravy fasád historických budov, které mají specifické nároky na stavební i vyztužující (vlákenné) materiály.

1. Primárním cílem disertační práce je analýza vlivu **vlákenné výztuže na mechanické vlastnosti omítkových kompozitů**. Práce je zaměřena na studium mechanických a fyzikálních vlastností v souvislosti s jejich strukturou. Jedním z klíčových určujících členů kompozitu je distribuce použité disperze, optimální množství a délka vlákenné výztuže. Stanovení těchto vlastností vychází primárně ze základního mechanického testování. Na základě literární rešerše byly vybrány tři druhy krátko-vlákenné výztuže, které byly doplněny perlinkovou výztuží pro možnost porovnání vyztužujících účinků.
2. Sorpcí vlhkosti do stavebních materiálů dochází k mechanickému i chemickému narušování materiálu, což přímo souvisí s většinou poškození stavebních konstrukcí. Z toho důvodu se práce zaobírá i testováním **transportu kapalné vody** u analyzovaných omítkových kompozitů.
3. V současné době je často řešený problém negativní vliv hluku na zdraví člověka. Jelikož jsou stavební materiály přímým účastníkem v dané interakci se zvukovými vlnami, je sledován vliv vlákenné výztuže na **akustickou pohltivost** omítkových kompozitů.
4. Mimo mechanických vlastností kompozitů ve stavebnictví je v dnešní době poměrně aktuální požadavek na **schopnost stínění elektromagnetického pole**. Práce se tedy zaobírá otázkou, zda může mít krátko-vlákenná výztuž pozitivní vliv také na tyto specifické fyzikální vlastnosti daných kompozitních materiálů. Jelikož schopnost stínit elektromagnetické pole mají pouze elektricky vodivé materiály, byla pro tento experiment vybrána výztuž ve formě uhlíkových vláken.

V závěru práce je k nalezení poměrně jasné posouzení chování vlákenných omítkových kompozitů při běžném mechanickém či klimatickém zatížení. Dále jsou shrnuty možnosti ovlivnění těchto parametrů a analýza vybraných fyzikálních vlastností, konkrétně akustického a elektromagnetického stínění.

## 1.2 Přehled současného stavu problematiky

Na celém světě existuje mnoho typů zděných budov v závislosti na lokálních zdrojích a tradicích. Povrchová úprava zdiva ve formě omítek má již velmi dlouhou tradici a díky své konstrukční snadnosti a ekonomické výrobě lze předpokládat, že bude mít i nadále svůj zásadní význam ve stavebnictví.

Myšlenka zabudovat mřížku do maltové matrice pochází z konce 40. let 19. století, o necelé století později Pier Luigi Nervi aplikoval cementovou omítku přes vrstvu ocelové sítě [1]. Obdobnou technologií je textilem vyztužený beton. Tento kompozit

využívá skleněné, uhlíkové nebo aramidové tkaniny odolné vůči alkáliím v kombinaci s cementovým betonem. Díky vysoké pevnosti v tlaku i tahu je používán pro stavbu tenkých strukturálních prvků jako je trvalé bednění nebo fasáda [2][3].

Začlenění krátko-vlákenné výztuže do omítkové (cementové) matrice se obvykle provádí za účelem zlepšení tahových vlastností a snížení křehkosti kompozitu. V praxi se běžně používá cementová matrice, do které se přidává krátko-vlákenná ocelová nebo skleněná výztuž. V novějších výzkumech se autoři zaměřili i na vlákna uhlíková [4] nebo vlákna s nízkým modulem pružnosti jako je polypropylen [5][6].

Současná věda se zaměřuje především na studium základních faktorů ovlivňujících mechanickou pevnost kompozitů. Jednou z hlavních problematik je vazba mezi vláknem a matricí. Vlákenná výztuž prodlužuje dobu vzniku trhlin a brání jejich šíření. Napětí z matrice je přenášeno na vlákna procházející rovinou trhliny, čím se zabraňuje selhání kompozitu. Následně je napětí přeneseno zpět do okolní matrice pomocí rozhraní vlákno/matrice. [3][7][8][9]

Dalším faktorem ovlivňujícím pevnost kompozitu je distribuce vláken. Ta je proto rozhodujícím faktorem pro dosažení požadovaného mechanického výkonu. Rovnoměrné rozložení vláken je však ve skutečnosti obtížně dosažitelné, proto je tento problém předmětem mnoha studií. [10][11][12][13][14]

Na vlastnosti omítkových kompozitů má také vliv pórovitost matrice. Pro správné pochopení a vysvětlení fyzikálních jevů v omítkách je v mnoha pracích studována poréznost struktur a její chování. [15][16][17][18][19]

Vlhkost vnitřního prostředí má značný vliv na zdraví a pocit komfortu obyvatel. Relativní vlhkost (RH) ovlivňuje vnímání kvality vnitřního vzduchu a tepelnou pohodu. Jestliže je hodnota RH přílišní nízká nebo naopak příliš vysoká zvyšuje se riziko rozvoje alergií a jiných onemocnění. Proto je snaha udržovat ve vnitřních prostorách optimální hodnotu RH (v rozmezí 40 – 60 %). [20][21] V případě vyšších hodnot RH (nad 80 %) může docházet nejen k biologickému růstu, ale v některých případech může dojít ke zkrácení předpokládané životnosti daného stavebního materiálu. [22]

Vlhkost je jedním z hlavních faktorů podílejících se na rozkladu stavebních materiálů. Voda může pronikat do struktury materiálu např. kapilárním vzlínáním nebo kondenzací vzdušné vlhkosti, což může mít za následek fyzikální a chemické změny. [23][24] Kompozity mají obvykle sklon k absorbování většího množství vody, než je tomu u čisté matrice. Některé studie ukázaly, že k nejvýraznějšímu zvýšení obsahu vlhkosti dochází u kompozitů s vyšším množstvím vláken. [25][26] Naopak omítkové kompozity s rostlinnými materiály jako je sláma nebo kukuřičná dřeň poukazují na zvýšení propustnosti vodní páry. [27][28][29] Vlhkost je v kompozitech transportována pomocí difuze v matrici a na rozhraní vlákno – matrice. Vlákna proto mohou ovlivnit kinetiku absorpce vody a transportní kapacitu. [30][31] V poslední době se mnoho vědců zabývá výzkumem materiálů tlumící vlhkost, které mohou absorbovat/desorbovat vlhkost prostřednictvím porézní struktury. Výměna vlhkosti umožňuje autonomní regulaci vlhkosti, díky čemuž se tyto kompozity zdají být slibné z hlediska realizace trvalé regulace vnitřní vlhkosti a při snižování energetických nákladů. [32][33]

Jedním z velkých témat dnešní doby je neustále rostoucí hladina hluku, která je spjatá s obrovským technologickým pokrokem v mnoha odvětvích každodenního života. Je mnoho lékařských výzkumů dokazujících negativní dopad dlouhodobého vystavení hluku nebo vysoké hladiny hluku na lidský organismus. Tyto faktory ovlivňují nejen psychický stav, ale i celkové zdraví člověka. [34][35][36][37]

Schopnost stavebních materiálů pohlcovat zvukové vlny je závislá na jejich tuhosti, hustotě a pórovitosti [38][39][40]. Běžně využívané stavební materiály jako jsou cihly, beton, pórobeton, železobeton, skelná vata, polystyren a další, mají již známé a prozkoumané obecně mechanické a tepelně izolační vlastnosti. Jejich výroba má však negativní dopad na životní prostředí, a proto se v posledních letech dostávají do popředí stavební kompozity využívající některé klasické přírodní materiály (čočka, konopí, dřevo sláma, rákos, rýžové slupky, …). [41][42][43]

Dalším velkým tématem jsou výzkumy zabývající se opětovným použitím ať už biologických nebo průmyslových odpadních materiálů (ovčí vlna, juta, recyklovaná bavlna, syntetické tkaniny, celulóza, dřevo, konopí, …) jako zvukové izolace [44][45][46][47][48]. Ovšem v případě cementových kompozitů, které jsou zásadité, může lehce dojít k poškozování jak rostlinných, tak živočišných vláken a spolu s absorpcí vody postupem času značně oslabují spojení mezi vláknem a matricí [49].

Jak již bylo zmíněno pohlcování zvuku závisí také na pórovitosti materiálu. Dle některých studií je použití vláken ve stavebních kompozitech v tomto ohledu pozitivní. Přidání přírodních vláken může mírně zvýšit otevřenou pórovitost a díky relativně vyššímu objemu pórů je tedy možná výsledná absorpce zvuku vyšší. [50][51][25]

Moderní vývoj v elektronice (speciálně v bezdrátových a komunikačních systémech) přináší do běžného života mnoho výhod. Je třeba si ale také uvědomit, že s těmito pokroky dochází ke zvýšenému výskytu elektromagnetických vln v našem okolí. Nadměrná přítomnost těchto vln může negativně ovlivňovat lidské zdraví [52][53][54][55].

Dnes již běžně využívané kovové stínění trpí řadou nevýhod jako je vysoká hmotnost, náchylnost ke korozi nebo obtížné zpracování [56][57][58][59]. Ve studiích zabývajících se elektromagnetickým stíněním stavebních materiálů se často používají příměsi s vysokou elektrickou vodivostí nebo materiály na bázi uhlíku [60][61][62][63], což může vést ke zvýšení účinnosti elektromagnetického stínění a zároveň k nárůstu stavebních nákladů a nákladů na následnou údržbu. Některé studie využívají minerální příměsi jako je popílek, saze nebo struska, které se běžně využívají jako doplňkové cementové materiály pro jejich stabilní mechanické vlastnosti, vhodné elektromagnetické vlastnosti, nízké emise $CO_2$ a dobrou finanční dostupnost [63][64][65][66][67]. Slibné výsledky dosahují také cementové kompozity s plnivem ve formě uhlíkových nanotrubic, které se vyznačují vysokou elektrickou vodivostí, což vede k vysokým hodnotám účinnosti elektromagnetického stínění (SE) [68][69][70][71]. Nicméně využití nanotrubic do cementových kompozitů vede také k extrémně vysokým výrobním nákladům. Z plniv na bázi uhlíku se jako nejvýhodnější zdají uhlíková vlákna, která mají nižší výrobní náklady (oproti např. uhlíkovým nanotrubicím) a zároveň mají vysokou pevnost, vysoký modul pružnosti a dobrou elektrickou vodivost [72][73][74][75].

Jelikož je cement základní materiál, který se hojně využívá ve stavebnictví, využívá ho převážná většina výzkumů v této oblasti jako matrici. Nicméně samotná cementová matrice má špatnou účinnost elektromagnetického stínění.

Ve stavebnictví se používá až 60 % surovin získávaných z litosféry, proto má toto odvětví velký vliv na životní prostředí [76]. Vytváří se velké množství stavebního a demoličního odpadu, přičemž pouze 50 % je recyklováno [77][78]. S neustálým nárůstem environmentálních problémů (klimatické změny, ubývání přírodních zdrojů, problémy spojené se znečištěním a nakládáním s odpady) roste také potřeba vytvářet úspornější a udržitelnější materiály se stále lepšími fyzikálními a mechanickými vlastnostmi.

V současné době se průmyslový i akademický svět zaměřuje na vývoj udržitelných materiálů/kompozitů vyztužených přírodními vlákny. Mnoho odborných prací se zabývalo možností použít přírodní vlákna jako alternativní vyztužení. Vlákna jako konopí, len, juta, čedič, sisal atd. jsou schopné vykazovat mechanické vlastnosti srovnatelné se syntetickými vlákny [79][80]. Díky nízké hustotě, srovnatelným specifickým vlastnostem, snížené spotřebě energie, menším zdravotním rizikům, obnovitelnosti, recyklovatelnosti, biologické rozložitelnosti a nízkým nákladům je použití přírodních vláken v kompozitech lukrativní možností. Jedna z hlavních nevýhod využití těchto vláken jako výztuže je slabá interakce mezi vlákny a matricí. Proto se řada vědců ve svých studiích zabývala chemickým a fyzikálním ošetřením vlákna pro zvýšení drsnosti povrchu, zlepšení přilnavosti vlákna a matrice a snížení absorpce vlhkosti [81][82]. Chemická ošetření většinou zahrnují nebezpečná činidla, proto se od tohoto způsobu povrchové úpravy upouští a do popředí se dostávají biologické úpravy založené na využití působení vhodných hub a enzymů. Odstraněním hydrofilní fáze pektinu a hemicelulózy, které slouží jako pojivo svazku vláken můžeme selektivně zlepšit homogenitu, jemnost a účinnost vláken ve struktuře s nižším dopadem na životní prostředí oproti tradičním metodám. [83][84]

# 2 KOMPOZITY

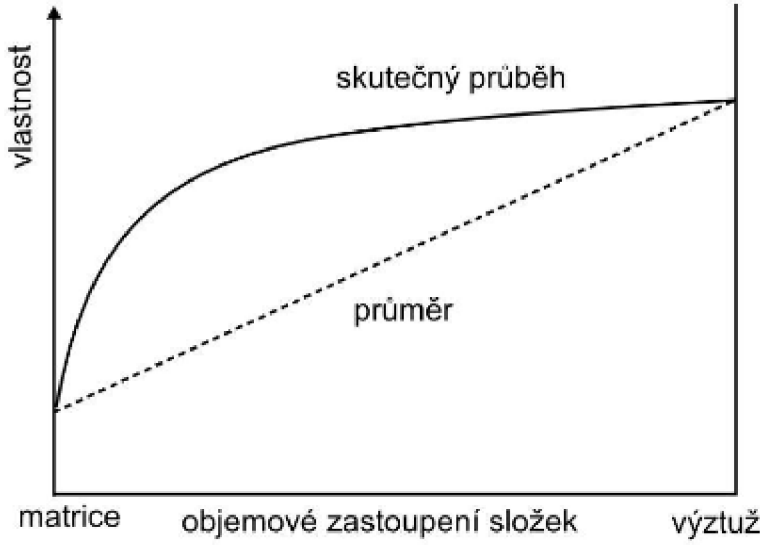
Kompozitní materiál je specifický druh materiálu, který kombinuje dva nebo více komponent (fází), přičemž každá z těchto komponent se liší mechanickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Všechny fáze musí být navzájem rozlišitelné a oddělené rozhraním. Obvykle se kompozit skládá ze spojité fáze (matrice) a fáze nespojité (výztuž). Matrice je většinou poddajnější a slouží jako pojivo výztuže. Jejím úkolem je přenášet zatížení mezi jednotlivými vlákny, formovat a fixovat plnivo a vytvářet výsledný tvar. Vyztužující materiály jsou zpravidla tvrdší, tužší a pevnější a jejich hlavním cílem je tyto vlastnosti ještě zlepšit.

K získání materiálů se zcela novými vlastnostmi je potřeba ve struktuře vyvolat synergický efekt (obr. 1). Synergismus vzniká spoluprací materiálů (složek) či fází tvořící kompozit, jehož vlastnosti jsou lepší než vlastnosti, které by odpovídaly pouhému součtu jednotlivých složek (1 + 1 = 3). Při vytváření kompozitních materiálů se hledá takové uspořádání komponent, které vede k co největšímu synergismu. [85][86]

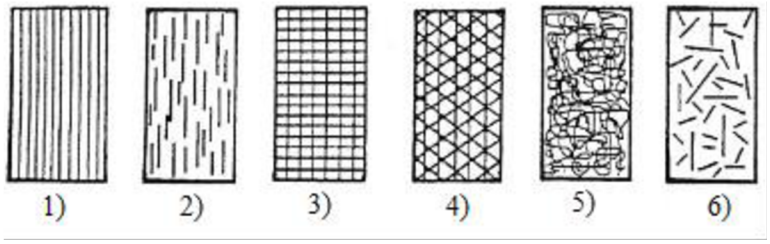
Kompozitní materiály je možné dělit podle různých hledisek. Výztuž kompozitních materiálů se dělí na kovy a nekovy, které se dále člení na anorganické a organické materiály. Stejné materiálové dělení mají matrice. Materiálové složení výztuže a matrice lze kombinovat nejrůznějším způsobem, předpokladem je dobrá mezifázová adheze a vhodné deformačně-napěťové vlastnosti. Důležité je také členění podle geometrického tvaru výztuže:

- vlákenné
- částicové
- skeletové

Vlákennou výztuž lze použít v různých délkách a uspořádáních, která jsou znázorněná na obrázku 2. [87][88]




Obr. 1 Synergické chování složek kompozitu [86]




Obr. 2 Typy vlákenných kompozitů: 1) jednosměrná nekonečná vlákna, 2) jednosměrná krátká vlákna, 3) dvousměrné vyztužení (perlinka, rohož, tkanina v plátnové vazbě), 4) vícesměrné vyztužení, 5) náhodná orientace nekonečných vláken, 6) náhodná orientace krátkých vláken

Částicové kompozity mají výztuž (částice) dispergovanou v matrici. Částice omezují rozvoj plastických deformací. Omezení plastických deformací vede ke zvýšení meze kluzu, meze pevnosti a tvrdosti. Zároveň pomocí této výztuže lze ovlivnit řadu dalších vlastností jako je tepelná a elektrická vodivost a jiné. [86][87][88]

Skeletové kompozity představují pórovitou matrici, která je prostoupena souvislým nosným skeletem.

Kompozity s vlákennou výztuží lze podrobněji členit podle geometrického uspořádání vláken:

- **jednovrstvé**
  - dlouhovlákenné
    - s jednosměrným vyztužením
    - s vícesměrným vyztužením

  - krátkovlákenné ($l/d$ < 100)
    - s náhodnou orientací vláken
    - s přednostní orientací vláken

- **vícevrstvé**
  - laminát
  - hybridy [86][87][88].

## 2.1 Vlákenná výztuž

Vzhledem k faktu, že vlákna vytvářejí nosnou strukturu kompozitních materiálů je tato kapitola věnována vláknům, které se často používají jako výztuž v kompozitech a zároveň se jedná o vlákna použitá v experimentální části této práce.

### 2.1.1 Čedičová vlákna

Čedič (bazalt) je jednou z hojně se nacházejících vyvřelých hornin na zemském povrchu. Jedná se o generické označení skupiny hornin, v níž je zastoupena řada kysličníků a minerálů mezi které patří pyroxeny, magnetit, olivín a plagioklas, které se v čedičích

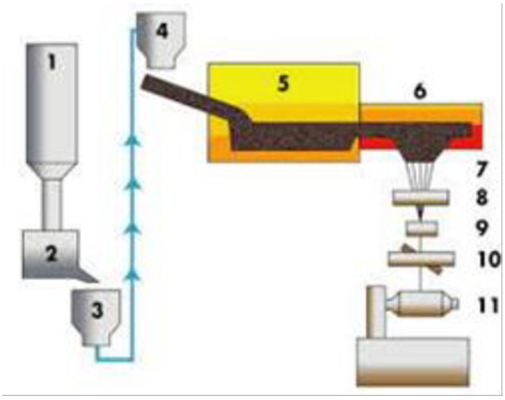
často vyskytují v podobě vyrostlic[1]. Pro výrobu vláken se používají bazaltické horniny, které obsahují dva základní minerály: olivín a nefelin. Na základě obsahu oxidu křemičitého lze čedič rozdělit do tří skupin:

- alkalické čediče (obsah $SiO_2$ do 42 %)
- slabě kyselé čediče (obsah $SiO_2$ od 43 do 46 %)
- kyselé čediče (obsah $SiO_2$ nad 46 %). [89][90]

Pro výrobu vláken jsou vhodné pouze kyselé čediče s konstantním chemickým složením. Hornina musí mít schopnost tání bez pevných zbytků, tavenina musí mít optimální viskozitu a schopnost tuhnout bez výrazné krystalizace. Při výrobě čedičových vláken je nutné zachovat amorfní skelný stav. Vznik krystalické fáze má za následek snížení pevnosti čedičových vláken.[89][90]

**Výroba čedičových vláken**

Čedičová vlákna mohou být vyráběna ve formě krátkých vláken odstředivým způsobem nebo rozfoukáváním. Kontinuální vlákna se vyrábí pomocí tavného zvlákňování při teplotách 1500 - 1700 °C s možností následného dloužení při teplotě 1300 °C (obr. 3). V závislosti na jemnosti vláken lze vyprodukovat 15 - 35 kg vláken/h. Za největší výrobce čedičových vláken se v dnešní době považuje Rusko, Čína a Ukrajina.[89]




Obr. 3 Schéma výroby čedičových vláken: 1) drcený kámen, 2) nakládací stanice, 3) a 4) dopravní systém, 5) počáteční zóna tavení, 6) sekundární tepelná zóna, 7) zvlákňování, 8) sizing, 9) tvorba pramene, 10) dloužení, 11) navíjení [91]

**Vlastnosti čedičových vláken**

Čedičová vlákna jsou svými vlastnosti velmi podobná skleněným vláknům. Výhodou čedičových vláken je dobrá dostupnost a nenákladnost suroviny a zároveň tavení čediče je rychlejší, hygieničtější a méně energeticky náročné než tavení skloviny ze skelného kmene. [89][91]

Vlivem času mohou čedičová vlákna postupně ztrácet svoji pevnost. Stárnutí vláken souvisí s prachovými částicemi, adsorbovanou vlhkostí a nedokonalým povrchem vláken. Povrchově adsorbovaná vlhkost má za následek snižování pevnosti vláken. Tento

[1] Relativně velké krystaly vyskytující se v jemnozrnější základní hmotě vyvřelých nebo metamorfovaných (přeměněných) hornin.

negativní jev roste společně s rostoucí teplotou. Nedokonalost povrchu vláken je důsledek nehomogenní povrchové struktury. Navlhavost vláken se pohybuje kolem 1 %. Vlákna mají vysokou odolnost vůči vodě a vlhkosti, důvodem je pouze malé množství OH-skupin obsažených v čediči. Bazaltová vlákna dobře odolávají eroznímu prostředí, plísním a jiným mikroorganismům. Ve srovnání se sklem je čedič méně odolný vůči kyselinám, ale výborně odolává louhům (i koncentrovaným), z čehož plyne vhodnost použití čedičových produktů do omítek a cementů. [89]

Basalt má velký tepelný rozsah použitelnosti od - 200 - 700 °C, dobrou odolnost vůči UV záření a vysoký elektrický odpor. Je nehořlavý, má silně tlumící schopnosti vůči pronikajícím plamenům a ohni a je velice dobrým tepelným izolantem. Při teplotě kolem 20 °C se jeho tepelná vodivost pohybuje v rozmezí od 0,03 do 0,04 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$. Má dobré zvukově izolační vlastnosti, které jsou dané velkým obsahem pórů ve vlákenné spleti. [89]

**Možnosti použití čedičových vláken**

S ohledem na podobnost fyzikálních, mechanických a chemických vlastností čedičových a skleněných vláken lze basaltová vlákna v technické praxi použít ve většině případech, kde se aplikovala vlákna skleněná. Obecně je lze použít jako:

- geotextilie
- tepelně-izolační aplikace ve stavebnictví
- výztuže v kompozitních materiálech
- zvuková a chemická izolace
- k filtrování agresivních látek
- pro ochranné a pracovní oděvy
- pro bytové a interiérové nehořlavé textilie. [91]

### 2.1.2 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna se průmyslovým způsobem začala vyrábět více jak před 60 lety. V podstatě se jedná o souhrnný název všech vláken obsahující uhlík v různých modifikacích. Vlákna obsahují atomy uhlíku a vytváří krystaly, které mají různý stupeň orientace vůči ose vlákna. Díky tomuto uspořádání mají uhlíková vlákna specifické vlastnosti. [89][92]

**Výroba uhlíkových vláken**

Uhlíková vlákna se vyrábějí převážně řízenou pyrolýzou vhodných prekurzorů. Jako nejvíce využívané prekurzory se používají polyakrylonitrilová vlákna, viskózová vlákna (nejlevnější alternativa) a vlákna na bázi smol[2] a dehtu (nejpevnější vlákna). Vlákna využívající viskózový prekurzor mají pouze malý výtěžek uhlíkových vláken (20 - 25 %), lépe jsou na tom prekurzory z PAN (45 - 50 %) a největší výtěžek (75 - 80 %) mají prekurzory ze smol, tyto prekurzory lze navíc připravit s vysoce orientovanou strukturou. Výrobu uhlíkových vláken je možné rozdělit do několika základních operací:

[2] Zbytky krakování/ výroba ropy

**Příprava prekurzoru** - probíhá buď tavným zvlákňováním, nebo zvlákňováním z roztoku. Při výrobě prekurzoru je kladen důraz na její strukturu (orientace molekul ve směru osy vlákna), která následně ovlivňuje strukturu a pevnost výsledných uhlíkových vláken.

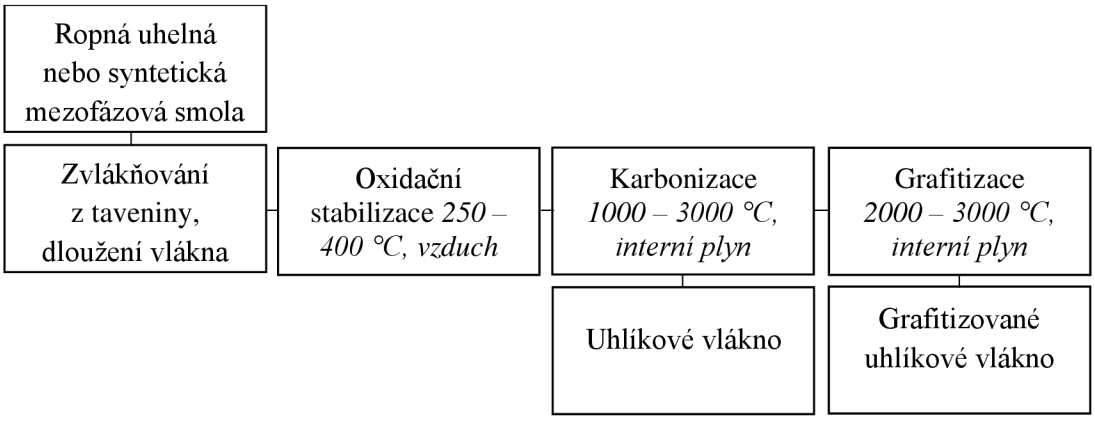
**Stabilizace** - dochází k přeměně prekurzoru na zhuštěnou a teplotně stabilní formu. Probíhá na vzduchu zahřátím na teploty 200 - 450 °C. Při stabilizaci dochází ke snížení pevnosti v tahu, tažnosti a vlákno se stává nehořlavým.

**Karbonizace** - provádí se v inertní atmosféře při teplotách 1000 - 2000 °C. Dochází k přeměně prekurzoru na uhlíkové vlákno, které obsahuje 85 - 95 % uhlíku. V důsledku strukturálních změn ve vlákně se mění fyzikální a mechanické vlastnosti výsledného vlákna.

**Grafitizace** - probíhá v inertní atmosféře při teplotách 2400 - 3000 °C. Dochází k nárůstu obsahu uhlíku na 99 % a více. Neuspořádaná struktura uhlíku se přemění na velmi uspořádanou grafitickou strukturu.

**Povrchové úpravy** - velmi často se používají úpravy, které zvyšují povrchovou energii. Tato změna se provádí pomocí oxidace povrchu vláken, což vede ke schopnosti na sebe vázat pojiva silnějšími chemickými vazbami. Nebo se pomocí elektrolýzy zvětšuje povrch vlákna a dochází k lepšímu mechanickému spojení s pojivy. Dále je možné provádět preparaci vláken. Jedná se o nános vrstvy, která chrání před poškozením a udržuje monofily v kabílku pohromadě. [89]

Výše zmíněným postupem lze vyprodukovat uhlíková vlákna z PAN. Nejtužší uhlíková vlákna se vyrábí ze smol. Tuhá a zároveň pevná vlákna získáme z takzvané mezofázové smoly (obsahuje kapalné krystaly). Při zvlákňování taveniny dochází k orientování aromatické roviny podél osy vlákna a při následné oxidaci k zesítění. Následuje karbonizace a grafitizace při které lze vlákna ještě dloužit pro dosažení velkých hodnot modulu pružnosti v tahu. Výroba vláken z mezofázové smoly je znázorněna na obrázku 4. [89][93]




Obr. 4 Schéma výroby uhlíkových vláken ze smol

**Vlastnosti uhlíkových vláken**

Uhlíková vlákna se jako technický materiál neustále vyvíjí, nabídka na trhu se tedy neustále rozšiřuje o nové druhy vláken, které mají speciální vlastnosti. Obecně lze tyto vlákna rozdělit podle jejich vlastností:

*Vlákna nižších parametrů* - pevnost v tahu < 1000 MPa. Používají se jako tepelná izolace nebo pro odstraňování elektrostatických nábojů z povrchových vrstev kompozitních struktur.

*Vlákna se standartní pevností* - pevnost v tahu 2,5 až 4 GPa

*Vlákna s vysokými mechanickými parametry* - pevnost v tahu 3,5 až 7 GPa. Podle mechanických vlastností lze vlákna v této skupině ještě dělit na:

- vysoce pevná vlákna
- vysokomodulová vlákna
- vlákna se super vysokým modulem.

Vzhledem k rozmanitosti vlastností uhlíkových vláken jsou tyto kategorie pouze orientační a mohou se tedy překrývat. [89][92][93][94]

Uhlíková vlákna z PAN se nejčastěji vyrábí o průměru 4 - 8 µm, vlákna na bázi smol mají průměr pod 10 µm. Hustota vláken se pohybuje v rozmezí 1600 - 2200 $kg \cdot m^{-3}$ a ovlivňuje ji struktura vláken, stupeň pórovitosti a uspořádání grafenových rovin. Elektrická vodivost vláken roste s dokonalejším uspořádáním vnitřní struktury s osou vlákna, je tedy izotropní. Tepelná roztažnost je ve směru osy vlákna velmi nízká (nabývá i záporných hodnot). Vlákna jsou křehká a mají pouze malou odolnost v ohybu, mají vynikající odolnost vůči kyselinám, alkáliím, různým rozpouštědlům a solím. Vyznačují se také teplotně rozměrovou stabilitou a odolností vůči únavě tření a opotřebení. [89][92][94]

**Možnosti použití uhlíkových vláken**

Zatímco vlastnosti uhlíkových vláken jsou srovnatelné s ocelí, jejich hmotnost je přibližně 5krát menší, a právě tato kombinace vlastností je jedním z důvodů poměrně vysoké ceny vláken. Využití uhlíkových vláken je proto směřována hlavně do oblastí a aplikací, kde se poměr cena/výkon vyplatí. [94]

V dnešní době se uhlíková vlákna využívají hlavně jako výztuž do kompozitních materiálů. Mezi hlavní obory využívající uhlíkové kompozity patří kosmonautika a letectví, pozemní a vodní doprava, strojírenství, výroba energie a stavebnictví. Kompozity se také hojně rozšířily ve sportovním průmyslu a našly také uplatnění v lékařství. [92][94]

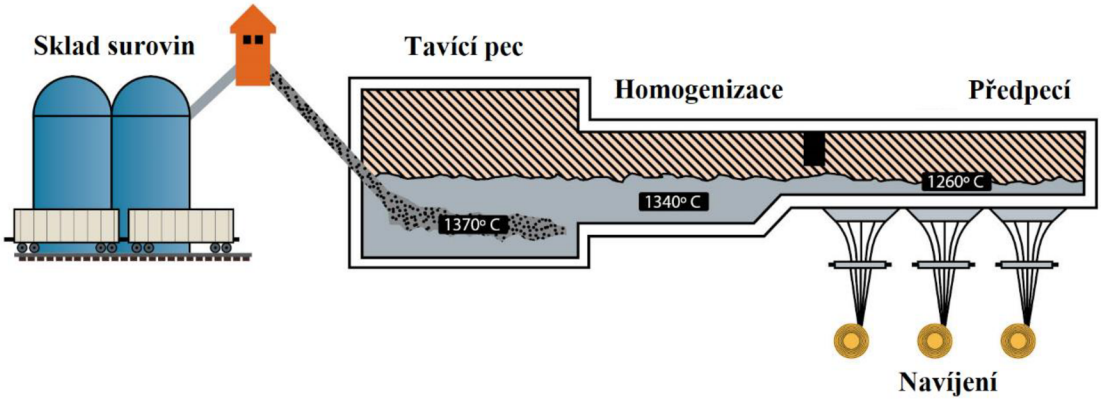
### 2.1.3 Skleněná vlákna

Skleněná vlákna se řadí mezi anorganická vlákna se širokým záběrem použití. Vzhledem k faktu, že sklo nemá pravidelnou strukturu tuhého stavu, ho nelze zařadit do kapalného nebo tuhého stavu, a proto se jeho stav nazývá skelný. Ačkoli už ve starém Egyptě a Řecku věděli, jak tavit sklo a z taveniny vytahovat tenká vlákna, až po roce 1937 zaznamenala výroba skleněných vláken klíčový rozvoj. Díky jejich dobrým vlastnostem a nízkým výrobním nákladům jsou dodnes hojně používaným materiálem. [89][95]

**Výroba skleněných vláken**

Pro výrobu skleněných vláken se využívá metoda tavného zvlákňování s následným dloužením za tepla (obr. 5). K přímému tavení skla je potřeba vysoké teploty, které způsobují problémy s homogenizací taveniny a k částečnému těkání některých složek taveniny. Pro odstranění těchto komplikací při výrobě se používá sol/gel metoda. Sol představuje koloidní suspenzi obsahující velmi malé částice, které nesedimentují. Gel je kapalné médium, jehož viskozita zapříčiňuje, že se chová jako pevná látka. Temperací sol/gelu dojde ke zkompaktnění struktury a následně ke vzniku skleněných vláken. [89]

Bezprostředně po zvláknění a dloužení se povrch skleněných vláken pokrývá ochrannou vrstvou, aby nedocházelo k abrazi a snížení pevnosti vláken. Pro povrchové úpravy skleněných vláken se používají lubrikační látky (želatina, vosk, polyvinylalkohol, škrob), které mají za úkol vlákno chránit při jeho dalším zpracování. Nevýhodou lubrikačních látek je špatná kompabilita s matricemi při výrobě kompozitů. Proto lze použít vazebných prostředků s dobrou afinitou jak ke skleněným vláknům, tak k matrici (organokovové sloučeniny, organosilany). [89][96]




Obr. 5 Schéma výroby skleněných vláken [97]

**Vlastnosti skleněných vláken**

Existuje velké množství skel lišící se svým složením a účelem použití. Pro výrobu skleněných vláken se nejčastěji využívá bazaltické E-sklo, které obsahuje $SiO_2$, $Al_2O_3$, CaO, MgO. [89]

Vlákna se vyznačují vysokou pevností a Youngovým modulem v tahu. Pevnost skleněných vláken však snižuje přítomnost vlhkosti ve vláknech. Čerstvě vyrobené vlákno má proto větší pevnost než vlákno s rovnovážným obsahem vody. Navlhavost skleněných vláken se může lišit v závislosti na typu vlákna, povrchové úpravě a prostředí, ve kterém se vlákna nacházejí. Dále se vyznačují nízkou odolností vůči dlouhodobému statickému namáhání a oděru, jsou křehká a mají nízkou tažnost. Skleněná vlákna odolávají ohni a kyselinám a mají dobré elektroizolační vlastnosti.[95][96]

**Možnosti použití skleněných vláken**

V dnešní době se skleněná vlákna hojně využívají jako výztuže do kompozitních materiálů. Dále pro izolační a filtrační účely a díky nehořlavosti se využívají k výrobě ochranných pracovních oděvů, nebo také v interiérech jako bytové a dekorační textilie.

Lze také vyrobit skleněná optická vlákna pro konstrukci optických vlnovodů a světlovodů nebo vlákna pro elektrické izolace. [89][96]

## 2.2 Matrice - omítky

Matrice je základní stavební jednotkou zajišťující celistvost kompozitních materiálů. Zabezpečuje přenos namáhání na jednotlivá vlákna, zároveň vlákna chrání před okolním prostředím a fixuje jejich geometrickou polohu. Pro dosažení optimálních vlastností celého kompozitu je důležité, aby materiálové vlastnosti matrice a vláken byly v souladu. V neposlední řadě matrice vytváří funkční povrch tělesa a jeho estetický vzhled. Ve stavebnictví se velmi často vyskytují kompozity, které mají cementovou matrici a vlákennou výztuž (sklovláknobeton, železobeton, …). Vzhledem k zaměření této disertační práce pojem matrice představuje omítky, které jsou v této kapitole blíže popsány. [87][88]

Omítku lze definovat jako povrchovou úpravu zdí a stěn. Povrchové úpravy stavebních konstrukcí mají hlavně ochranou funkci, zároveň dodávají konstrukcím na estetičnosti vnitřního a vnějšího prostředí. Omítky mají především chránit před povětrnostními, mechanickými, fyzikálními, chemickými i biologickými vlivy a zabezpečit zlepšení stávajících vlastností konstrukcí jako je odolnost proti vlhkosti, tepelně a zvukově izolační schopnost a prodloužit životnost stavby. Povrchovou úpravu je třeba volit s ohledem na materiál podkladové konstrukce, na hmotách určených pro povrchovou úpravu a způsobu provádění úpravy a v neposlední řadě také záleží na účelu daných prostorů a ploch. Omítky můžeme dělit podle řady faktorů, mezi které patří:

- materiál
- technologie provádění úpravy (ruční/strojové omítky)
- počet vrstev (jednovrstvé, vícevrstvé)
- úprava povrchu (nezatřená omítka, hladká, broušená, škrábaná, …)
- tvar omítaných ploch (rovné, oblé, profilované plochy)
- umístění v budovách (podzemí, nadzemní podlaží, podkroví). [98][99][100]

Omítky se dle materiálu mohou dále dělit. První skupinu tvoří tradiční omítkové materiály, mezi které se řadí vápenná, cementová, vápenocementová, sádrová a vápenosádrová omítka. Dále lze omítky dělit na novodobé (minerální, pryskyřičné a silikonové) a speciální (tepelně-izolační, sanační a uzavírací). [98][99][100]

Omítka se skládá ze tří hlavních částí, kterými jsou plnivo, pojivo a speciální přísady. Pojivo je hlavní složkou, která nám v podstatě definuje materiálové složení, ovlivňuje technologické vlastnosti omítky a zajišťuje přilnavost, plastičnost a její životnost. V tabulce 1 jsou uvedeny jednotlivé typy omítek dle pojiva. Zároveň je z rozdělení patrné, že při výrobě dochází ke kombinaci a překrývání pojiv. V tabulce 1 jsou pojiva rozdělena na minerální nebo organická. Minerální pojiva mohou být:

- vzdušná - ke ztvrdnutí dochází na vzduchu, (vápno, sádra, jíl)
- hydraulická - tuhnou a tvrdnou jak na vzduchu, tak ve vodě (cement, hydraulické vápno)
- organická (především disperze).[101]

Tab. 1 Rozdělení omítek dle použitého pojiva

| Typ pojiva | Typ omítky | Převládající druh pojiva | Oblast použití |
|---|---|---|---|
| minerální | vápenná | vápno, hydraulické vápno | vnitřní omítky, oblast restaurování |
| | vápenocementová | vápno, cement (obvyklý poměr cca 2:1) | běžné omítky, speciální (např. sanační, tepelně-izolační, spec. stěrky, spárovací, akustické, protipožární, atd.) |
| | cementová | cement, vápno ve velmi malém množství pro lepší zpracování | |
| | sádrová (vápenosádrová) | sádra (event. Vápno) | vnitřní a protipožární omítky |
| | hliněná | jíl | tenkovrstvé omítky, vysprávky |
| organické | silikonová | silikátová disperze | vnitřní omítky, zdravé bydlení, ekologické restaurování |
| | disperzní (akrylátová) | akrylátová disperze | |
| | silikátové | vodní sklo, disperze | |

### 2.2.1 Vzdušná pojiva

V této podkapitole jsou popsány jednotlivé druhy vzdušných pojiv, jejich výroba, tuhnutí a tvrdnutí a možnost použití.

#### 2.2.1.1 Vzdušné vápno

Vápno (oxid vápenatý) se řadí mezi nejstarší stavební pojiva. Obsahuje různé množství oxidu hořečnatého, který se vyrábí pálením vysokopecních nebo dolomitických vápenců. Podle obsahu MgO se vzdušné vápno dělí na:

**Vápno vzdušné bílé** - označení vyjadřující jeho chemické složení, obsah MgO nesmí přesáhnout 7 %. Při hašení jeho objem nabyde až 3krát.

**Dolomitické vzdušné vápno** - vyznačuje se menší vydatností a pomalejší reakcí s vodou, obsah MgO je větší jak 7 % a při hašení se jeho objem zvětšuje 1,5 - 2krát. Následným jemným mletím se získává vídeňské vápno, které se používá zejména pro leštění.

Vzdušné vápno lze rozdělit do 5 tříd jakosti, ovšem pro stavební účely musí obsah CaO činit minimálně 85 %. [102][103][104]

**Výroba vzdušného vápna**

Pro výrobu vzdušného vápna se používají vápence s malým obsahem nečistot. Vhodně upravené suroviny se pálí v rotačních či šachtových pecích při teplotě 1000 - 1250 °C. Při výpalu získáváme pálené (nehašené) vápno, které vzniká tepelným rozkladem uhličitanu vápenatého (dekarbonizace) podle rovnice (1):

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2 \quad (1)$$

Při zvyšování teploty výpalu se vytváří větší krystaly CaO. Tyto krystaly jsou méně porézní a mají menší měrný povrch.

Platí, že s nižšími teplotami (kolem 1000 °C) a při nižších rychlostech výpalu, vznikají vápna, která mají vysokou porozitu zrn, velký měrný povrch a reagují s vodou rychleji. Jsou to tzv. měkce pálená vápna, která jsou vhodná pro výrobu malt a omítek. Naopak při vyšších teplotách (nad 1100 °C) a rychlostech vzrůstá podíl hutnější struktury. Vznikají vápna s menším měrným povrchem a pomaleji reagující s vodou. Tyto vápna se nazývají tvrdě pálená a jsou vhodná k výrobě autoklávového pórobetonu.

Pro stavební práce se běžně využívá hašené vápno $Ca(OH)_2$, které vzniká při reakci páleného vápna s vodou. Při reakci dochází k rozrušování zrn CaO a vzniká plastická kaše. Hašení vápna lze popsat rovnicí (2):

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 \quad (2)$$

Kvalita hašeného vápna je definována vydatností a plasticitou. Vydatnost je množství kaše, která vznikne z 1 kg páleného vápna. Plasticita je způsobena hydroxidem vápenatým a zásadně ovlivňuje technologické vlastnosti malt. Hašení vápna lze provádět dvěma způsoby:

**Mokré hašení** - provádí se skrápění vrstvy páleného vápna vodou (za přebytku vody), přímo na stavbě. Optimální teplota hašení by neměla přesáhnout 100 °C. Při vyšší teplotě a špatném míchání by došlo ke shlukování částic, uzavření povrchu a důsledkem by bylo nezreagování vody a části zrn páleného vápna. Vápno se nechává před použitím stanovenou dobu odležet.

**Suché hašení** - se provádí průmyslově na vápence a vzniká tzv. vápenný hydrát. Pro hašení se používá přesně stanovené množství vody (v malém nadbytku), která se při hydrataci odpaří. Vápenný hydrát lze skladovat po dobu 6 měsíců. Pro přípravu malt určených ke zdění je možno použít vápenný hydrát přímo, pro ostatní účely je třeba nechat jej odležet. [102][103][105][106]

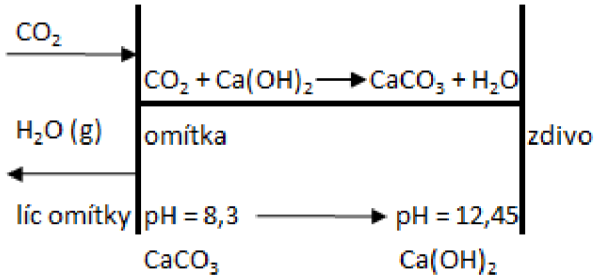
**Tuhnutí a tvrdnutí vzdušného vápna**

Odpařováním přítomné vody dochází k tuhnutí vápenné malty. Při tomto procesu dochází ke karbonataci[3] (obr. 6) působením vzdušného oxidu uhličitého (3):

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \quad (3)$$

Pro tuto reakci je potřeba alespoň malé množství vody v tvrdnoucí maltě. Protože uhličitan vápenatý nemá pojivé vlastnosti, při přístupu oxidu uhličitého k vápnu dochází k znehodnocení vápna. Velký vliv na průběh karbonatace má teplota, která ovlivňuje odpařování vody. Při nízkých teplotách dochází vlivem vzniku ledu k porušení spojení plniva a pojiva, což může mít za následek rozpad malt, zejména omítek.

[3] Proces, při kterém dochází k transformaci hašeného vápna na kalcit (a to pouze za přítomnosti oxidu uhličitého a volné vody).




Obr. 6 Karbonatace vápenné omítky [106]

**Použití vzdušného vápna**

Vápno lze ve stavebnictví použít v různých formách:

- vápenná voda (čirý roztok $Ca(OH)_2$, pro restaurátorské práce)
- vápenné mléko (suspenze $Ca(OH)_2$ s obsahem sušiny do 10 %, nátěry)
- vápenná kaše (suspenze $Ca(OH)_2$ s obsahem sušiny okolo 50 %, zdící a omítkové malty)
- vápenný hydrát (práškový $Ca(OH)_2$, zdící a omítkové malty). [105][106] [107]

### 2.2.1.2 Sádra a sádrová pojiva

Tepelným zpracováním sádrovce se získává anorganické práškové pojivo nazývané sádra. Je to jedno z nejdéle používaných pojiv (byla používána už ve starověkém Egyptě). Řadí se mezi vzdušná pojiva i přes fakt, že k zatvrdnutí může docházet i pod vodou. V tomto prostředí ale nevytváří trvalé spojení. Pro výrobu sádry se používají suroviny přírodní (primární) i odpadní (druhotné):

**Přírodní sádrovec** - dihydrát síranu vápenatého, vzniká evaporací[4] mořské vody z uzavřených pánví či lagun.

**Přírodní anhydrid** - přírodní forma síranu vápenatého, spolu se sádrovcem je součástí evaporitových ložisek. Jeho vznik je závislý na teplotě roztoku. Vzniká evaporací mořské vody nebo dehydratací sádrovce.

**Syntetický sádrovec** - vedlejší produkt potravinářského, sklářského nebo chemického průmyslu. Plnohodnotná náhrada přírodního sádrovce. Od přírodní suroviny se liší malou velikostí zrn a vyšší vlhkostí.[98][107]

**Výroba sádry**

Sádru je možné vyrábět různými technologickými postupy, které se vybírají s ohledem na vstupní suroviny a na požadavky vyrobené maltoviny. Před samotným výpalem dochází k nadrcení suroviny a následná kalcinace (dehydratace) sádrovce může probíhat v rotačních pecích, sušících mlýnech, šachtových pecích, autoklávech nebo v tzv. vařácích. Při výrobě sádry je nejčastější reakcí částečná dehydratace, která probíhá podle rovnice (4):

[4] Evaporace je fyzikální proces, při kterém se kapalina mění v páru za normálního atmosférického tlaku a při teplotách pod bodem varu. Když se mořská voda vypařuje, rozpuštěné soli se usazují na dně a mohou vytvořit sedimenty, které se později mohou stát sádrovcem.

$$CaSO_4 \cdot 2H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O + 1{,}5H_2O \quad (4)$$

Způsob tepelného zpracování výchozí suroviny ovlivňuje vlastnosti výsledného pojiva, které se mohou výrazně lišit. Při kalcinaci vzniká půlhydrátová nebo hemihydrátová sádra.

Při zahřátí sádrovce na teploty 115 - 125 °C a za současného přetlaku ($1{,}3 \cdot 10^5$ Pa) dochází ke vzniku **α-sádry**. Při vzniku α-sádry dochází k uvolňování krystalové vody v kapalné podobě, čímž nedochází k poruchám mřížky sádry. Málo porušená mikrostruktura má pozitivní vliv na pevnost zatvrdlé malty.

Za běžného tlaku ($1{,}01325 \cdot 10^5$ Pa) a teplotě kolem 100 - 160 °C vzniká **β-sádra.** Při tomto procesu se voda z mřížky uvolňuje ve formě páry, a tak způsobuje její poruchy. Při výrobě β-sádry je potřeba, aby obsah dihydrátu byl co největší. Přítomnost anhydridu je nežádoucí.

Mineralogické složení maltovin rozhoduje o výsledných vlastnostech sádry. Sádry mohou být tvořeny:

- půlhydráty (hemihydráty) – vznikají při teplotách 110 - 150 °C
- $CaSO_4$ III - vyskytuje se ve 2 modifikacích α/β
- $CaSO_4$ II - vzniká při teplotách nad 500 °C
- $CaSO_4$ I - vzniká z anhydridu při teplotách nad 800 °C.

**Tuhnutí sádrových pojiv**

Při smíchání sádry s vodou dojde k rozpuštění sádry a vznikne přesycený roztok, který začne okamžitě krystalizovat. Mechanismus tuhnutí lze popsat (5):

$$CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O \quad (5)$$

Rychlost tuhnutí ovlivňuje množství anhydridu v sádře. Při vyšších teplotách výpalu vzniká větší množství anhydridu, což způsobuje pomalejší tuhnutí sádry. Doba tuhnutí se odvíjí od různých faktorů a lze ji ovlivnit. Zkrácení doby tuhnutí docílíme snížením vodního součinitele, zvýšením teploty záměsové vody, přidání urychlovačů tuhnutí nebo prodloužení doby míchání. Pro prodloužení doby tuhnutí se do směsi přidávají některé koloidní materiály. [98][106][107]

**Druhy sádry a sádrových pojiv**

Sádru lze dělit podle mnoha různých faktorů. Často se uvádí dělení podle doby tuhnutí:

- sádra rychle tuhnoucí
- sádra pomalu tuhnoucí
- sádrová maltovina
- anhydridová maltovina

Rychle tuhnoucí sádra vzniká při teplotách do 150 °C. Doba tuhnutí je 6 - 20 minut. Ve stavebnictví se využívá pro sádrokartonové desky a obklady, podhledy, suché omítkové směsi, sádrovláknité desky a jiné.

Pomalu tuhnoucí sádra tuhne většinou 9 - 12 hodin. Vyznačuje se lepší odolností vůči vodě oproti rychle tuhnoucí sádře. Používá se pouze ve stavebnictví (omítky, bezespáré podlahy, obkládací desky, umělý mramor, …).

Sádrové maltoviny se připravují mletím sádry s přídavky (vysokopecní struska, portlandský cement, hydraulické látky). Tímto postupem lze recyklovat směsi rychle tuhnoucí sádry.

Anhydridová pojiva lze připravit buď z přírodního anhydridu nebo ze sádrovce. Používají se na vnitřní omítky, štuk, tepelně izolační výrobky, podlahy a podobně. [98][107]

### 2.2.2 Hydraulická pojiva

Hydraulická pojiva se vyznačují tím, že po částečném zatuhnutí na vzduchu vytvoří dostatečně pevnou strukturu pro jejich následnou stálost na suchu a ve vlhkém i vodním prostředí. Tuto vlastnost mají, pokud se v jejich struktuře vyskytují $SiO_2$, $Al_2O_3$ a $Fe_2O_3$. Tyto oxidy při výpalu reagují s CaO a vytvářejí slínkové minerály[5]. Hydraulická pojiva dosahují vyšších pevností a rychleji tvrdnou než pojiva vzdušná.

#### 2.2.2.1 Hydraulické vápno

Při porovnání se vzdušným vápnem dosahuje vyšších pevností a odolnosti proti vlhkosti a vodě. Musí obsahovat minimálně 10 % hydraulických složek jako jsou $SiO_2$, $Al_2O_3$ a $Fe_2O_3$. Hydraulická vápna lze charakterizovat hydraulickým modulem $H_M$ [-] (6):

$$H_M = \frac{CaO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3} \tag{6}$$

Podle hodnoty $H_M$ lze vápna dělit na:

- slabě hydraulická vápna (10 - 15 % hydraulitů, $H_M$ = 6 - 9)
- silně hydraulická vápna (více jak 15 % hydraulitů, $H_M$ = 1,7 - 3)

Pokud je $H_M$ větší jak 9 jedná se o vápno vzdušné.

Důležitá složka hydraulického vápna je dikalciumsilikát $C_2S$, který je zodpovědný za hydraulické vlastnosti vápna. [106]

**Výroba hydraulického vápna**

Hydraulické vápno se vyrábí obdobným způsobem jako vápno vzdušné v šachtových nebo rotačních pecí pálením vápenců, dolomitických vápenců nebo vápnitých slínů a slínovců. Pálení probíhá pod mez slinutí (900 - 1100 °C). Slabě hydraulická vápna lze hasit i za sucha malým množstvím vody díky velkému množství volného CaO. Silně hydraulická vápna se svými vlastnostmi podobají cementům, z toho důvodu se před mletím nehasí, protože by zatvrdla. [106]

**Tuhnutí a tvrdnutí hydraulického vápna**

Tyto procesy probíhají v závislosti na složení vápna. Hydraulické sloučeniny reagují s vodou a vznikají hydratované křemičitany a hlinitany vápenaté a současně dochází ke karbonataci volného oxidu vápenatého. [106][107]

---

[5]Dikalciumsilikát, trikalciumaluminát a tetrakalciumferoaluminát – hlavní slínkové minerály (podílejí se na jeho tvorbě z 90 %).

Po zatuhnutí na vzduchu dochází k tvrdnutí a hydraulická vápna jsou posléze stálá ve vlhku a vysoce hydraulická ve vodním prostředí. Tyto vlastnosti jsou závislé na poměru obsahu volného CaO a hydraulických složek.

V případě, že nastává tuhnutí příliš brzy lze ho zpomalit přidáním sádrovce. Přidáním 5 % se doba tuhnutí prodlouží čtyřnásobně. [107]

**Použití hydraulického vápna**

Používají se pro výrobu malt a betonů nižších pevnostních tříd. U slabě hydraulického vápna je třeba nejprve zatuhnutí na vzduchu. Následně je lze použít pro aplikace do vodního prostředí. Častým použitím je příprava šlechtěných omítek nebo příprava omítkových matl na stavbě. V porovnání s omítkami ze vzdušných malt mají větší odolnost proti povětrnostním vlivům a také delší životnost. Při porovnání s cementem je jejich výhodou plasticita. [107]

#### 2.2.2.2 Cement

Cement je hydraulické pojivo získávané pálením nad mez slinutí. Po smíchání s vodou cement tuhne a tvrdne a vzniká velmi pevná hmota stálá na vzduchu i pod vodou. Tvrdnutí cementu pod vodou je důsledek hydratace vápenných silikátů a aluminátů. Hydraulické složky cementů jsou sloučeniny CaO a $SiO_2$ nebo $Al_2O_3$ s $Fe_2O_3$, případně to mohou být sloučeniny podobného typu. Cementy můžeme podle chemického složení dělit na:

- křemičitanové (převaha křemičitanů vápenatých) nejvýznamnější je portlandský cement
- hlinitanové (převaha hlinitanů vápenatých)
- ostatní (např. železitanové, barné, …)

Suroviny pro výrobu cementů lze rozdělit do 2 skupin:

**Základní suroviny**, mezi které patří vápenec, slíny, hlíny, křídy a jíly.

**Pomocné suroviny** se používají, pokud v základní surovině nejsou v dostatečném množství zastoupeny hydraulity ($SiO_2$, $Al_2O_3$, $Fe_2O_3$). V takovém případě lze přidat bauxit, odpady z hutnictví a křemičitý písek. [106][107][108]

Složení cementových surovinových směsí se provádí podle hydraulického $M_H$ [-], silikátového $M_S$ [-] a hlinitanového $M_A$ [-] modulu. Pomocí těchto modulů je možné řídit nejen složení surovin, ale také chemickou a fázovou skladbu portlandského slínku.

$$M_H = \frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3} = 1{,}7 - 2{,}4 \tag{7}$$

$$M_S = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} = 1{,}7 - 2{,}7 \tag{8}$$

$$M_A = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} = 1{,}5 - 2{,}5 \tag{9}$$

Pokud je hodnota $H_M$ dle (7) menší než 1,7, cementy nemají dobrou vaznost. Při hodnotě $H_M$ vyšší jak 2,4 mají cementy vyšší počáteční pevnost, sníženou odolnost vůči agresivním látkám a mají určitou objemovou nestálost.

Při hodnotě modulu $M_S$ dle (8) menší než 1,7 dochází k horším výpalům, nad hodnotu 2,7 dochází k pomalejšímu tuhnutí a tvrdnutí cementu.

U vyšších hodnot $M_A$ dle (9) nad 2,5 se u cementů zvyšuje počáteční pevnost a hydratační teplo a snižuje se odolnost proti chemickým vlivů. [106][107][108]

**Výroba cementu**

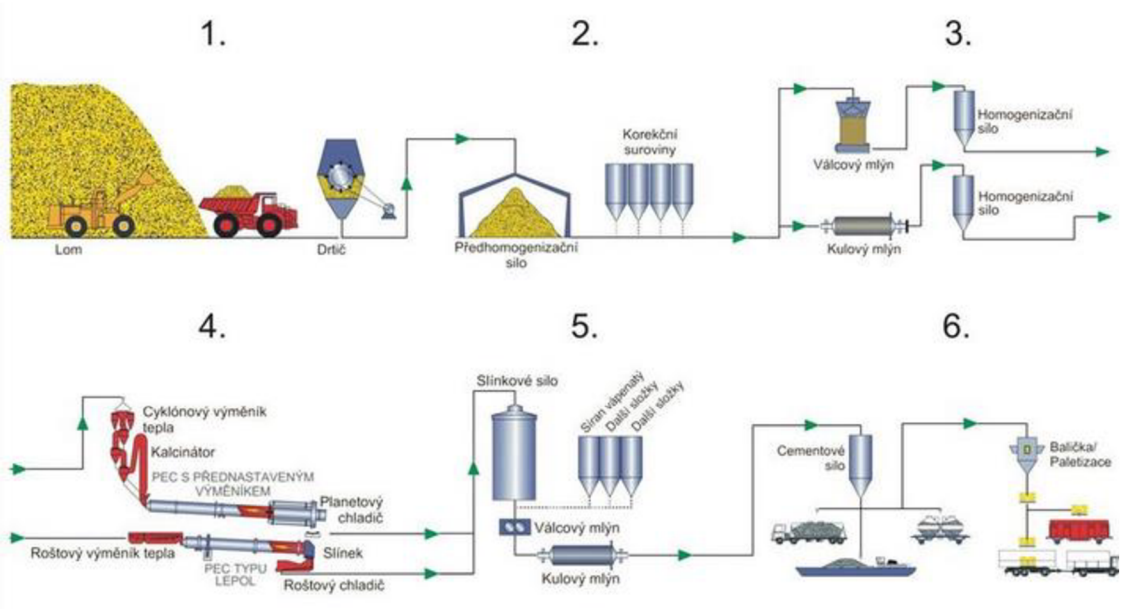
Výroba cementu začíná v přípravě surovinové směsi, která se vypálí na slínek (při 1350 - 1450 °C), následně se chladí a nechá se odležet. Slínek tvoří 4 základní minerály s malým množstvím CaO a MgO. Obecně lze výpal popsat (10).

$$CaO + SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 \rightarrow C_3S + C_2S + C_3A + C_4AF \qquad (10)$$

Poté dochází k mletí slínku s regulátorem tuhnutí nebo s příměsmi (obr.7). Jako regulátor tuhnutí se používá sádrovec nebo sádrové střepy. Mezi příměsi patří vysokopecní struska, křemičitý úlet, pucolán, popílek a jiné.

Surovinová moučka se vyrábí buď suchým nebo mokrým způsobem. U mokrého způsobu dochází k drcení vápence za sucha a následnému mletí za mokra. Surovinový kal obsahuje 33 až 40 % vody, ve které je směs dokonale homogenizována. Následně se směs vysušuje a vypaluje do slinutí. Výhodou tohoto způsobu je absence sušení vstupní suroviny a snadnější mletí. Nevýhodou je vysoká spotřeba vody a energetická náročnost pro následné vysušení. Tento způsob je vhodný zejména pro suroviny s nestálým chemickým složením. [98]

Při suchém způsobu je nezbytné suroviny před výpalem vysušit, což se odehrává před mletím nebo současně s mletím. Dále se surovina homogenizuje, předehřívá se pomocí spalin a následně probíhá samotný výpal. Výhodou je vysoká výkonnost výroby a podstatně nižší energetická náročnost. Suchý způsob výroby se uplatňuje u tvrdých vstupních surovin, které mají pouze malou vlhkost a spíše stálé chemické složení. [98]




Obr. 7 Zjednodušené schéma výroby cementu [105]

**Tuhnutí a tvrdnutí cementu**

Při tuhnutí a tvrdnutí dochází k řadě fyzikálních a chemických dějů.

**Fyzikální děje** představují změnu stavu skupenství (z plastického do pevného), vytváří se pevné spoje kameniva a hydratačních produktů, které vyplňují místa, ve kterých se nacházela voda. Vzniká tak pevný cementový tmel. [106]

**Chemické děje** představují hydrolýzu a následnou hydrataci. Slínkové minerály hydratují a zároveň se vytvářejí hydratované křemičitany vápenaté. Dále hydratuje aluminátová fáze a vznikají hydratované hlinitany vápenaté. Hydratované železitany vápenaté jsou tvořeny feritovou fází. Slínkových minerálů je v cementu více jak 20 druhů. Hydratační reakce těch nejvýznamnějších lze zjednodušeně popsat chemickými rovnicemi (11),(12),(13),(14):

**Trikalciumsilikát** ($C_3S$)

$$2(3CaO \cdot SiO_2) + 6H_2O \rightarrow 3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O + 3Ca(OH)_2 \qquad (11)$$

Nachází se z 35 - 75 % ve slínku, přispívá k vývinu počátečních pevností, je málo odolný vůči agresivním vodám.

**Dikalciumsilikát** ($C_2S$)

$$2(2CaO \cdot SiO_2) + 4H_2O \rightarrow 3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O + Ca(OH)_2 \qquad (12)$$

Jeho obsah ve slínku je 5 - 40 %, na vývinu pevnosti se podílí až po 28 dnech, špatně odolává síranovým vodám.

**Trikalcizmaluminát** ($C_3A$)

$$3CaO \cdot Al_2O_3 + 6H_2O \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O \qquad (13)$$

Ve slínku je zastoupen 3 - 15 %, jeho reaktivita je ze všech slínkových minerálů největší, má malou odolnost vůči síranům. Při styku s vodou reaguje okamžitě, vzhledem ke zpracovatelnosti je nutné reakci zpomalit použitím sádrovce.

**Tetrakalciumaluminátferit** ($C_4AF$)

$$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 \qquad (14)$$

Tetrakalciumaluminátferit reaguje s vodou a vznikají $C_4(A,F)H_x$, $C_3AH_6$ a $C_3FH_6$. Ve slínku se vyskytuje v 9 - 14 %. Na vývinu pevnosti se podílí dlouhodobě a má dobrou odolnost vůči agresivnímu prostředí. [106]

Tuhnutí a tvrdnutí lze podle jednoduché představy interpretovat následovně: $C_3S$ odštěpuje $Ca(OH)_2$, přetváří se v hydrogel a vytváří obal okolo zrna cementu. V průběhu reakce dochází ke spojování gelových vrstev a vytváření jehlicovitých útvarů vyplňujících prostor mezi zrny. Při hydrataci vznikají hydroalumináty a sulfoaluminoferity, které krystalizují z roztoku. Tvorba gelu a tvorba krystalků hydroaluminátové fáze probíhají současně. S pokračujícími reakcemi dochází k chemickému navázání vody, čímž dochází k přeměně gelu, který tuhne a nabývá na pevnosti. [106]

Kinetika hydratace při výrobě cementu je ovlivněna řadou faktorů, mezi nejpodstatnější patří:

- **teplo** - se zvyšujícím se teplem roste rychlost reakce a naopak, pod 5 °C se hydratační reakce téměř zastaví, proto se nedoporučují provádět betonářské práce.
- **velikost částic** - resp. jejich měrný povrch ovlivňuje rychlost reakce (jemněji mleté cementy - větší povrch - rychlejší reakce).
- **přísady** - používají se jak pro zpomalení, tak pro urychlení hydratace cementu.

Hydratační teplo se odvíjí od množství reagujících látek. Průběh tvorby hydratačního tepla umožňuje sledovat a ovlivnit hydrataci cementu. Slínkové minerály vyvíjí jiné množství hydratačního tepla. Rostoucí hodnota vodního součinitele snižuje rychlost vývinu hydratačního tepla. [107]

Vodní součinitel představuje poměr vody a cementu (*w*/*c*). Běžná hodnota poměru *w*/*c* se s použitím plastifikátorů pohybuje v rozmezí 0,4 - 0,5, bez plastifikátorů 0,55 - 0,65. Množství vody ovlivňuje vznik porézní struktury cementového tmelu v betonu. [107]

Zatvrdnutý cement se skládá z pevné fáze (hydratované slínkové minerály, krystaly $Ca(OH)_2$ a zbytky nehydratovaných cementů), kapalné fáze (pórový roztok s pH ~ 12,45) a plynné fáze (vzduch v kapilárních a technologických pórech). Cementový tmel obsahuje póry, které se selektují podle jejich velikosti na gelové (2 - 4 nm, nachází se v hydratačních produktech), kapilární (0,01 - 10 µm, vytvářejí se odpařením vody, množství je závislé na vodním součiniteli) a technologické (0,05 - 2 mm, vznikají uzavřením vzduchu při technologickém zpracování). [107]

**Druhy cementů**

Druhy cementů jsou uvedeny v normě ČSN EN 197-1 [109]. Základní typ cementu je jednosložkový cement portlandský, který obsahuje 95 % křemičitanového slínku a 5 % přísad. Ostatní cementy jsou od tohoto základního odvozeny. Cementy pro obecné použití můžeme rozdělit do 5 skupin:

I. Portlandský cement
II. Portlandský cement směsný
III. Vysokopecní cement
IV. Pucolánový cement
V. Směsný cement

Dále existují také speciální cementy, mezi které patří silniční, hlinitanový, síranuvzdorný cement, hydrofobizované, plastifikované a fungicidní cementy nebo bílý a barevné cementy, barnaté a strontnaté cementy a vysokopecní a rychlovazné cementy. [107]

## 2.3 Testování vlastností kompozitů

V této kapitole jsou uvedeny a popsány zkoušky a použité metody pro zhodnocení vlastností kompozitů uvedených v experimentální části práce.

### 2.3.1 Mechanické vlastnosti

Podkapitola obsahuje popis základních mechanických zkoušek, použitých pro testování omítkových kompozitů.

**Stanovení pevnosti v tahu za ohybu**

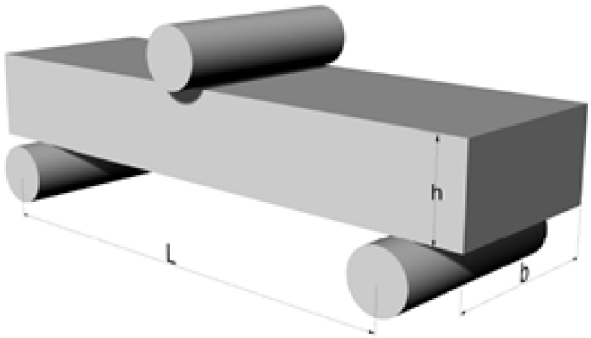
Pevnost je jednou z nejdůležitějších vlastností kompozitů. Pevnost se zjišťuje pomocí testování pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu za ohybu.

Pevnost v tahu za ohybu se testuje na trámcích o velikosti 40 x 40 x 160 mm. Tato zkouška je určena pro křehké stavební materiály jako jsou betony, maltoviny, přírodní kámen a jiné. Při stanovování pevnosti v tahu za ohybu je zkušební těleso zatěžováno podle obrázku 8. Klasický tah v tomto případě nelze provést z důvodu upnutí vzorků do čelistí. Vzhledem k povaze materiálu by při upnutí do čelistí docházelo k rozdrcení materiálu. Testování probíhalo v souladu s normou ČSN EN 1015-11 [110].

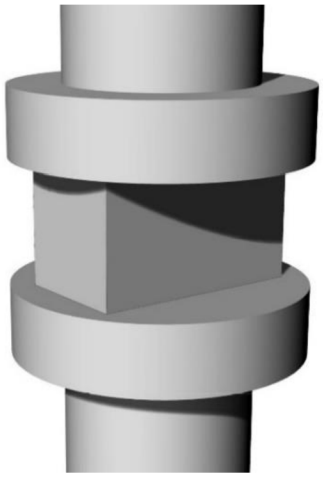
Pevnost v tahu za ohybu [MPa] je dále stanovena dle vzorce (15):

$$R_f = \frac{3Fl_p}{2bh^2}, \tag{15}$$

kde $b$ je šířka vzorku [mm], $h$ je výška vzorku [mm], $l_p$ je vzdálenost válcových podpěr [mm] a $F$ je lomové zatížení [N]. Výsledné hodnoty se udávají s přesností na 0,1 MPa.




Obr. 8 Zatěžování zkušebního tělesa při zkoušce trojbodým ohybem



Obr. 9 Zatěžování zkušebního tělesa pro stanovení pevnosti v tlaku

Pevnost v tlaku se stanovuje na zlomcích testovaných trámků po stanovení pevnosti v tahu za ohybu (40 x 40 x 80 mm). Zatěžování vzorku je znázorněno na obr.9. Testování probíhalo v souladu s normou ČSN EN 1015-11 [110].

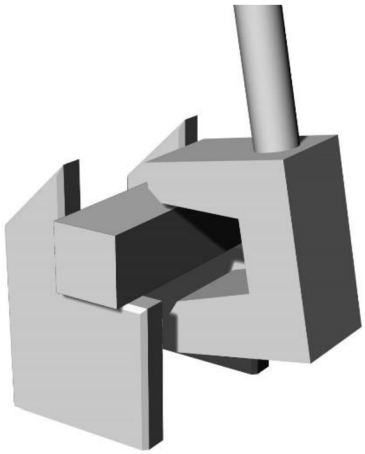
Pevnost v tlaku [MPa] se stanovuje dle vzorce (16):

$$R_c = \frac{F_c}{A_p}, \tag{16}$$

kde $F_c$ je nejvyšší zatížení při porušení [N] a $A_p$ je plocha průřezu vzorku [mm$^2$].

**Stanovení rázové houževnatosti**

Rázová houževnatost je velmi dobrým ukazatelem odolnosti materiálu vůči deformaci. Houževnatost souvisí se schopností materiálu rychle absorbovat energii. Rázovou houževnatost lze stanovit pomocí Charpy testu a slouží jako simulace různých druhů nárazů (obr. 10). Pro toto měření byly použity vzorky o velikosti 40 x 40 x 160 mm. Testování probíhalo v souladu s normou ČSN EN ISO 179-2 [111].



Obr. 10 Schéma testování rázové houževnatosti

Rázová houževnatost $A_\omega$ [J·mm$^{-2}$], představuje kinetická energie $E_c$ [J], která je potřebná k přeražení zkušebního tělesa a vztažená na její původní plochu průřezu – šířku $b$ [mm] a tloušťku/výšku $h$ [mm] (17).

$$A_\omega = \frac{E_c}{bh} \tag{17}$$

### 2.3.2 Sorpční vlastnosti

V této podkapitole jsou popsány experimenty, které byly použity pro popis sorpčních vlastností omítkových kompozitů.

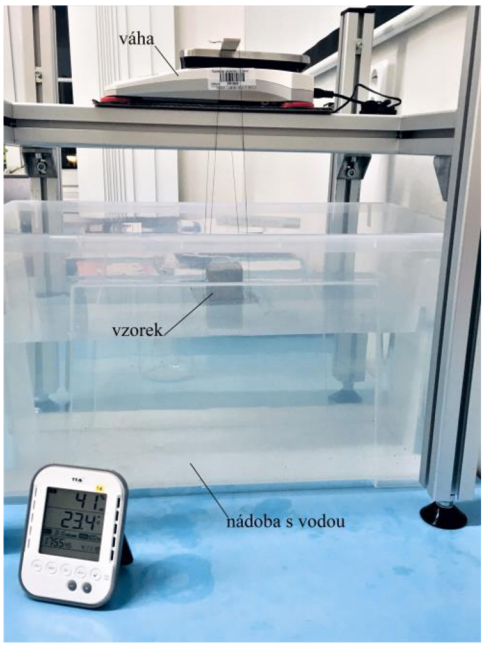
**Transport kapalné vody**

Transport kapalné vody byl stanoven na základě změny hmotnosti vzorku dle normy ČSN EN ISO 15148 [112]. Pro tento sorpční experiment je potřeba, aby vzorky byly po obvodu izolovány pomocí epoxidové pryskyřice, čímž se zajistí jednosměrný transport vody. Vzorek se čelní neizolovanou stranou ponoří 2 - 3 mm pod vodní hladinu, zároveň je

zavěšený na automatické digitální váze, která v daný časový okamžik zaznamenává nárůst hmotnosti vzorku (obr. 11). Změna hmotnosti $M$ [%] byla stanovena pomocí (18):

$$M = \frac{M_t - M_0}{M_0} 100 \tag{18}$$

kde $M_t$ [g] je naměřená hodnota hmotnosti v čase $t$ a $M_0$ [g] je počáteční hmotnost.




Obr. 11 Schéma měřícího zařízení pro transport kapalné vody

**Transport vodní páry**

Transport molekul vodní páry je jedním z faktorů, který výrazně ovlivňuje životnost a technické vlastnosti stavebních konstrukcí a budov. Jedním z hlavních ukazatelů funkčnosti omítek jsou součinitel difúze vodní páry a faktor difúzního odporu. Vodní páry obsažené ve vzduchu difundují z místa o vyšším parciálním tlaku do místa s nižším parciálním tlakem. Obecně by tedy měl difúzní odpor klesat směrem z interiéru ven do exteriéru. Součinitel difuze vodní páry a faktor difúzního odporu lze stanovit z hodnoty součinitele difúzní propustnosti, která se stanoví na základě metody bez teplotního spádu dle normy ČSN 727031 [113].

Metoda spočívá v jednosměrném prostupu vodní páry vzorkem, dochází k měření difúzního toku vodní páry, která projde testovaným tělesem. Pro metodu bez teplotního spádu je třeba zajistit stálou teplotu a relativní vlhkost nad a pod testovaným tělesem. Při měření musí být vzorek parotěsně a vodotěsně izolován a utěsněn v misce naplněné vysoušedlem. Takto připravené vzorky se periodicky váží a zaznamenává se hmotnostní přírůstek či úbytek. Součinitel difúze vodní páry $D$ [$m^2 \cdot s^{-1}$] se vypočítá podle vztahu (19):

$$D = \frac{\Delta m \, d \, R_p \, T}{A_{vz} \, t \, M_{H_2O} \, \Delta p_p}, \tag{19}$$

kde $\Delta m$ je množství vodní páry prodifundované vzorkem [kg], $d$ je tloušťka vzorku [m], $R_p$ [$J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$] je univerzální plynová konstanta, $T$ [K] je absolutní teplota, $A_{vz}$ [$m^2$] představuje plochu testovaného vzorku, která je ve styku s daným prostředím, $t$ [s] je

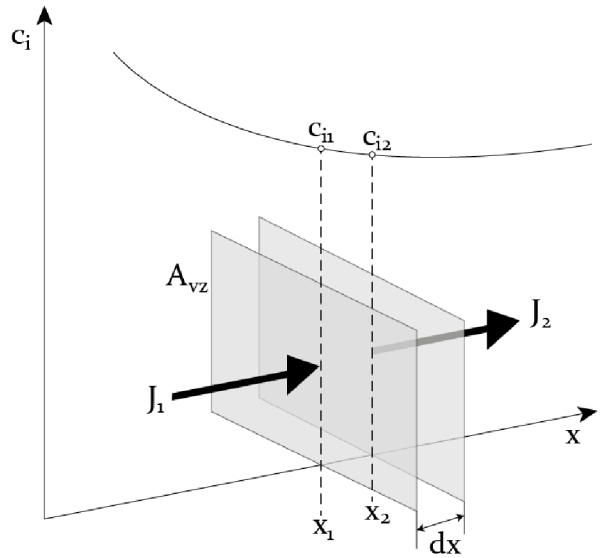
časové období související s transportem hmotnosti vodní páry, $M_{H_2O}$ [kg·mol$^{-1}$] je molární hmotnost vody a $\Delta p_p$ [Pa] je rozdíl parciálních tlaků vodní páry ve vzduchu nad a pod povrchem vzorku. Faktor difúzního odporu $\mu$ [-] se stanoví podle (20):

$$\mu = \frac{D_a}{D}, \tag{20}$$

kde $D_a$ [m$^2$·s$^{-1}$] je součinitel difúze vodní páry ve vzduchu jehož hodnota je 2,3·10$^{-5}$ m$^2$·s$^{-1}$. Hodnota faktoru difúzního odporu vyjadřuje o kolikrát je transport vodní páry materiálem pomalejší, než je transport vodní páry vzduchem. [114][115]

V porézních materiálech dochází k transportu vodní páry konvekcí nebo difúzí. Difúze může probíhat pouze v kapilárách s průměrem větším než 10$^{-7}$ m, protože tu nedochází ke kapilární kondenzaci. V souvislosti s porézními strukturami se velmi často uvažuje o modelu, kde je tlakový gradient základní hybnou silou a rychlost vodní páry představuje transportní parametr. Pokud tedy budeme mít prodyšnou porézní strukturu, může tu docházet k velkým konvenčním tokům, které způsobí pouze malý tlakový gradient. V porézní struktuře dochází během transportu k absorpci části molekul vodní páry na povrchu matrice. Tento jev je vyvolán v důsledku interakce mezi molekulami plynu/páry a povrchem matrice Van der Waalsovými silami. Takto absorbované molekuly se mohou dále šířit pevným materiálem. [115][116]

Nestacionární difúze je jev, při kterém dochází k pohybu částic látky z oblasti s vysokou koncentrací do oblasti s nižší koncentrací. Koncentrace látky se mění v závislosti na čase a prostoru a je způsobena různými faktory (rozdíl koncentrací mezi dvěma oblastmi, teplotní gradient nebo rozdíl tlaku). Tyto faktory vytvářejí hybnou sílu, která způsobuje pohyb částic látky. Princip nestacionární difúze je znázorněn na obrázku 12. Jestliže budeme mít na obou stranách hranolu rozdílné koncentrace, bude zde docházet k transportu látky z místa s vyšší koncentrací na místo o nižší koncentraci přes kontrolní objem s průřezem $A_{vz}$. Pokud z jedné strany vstupuje větší množství látky, než ze strany druhé vystupuje, část látky zůstává v kontrolním objemu a zvyšuje v něm koncentraci. Změnu koncentrace látky v závislosti na čase lze popsat 2. Fickovým zákonem. [115][116][117]




Obr. 12 Princip nestacionární difúze

V následujícím experimentu předpokládáme jednosměrný transport vodní páry, kdy součinitel propustnosti pro vodní páru $\delta_p$ je konstantní. Množství procházející vodní páry lze stanovit podle rovnice (21):

$$n\frac{M_{H_2O}}{R_pT}\frac{\partial^2 p_{wv}}{\partial t} = \delta_p \frac{\partial^2 p_p}{\partial d^2}, \tag{21}$$

kde $n$ [-] představuje porozitu materiálu stanovenou jako objem porézního prostoru k celému vzorku, $R_p$ [J·mol$^{-1}$·K$^{-1}$] je univerzální plynová konstanta, $T$ [K] je absolutní teplota, $M_{H_2O}$ [kg·mol$^{-1}$] je molární hmotnost vody, $d$ [m] je tloušťka vzorku, $t$ [s] je čas související s hmotnostní transportované vodní páry, $\Delta p_p$ [Pa] je rozdíl parciálních tlaků vodní páry ve vzduchu nad a pod měřeným povrchem vzorku. [115][116]

Dále byla stanovena ekvivalentní difúzní tloušťka (22) $S_d$ [m], která vyjadřuje, jakou tloušťku by musela mít vrstva vzduchu, aby měla stejný difúzní odpor jako měřený materiál.

$$S_d = \mu d, \tag{22}$$

kde $\mu$ [-] je faktor difúzního odporu a $d$ [m] je tloušťka materiálu.

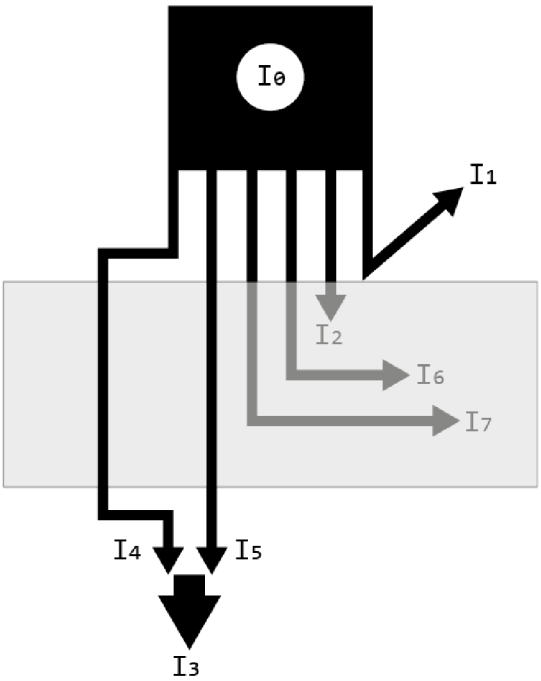
Pro tento experiment byly vyrobeny vzorky ve tvaru válce o průměru 100 mm a tloušťce 20 mm. Vzorek byl vzduchotěsně a parotěsně izolován po obvodu epoxidovou pryskyřicí, následně byl utěsněn plastelínou do hliníkové misky, která obsahovala nasycený roztok $K_2SO_4$ (RH v misce bylo 98 %). Změna hmotnosti vzorku byla zaznamenána pomocí vah v závislosti na čase. Měření se provádělo v akváriu, jehož počáteční RH bylo 0 %.

### 2.3.3 Akustická pohltivost

Zvuk lze charakterizovat jako mechanické vlnění v látkovém prostředí, které je schopné vyvolat v lidském uchu zvukový vjem. Zvukové vlny se mohou šířit tekutinami, plyny (vzduch) i pevnými látkami. Zvuk tvoří kmitání částic pružného prostředí v rozsahu slyšitelných kmitočtů (20 Hz - 20 kHz). Speciální forma zvuku je hluk. Hluk lze popsat jako nechtěný zvuk, který se bude jevit jako nežádoucí či rušivý. Působení hluku, ať už krátkodobě či dlouhodobě, má negativní dopad na zdraví člověka. Vnímání hluku ovlivňuje řada faktorů, mezi které patří věk, zdravotní stav, délka trvání nebo postoj posluchače. Z čehož vyplývá, že vnímání hluku je subjektivní. [118]

Při dopadu zvukové vlny na přepážku dochází k částečnému odrazu zvukové vlny, částečnému pohlcení a část vlny může projít přepážkou. Intenzitu zvukové vlny ($I_0$) dopadající na přepážku lze rozdělit (obr. 13):

- $I_1$ – intenzita zvuku vlny odražené
- $I_2$ – intenzita zvuku vlny pohlcené
- $I_3$ – intenzita zvuku vlny vyzářené za stěnu celkem
- $I_4$ – intenzita zvuku vlny prošlé za stěnu otvory a póry
- $I_5$ – intenzita zvuku vlny, kterou stěna vyzáří v důsledku svého ohybového kmitání do druhého poloprostoru
- $I_6$ – intenzita zvuku vlny, která je vedena ve formě chvění
- $I_7$ – intenzita zvuku přeměněná ve stěně na teplo. [115]



Obr. 13 Rozklad dopadající zvukové vlny

Činitele zvukové pohltivosti $\alpha$ [-] lze definovat:

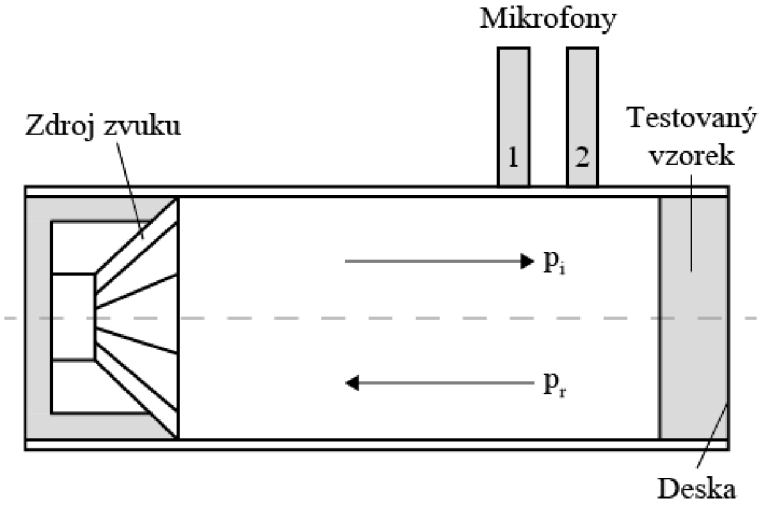
$$\alpha = \frac{I_2}{I_0}. \tag{23}$$

Pokud použijeme zákon o zachování energie, ze vztahu (23) plyne, že činitel zvukové pohltivosti leží v intervalu <0 – 1>. Materiál, který odráží 100 % zvuku, bude mít absorpční koeficient 0. [119][120]

Z obrázku 13 lze dále definovat činitele zvukové odrazivosti $\beta$ [-]:

$$\beta = \frac{I_1}{I_0}. \tag{24}$$

Akustickou pohltivost lze stanovit pomocí impedanční trubice metodou přenosové funkce dle normy ČSN ISO 10534-2 [121]. Na jednom konci trubice je umístěný měřený vzorek a na druhém konci reproduktor napájený generátorem signálu. Signál je následně zesílen v zesilovači. Pro měření akustického tlaku jsou použity dva mikrofony (obr. 14).



Obr. 14 Schéma měření akustické pohltivosti pomocí impedanční trubice

Činitel zvukové pohltivosti $\alpha$ [-], který představuje poměr absorbované a dopadající energie je při kolmém dopadu akustického vlnění definován následovně (25)(26):

$$\alpha = 1 - |\beta|^2 \tag{25}$$

$$\beta = \frac{H_{12} - H_I}{H_R + H_{12}} e^{2k_0 \cdot x_1 i}, \tag{26}$$

kde $\beta$ [-] je činitel zvukové odrazivosti, je dán poměrem odražené akustické energie od určité plochy k dopadající akustické energii na tuto plochu. $H_{12}$ je přenosová funkce signálů detekovaných mikrofony 1 a 2, $H_I$ je přenosová funkce pro dopadající vlnu, $H_R$ je přenosová funkce pro odrážející se vlnu, $k_0$ komplexní vlnové číslo, $x_1$ je vzdálenost mezi vzorkem a vzdálenějším mikroskopem, $i$ je imaginární jednotka. [120][121]

Při zvažování hluku v konstrukci je třeba vzít v úvahu subjektivní vnímání hluku, zejména v městském prostředí [119]. Zvukové pole je popsáno změnami proměnných v ustáleném stavu, jako je tlak, rychlost, teplota a hustota, které popisují stav prostředí, ve kterém se zvuk šíří.

Pro normálně dopadající akustickou vlnu na rozhraní s akustickou impedanci $z_1$ a $z_2$ lze zapsat činitele zvukové odrazivosti (27):

$$\beta = \frac{{z_2 - z_1}^2}{z_2 + z_1}. \tag{27}$$

Činitele zvukové pohltivosti lze tedy zapsat (28):

$$\alpha = 1 - \left|\frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1}\right|^2. \tag{28}$$

Akustická impedance $Z$ [Pa·s·m$^{-1}$] materiálu je poměr akustického tlaku k související rychlosti částic, lze ho také vyjádřit pomocí činitele zvukové odrazivosti dle vztahu:

$$Z = \rho_{O_2} c \frac{1+\beta}{1-\beta}, \tag{29}$$

kde $\rho_{vz}$ [kg·m$^{-3}$] je hustota vzduchu při aktuální teplotě a $c$ představuje rychlost zvuku [m/s]. Skutečná rychlost zvuku $c$, která závisí na modulu pružnosti $E$ [Pa=N·m$^{-2}$] a hustotě materiálu $\rho_m$ [kg·m$^{-3}$], je určena rychlostí šíření podélných vln resp. příčných vln

v neohraničeném prostoru podle (30). [122] Specifickou mechanickou impedanci $Z$ [Pa·s·m$^{-1}$] (29) lze použít ke kvantifikaci přenosu zvuku mezi dvěma materiály jako poměr procházející a dopadové energie. [120][121]

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho_m}} \tag{30}$$

### 2.3.4 Elektromagnetické stínění

Lze jej definovat jako odrušovací prostředek, který umožňuje snížit rušivé vyzařování (zdroj) nebo naopak zvýšit elektromagnetickou odolnost (přijímač). Stínění je nástroj, který umožňuje zabránit šíření rušivého elektromagnetického pole z vymezeného prostoru nebo do tohoto prostoru. Velmi často se používají stínící kryty a stínění, které stíní celý přístroj nebo jeho část, která působí jako zdroj rušení. Jedná se o vysoce efektivní způsob elektromagnetické ochrany před rušením kontinuálního i impulzního

charakteru. Elektromagnetické pole působí ve velmi širokém frekvenčním pásu. Pro zdroje střídavého proudu dosahuje frekvenční pás až 50 Hz, pro dlouhovlnná, středovlnná a krátkovlnná rozhlasová vysílání se pohybuje v rozsahu 100 MHz - 30 MHz, 100 MHz - 500MHz pro televizní vysílače a FM a pro mobilní telefony a radarové zdroje tento rozsah může být až několik GHz.

Špatná volba odrušovacího prostředku (nebo špatná montáž a instalace) často vede k zhoršení parametrů námi stíněného zařízení a ve výsledku může zvýšit celkovou hladinu rušení tak, že stíněné zařízení ruší nebo je rušeno více než zařízení nestíněné. [123][124]

**Účinnost stínění**

Kvalitu elektromagnetického stínění (EMS) jakožto lineárního systému lze posoudit pomocí koeficientu stínění $K_s$ [-] viz rovnice (31), který je stanoven poměrem intenzity elektrického pole $E_t$ [V·m$^{-1}$] (magnetického pole $H_t$ [A·m$^{-1}$]) uvnitř stíněného objektu a intenzit $E_i$ ($H_i$) v témže bodě bez stínícího krytu (intenzita pole dopadajícího na stínící přepážku)

$$K_S = \frac{E_t}{E_i} = \frac{H_t}{H_i}. \tag{31}$$

Pro běžné využití se z tohoto koeficientu stanoví účinnost elektromagnetického stínění $SE$ [dB], která vyjadřuje zeslabení rušivého pole stíněním (32):

$$SE = 20log\frac{1}{K_S} = 20log\left|\frac{E_i}{E_t}\right| \text{ nebo } SE = 20log\left|\frac{H_i}{H_t}\right|. \tag{32}$$

V případě, že je prostředí na obou stranách stínící přepážky stejné a vlna dopadající na přepážku je homogenní, jsou obě definice $SE$ stejné. Jsou-li prostředí různá na obou stranách stínění nebo jedná-li se o stínění v blízké zóně elektromagnetického pole získáme z výše uvedených vztahů různé výsledky. Pokud nelze posoudit elektrické a magnetické pole odděleně, je možné stanovit účinnost stínění pomocí výkonu (33):

$$SE = 10log\left|\frac{P_i}{P_t}\right|, \tag{33}$$

kde $P_i$ [W·m$^{-2}$] je výkonová hustota pole dopadající na stínící přepážku a $P_t$ [W·m$^{-2}$] je analogická hodnota propuštěná stíněním.[125][126]

Mechanismus stínění

Pro určení efektivnosti stínění je třeba definovat složky elektromagnetické vlny, která pronikne do stíněné oblasti při známé velikosti, známých parametrech stínící přepážky a známých parametrech okolního prostředí. Vztah pro účinnost stínění $SE$ [dB] ve vzdáleném elektromagnetickém poli lze také definovat pomocí fyzikálních mechanismů (34):

$$SE = R + A + M, \tag{34}$$

kde $R$ [dB] je odraz, $A$ [dB] absorpce a $M_R$ [dB] je mnohonásobný odraz elektromagnetického záření. Pro další rozbor lze zjednodušeně uvažovat o rovinné kovové desce, na kterou kolmo dopadá rovinná elektromagnetická vlna, která se šíří ve směru osy z. Z hlediska stínění je kolmý dopad vlny na plochu kovové přepážky nejhorším případem. Při dopadu elektromagnetické vlny pod jiným úhlem je vlna

procházející stínící přepážkou a pokračující dále do stíněného prostoru vždy menší (obr.15). Dalším předpokladem je neomezená plocha stínící přepážky, která dovoluje zanedbat efekty na jejích okrajích.

K útlumu odrazem (*R*) dochází vlivem částečného odrazu energie vlny, ke kterému dochází nejen na rozhraní mezi dielektrikem s impedancí (např. vzduch) a kovovou stěnou přepážky s impedancí, ale také na „výstupním“ rozhraní mezi kovovou stěnou a dielektrikem (vzduchem). K hlavnímu útlumu odrazem dochází na „vstupním“ rozhraní a k výstupnímu rozhraní postupuje už jen zlomek energie vlny, přičemž jeho přenos je přibližně konstantní. Útlum odrazem tedy nezávisí na tloušťce stínící kovové přepážky.

Absorpční útlum (*A*) vzniká pohlcením části energie elektromagnetické vlny při jejím průchodu stínící kovovou přepážkou o tloušťce *t* vlivem tepelných ztrát. Množství pohlcené části energie je závislé na materiálu přepážky, její tloušťce a frekvenci vlnění (35).

$$A = 20\log|e^{\gamma t}| = 20\log e^{\alpha t} = 20\log e^{\frac{t}{\delta}} = 8{,}6859\frac{t}{\delta} \tag{35}$$

kde $\delta$ [m] (36) představuje hloubku vniku elektromagnetického pole do kovového materiálu. [125][127]

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi\mu\sigma f}} \tag{36}$$

kde $f$ [Hz] je frekvence vlnění, $\mu_m$ [H·m$^{-1}$] je magnetická permeabilita a $\sigma$ [S·m$^{-1}$] je elektrická vodivost. Obecný vztah pro absorpční útlum (37) lze psát:

$$A = 8{,}69\frac{t}{\delta};\ A = 0{,}0848t\sqrt{\mu_m\sigma f}. \tag{37}$$

Útlum vlivem mnohonásobného odrazu ($M_R$) viz rovnice (38) vzniká v důsledku opakovaných odrazů na vstupu a výstupu stínící přepážky (obr.15).

$$M_R = 20log\left|1 - \left(\frac{Z_0 - Z_M}{Z_0 + Z_M}\right)^2 \mathrm{e}^{-\frac{2t}{\delta}}\mathrm{e}^{-j\frac{2t}{\delta}}\right|, \tag{38}$$

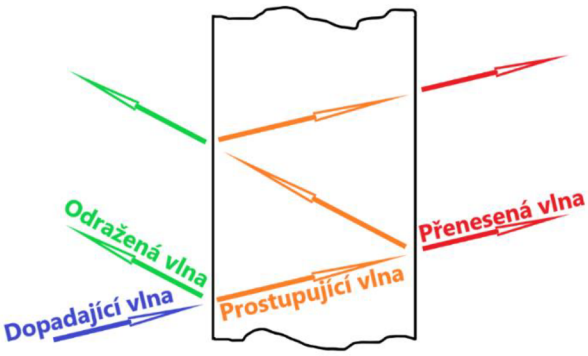
kde $Z_0$ [Ω] je vlnová impedance pro vakuum nebo suchý vzduch a $Z_M$ [Ω] je vlnová impedance pro vodivé prostředí stínící přepážky. Je-li stínící přepážka vyrobena z dobře vodivého materiálu ($Z_0 >> Z_M$) a její tloušťka *t* [m] je podstatně větší než hloubka vniku ($t >> \delta$) je výraz $M \sim 0$. V takovém případě lze zanedbat vliv mnohonásobných odrazů na celkovou účinnost stínění. Má-li stínící přepážka výrazně menší tloušťku ve srovnání s hloubkou vniku ($t << \delta$) je útlum mnohonásobnými odrazy záporný a hodnota *M* snižuje celkovou účinnost stínění.

Pomocí dvouportového síťového analyzátoru lze získat parametry rozptylu označené jako *S11** [dB] (nebo *S22**) a *S21** [dB] (resp. *S12**). Tyto parametry poskytují informace o odrazu $SE_R$ [-], absorpci $SE_A$ [-] a prostupu $SE_T$ [-] podle (39)(40)(41):

$$S11^* = 10log|S_{11}|^2;\ S21^* = SE = 10log|S_{21}|^2 \tag{39}$$

$$SE_R = |S_{11}|^2 \text{ a } SE_T = |S_{21}|^2\ ;\ SE_A = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 \tag{40}$$

$$SE_R = \frac{1}{10^{\left|\frac{S11^*}{10}\right|}};\ SE_T = \frac{1}{10^{\left|\frac{S21^*}{10}\right|}}. \tag{41}$$




Obr. 15 Skládání vlny vlivem mnohonásobného odrazu ve stěně přepážky

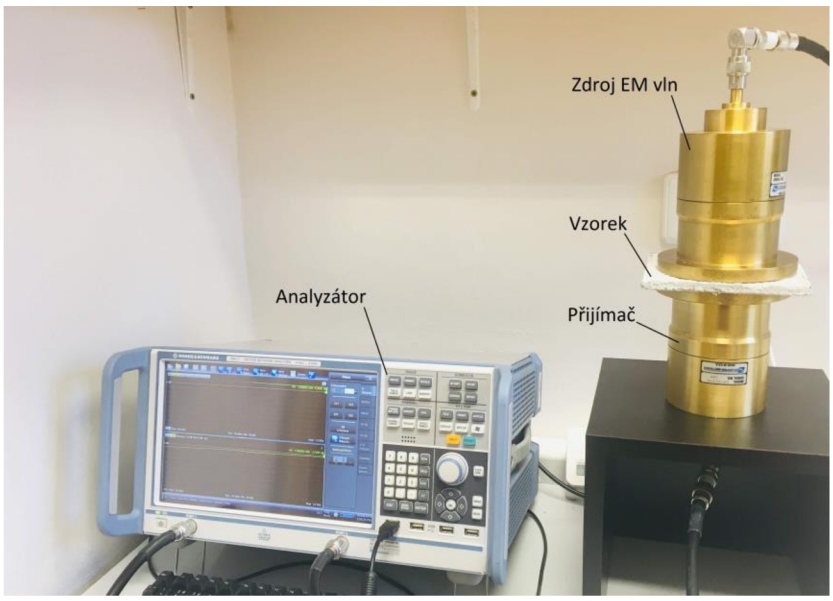
Jestliže je $SE_T$ > 10 dB v důsledku odrazu lze považovat vícenásobnou účinnost stínění za zanedbatelnou a můžeme ji vyjádřit jako (1-$SE_R$). Další možností, jak posoudit význam odrazu a absorpce vln je vyjádřit procentuální podíly odražených a absorbovaných vln, které je založeno na rozdělení nepropuštěného záření na složky.(42)

$$R = \frac{TSE_R}{1-SE_T}; A = \frac{TSE_A}{1-SE_T} \tag{42}$$

Je tedy zřejmé, že nejvhodnější materiál pro elektromagnetické stínění musí mít vysokou elektrickou vodivost a vysokou magnetickou permeabilitu. Z toho důvodu se pro tyto účely používají převážně kovy. Trendem dnešní doby je nahrazování kovů kompozitními materiály zejména z důvodu ceny, hmotnosti a vhodnějším mechanickým vlastnostem. Do kompozitů se využívají částicová plniva s vysokou elektrickou vodivostí (útlum elektromagnetického pole odrazem a absorpcí) a plniva s vysokým poměrem délka/tloušťka (tvorba vodivých řetězců).

Efektivitu stínění neovlivňuje pouze použitý materiál, ale také frekvence zdroje elektromagnetického záření, vzdálenost zdroje záření od stínícího prvku a v neposlední řadě množství a tvar nespojitostí jako jsou trhliny, mezery, díry, atd. [128]

Na obrázku 16 je zobrazeno testovací zařízení pro EMS. Měření probíhalo podle normy ASTM D 4935-18 [129].




Obr. 16 Testovací zařízení EMS

### 2.3.5 Užitná hodnota

Termín kvalita vyžaduje kvalifikaci ve smyslu svého kontextu a toho, do jaké míry je považováno za dobré nebo špatné. Cílem je obvykle zajistit, aby produkt vyhovoval účelu, odpovídal očekávání zákazníka a také poskytoval příležitost k zisku. Index kvality má umožnit hodnotit klíčové faktory, které přispívají k vytvoření „vhodné kvality“. Vytváří se na základě kvalitativních a kvantitativních ukazatelů, které měří různé aspekty kvality (výrobní standardy, funkčnost, vzhled a design, spokojenost zákazníka, atd.).[130][131][132]

Pro hodnocení celkového výkonu vyrobených kompozitů byl zvolen index kvality QI. Nejprve je vytvořena funkce pro odhad stupně kvality pro každou vlastnost dle vtahu (43)

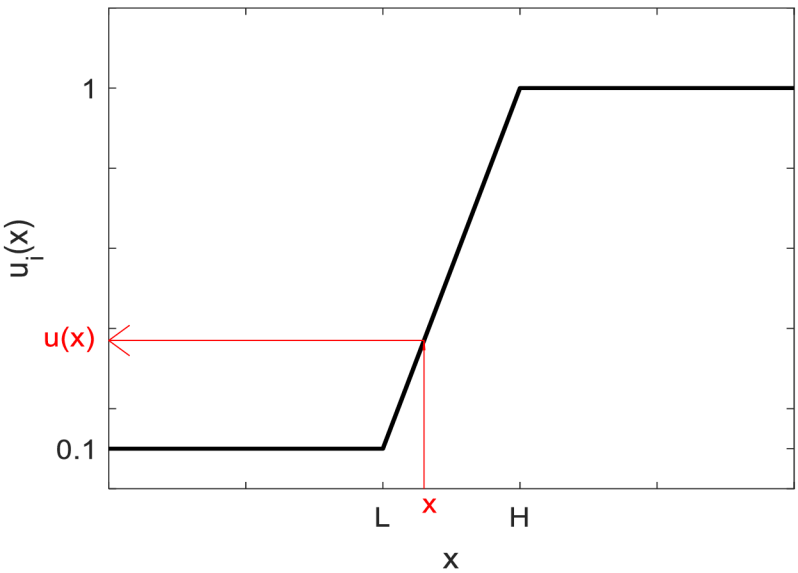
$$u_i(x) = f(x, L, H), \tag{43}$$

kde $H$ je zcela vyhovující, $L$, je nevyhovující a $x$ je aktuální naměřená hodnota stejné vlastnosti, jak je znázorněno na obrázku 17.

Na základě stupně kvality všech podstatných znaků, které byly vyselektovány, jako stěžejní, lze index kvality $QI$ ($0 \leq QI \leq 1$) stanovit pomocí váženého geometrického průměru dle vztahu (44):

$$QI = e^{\sum_{i=1}^{m}\left(w_j ln(u_j)\right)}, \tag{44}$$

kde $w_j$ je odpovídající hodnota váhy dané vlastnosti (která se pohybuje od 0 do 1), $j$ je sumační index a $m$ je celkový počet vlastností. [132][133]




Obr. 17 Diagram konstrukce užitné hodnoty [133]

# 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Tato disertační práce je zaměřena na vývoj a studii omítkových kompozitů s krátkovlákennou výztuží. Primárním cílem je studium mechanických a fyzikálních vlastností v souvislosti s jejich strukturou.

Sorpce vlhkosti do stavebních materiálů je běžný jev. Vlhkost může pronikat do materiálů z okolního prostředí, například vzduchu nebo země. Sorpce vlhkosti do stavebních materiálů ovlivňuje mechanické a chemické vlastnosti materiálu, z tohoto důvodu se práce zaobírá i testováním transportu kapalné vody omítkovým kompozitem.

Nedostatečná akustická izolace a nekvalitní zvuková absorpce mohou vést k nadměrnému šíření hluku v budovách. Tyto problémy jsou stále více diskutovaným tématem, z toho důvodu byl sledován vliv vlákenné výztuže na akustické vlastnosti omítkových kompozitů.

Dále se práce zaobírá otázkou, zda může mít vlákenná výztuž vliv na schopnost kompozitu stínit elektromagnetické pole.

Experiment byl proto naplánován následovně: Použity byly 4 omítkové matrice (vápenná, vápeno-cementová, sádrová, cementová) a 3 typy vlákenné výztuže (čedič, sklo, uhlík), přičemž vlákenná výztuž byla použita ve 4 úrovních (0, 1, 2, 3 hm%). Pro ucelenost informací a možnost porovnávání jednotlivých vlastností kompozitních materiálů byly do experimentů přidány běžně využívané vyztužující materiály ve stavebnictví v podobě skleněné a čedičové perlinky. Více informací o jednotlivých typech matric a vlákenné výztuže je k nalezení v následujících podkapitolách. Pro jednotlivé testování byly vyrobeny formy tak, aby odpovídaly potřebným rozměrům dle příslušné normy [110] [111] [112] [113] [121].

## 3.1 Použité matrice

V této kapitole budou popsány jednotlivé druhy omítek, použité v následujících experimentech. Při selekci byly vytipovány běžně dostupné a obvykle používané vnitřní omítky v České republice.

### Vápenná omítka

Vápenná omítka byla pořízena od filmy HASIT. Je určená pro ruční zpracování vnějších i vnitřních prostředí. Lze ji využít i jako povrchovou úpravu u zdrsněných jádrových omítek (štuk). Deklarované vlastnosti od výrobce jsou uvedeny v tabulce 2.

Tab. 2 Vlastnosti vápenné omítky uvedené výrobcem

| Vlastnost | Hodnota |
|---|---|
| Pevnost v tlaku | 0,4 – 2,5 $N \cdot mm^{-2}$ |
| Propustnost vodních par | $\leq 20$ |
| Kapilární absorpce vody | $C \leq 0{,}40\ kg \cdot m^{-2} \cdot min^{-0{,}5}$ |
| Tepelná vodivost | $\lambda \leq 1{,}17\ W \cdot m \cdot K^{-1}$ |
| Reakce s ohněm | A1 (nehořlavé materiály) |
| Trvanlivost | NPD (no performance determined) |
| Přídržnost | $\geq 0{,}1\ N \cdot mm^{-2}$ |
| Uvolňování nebezpečných látek | NPD |

## Vápenocementová omítka

Vápenocementová omítková směs je produktem společnosti SATSYS technology a.s. Tato omítka je určená do exteriérů i interiérů budov, je vhodná pro omítání betonových, pórobetonových a cihelných podkladů a také na smíšené zdivo. Kombinace nízké objemové hmotnosti a nízkého modulu pružnosti umožňují eliminovat objemové změny podkladu. Omítka je hydrofobizovaná, tepelně izolační a difuzně otevřená, což napomáhá k odstranění vlhkosti a zamezuje vzniku plísní. Vlastnosti deklarované výrobcem jsou uvedeny v tabulce 3.

Tab. 3 Vlastnosti vápenocementové omítky uvedené výrobcem

| Vlastnost | Hodnota |
|---|---|
| Pevnost v tlaku | 1,20 $N \cdot mm^{-2}$ |
| Pevnost v tahu za ohybu | ≥ 0,5 MPa |
| Propustnost vodních par | < 8 |
| Kapilární absorpce vody | $C \leq 0{,}40\ kg \cdot m^{-2} \cdot min^{-0,5}$ |
| Součinitel tepelné vodivosti | $\lambda < 0{,}08\ W \cdot m \cdot K^{-1}$ |
| Reakce s ohněm | A1 (nehořlavé materiály) |
| Přídržnost | 0,35 $N \cdot mm^{-2}$ |
| Zrnitost | 0 - 2 mm |

## Sádrová omítka

Sádrová omítka pochází od firmy Rigips SAINT - GOBAIN. Jedná se o lehčenou omítku s hlazeným povrchem určenou k omítání stěn a stropů v interiéru. Omítka je vhodná pro všechny typy podkladů, nehodí se pod keramické obklady a na čerstvý nebo mokrý beton se nesmí aplikovat. Je určená především pro ruční zpracování. Deklarované vlastnosti od výrobce jsou uvedeny v tabulce 4.

Tab. 4 Vlastnosti sádrové omítky uvedené výrobcem

| Vlastnost | Hodnota |
|---|---|
| Pevnost v tahu za ohybu | > 1,0 MPa |
| Pevnost v tlaku | > 2,5 MPa |
| Pevnost v přídržnosti | > 0,5 MPa |
| Faktor difuzního odporu | = 10 |

## Cementová omítka

Omítku firmy Weber SAINT - GOBAIN lze použít v interiéru i exteriéru. Jedná se o vícevrstvou jádrovou omítku určenou pro ruční zpracování. Omítka je vhodná pro použití v místech se zvýšeným požadavkem na pevnost a odolnost proti vodě. Deklarované vlastnosti od výrobce jsou uvedeny v tabulce 5.

Tab. 5 Vlastnosti cementové omítky uvedené výrobcem

| Vlastnost | Hodnota |
|---|---|
| Pevnost v tlaku | 6 MPa |
| Propustnost vodních par | = max. 30 |
| Kapilární absorpce vody | $C \leq 0{,}20\ \mathrm{kg \cdot m^{-2} \cdot min^{-0,5}}$ |
| Tepelná vodivost | $\lambda \leq 0{,}72\ \mathrm{W \cdot m \cdot K^{-1}}$ |
| Reakce s ohněm | A1 (nehořlavé materiály) |
| Přídržnost | Min. 0,3 $\mathrm{N \cdot mm^{-2}}$ |
| Zrnitost | 4 mm |

## 3.2 Výztužný materiál

Jako výztuž byla použita, v této kapitole popsaná, vlákna. Čedičová a skleněná vlákna byla vybrána s ohledem na jejich vlastnosti a historii používání těchto vláken ve stavebnictví a možnosti následného využití i na starších budovách. Uhlíkové vlákno bylo do experimentů zařazeno pro možnost specifického využití v oblasti elektromagnetického stínění. Pro ucelenost informací a možnost porovnávání jednotlivých vlastností kompozitních materiálů byly do experimentů přidány běžně využívané vyztužující materiály ve stavebnictví v podobě skleněné a čedičové perlinky.

### Skleněná vlákna

Skleněná vlákna byla pořízena od firmy SKLOCEMENT BENEŠ. Jedná se o vysokopevnostní a vysokomodulové sekané prameny z alkalivzdorných fibril. Vlákenné svazky mají speciální povrchovou úpravu zabezpečující integritu pramene a odolnost proti abrazi. Jednotlivé prameny jsou tvořeny 100 kusy individuálních vláken. Využívají se v podlahových betonech, potěrech, stěrkách a při výrobě tenkostěnných prefabrikátů ze sklocementu. Vlastnosti deklarované výrobcem jsou uvedeny v tabulce 6.

Tab. 6 Vlastnosti skleněných svazků uvedené výrobcem

| Vlastnost | Hodnota |
|---|---|
| Délka vlákna | 12 mm |
| Průměr filamentu | 14 µm |
| Jemnost | 45 tex |
| Obsah lubrikantu | 0,08 % |
| Vlhkost | max. 0,3 % |
| Elektrická vodivost | velmi nízká |
| Specifická hmotnost | 2,68 $\mathrm{g \cdot cm^{-3}}$ |
| Bod měknutí | 860 °C |
| Chemická odolnost | velmi vysoká |
| Modul pružnosti | 72 GPa |
| Pevnost pramene v tahu | 1700 MPa |

## Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna byla pořízena od firmy HAVEL COMPOSITES. Pro dosažení požadovaných vlastností jsou vlákna opatřena lubrikací. Vlastnosti deklarované výrobcem jsou uvedeny v tabulce 7.

Tab. 7 Vlastnosti uhlíkových vláken uvedené výrobcem

| Vlastnost | Hodnota |
|---|---|
| Pevnost v tahu | 3800 MPa |
| Modul pevnosti v tahu | 242 GPa |
| Elektrický odpor | 1,55 $10^{-3} \cdot \Omega \cdot cm^{-1}$ |
| Hustota | 1,81 $g \cdot cm^{-3}$ |
| Průměr vlákna | 7,2 µm |
| Obsah uhlíku | 95 % |

## Čedičová vlákna

Čedičová vlákna pochází od firmy BASALTEX, která nabízí vlákna udržitelná, inertní, žáruvzdorná a ohnivzdorná. Vlákna jsou vhodná pro textilní a kompozitní aplikace. Vlastnosti deklarované výrobcem jsou uvedeny v tabulce 8.

Tab. 8 Vlastnosti čedičových vláken uvedené výrobcem

| Vlastnost | Hodnota |
|---|---|
| Průměr filamentu | 13 µm |
| Jemnost fibrily | 0,35 tex |
| Obsah vlhkosti | Ne víc než 1 % |
| Chemická odolnost: | úbytek hmotnosti během 3 dnů |
| 2H NaOH | 2,5 % |
| SH HCl | 2,5 % |

## Skleněná perlinka

Skleněná perlinková tkanina WEBER THERM má speciálně navrženou povrchovou úpravu zabezpečující ochranu mřížky proti alkalickému působení lepidel a dalších používaných materiálů. Zároveň tato úprava zabraňuje posuvu přízí v armovací tkanině. Perlinka se běžně používá v exteriérech, interiérech a u venkovních omítek. Vyznačuje se vynikající rozměrovou stabilitou, vysokou mechanickou pevností a je kompatibilní se všemi hlavními fasádními systémy. Vlastnosti deklarované výrobcem jsou uvedeny v tabulce 9 a 10.

Tab. 9 Vlastnosti skleněné perlinky uvedené výrobcem

| Vlastnost | Hodnota |
|---|---|
| Plošná hmotnost upravené tkaniny | 145 $g \cdot m^{-2}$ |
| Plošná hmotnost režné tkaniny | 117 $g \cdot m^{-2}$ |
| Limitní kyslíkové číslo (LOI) | 20 % |
| Světlost ok | 4,0 x 4,5 mm |

Tab. 10 Pevnost a protažení skleněné perlinky uvedené výrobcem (osnova/útek)

| | Pevnost [N / 50 mm] | | Protažení [%] |
|---|---|---|---|
| Způsob uložení | Nominální hodnota | Jednotlivá hodnota | Průměrná hodnota |
| Standartní podmínky | 2100 / 2200 | 1900 / 1800 | 3,8 / 3,8 |
| 5 % NaOH | 1300 / 1350 | 1000 / 900 | 3,5 / 3,5 |
| Rychlotest | 1500 / 1600 | 1100 /1 000 | 3,5 / 3,5 |
| 3 iontový roztok (ETAG 004) | | 1000 / 1000<br>50 % / 50 % | |

## Čedičová perlinka

Firma BASALTEX nabízí perlinky vyrobené z čedičových vláken, které mají přirozenou alkalickou a korozivzdornou odolnost. Používají se jako výztuž do betonu, do betonových a zděných konstrukcí. Vlastnosti deklarované výrobcem jsou uvedeny v tabulce 11.

Tab. 11 Vlastnosti čedičové perlinky uvedené výrobcem

| Vlastnost | Hodnota |
|---|---|
| Plošná hmotnost | 125 $g \cdot cm^{-2}$ |
| Světlost ok | 5 x 5 mm |
| Limitní kyslíkové číslo (LOI) | 20 % |

## 3.3 Stanovení délky a množství vláken

Cílem experimentu bylo zjistit jaká délka a množství vláken je optimální pro použití v omítkových kompozitech.

Ke stanovení délky jednotlivých vláken (sklo, čedič, uhlík) bylo potřeba otestovat soudržnost vláken a matrice. Pro tento experiment byly vyrobeny vzorky o rozměrech 40 x 40 x 40 mm, do kterých byly vloženy svazky vláken (do hloubky 20 mm). Jemnost vlákenných svazků je uvedena v tabulce 12. Svazky vláken byly vkládány do každého typu použité matrice (vápenná. vápeno-cementová, sádrová, cementová). Pro každý typ vzorku (kombinace matrice + vlákno) bylo zhotoveno 5 vzorků.

Tab. 12 Parametry svazků vláken

| Vlákenný svazek | Čedič | Sklo | Uhlík |
|---|---|---|---|
| Jemnost svazku [tex] | 223,5 | 178,8 | 200 |

Takto vytvořené testovací objekty tvrdly po dobu 21 dní. Následně byly vzorky testovány pomocí dynamometru LabTest 4.050 (obr. 18). Rychlost napínání vlákenného svazku byla 2 mm/min a upínací délka byla 100 mm. Průměrné hodnoty měření jsou uvedeny v tabulce 13.

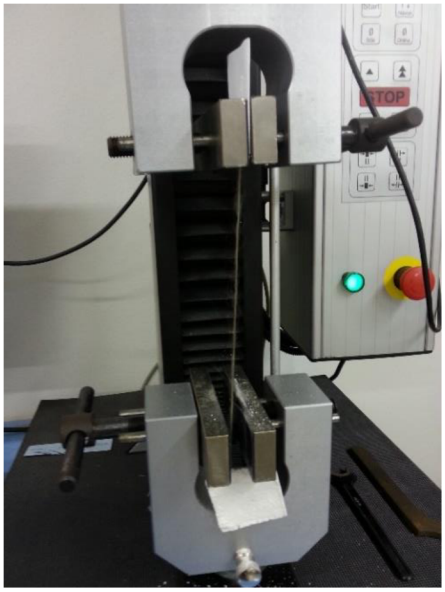
Naměřené hodnoty byly použity pro výpočet kritické délky vlákna dle vztahu (45):

$$l_c = \frac{R_{mV} d_{vl}}{2\tau_m}, \qquad (45)$$

kde $l_c$ [mm] je kritická délka, $R_{mV}$ [MPa] je pevnost vláken, $d_{vl}$ [mm] je průměr vláken <a $\tau_m$ [MPa] je pevnost rozhraní mezi matricí a vlákny ve smyku.

Tab. 13 Parametry svazků vláken zapuštěných do matrice/omítky

| Druh matrice / Druh vlákenného svazku | Vápenná | Vápeno-cementová | Sádrová | Cementová |
|---|---|---|---|---|
| | Síla vytržení [N] | | | |
| Sklo | 19,9 | 22,1 | 27,6 | 43,3 |
| Čedič | 11,4 | 16,3 | 23,1 | 29,0 |
| Uhlík | 24,3 | 36,4 | 61,4 | 76,7 |




Obr. 18 Testování soudržnosti vláken s matricí

Kritická délka vlákna představuje minimální délku vlákna, která je ještě schopná přenášet napětí. Této délky lze dosáhnout pouze obtížně. Pro výpočet efektivní délky vlákna $l$ byl použit vzorec (46) od W. D. Callister [134]:

$$l = 15l_c. \tag{46}$$

Vzorce (46) a (47) jsou určené pro kompozity s polymerní matricí. Jelikož byla v experimentu použita jiná matrice, je potřeba výpočet pro efektivní délku upravit, proto byl použit vztah tvarového součinitele (aspektní poměr $\alpha_p$), čímž byla vypočtena reálná délka vlákenné výztuže (47):

$$\alpha_p = \frac{l}{d}. \tag{47}$$

Konečná délka vlákenné výztuže byla určena jako efektivní délka násobená aspektním poměrem. V tabulce 14 jsou uvedeny průměrné hodnoty vypočtených délek vláken pro jednotlivé typy omítek. Vzhledem k malé variabilitě výsledků a k aktuální nabídce vláken na trhu, byla pro každé vlákno stanovena jedna délka, která byla použita u všech druhů omítek, viz tabulka 14.

Tab. 14 Konečná délka krátkovlákenné výztuže

| | **Vápeno-cementová omítka** | **Sádrová omítka** | **Vápenná omítka** | **Cementová omítka** | **Použitá délka vláken** |
|---|---|---|---|---|---|
| **sklo** | 7,6 mm | 6,4 mm | 11,9 mm | 6,2 mm | **12 mm** |
| **čedič** | 7,7 mm | 6,9 mm | 7,8 mm | 6,4 mm | **8 mm** |
| **uhlík** | 7,4 mm | 6,3 mm | 7,9 mm | 6,1 mm | **8 mm** |

Při stanovování obsahu krátko-vlákenné výztuže byly výchozím bodem betonové kompozity, jejichž obsah vlákenné složky je obvykle 6 hm%. Obsah vlákenné výztuže byl nejprve zvolen 5, 6 a 7 hm%. Po smíchání matrice s takto vysokým obsahem vláken docházelo k velmi špatnému propojování omítkové matrice a vláken už při samotné výrobě kompozitních vzorků. Z tohoto důvodu bylo pro následující experimenty zvoleno 1, 2 a 3 hm% vyztužení.

K stanovení množství vlákenné výztuže byl použit výpočet hmotnostního podílu (48):

$$w_i = \frac{V_i \rho_i}{\sum V_i \rho_i}, \tag{48}$$

kde $w_i$ [%] je hmotnostní podíl i-té složky, $V_i$ [%] je objemový podíl i-té složky a $\rho_i$ [kg·m$^{-3}$] je hustota i-té složky. Hmotnostní podíly pro jednotlivé vlákna jsou uvedeny v příloze 1.

## 3.4 Příprava vzorků

Pro každý experiment byly zhotoveny formy, tak aby odpovídaly požadavkům na jednotlivá měření a příslušným normám. Omítkové kompozity byly vyrobeny ze 4 vybraných matric do kterých byly přidány 3 druhy krátkých vláken ve 4 úrovních (0, 1, 2 a 3 hm%). Pro ucelenost informací a možnost porovnávání jednotlivých vlastností kompozitních materiálů byly do experimentů přidány běžně využívané vyztužující materiály ve stavebnictví v podobě skleněné a čedičové perlinky. Pro každý typ kompozitu (kombinace vlákno + hm% + matrice) bylo vyrobeno 5 testovacích vzorků, celkem bylo zhotoveno 240 ks pro měření jedné vlastnosti v celkovém rozsahu. Přesné rozměry a tvar zkušebních těles jsou uvedeny v kapitole 2.3 Testování vlastností kompozitů. Příprava vzorků probíhala v souladu s normou ČSN EN 1015-11 [110]. Přehled označení jednotlivých vzorků podle druhu omítky a použité výztuže je uveden v tabulce 15.

Tab. 15 Přehled označení vyrobených vzorků

| | | krátká vlákna | | | | | | | | | perlinka | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **čedič (basalt)** | | | **sklo** | | | **uhlík** | | | čedič | sklo |
| omítka | 0% | 1% | 2% | 3% | 1% | 2% | 3% | 1% | 2% | 3% | | |
| **Vápenná** | V | V1b | V2b | V3b | V1s | V2s | V3s | V1u | V2u | V3u | **Vbp** | **Vsp** |
| **Vápeno-Cementová** | V-C | V-C1b | V-C2b | V-C3b | V-C1s | V-C2s | V-C3s | V-C1u | V-C2u | V-C3u | **V-Cbp** | **V-Csp** |
| **Sádrová** | S | S1b | S2b | S3b | S1s | S2s | S3s | S1u | S2u | S3u | **Sbp** | **Ssp** |
| **Cementová** | C | C1b | C2b | C3b | C1s | C2s | C3s | C1u | C2u | C3u | **Cbp** | **Csp** |

*uvedené množství vlákenné výztuže je v hm%

Pokud je vzorek označen např. S2u znamená to, že vzorek je ze sádrové omítky, do které byly přidány 2 hm% uhlíkových vláken.

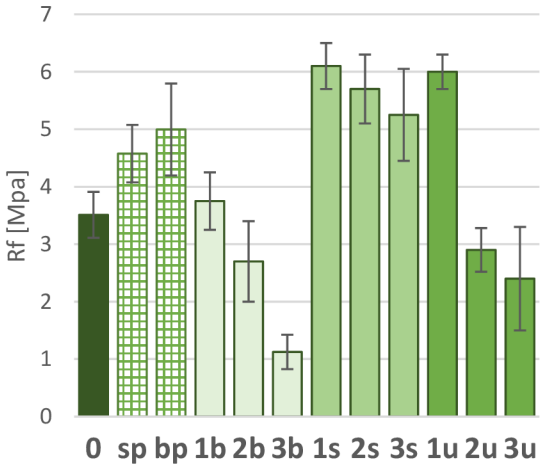
## 3.5 Základní mechanické vlastnosti

Na mechanické vlastnosti omítkových materiálů je kladen velký důraz. Omítka by měla vždy efektivně spolupracovat s ostatními materiály celého systému, chránit stěnu před mechanickým poškozením a současně zlepšovat technické vlastnosti konstrukce jako jsou tepelně a zvukově izolační vlastnosti a odolnost stavby vůči vlhku. K poškození omítky dochází vlivem působení fyzikálních a chemických dějů, mezi které patří působení povětrnosti, změna teploty vyvolávající tahy a tlaky způsobené smrštěním či roztažením, vzlínající vody obsahující soli, mechanickými vibracemi, oděrem povrchu atd. Tato kapitola sleduje vliv krátkovlákenné výztuže na mechanické vlastnosti omítek.

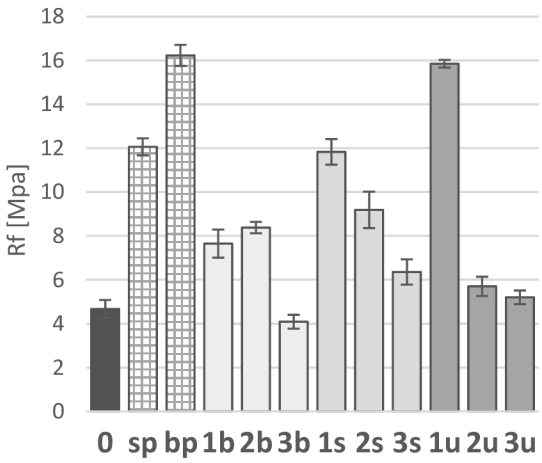
### 3.5.1 Pevnost v tahu za ohybu

Pevnost v tahu za ohybu byla testována pomocí tříbodového ohybu pomocí dynamometru Tiratest T2400. Schéma tříbodové zkoušky je na obr. 8 v kapitole 2.3.1. Experiment probíhal dle normy ČSN EN 1015-11 [110]. Měření bylo uskutečněno na testovacích tělesech (5 ks) s rozměry 40 x 40 x 160 mm. Zatěžování bylo zvyšováno rovnoměrnou rychlostí. Výsledkem této zkoušky je maximální síla dosažená při porušení testovacího tělesa. Z této hodnoty byla následně určena pevnost v tahu za ohybu dle vztahu (15). Vzorky byly podrobeny zkoušce pevnosti po 28 dnech. Poloviny testovacích těles získané z této zkoušky byly následně použité pro testování pevnosti v tlaku.

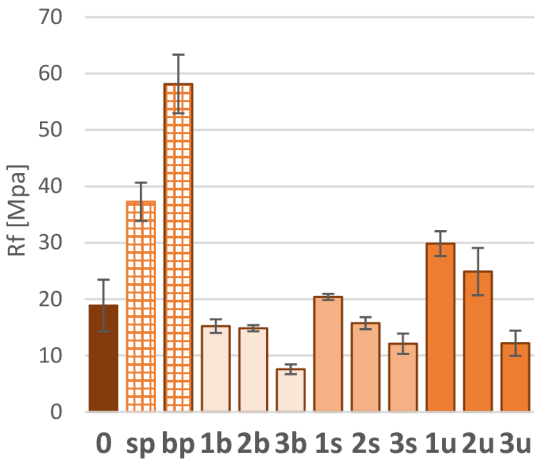
Na obrázku 19 jsou uvedeny průměrné hodnoty spolu s 95% IS pro všechny použité výztuže vždy pro jeden druh omítky. Z důvodu velkého rozsahu dat u všech použitých omítek nebylo v grafickém znázornění použito jednotné měřítko. Jak je z obrázku patrné nelze uvést jeden druh výztuže, která by dosahovala nejlepších výsledků u všech omítek. U cementové a sádrové omítky se nejvíce projevil vyztužující účinek u čedičové perlinky, z důvodu její spojité struktury.



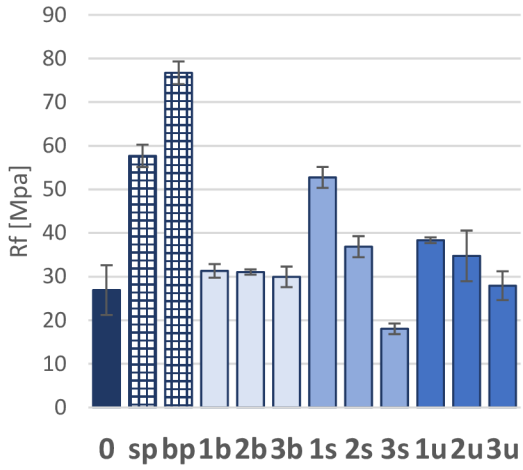

a) Pevnost v tahu za ohybu pro vápennou omítku




b) Pevnost v tahu za ohybu pro vápeno-cementovou omítku




c) Pevnost v tahu za ohybu pro sádrovou omítku




d) Pevnost v tahu za ohybu pro cementovou omítku

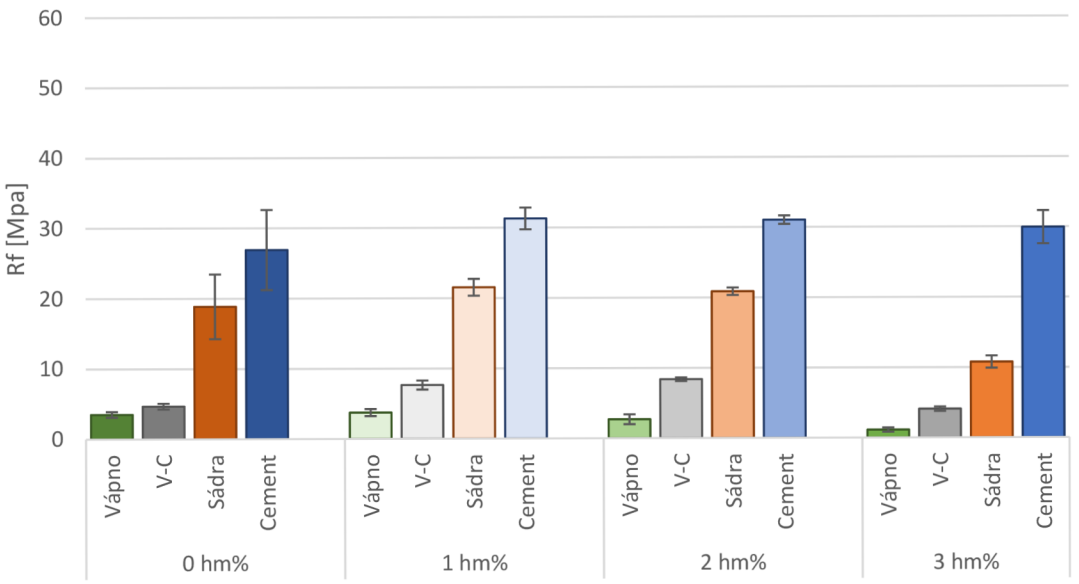
Obr. 19 Pevnost v tahu za ohybu pro jednotlivé omítky

Vzorky vápeno-cementové omítky vyztužené čedičovou perlinkou dosahují také nejvyšší pevnosti v tahu za ohybu, ale zároveň jsou srovnatelné se vzorkem vyztuženým 1 hm% uhlíkových vláken, neboť uhlíková vlákna mají výrazně lepší mechanické vlastnosti než ostatní použitá vlákna

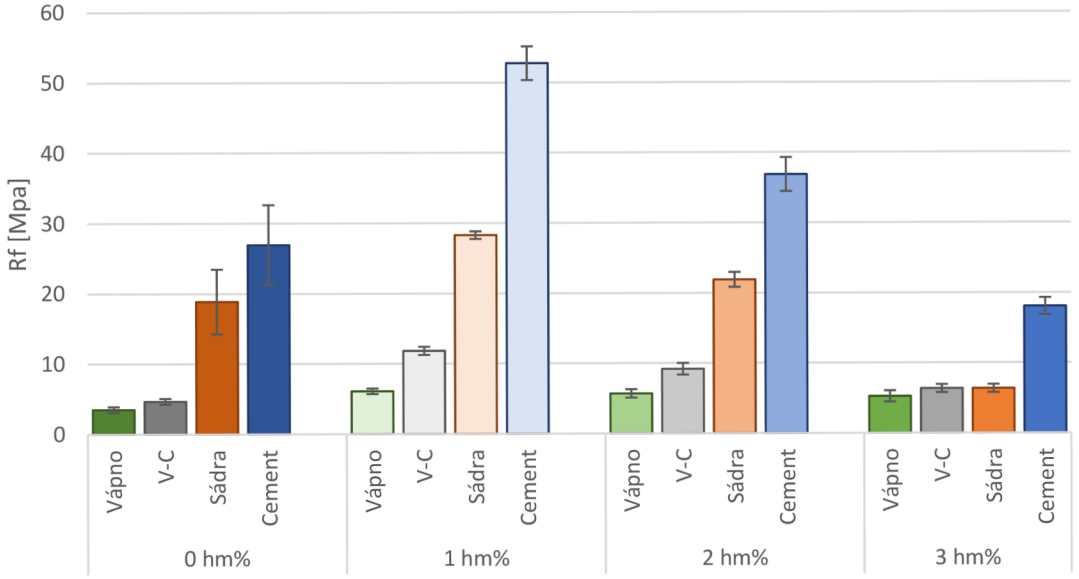
Výjimku tvoří vápenná omítka, kde krátkovlákenná skleněná a uhlíková výztuž dosahovala lepších výsledků než vzorky s čedičovou perlinkou, protože je zde lepší interakce mezi vlákny a matricí, která je jemnozrnná. Dále je vidět, že při použití vyššího obsahu vláken ve vzorcích se napětí v ohybu snižuje. To je dáno tím, že při použití většího množství vláken dochází ke snižování obsahu matrice, což vede k horšímu propojení vláken s matricí a dochází ke špatnému přenosu napětí mezi jednotlivými vlákny. Při porušení vzorků byl znatelný vliv vlákenné výztuže (krátkovlákenné i plošné) na soudržnost vzorku. Vzorky vyztužené perlinkou dosahovaly většinou vyšších výsledků pevnosti v tahu za ohybu. Po porušení vzorku bylo patrné, že u vzorků s perlinkami docházelo ke snadnějšímu zvětšování praskliny a samotný vzorek držel pouze ve spodní části díky perlince. Vzorky obsahující krátká vlákna měly výztuž rozptýlenou v celém vzorku, co nejrovnoměrněji. Po prasknutí vlákna celou trhlinu přemosťovala, tudíž nedocházelo k tak snadnému zvětšování trhliny (jako u vzorků s perlinkou) a k jednoduchému oddělení polovin vzorku. Tento fakt by obecně mohl mít pozitivní vliv na prodloužení životnosti omítky.

**<u>Vliv matrice a množství krátkovlákenné výztuže na pevnost v tahu za ohybu</u>**

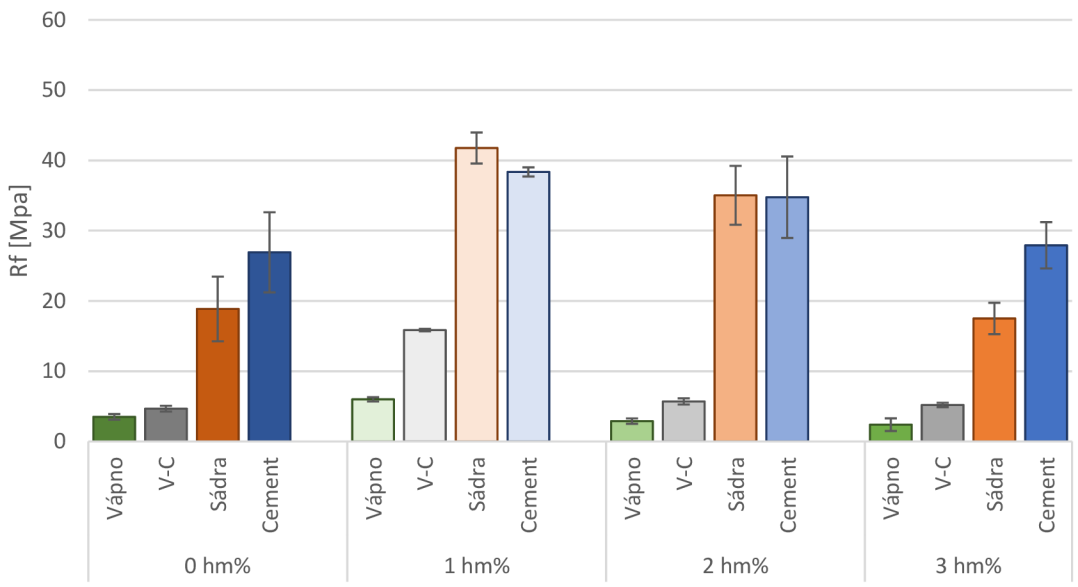
Při porovnání samotných omítek bez vláken dosahuje nejvyšší pevnosti v tahu za ohybu cementová omítka. Vzhledem k obecným vlastnostem cementové omítky, lze toto chování očekávat. Pokud k cementové omítce přidáme čedičová a skleněná vlákna dosahuje tato omítka stále nejvyšších hodnot při porovnání s ostatními omítkami. Výjimku tvoří vzorky s uhlíkovým vláknem, kde nejlepších výsledků dosáhla omítka sádrová.




a) Čedičová vlákna




b) Skleněná vlákna




c) Uhlíková vlákna

Obr. 20 Vliv matrice a množství krátkovlákenné výztuže na pevnost v tahu za ohybu pro jednotlivé typy omítek

Tab. 16 Průměrné hodnoty pevnosti v tahu za ohybu [MPa] pro všechny typy kompozitů

| | | krátká vlákna | | | | | | | | | perlinka | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **čedič (basalt)** | | | **sklo** | | | **uhlík** | | | čedič | sklo |
| omítka | 0 % | 1 % | 2 % | 3 % | 1 % | 2 % | 3 % | 1 % | 2 % | 3 % | | |
| **Vápenná** | 3,5 | 3,8 | 2,7 | 1,1 | 6,1 | 5,7 | 5,3 | 6,0 | 2,9 | 2,4 | 5,0 | 4,6 |
| **Vápeno-Cementová** | 4,7 | 7,7 | 8,4 | 4,1 | 11,8 | 9,2 | 6,4 | **15,9** | 5,7 | 5,2 | 16,2 | 12,1 |
| **Sádrová** | 18,9 | 21,6 | 20,9 | 10,8 | 28,3 | 21,9 | **6,4** | 41,8 | 35,0 | 17,5 | 58,2 | 37,3 |
| **Cementová** | 26,9 | 31,3 | 31,1 | 30,0 | 52,7 | 36,9 | 18,1 | 38,4 | 34,8 | 27,9 | 76,7 | 57,7 |

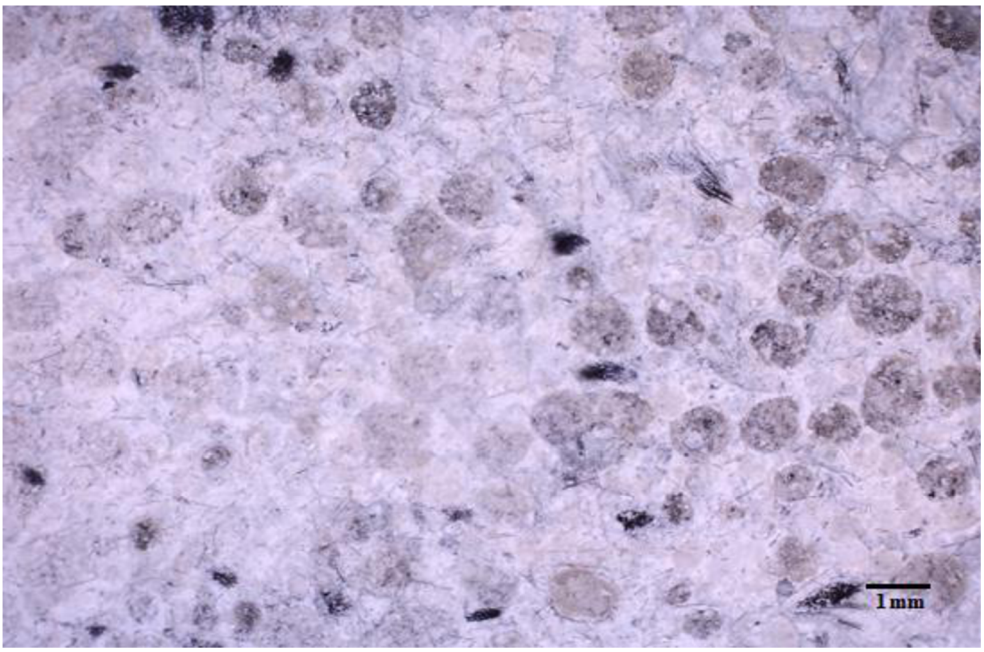
*Nejlepší výsledek, nejhorší výsledek, ** uvedené množství vlákenné výztuže je v hm%

Největší vyztužující účinek (v porovnání s prázdným vzorkem z hlediska zlepšení vlastností) měla uhlíková vlákna v kombinaci s vápeno-cementovou omítkou, kde došlo ke zlepšení pevnosti v tahu za ohybu o 153 % (obr. 20c). Na obrázku 21a je řez tímto vzorkem. Je zde patrný vliv křemičitých kuliček na shlukování vláken. I přes tento fakt se většina vláken dostatečně rozptýlila ve vzorku a zvýšila tak pevnost v tahu za ohybu.

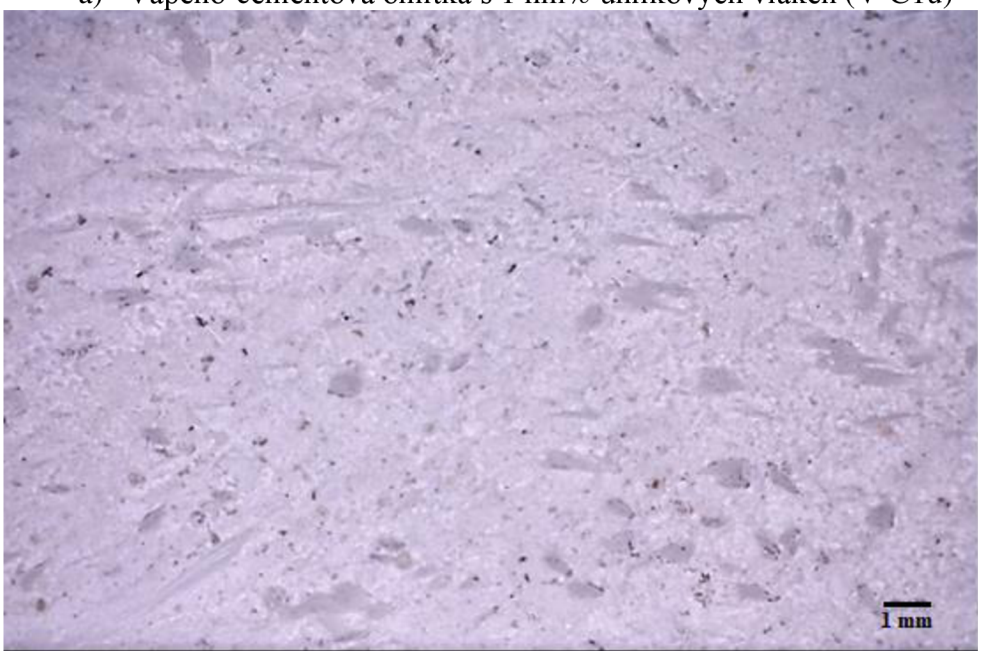
Se zvyšujícím se obsahem vláken v matrici docházelo ke zhoršení přenosu napětí mezi vláknem a matricí. Tento fakt se nejvíce projevil u sádrové omítky se 3 hm% skleněných vláken (obr. 21b), kde došlo k poklesu o 68 %. Na řezu tímto vzorkem je vidět rozložení svazečků skleněných vláken a v důsledku většího množství vláken vzniklých mikropórů v sádrové omítce. Průměrné hodnoty pevnosti v tahu za ohybu jsou uvedeny v tabulce 16.

Z provedeného experimentu je možno shrnout následující:

- Nejlepších výsledků dosahují vzorky s 1 hm% vláken.
- Se zvyšujícím se podílem vláken (3 hm%), klesá pevnost v tahu za ohybu.




a) Vápeno-cementová omítka s 1 hm% uhlíkových vláken (V-C1u)

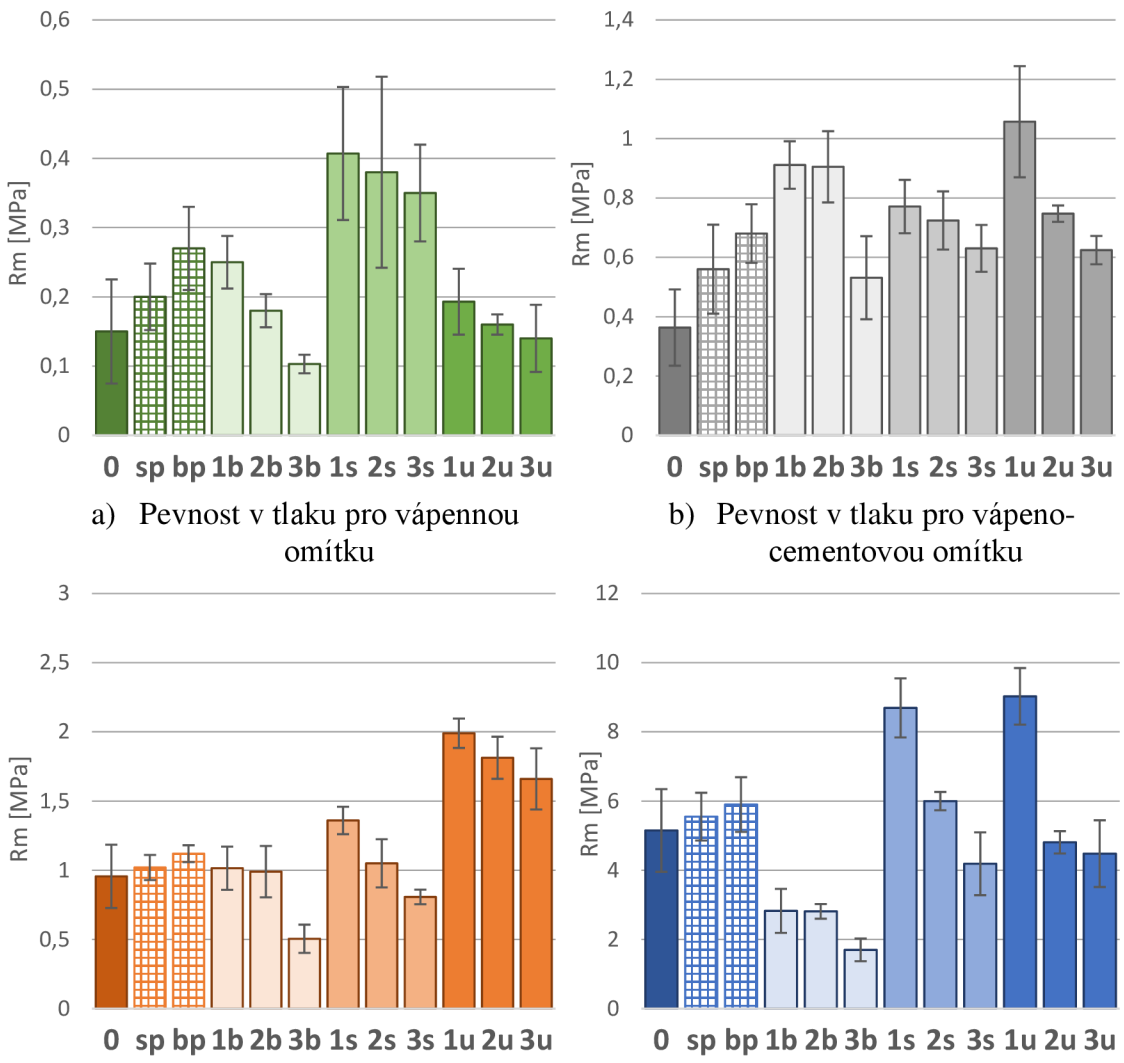



b) Sádrová omítka se 3 hm% skleněných vláken (S3s)

Obr. 21 Řezy vzorkem

### 3.5.2 Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku byla testována na testovacích tělesech o velikosti 40 x 40 x 80 mm. Měření probíhalo na dynamometru Tiratest T2400 v souladu s normou ČSN EN 1015-11 [110]. Vzorek byl zatěžován plynule s konstantním přírůstkem síly až do jeho porušení. Schéma testování pevnosti v tlaku je uvedeno na obrázku 9. Při testování byla zaznamenávána hodnota maximálního tlaku při porušení tělesa a následně byla z této hodnoty vypočtena pevnost v tlaku podle vztahu (16) v kapitole 2.3.1. Z důvodu velkého rozsahu dat u všech použitých omítek nebylo v grafickém znázornění použito jednotné měřítko.




a) Pevnost v tlaku pro vápennou omítku

b) Pevnost v tlaku pro vápeno-cementovou omítku

c) Pevnost v tlaku pro sádrovou omítku

d) Pevnost v tlaku pro cementovou omítku

Obr. 22 Porovnání pevnosti v tlaku pro jednotlivé typy omítek

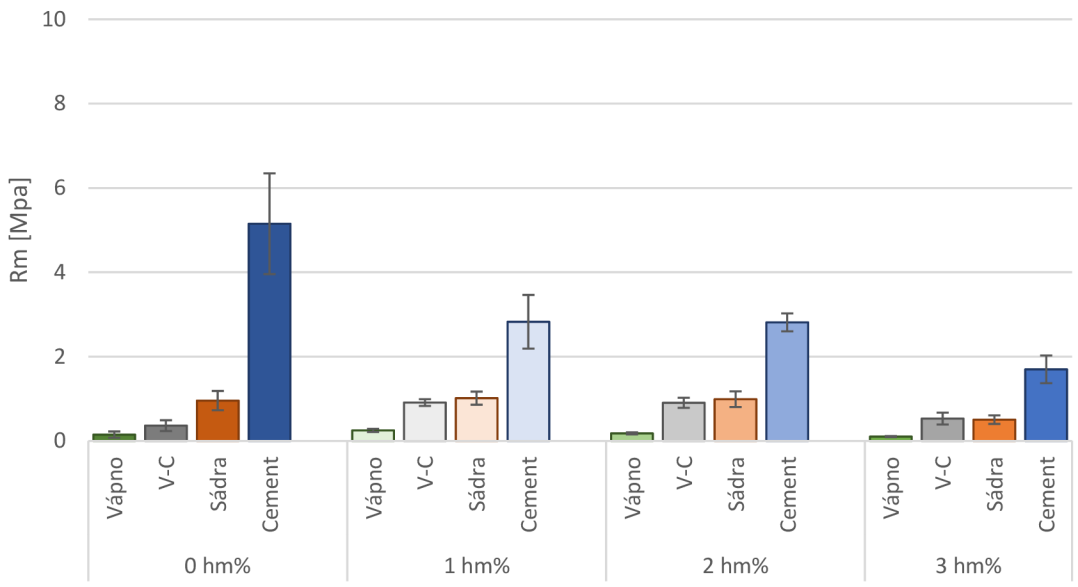
Z výsledků testování pevnosti v tlaku (obr. 22) se prokázal 1% hmotnostní podíl mezi vlákny a matricí nejvhodnější. Mezi matricí a vlákny vzniká optimální spoj, což umožňuje dobrý přenos zatížení z matrice na vlákno. Výjimku tvoří cementová omítka, u které čedičová výztuž způsobila celkové zhoršení pevnosti v tlaku. V průběhu samotného testování tlakové odolnosti vzorků vyztužených vlákny docházelo ke zmenšování výšky vzorků při současném zvětšováním jejich šířky. I přes tento fakt si většina vzorků zachovala celistvost. Opačně se chovaly vzorky bez jakékoli výztuže. U těchto vzorků docházelo při testování ke vzniku výrazných prasklin, které dále vedly k drolení a samotné destrukci vzorků.

**<u>Vliv matrice a množství krátkovlákenné výztuže na pevnost v tlaku</u>**

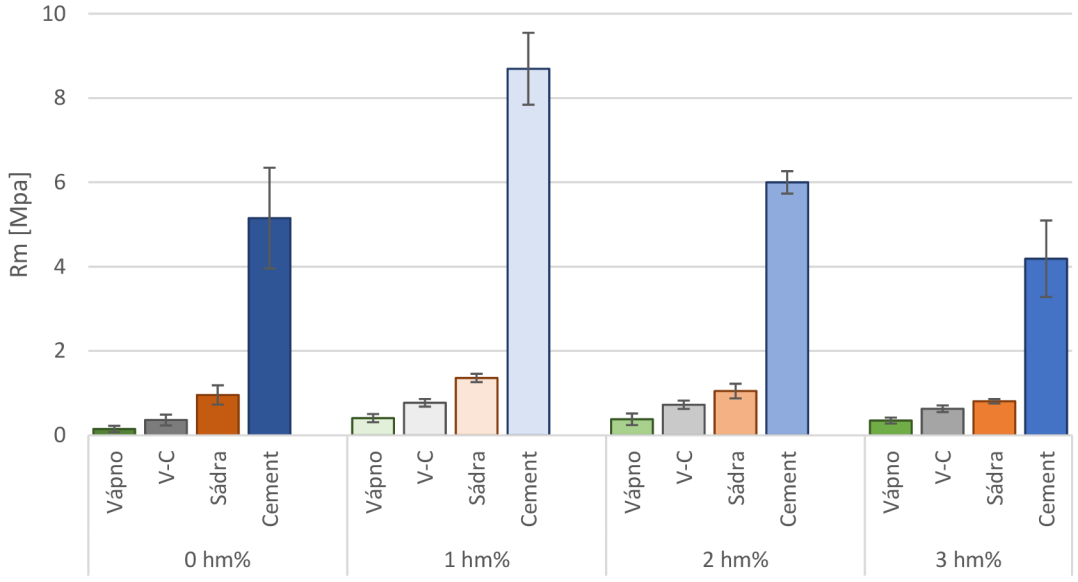
Na obrázku 23 jsou zobrazeny průměrné hodnoty pevnosti v tlaku společně s 95% IS. Nejlepších výsledků pevnosti v tlaku dosahuje cementová omítka. Oproti samotné omítce došlo ke zlepšení vlastností při použití 1 hm% uhlíkových a také skleněných vláken.

Při použití čedičových vláken jakékoli koncentrace došlo ke snížení pevnosti v tlaku. V průběhu zkoušky byl patrný vliv krátkých vláken na celistvost vzorku. Na rozdíl od vzorků bez vlákenné výztuže a vzorků s perlinkou nedocházelo při stlačování k odpadávání kusů od těla vzorku a k rozpadu materiálu na jemné částice.

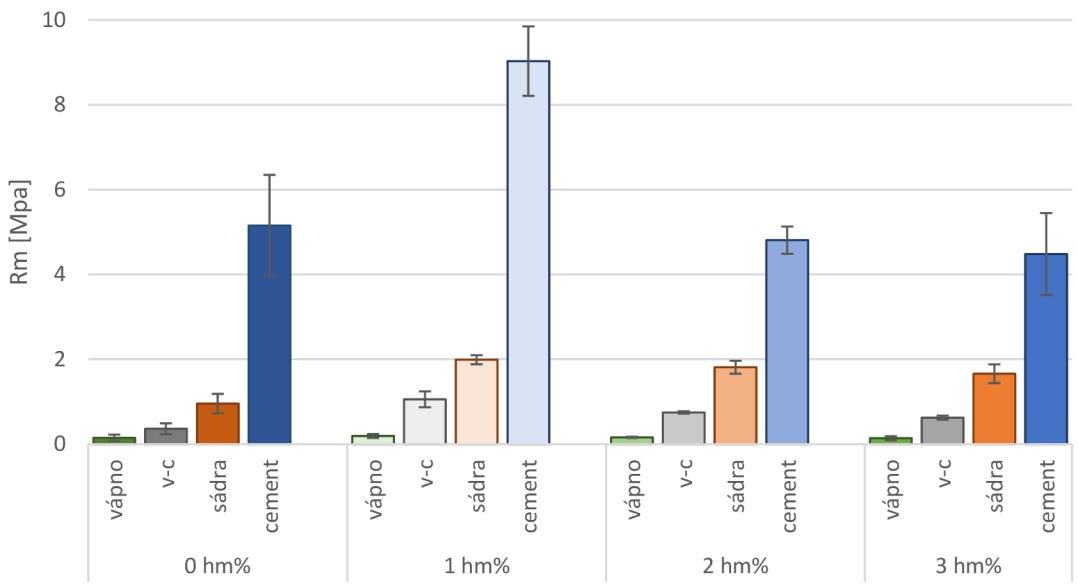
Pokud porovnáme prázdný vzorek se vzorkem s vlákny, měla nejlepší schopnost odolávat tlaku vápenná omítka s 1 hm% skleněných vláken, zde došlo ke zlepšení o 171 % (obr. 23c). Největšímu poklesu pevnosti v tlaku (67 %) došlo u cementové omítky se 3 hm% čedičových vláken (obr. 23a). Průměrné hodnoty pevnosti v tlaku jsou uvedeny v tabulce 17.




a) Čedičová vlákna




b) Skleněná vlákna




c) Uhlíková vlákna

Obr. 23 Vliv matrice a množství krátkovlákenné výztuže na pevnost v tlaku pro jednotlivé typy omítek

Tab. 17 Průměrná hodnota pevnosti v tlaku [MPa] pro všechny typy kompozitů

| | | krátká vlákna | | | | | | | | | perlinka | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **čedič (basalt)** | | | **sklo** | | | **uhlík** | | | čedič | sklo |
| omítka | 0 % | 1 % | 2 % | 3 % | 1 % | 2 % | 3 % | 1 % | 2 % | 3 % | | |
| **Vápenná** | 0,15 | 0,25 | 0,18 | 0,10 | **0,41** | 0,38 | 0,35 | 0,19 | 0,16 | 0,14 | 0,27 | 0,20 |
| **Vápeno-Cementová** | 0,36 | 0,91 | 0,91 | 0,53 | 0,77 | 0,72 | 0,63 | 1,06 | 0,75 | 0,62 | 0,68 | 0,56 |
| **Sádrová** | 0,96 | 1,02 | 0,99 | 0,51 | 1,36 | 1,05 | 0,81 | 1,99 | 1,81 | 1,66 | 1,12 | 1,02 |
| **Cementová** | 5,15 | 2,83 | 2,81 | **1,70** | 8,69 | 6,00 | 4,19 | 9,03 | 4,81 | 4,48 | 5,90 | 5,55 |

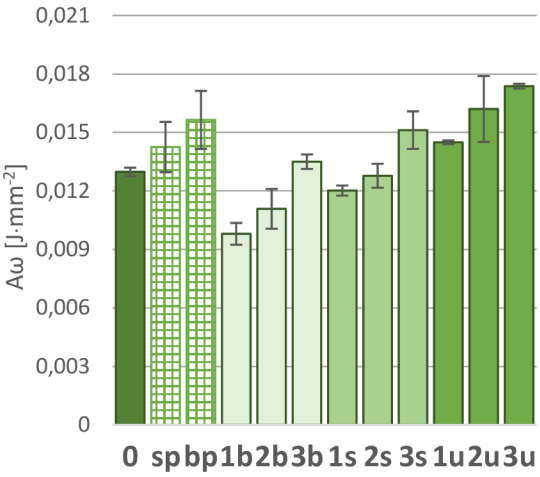
*Nejlepší výsledek, nejhorší výsledek, ** uvedené množství vlákenné výztuže je v hm%

Z provedeného experimentu plynou tato zjištění:

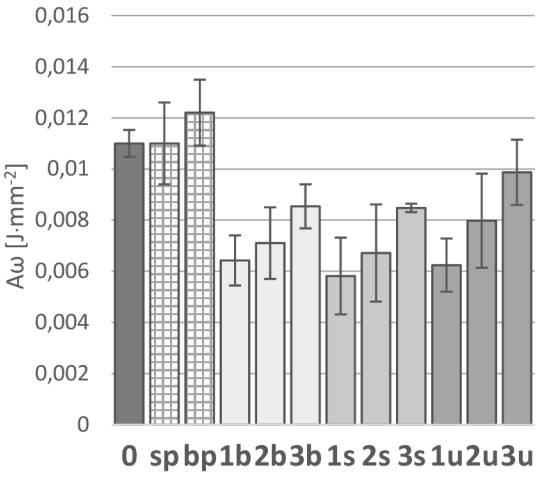
- Pevnost v tlaku klesá s vyšším množstvím výztuže (2 a 3 %).
- Vlákenná výztuž zajišťuje celistvost vzorku při zatěžování (vzorek se hned nerozpadá a nedrolí).
- U cementové omítky dochází vlivem výztuže k poklesu pevnosti v tlaku.

### 3.5.3 Rázová houževnatost

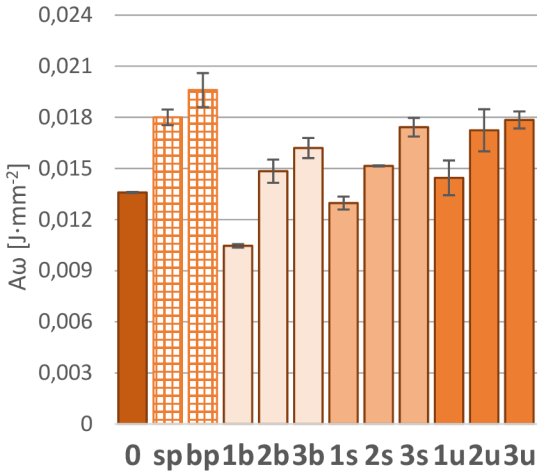
Rázová houževnatost byla testována na přístroji Charpy Labtest CHK50J. Pro testování byly zhotoveny vzorky o velikosti 40 x 40 x 160 mm. Měření probíhalo v souladu s normou ČSN EN ISO 179-2 [111]. Schéma průběhu zkoušky je uvedeno na obrázku 10 v kapitole 2.3.1. Z důvodu velkého rozsahu dat u všech použitých omítek nebylo v grafickém znázornění použito jednotné měřítko.



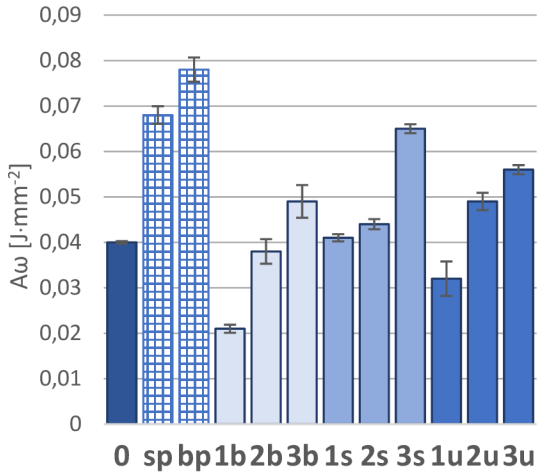

a) Rázová houževnatost pro vápennou omítku




b) Rázová houževnatost pro vápeno-cementovou omítku




c) Rázová houževnatost pro sádrovou omítku




d) Rázová houževnatost pro cementovou omítku

Obr. 24 Porovnání rázové houževnatosti pro jednotlivé typy omítek

Z uvedených výsledků (obr. 24) je patrný příznivý vliv většího množství vláken na schopnost vzorku odolávat rázu. U vápeno-cementové omítky (obr. 24b) je patrné, že již sama omítka má dobrou rázovou houževnatost. Ke zlepšení této vlastnosti došlo pouze u vzorku vyztuženého čedičovou perlinkou (obr. 24b).

Tab. 18 Průměrné hodnoty rázové houževnatosti [J·mm$^{-2}$] pro jednotlivé typy kompozitů

| | | krátká vlákna | | | | | | | | | perlinka | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **čedič (basalt)** | | | **sklo** | | | **uhlík** | | | čedič | sklo |
| omítka | 0 % | 1 % | 2 % | 3 % | 1 % | 2 % | 3 % | 1 % | 2 % | 3 % | | |
| **Vápenná** | 0,013 | 0,010 | 0,011 | 0,014 | 0,012 | 0,013 | 0,015 | 0,014 | 0,016 | 0,017 | 0,016 | 0,014 |
| **Vápeno-Cementová** | 0,011 | 0,006 | 0,007 | 0,009 | 0,006 | 0,007 | 0,008 | 0,006 | 0,008 | 0,010 | 0,012 | 0,011 |
| **Sádrová** | 0,014 | 0,010 | 0,015 | 0,016 | 0,013 | 0,015 | 0,017 | 0,014 | 0,017 | 0,018 | 0,020 | 0,018 |
| **Cementová** | 0,040 | **0,021** | 0,038 | 0,049 | 0,041 | 0,044 | **0,065** | 0,032 | 0,049 | 0,056 | **0,078** | 0,068 |

*Nejlepší výsledek, nejhorší výsledek, ** uvedené množství vlákenné výztuže je v hm%

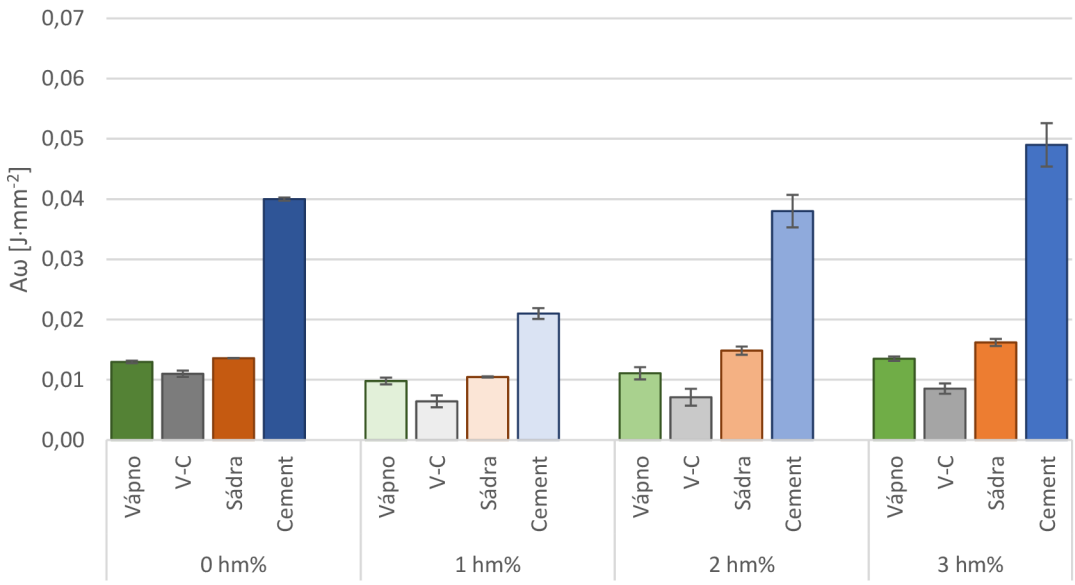
U cementové a sádrové omítky (obr. 24) dosahovala nejvyšších hodnot rázové houževnatosti také čedičová perlinka. Výjimku tvoří vápenná omítka, kde lepších výsledků dosahuje vzorek se 3 hm% uhlíkových vláken. Pokud porovnáme pouze krátkovlákennou výztuž nejlépe rázu odolává cementová omítka se 3 hm% skleněných vláken. Sádrová a vápenná omítka dosáhly nejlepších výsledků s 3 hm% uhlíkových vláken. Průměrné hodnoty rázové houževnatosti jsou uvedeny v tabulce 18.

Z provedeného experimentu vyplývá:

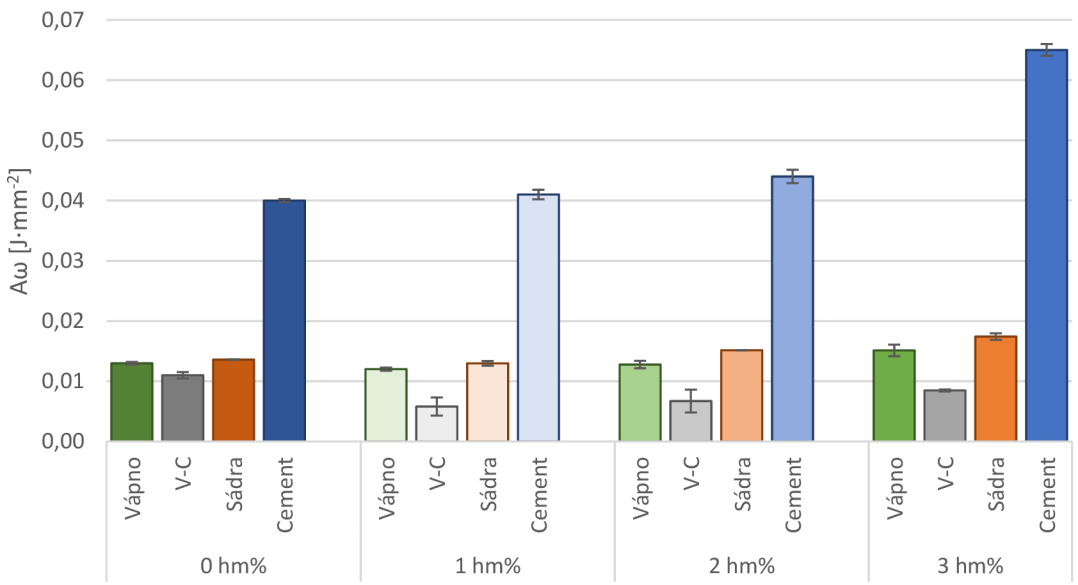
- Rázová houževnatost kompozitového vzorku roste s rostoucím množstvím vlákenné výztuže.

**Vliv typu matrice při daném obsahu a typu výztuže na rázovou houževnatost**

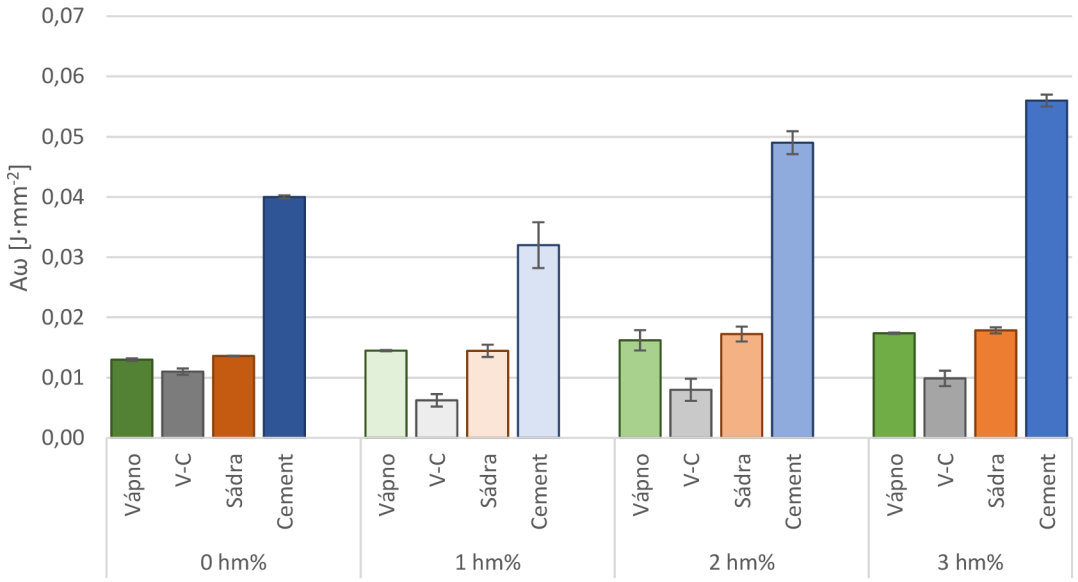
Na obrázku Obr. 25a jsou znázorněny průměrné hodnoty s 95% IS různých koncentrací čedičového vlákna na jednotlivé typy omítky. Z obrázku jasně vyplývá, že největší destruktivní účinek měla rázová houževnatost na cementovou omítku s 1 hm% čedičových vláken, kde došlo k poklesu oproti samotné omítce o 48 %. Zároveň k největšímu zlepšení o 63 % došlo u cementové omítky se 3 hm% skleněných vláken. U všech použitých vláken se projevil trend vyšší rázové houževnatosti při vyšší koncentraci vláken.




a) Čedičová vlákna




b) Skleněná vlákna




c) Uhlíková vlákna

Obr. 25 Vliv typu matrice a krátkovlákenné výztuže na rázovou houževnatost pro jednotlivé typy omítek

## 3.6 Sorpční vlastnosti

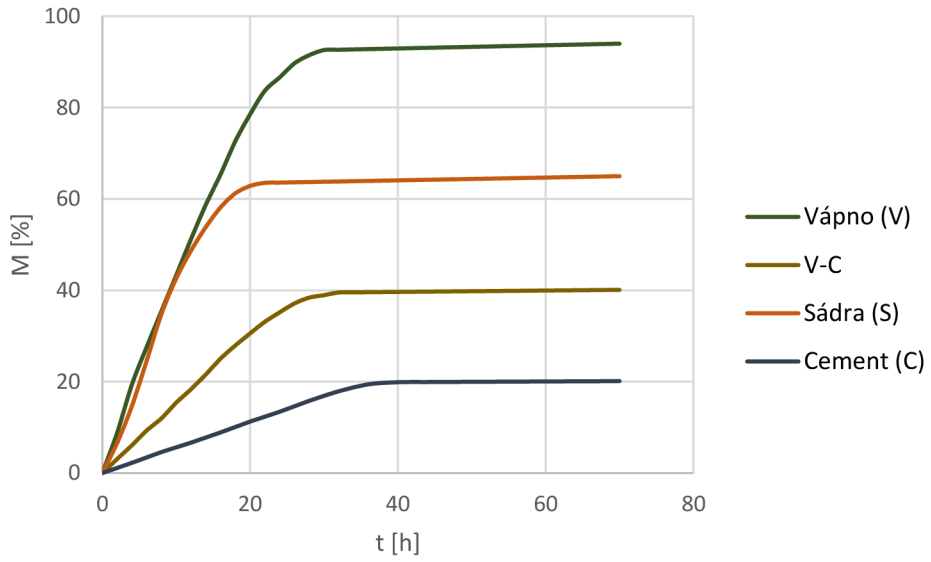
Účinky fyzikálních a chemických procesů hrají velkou roli v otázkách trvanlivosti stavebních materiálů. Vzhledem k povaze stavebních hmot (hydrofilita, porozita) dochází k rychlému transportu vody do struktury materiálu, a to ovlivňuje řadu technologických procesů jako je degradace materiálu.

### 3.6.1 Transport kapalné vody

Pro tento experiment byly vzorky vyrobeny a testovány dle normy ČSN EN ISO 15148 [112]. K zajištění absorpce vody pouze z jedné (spodní) strany, byly vzorky po obvodu

natřeny epoxidovou pryskyřicí. Princip testování spočívá v zaznamenávání hmotnostního přírůstku v pravidelných časových intervalech. Pro měření byly použity váhy, které se umístily na konstrukci, pod kterou byla nádoba s vodou. Na váhy byl následně umístěn (zavěšen) vzorek tak, aby jeho spodní strana byla ponořena do vody (obr. 11). K zaznamenání hmotností byl použit dataloger LabQuest 2, který odečítal aktuální váhu vzorku každých 60 minut. Měření probíhalo v laboratoři při konstantních klimatických podmínkách (RH 30 ± 5 %, teplota 23 ±2 °C).

Na obrázku 26 jsou zaznamenány průměrné hodnoty z 5 měření pro jednotlivé omítky. Největší hmotnostní přírůstek byl zaznamenán u vápenné omítky, což může být dáno tím, že vápno má schopnost absorbovat vodu a transportovat ji svou strukturou. Naopak nejnižší hmotnostní přírůstek byl zaznamenán u cementové omítky. Cement má obecně pevnější a těsnější strukturu. Proto má voda tendenci zůstávat na povrchu, místo aby pronikala dovnitř. Nejdříve dosáhla rovnovážného stavu sádrová omítka.



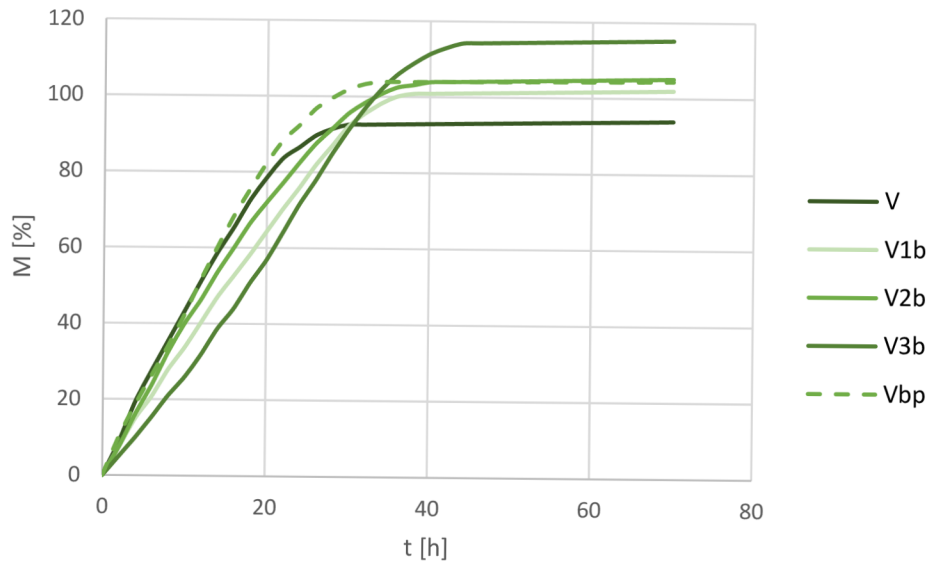

Obr. 26 Transport kapalné vody pro jednotlivé druhy omítek

### 3.6.2 Vliv množství vlákenné výztuže na transport kapalné vody

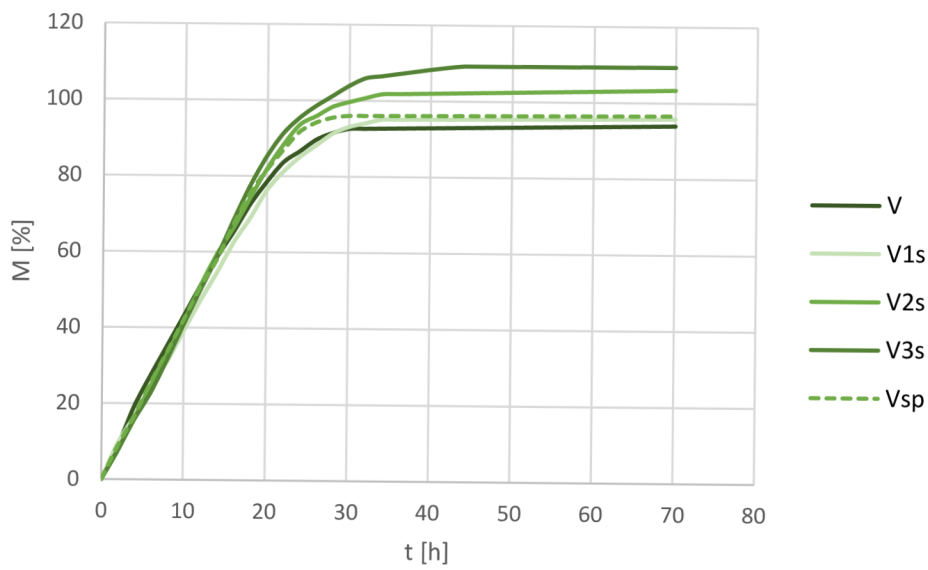
Omítkové kompozity s vápennou, vápeno-cementovou a sádrovou matricí byly testovány po dobu 70 hodin. U cementových kompozitů docházelo k pomalejšímu transportu kapalné vody, proto doba testování trvala 120 hodin. V tabulce 19 jsou uvedeny hmotnostní podíly pro všechny měřené vzorky.

Na obrázku 27 je znázorněna závislost průměrné hodnoty změny hmotnosti *M* na čase vápenných kompozitů. Z výsledků je patrný vliv výztuže na hmotnostní přírůstek vzorků. Z výsledku vyplývá, že přidání vláken vede ke zvýšení absorpce vody vzorkem.

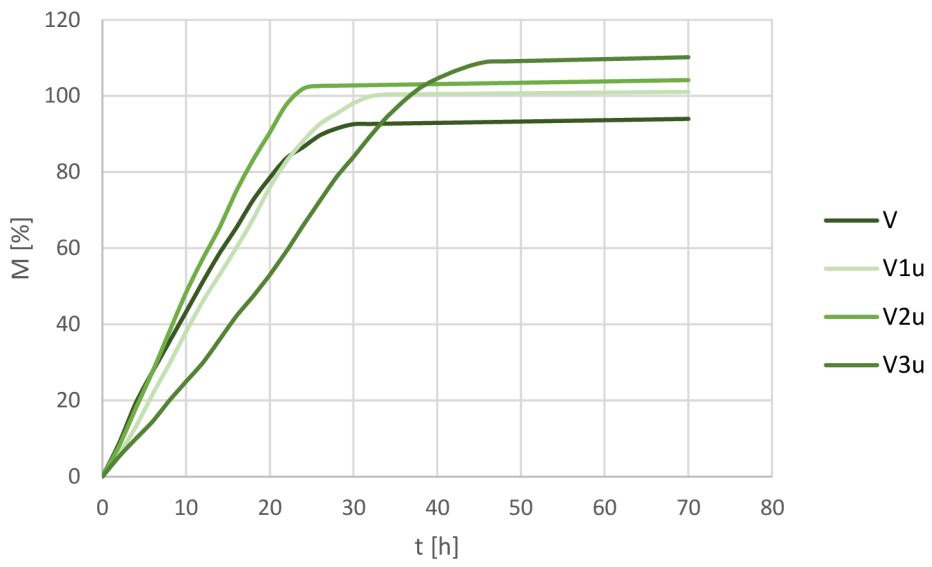
Přidání čedičových vláken do vápenné omítky (obr. 27a) vede nejenom ke zvýšení absorpce, ale také k prodloužení času, za který vzorek vodu přijímá. U vzorků V1b, V2b a V3b došlo k zvýšení hmotnosti o 8, 11 a 21 %.




a) Čedičová vlákna




b) Skleněná vlákna

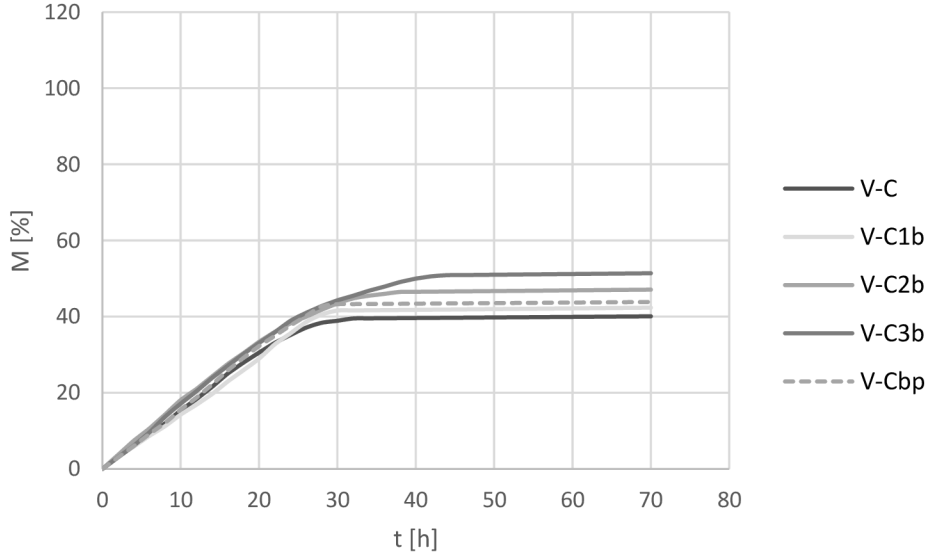



c) Uhlíková vlákna

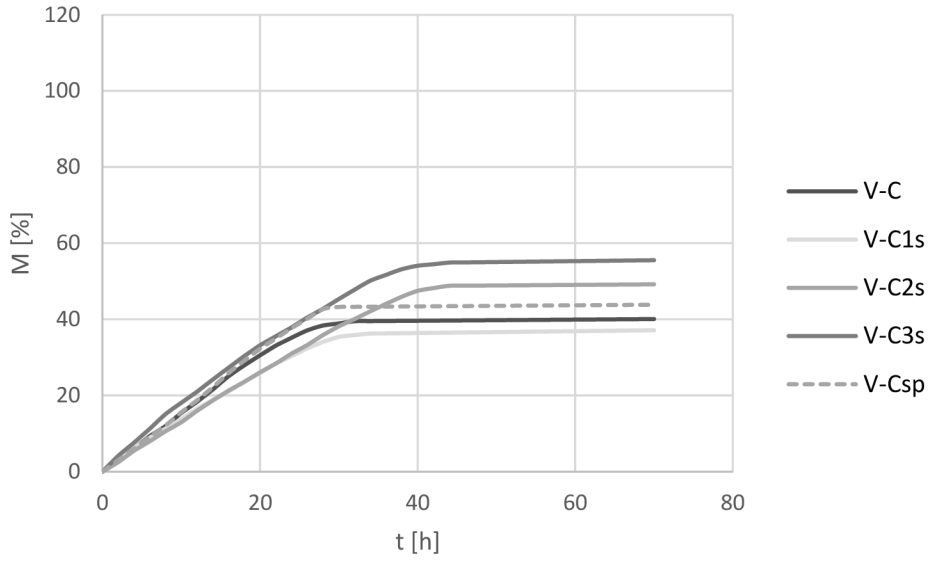
Obr. 27 Transport kapalné vody pro vápennou omítku

U vzorku V1s došlo k nárůstu hmotnosti pouze o 2 %. Důvodem by mohl být fakt, že použitá skleněná vlákna jsou určená do stavebních materiálů a mají povrchovou úpravu, která odolává alkalickému prostředí. Přidání krátkých vláken vede obecně ke zvýšení pórů ve struktuře omítek, což mohl být důvod zvýšeného hmotnostního přírůstku vlhkosti u vzorku V2s a V3s (obr. 27b).

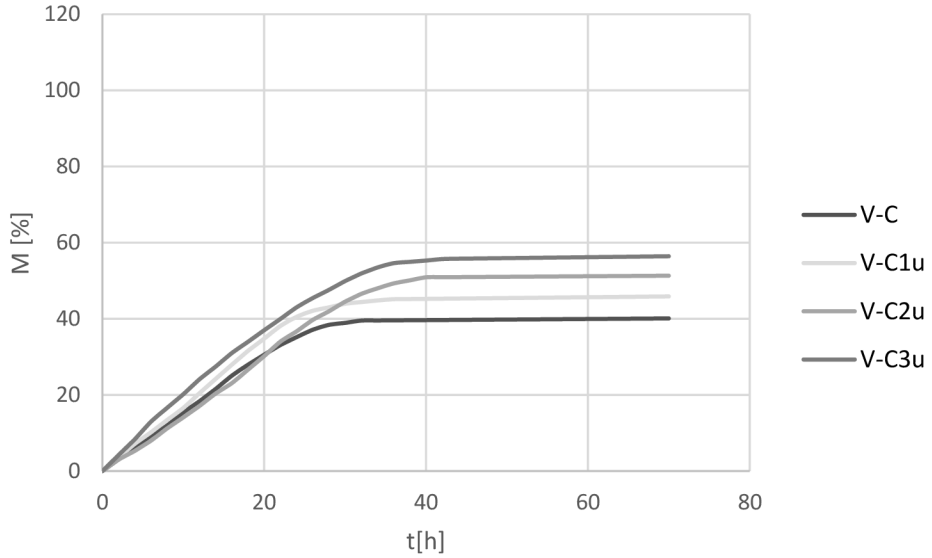
Mezi vápennými kompozity s uhlíkovými vlákny vykazoval největší hmotnostní nárůst (o 16 %) vzorek V3u, zároveň tento vzorek pomaleji přijímal vodu stejně jako vzorek V3b. Tento fakt by mohl být dán zvýšenou pórovitostí omítky, což vede jednak k vyššímu hodnotě *M*, a zároveň u většího množství pórů dochází k jejich pomalejšímu zaplňování, a tedy zpomalení sání.




a) Čedičová vlákna




b) Skleněná vlákna




c) Uhlíková vlákna

Obr. 28 Transport kapalné vody pro vápeno-cementovou omítku

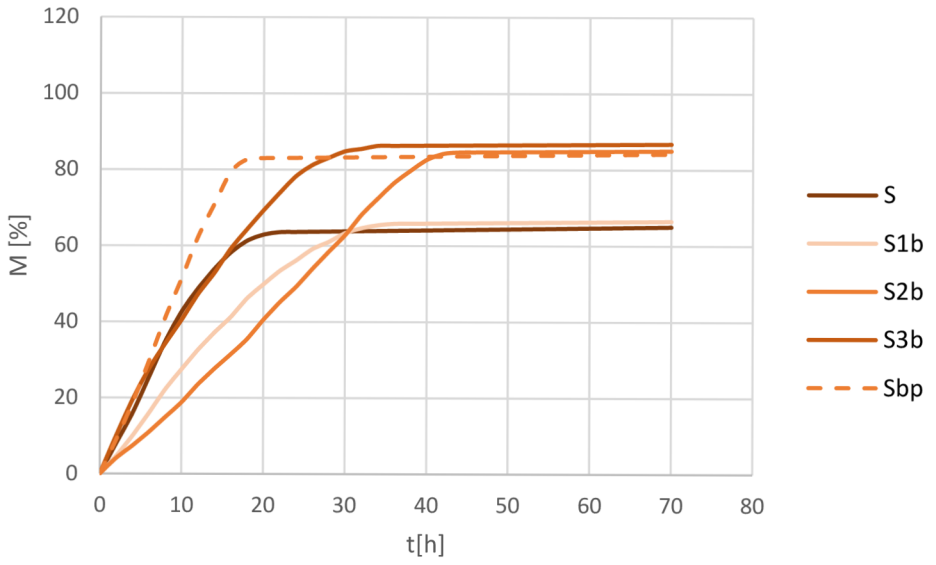
Přidání krátkovlákenné výztuže do vápeno-cementové omítky vede obecně ke zvýšení hmotnostního přírůstku (obr. 28). Výjimku tvoří pouze vzorek s 1 hm% skleněných vláken, kde došlo ke snížení hmotnosti o 4 %.

U sádrové omítky (obr. Obr. 29) můžeme sledovat obdobný trend jako u vápenné a vápeno-cementové omítky. Přidání 1 hm% skleněné výztuže vede ke snížení hmotnostního podílu o 3 %. Dále můžeme pozorovat, že se zvyšujícím se podílem vláken ve vzorku se prodlužují časy sání.

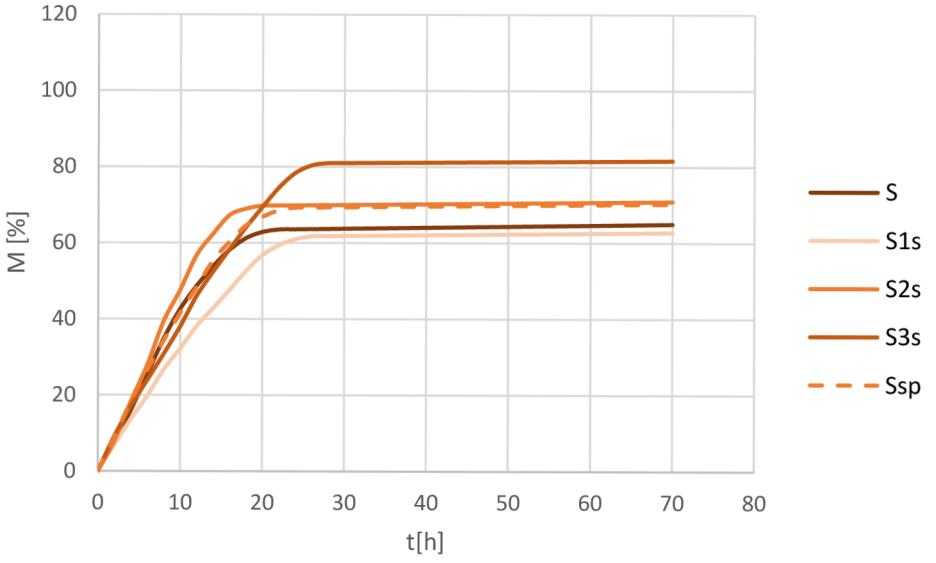
Na obrázku 30 jsou uvedeny výsledky pro cementové kompozity. Samotná cementová omítka přijímá 20 % vody, což je nejmenší procento ze všech použitých omítek (obr. 26). Přidání krátkovlákenné výztuže v kombinaci s kamínky, které cementová omítka obsahuje, vede k tvorbě pórů, což má za následek zvýšený transport vody do struktury omítky. U cementové omítky je vidět, že použití výztuže ve formě

perlinek se projevil nižší hodnotou hmotnostního přírůstku na rozdíl od vzorků s krátkými vlákny. Vzhledem k tomu, že cementová omítka má kompaktnější strukturu, může vést použití perlinky k tvorbě menšího množství pórů, které mají vliv na savost vzorku.

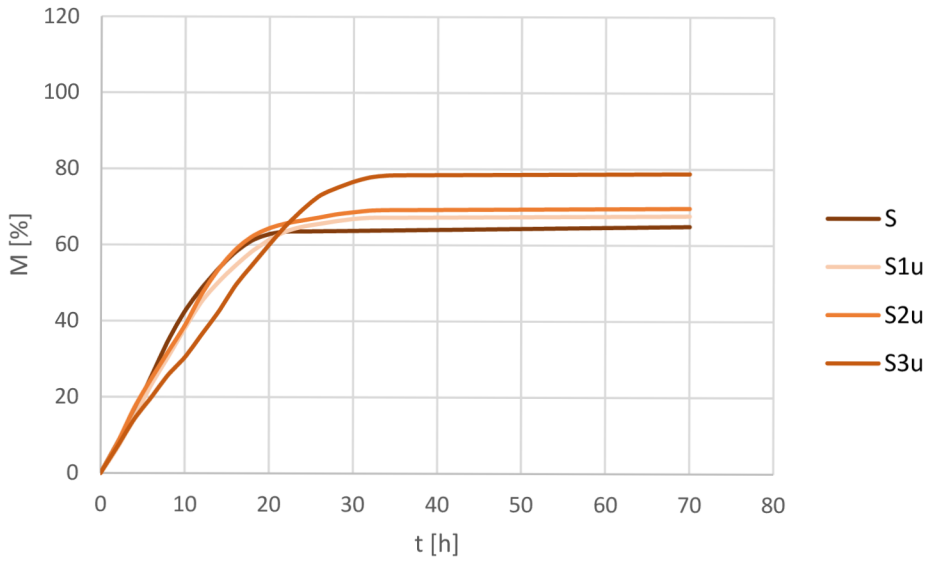
V tabulce 19 jsou uvedeny průměrné hodnoty hmotnostního přírůstku z 5 měření pro jednotlivé kompozitní materiály.




a) Čedičová vlákna

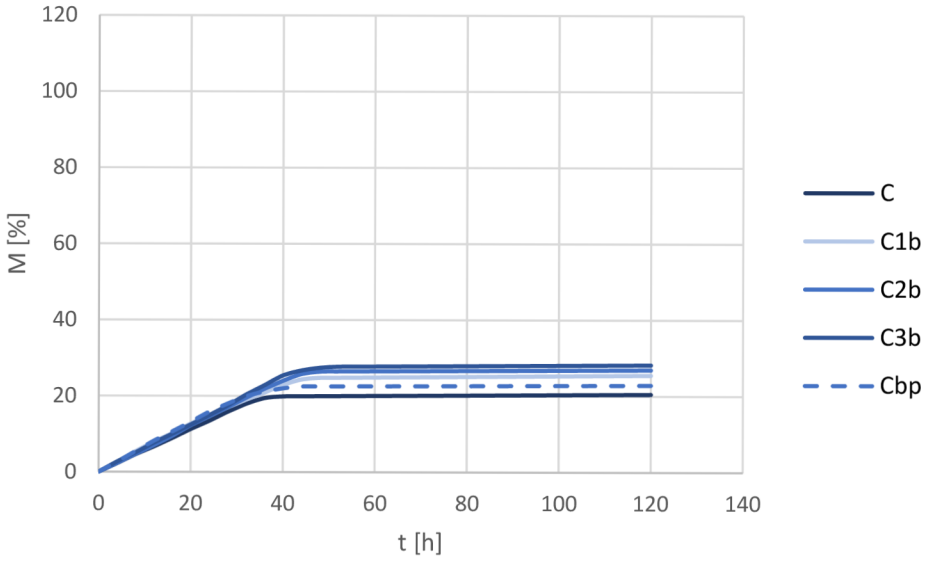



b) Skleněná vlákna

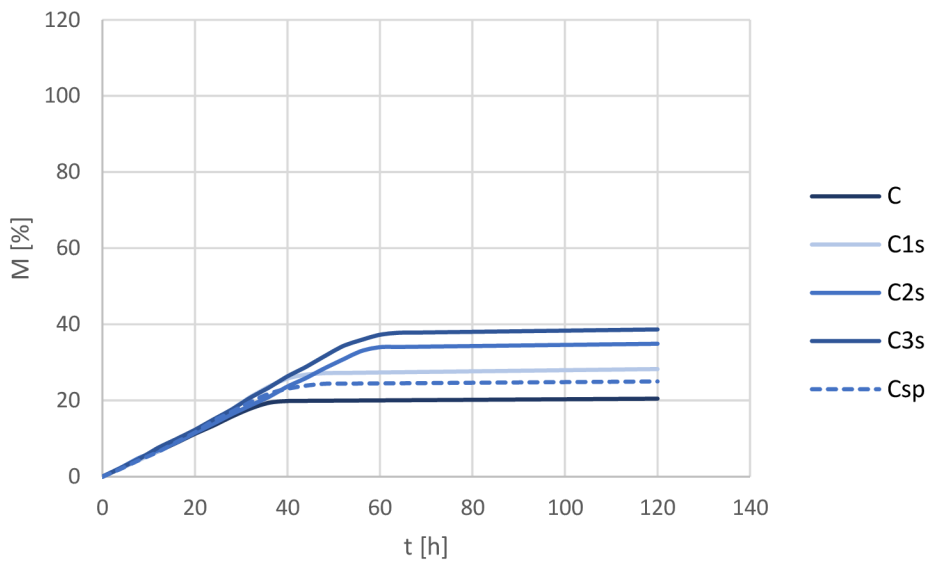



c) Uhlíková vlákna

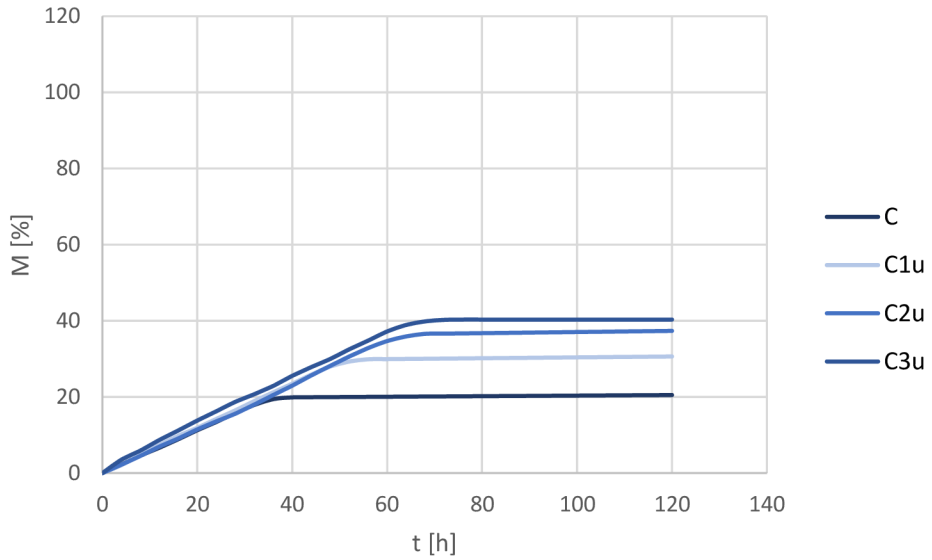
Obr. 29 Transport kapalné vody pro sádrovou omítku




a) Čedičová vlákna




b) Skleněná vlákna




c) Uhlíková vlákna

Obr. 30 Transport kapalné vody pro cementovou omítku

Tab. 19 Transport kapalné vody, hmotnostní přírůstek *M* [%] v čas nasycení vzorku

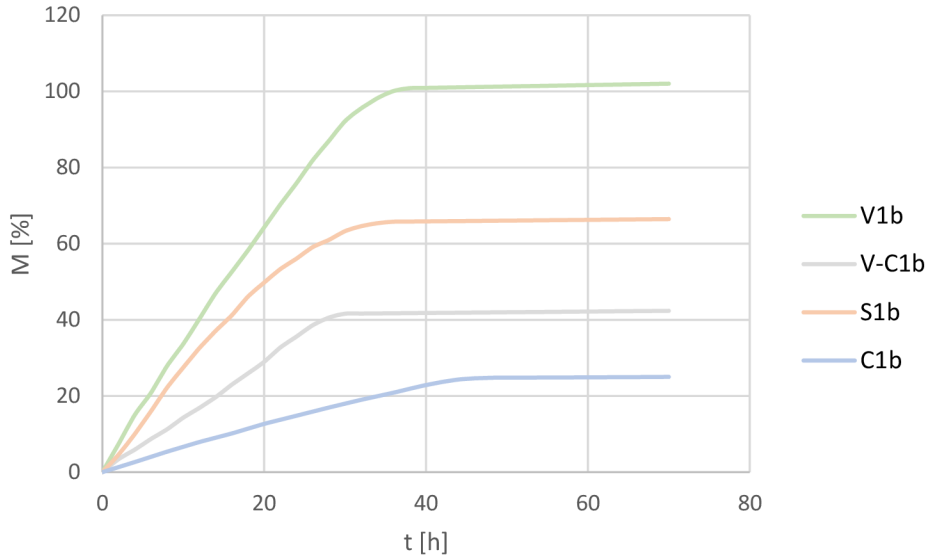
| | | krátká vlákna | | | | | | | | | perlinka | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **čedič (basalt)** | | | **sklo** | | | **uhlík** | | | čedič | sklo |
| omítka | 0% | 1% | 2% | 3% | 1% | 2% | 3% | 1% | 2% | 3% | | |
| **Vápenná** | 93 | 103 | 107 | 114 | 95 | 102 | 109 | 102 | 103 | 109 | 94 | 96 |
| **Vápeno-Cementová** | 40 | 42 | 47 | 60 | 36 | 49 | 55 | 45 | 51 | 56 | 43 | 52 |
| **Sádrová** | 64 | 66 | 85 | 86 | 62 | 70 | 81 | 67 | 69 | 78 | 83 | 69 |
| **Cementová** | 20 | 5 | 6 | 8 | 7 | 14 | 18 | 30 | 37 | 40 | 23 | 24 |

*uvedené množství vlákenné výztuže je v hm%, **transport kapalné vody je uveden v %

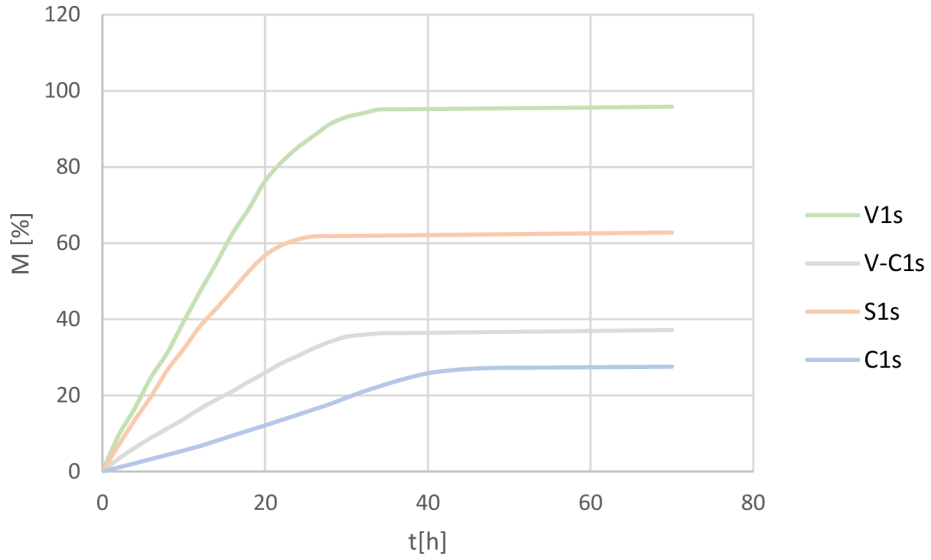
### 3.6.3 Vliv typu matrice na transport kapalné vody

V této kapitole je znázorněn transport kapalné vody vždy pro jeden druh vlákna ve stejném množství (1, 2 a 3 hm%) pro všechny typy matric. Na obrázku 26 jsou znázorněny průměrné hodnoty hmotnostního přírůstku pro samotné omítky bez vlákenné výztuže. Z použitých matric došlo k největšímu hmotnostní přírůstku u vápenné omítky (93 %), následovala sádrová omítka, vápeno-cementová omítka a nejmenší hmotnostní přírůstek měla cementová omítka (20 %).

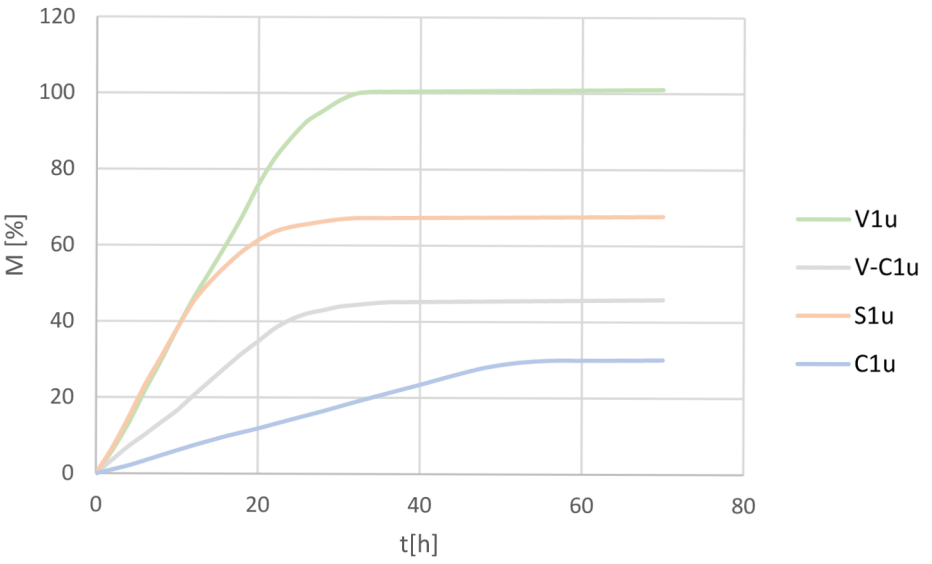
Při porovnání kompozitů s 1 hm% (obr. 31), 2 hm% (obr. 32) a 3 hm% (obr. 33) je zřejmé, že vlákenná výztuž tento fakt nezměnila. Nejmenší procento vody přijímá cementový kompozit, kterému zároveň trvá nejdelší dobu, než dojde k jeho nasycení vodou (50 – 70 h). Nejrychleji přijímá vodu sádrová omítka (35 – 40 h).




a) Čedičová vlákna

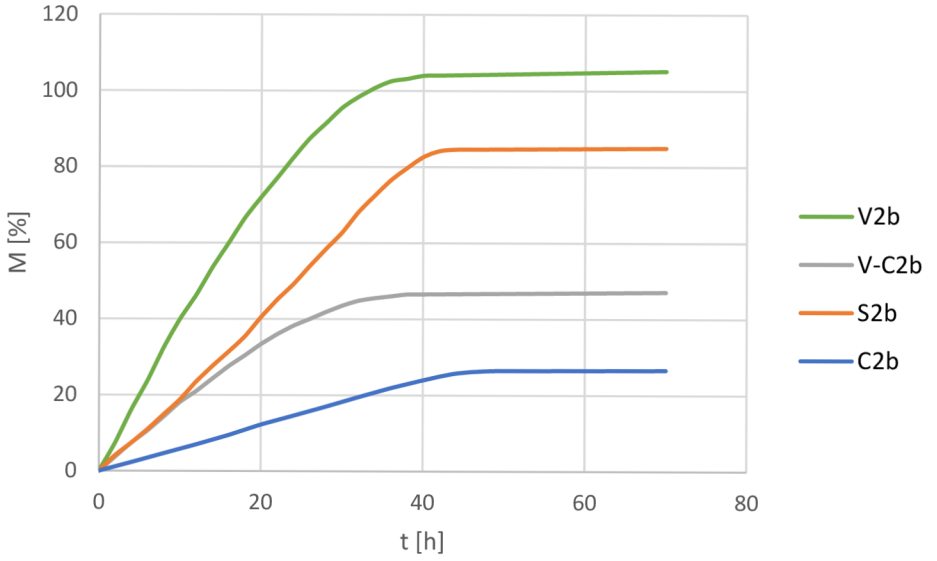



b) Skleněná vlákna

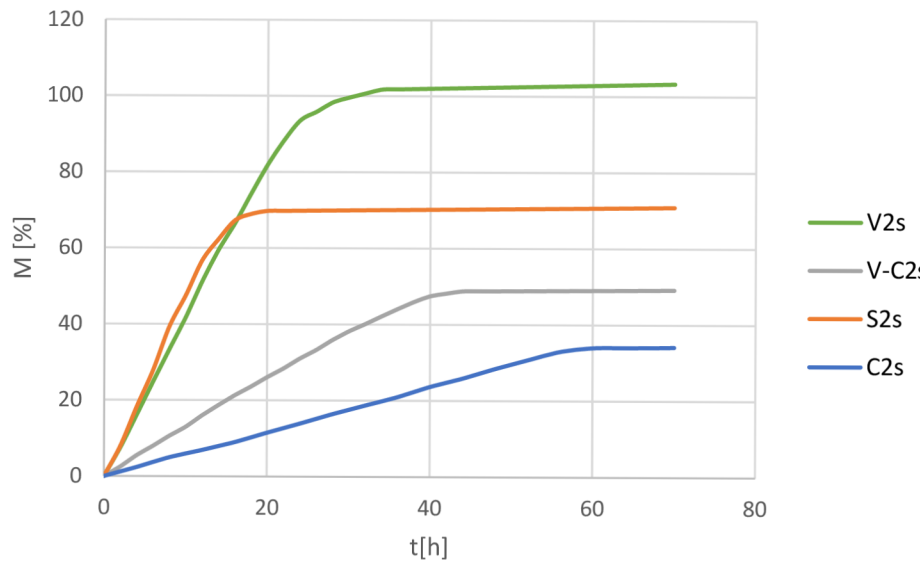



c) Uhlíková vlákna

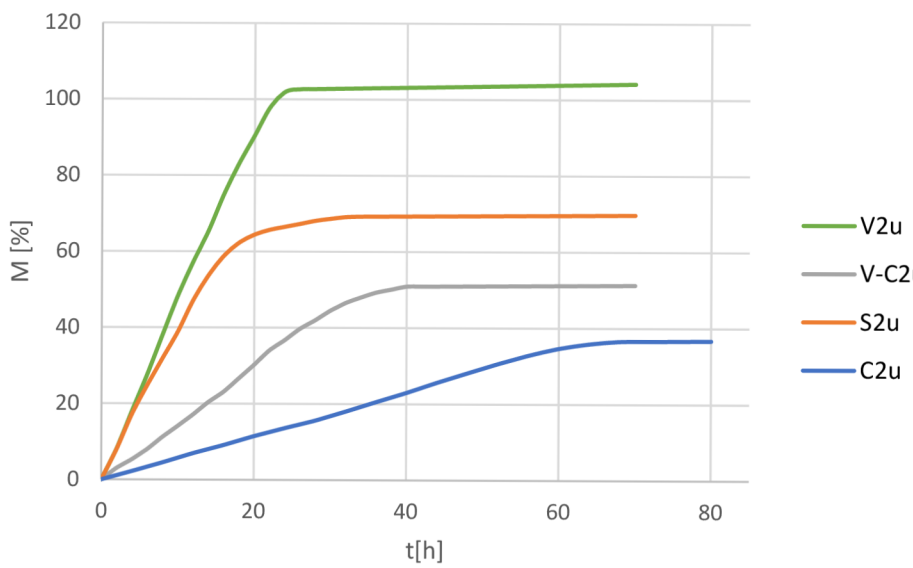
Obr. 31 Hmotnostní přírůstek u kompozitů s 1 hm% vláken




a) Čedičová vlákna

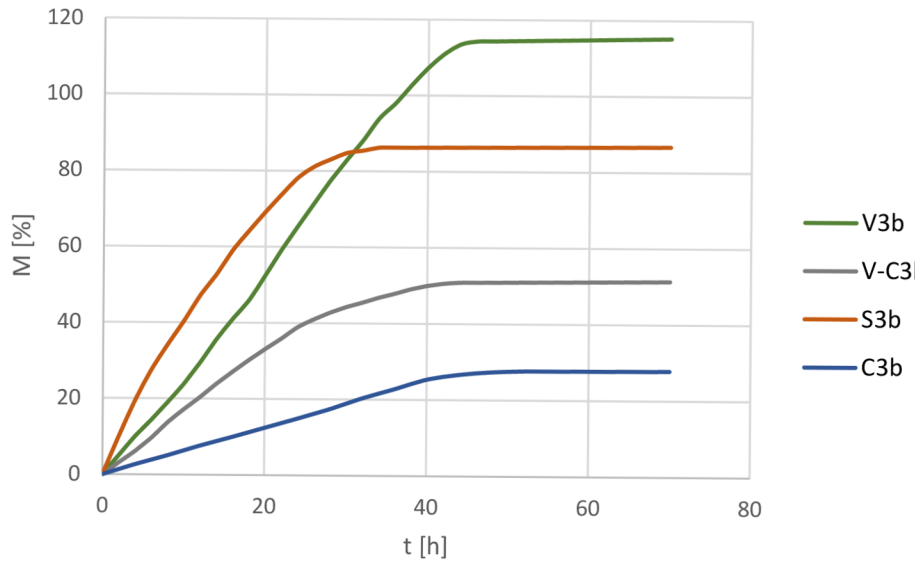



b) Skleněná vlákna

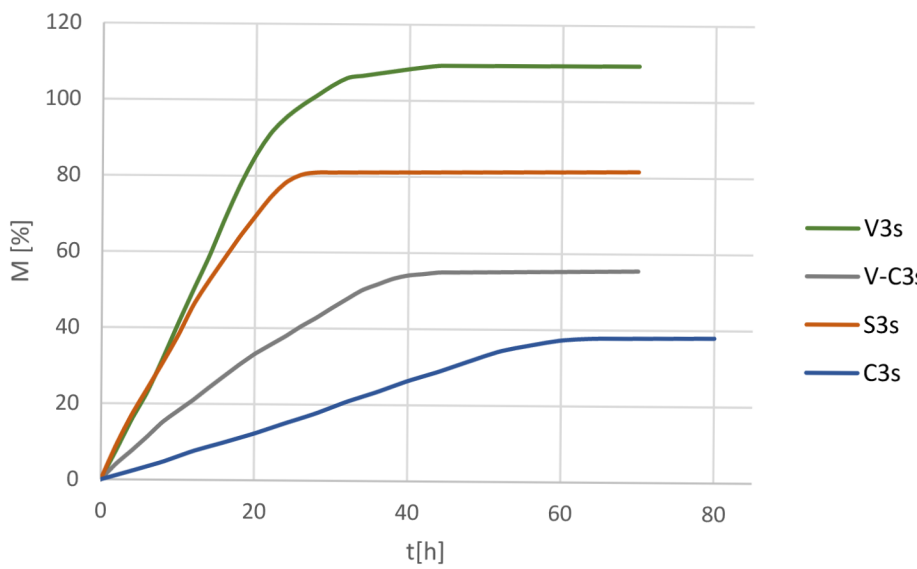



c) Uhlíková vlákna

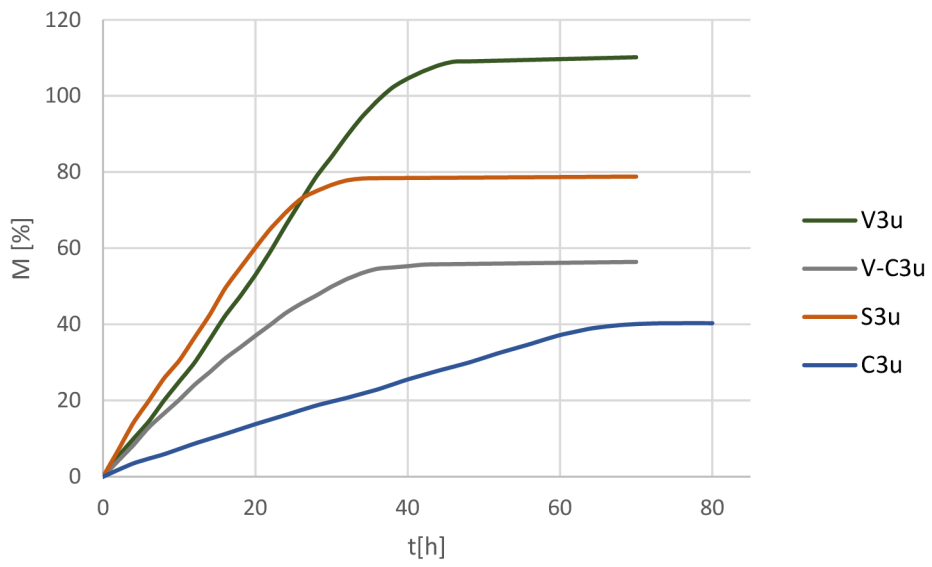
Obr. 32 Hmotnostní přírůstek u kompozitů se 2 hm% vláken




a) Čedičová vlákna



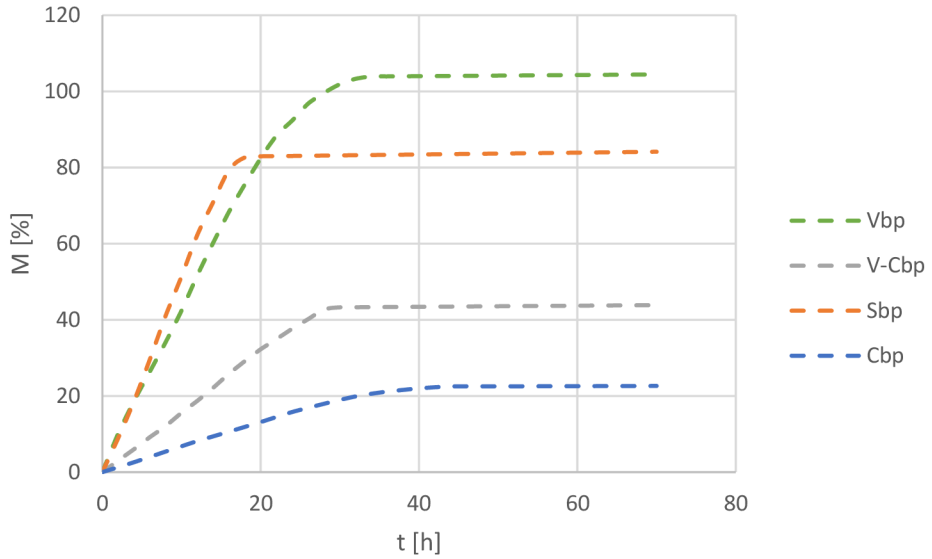

b) Skleněná vlákna



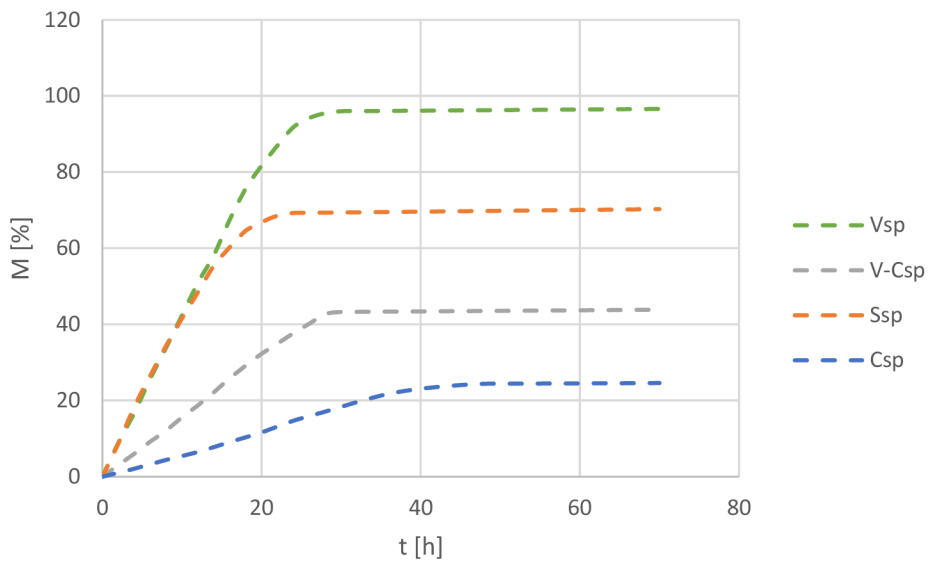

c) Uhlíková vlákna

Obr. 33 Hmotnostní přírůstek u kompozitů se 3 hm% vláken

Pokud porovnáme výsledky perlinkové výztuže je zřejmé (obr. 34), že druh perlinky (čedič, sklo) nezmění významným způsobem transport kapalné vody daného typu matrice (porovnání s obr. 26). Určující pro výsledné sorpční vlastnosti je typ matrice/omítky.




a) Čedičová perlinka

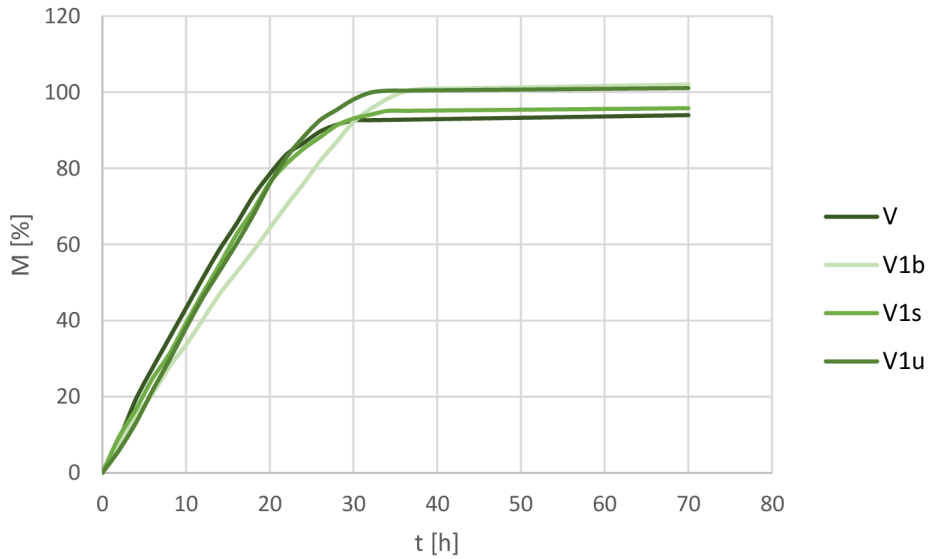



b) Skleněná perlinka

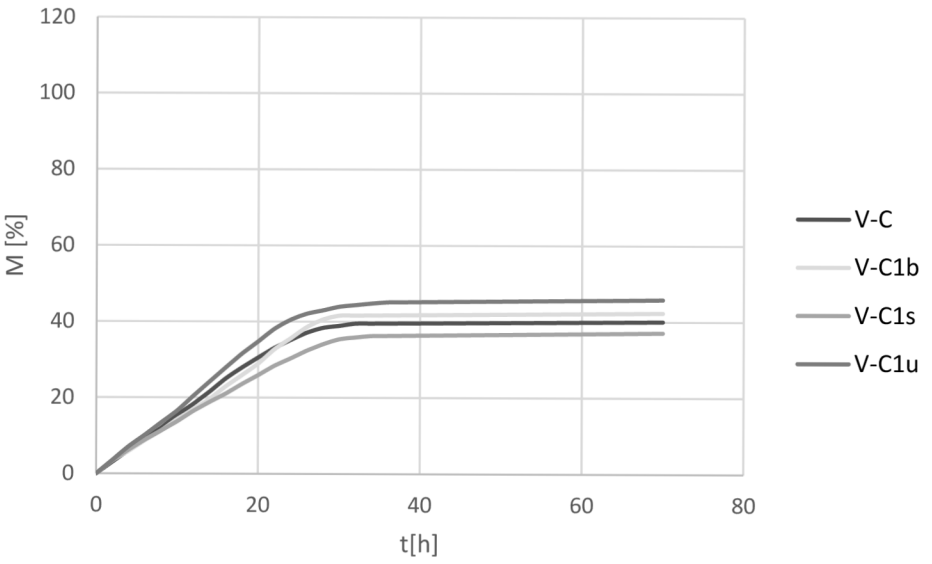
Obr. 34 Hmotnostní přírůstek u kompozitů s perlinkou

### 3.6.4 Vliv typu vlákna na transport kapalné vody

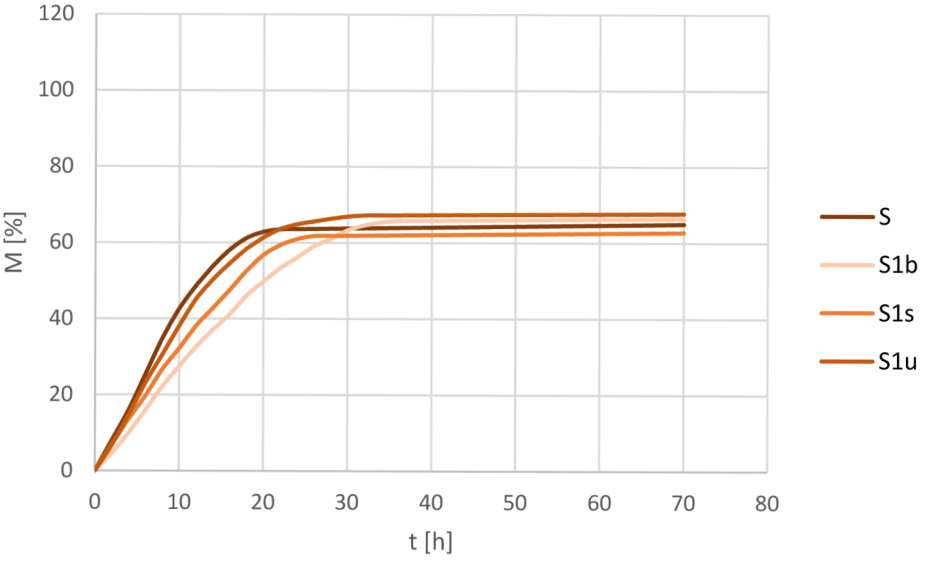
V této kapitole jsou zobrazeny průměrné výsledky transportu kapalné vody vždy pro jeden typ matrice, stejné množství výztuže a různé typy vláken. Pro ucelenost jsou zde znázorněny také výsledky samotné omítky. Na obrázku 35 můžeme vidět výsledky matric s 1 hm% vláken. U vápenné, vápeno-cementové a sádrové omítky se projevil nejnižší hmotnostní přírůstek u vzorků se skleněnými vlákny. Výjimku tvoří cementový kompozit, kde došlo k nejnižšímu přírůstku hmotnosti u čedičových vláken. Protože se jedná o kombinaci cementové matrice, která má nejmenší schopnost přijímat vlhkost a přidání čedičových vláken nedojde k zvýšení této schopnosti.



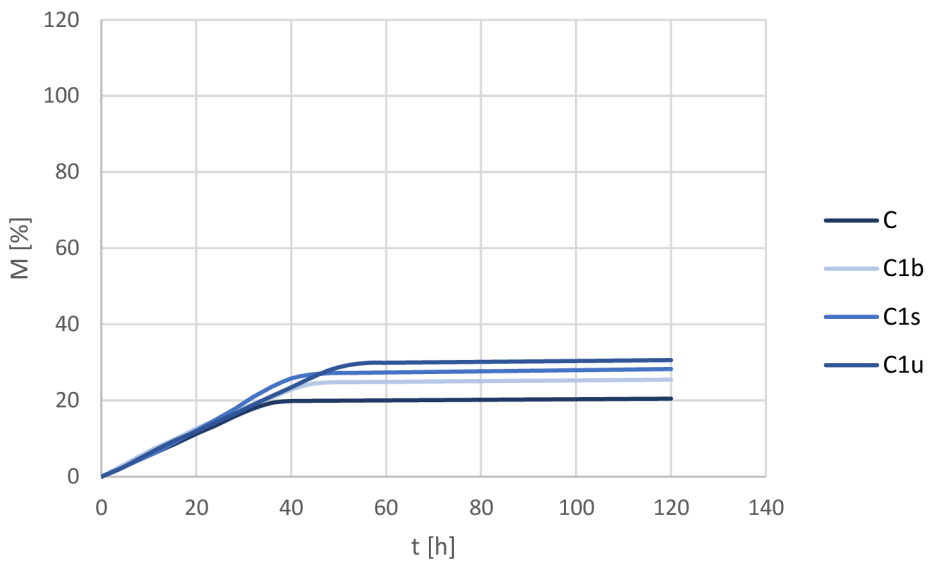

a) Vápenná omítka




b) Vápeno-cementová omítka



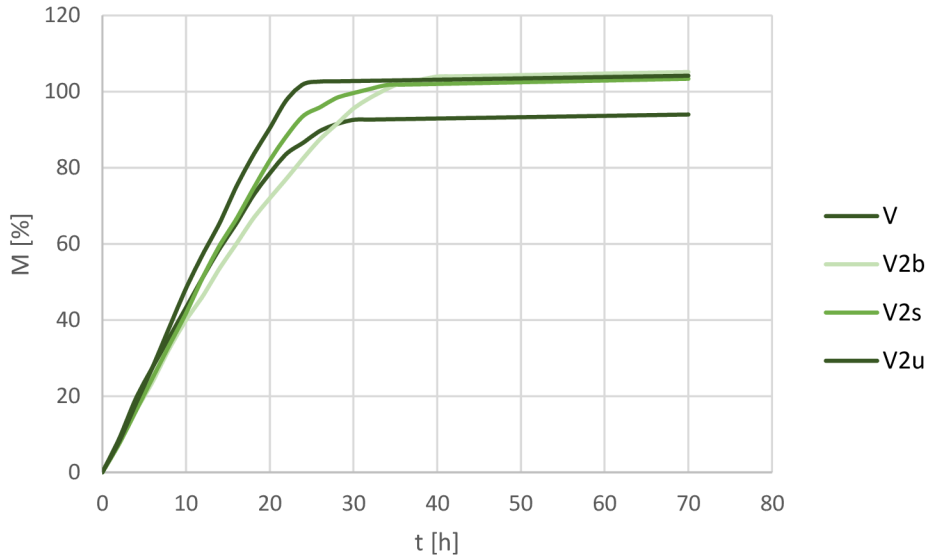

c) Sádrová omítka



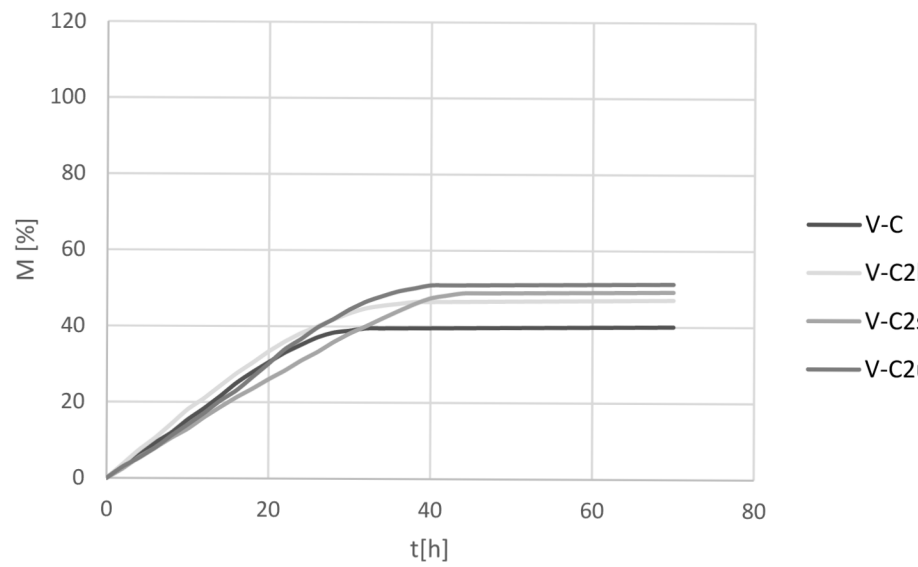

d) Cementová omítka

Obr. 35 Hmotnostní přírůstek omítkových kompozitů s 1 hm% vlákenné výztuže

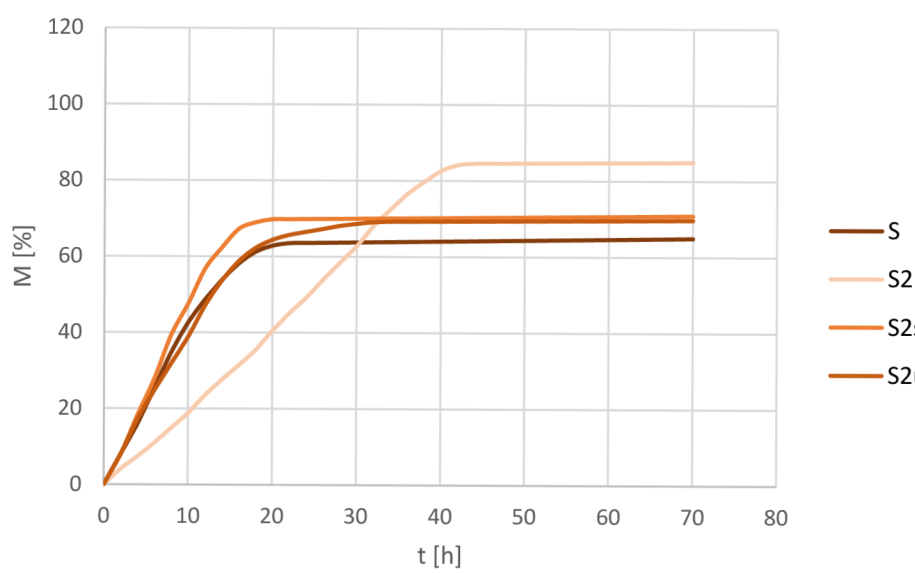
Na obrázku 36 lze porovnat hmotnostní přírůstek kompozitů se 2 hm%. Výsledky vápenné omítky ukazují, že pokud přidáme 2 hm% vlákenné výztuže dostaneme srovnatelné výsledky u všech typů použitých vláken. Rozdíl je pouze v čase transportu vody. Nejrychleji přijímal vodu kompozit s uhlíkovými vlákny. U vápeno-cementového a cementového kompozitu dochází k nejnižšímu přírůstku hmotnosti (oproti prázdné omítce) při použití vláken čedičových. K nejnižšímu hmotnostnímu přírůstku došlo u sádrového kompozitu v kombinaci s uhlíkovými vlákny. U sádrového kompozitu je zároveň patrné, že přidání čedičových vláken vede k výraznému prodloužení času sání.



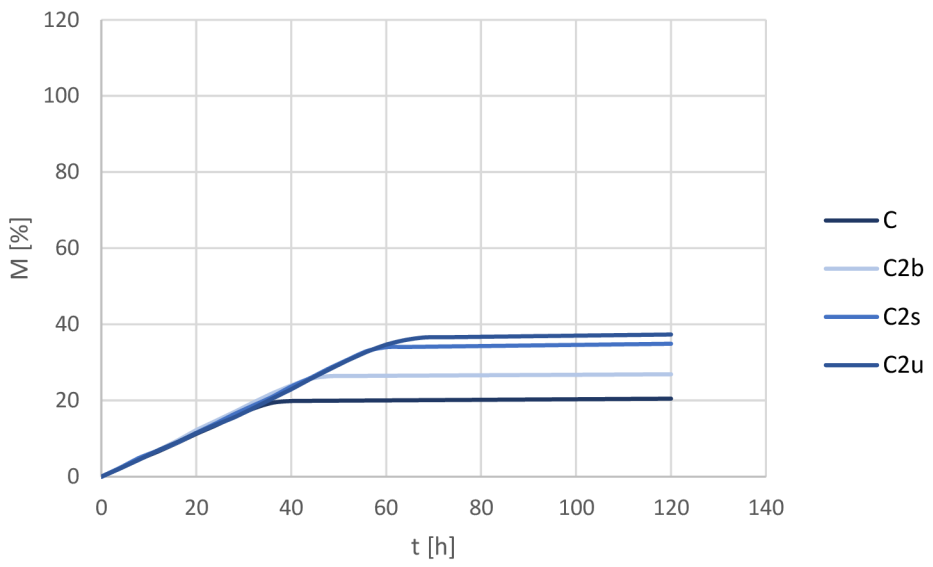

a) Vápenná omítka




b) Vápeno-cementová omítka



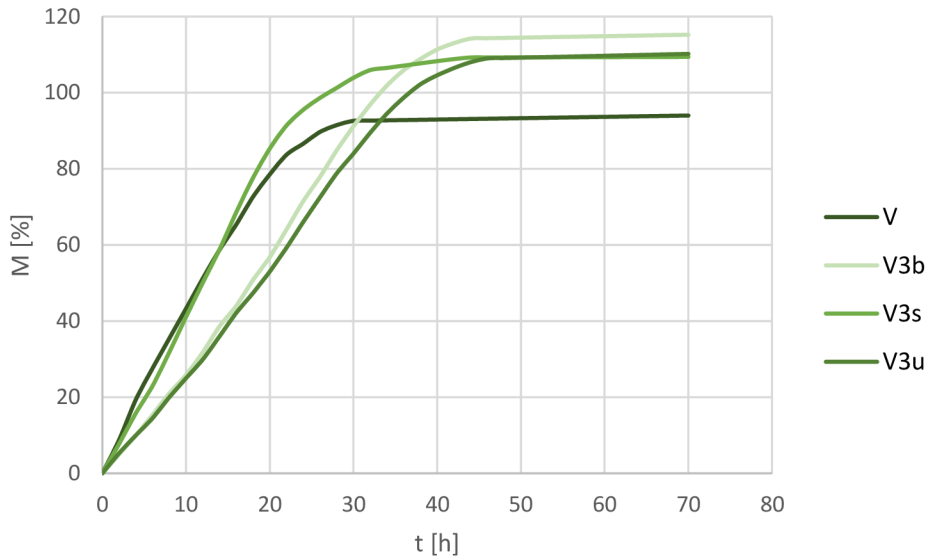

c) Sádrová omítka



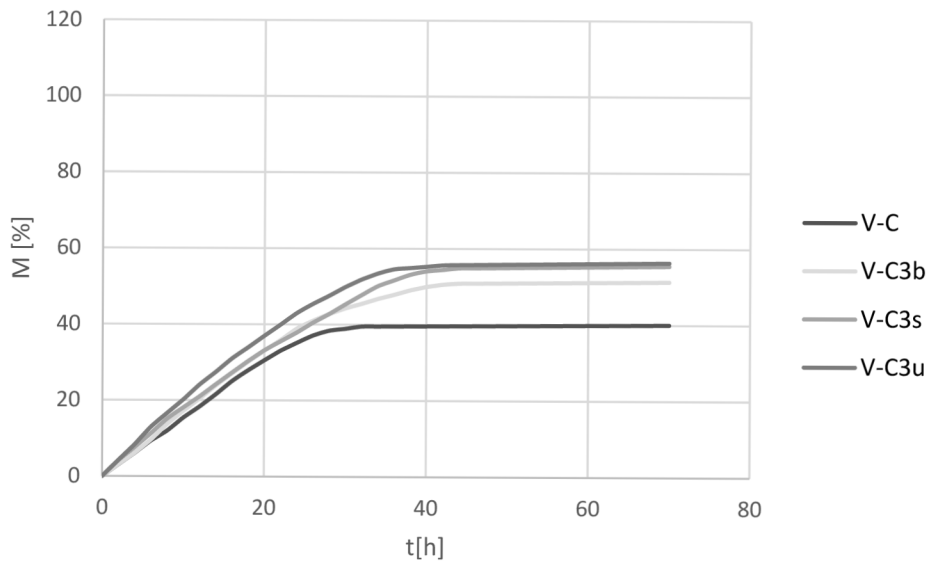

d) Cementová omítka

Obr. 36 Hmotnostní přírůstek omítkových kompozitů s 2 hm% vlákenné výztuže

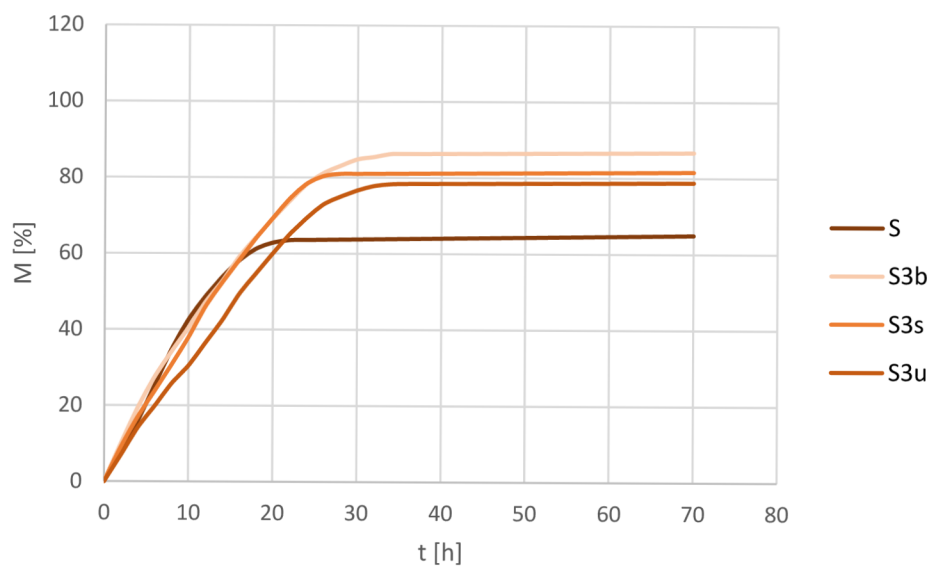
Při porovnání výsledků vápenné omítky se 3 hm% vláken (obr. 37) dosáhneme srovnatelných výsledků u vzorků se skleněnými a uhlíkovými vlákny. Rozdíl je dán pouze rychlostí, jakou vzorek přijímá vodu (pomaleji přijímá vodu kompozit s uhlíkovými vlákny). Vápeno-cementový a cementový kompozit se choval se 3 hm% obdobně jako kompozit se 2 hm% a nejnižších hodnot hmotnostního přírůstku bylo dosaženo s čedičovými vlákny. Sádrový kompozit přijímal nejméně vody s vlákny uhlíkovými.



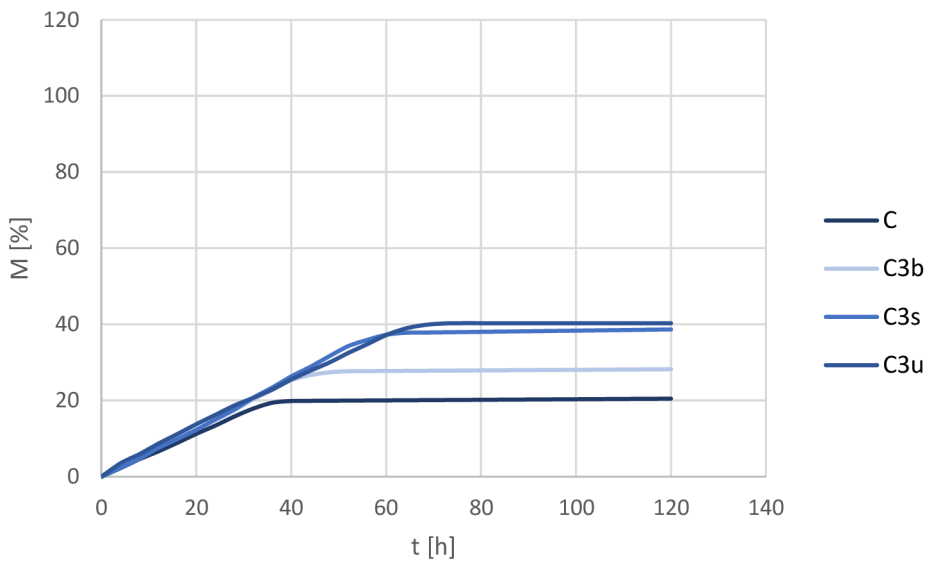

a) Vápenná omítka




b) Vápeno-cementová omítka




c) Sádrová omítka




d) Cementová omítka

Obr. 37 Hmotnostní přírůstek omítkových kompozitů s 3 hm% vlákenné výztuže

Z provedeného experimentu je možno shrnout následující:

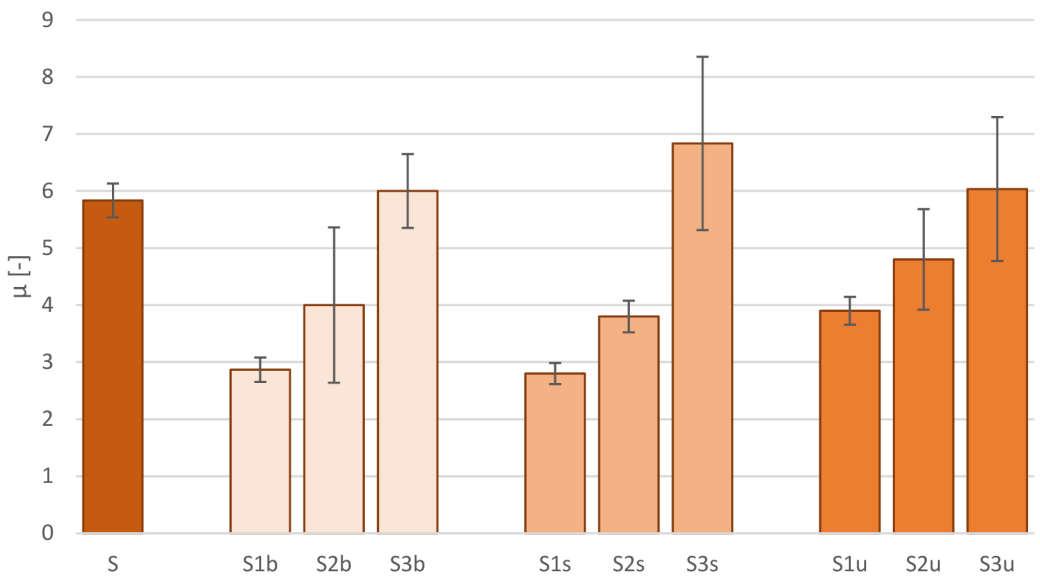
- Cementový kompozit dosahuje nejnižšího hmotnostního přírůstku s čedičovými vlákny.
- Vápenná, vápeno-cementová a sádrová omítka mají nejnižší hodnoty hmotnostního přírůstku s 1 hm% skleněných vláken.

### 3.6.5 Transport vodní páry

Pro tento experiment byly vyrobeny vzorky ve tvaru válce o průměru 100 mm a výšce 20 mm. Vzorek byl vzduchotěsně a parotěsně izolován po obvodu epoxidovou pryskyřicí, následně byl utěsněn plastelínou do hliníkové misky, která obsahovala nasycený roztok $K_2SO_4$ (RH v misce bylo 98 %). Změna hmotnosti vzorku byla zaznamenána pomocí vah v závislosti na čase. Měření se provádělo v uzavřeném „akváriu“, jehož počáteční RH bylo 0 %. Testování probíhalo v souladu s normou ČSN 72 7031 [113].

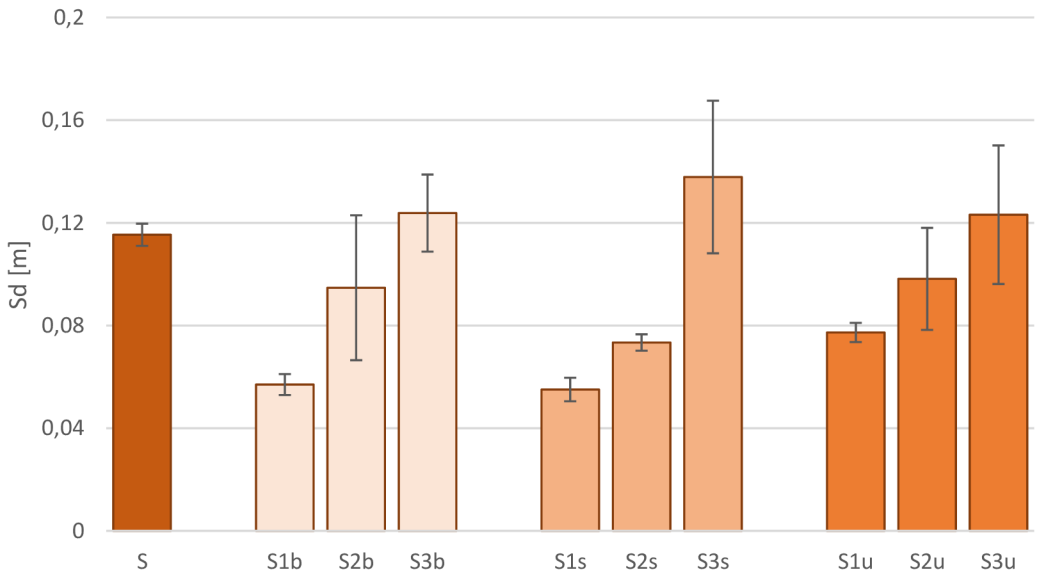
Měření transportu vodní páry bylo realizováno v Kloknerově ústavu v Praze. Vzhledem k rozsahu měření (množství vzorků a časové náročnosti) byla naměřena pouze jedna kompletní sada vzorků (1, 2 a 3 hm%, čedič, sklo uhlík) u sádrové omítky. Pro tento experiment byla s ohledem na všestranné použití a dobré mechanické vlastnosti (viz kapitola 3.5) vybrána sádrová omítka. U zbylých omítek (vápenná, vápeno-cementová, cementová) byl s ohledem na mechanické vlastnosti (viz. kapitola 3.5) měřen transport vodní páry pouze u vzorků s 1 hm% vlákenné výztuže.

Na obrázku 38 jsou znázorněny průměrné hodnoty faktoru difuzního odporu z 5 měření po 7 dnech. Pro každé množství vlákenné složky je uveden 95% IS. Sádrová omítka bez vlákenné výztuže dosahuje hodnoty $\mu$=5,8. Přidání 3 hm% vláken vede k nárůstu faktoru difuzního odporu z čehož vyplývá, že transport vodní páry bude těmito vzorky více omezen.




Obr. 38 Faktor difuzního odporu sádrového kompozitu

Na obrázku 39 jsou průměrné výsledky ekvivalentní difúzní tloušťky pro sádrové kompozity po 7 dnech. Tento parametr vyjadřuje, jakou tloušťku by musela mít vrstva vzduchu, aby kladla stejný odpor jako měřený vzorek. Nejvyšších hodnot dosahují vzorky S3s a S3u které dosahují ekvivalentní difúzní tloušťku 0,13 a 0,12 m.

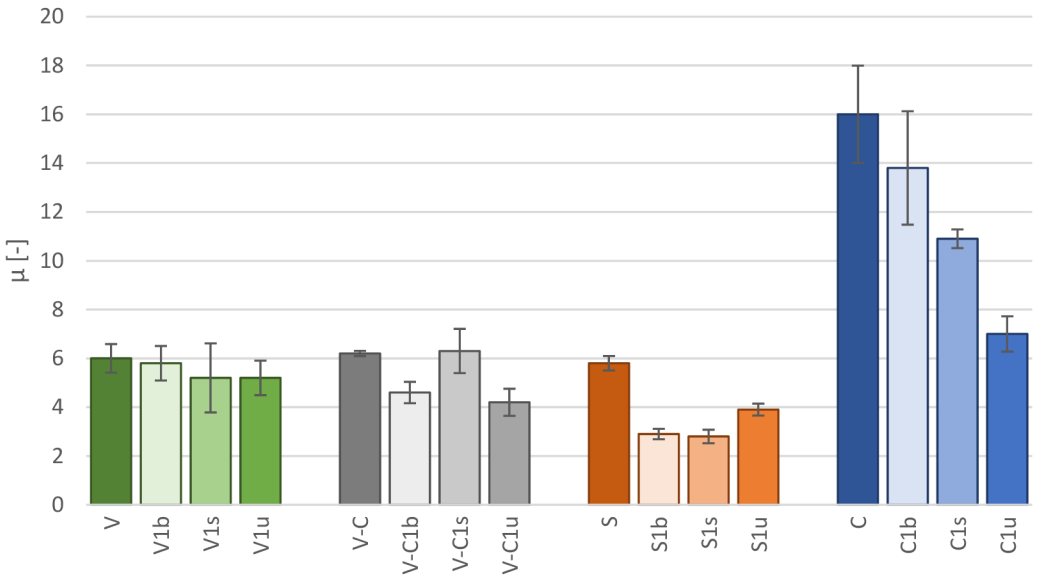



Obr. 39 Ekvivalentní difúzní tloušťka sádrových kompozitů

Na obrázku 40 jsou průměrné hodnoty faktoru difúzního odporu z 5 měření pro jednotlivé typy omítek s 1 hm% vlákenné výztuže po 7 dnech testování. Přidání 1 hm% vlákenné výztuže vede ke snížení hodnoty faktoru difúzního odporu pro vápennou, sádrovou a cementovou omítku. Výjimku tvoří vápeno-cementová omítka, kde vzorek s 1 hm% skleněných vláken (V-C1s) dosahuje obdobné hodnoty $\mu$ (6,3) jako má samotná vápeno-cementová omítka. Vápeno-cementová omítka je termoizolační a přidání skleněné výztuže ve formě vlákenných svazečků může vést k snazšímu zaplňování pórů

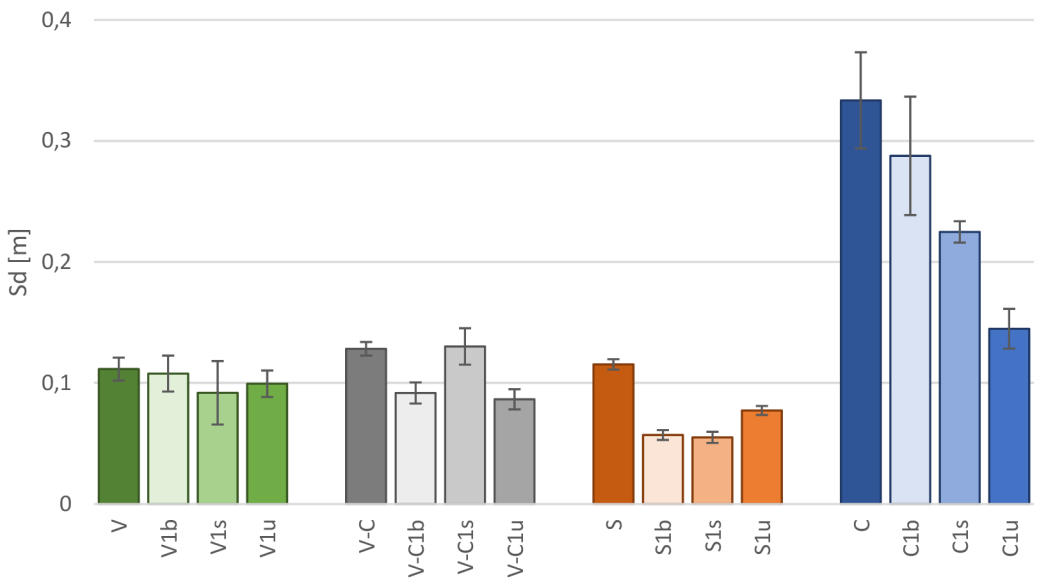
než u vzorků s čedičovými a uhlíkovými vlákny. A z tohoto důvodu může u těchto kompozitů docházet k obtížnějšímu transportu vodní páry.

Z výsledků je dále patrná vysoká hodnota faktoru difúzního odporu samotné cementové omítky. Cement má obecně pevnější a těsnější strukturu. Proto má voda tendenci zůstávat na povrchu, místo aby pronikala dovnitř. Vzhledem k těmto vlastnostem byla vyšší hodnota $\mu$ (16) v porovnání s ostatními omítkami předpokládaná. Zároveň se ukázalo, že největší vliv na snížení hodnoty faktoru difúzního odporu u cementového kompozitu má přidání 1 hm% uhlíkové výztuže.




Obr. 40 Faktor difuzního odporu omítkových kompozitů s 1 hm% vláken

Na obrázku 41 jsou průměrné výsledky ekvivalentní difúzní tloušťky pro omítkové kompozity s 1 hm% vláken po 7 dnech testování. Výsledky vápenné, vápeno-cementové a sádrové omítky jsou srovnatelné a dosahují průměrné hodnoty ekvivalentní difúzní tloušťky 0,1 m. Nejvyšší hodnoty $S_d$ dosahuje samotná cementová omítka a omítka s 1 hm% čedičových vláken (0,3 m). V tabulce 20 a 21 jsou zaznamenány průměrné hodnoty faktoru difúzního odporu a ekvivalentní difúzní tloušťky.




Obr. 41 Ekvivalentní difúzní tloušťka omítkových kompozitů s 1 hm% vláken

Tab. 20 Průměrné hodnoty faktoru difúzního odporu $\mu$ [-] omítkových kompozitů

| | | Krátká vlákna | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | čedič (basalt) | | | sklo | | | uhlík | | |
| omítka | 0 % | 1 % | 2 % | 3 % | 1 % | 2 % | 3 % | 1 % | 2 % | 3 % |
| **Vápenná** | 6,0 | 5,8 | - | - | 5,2 | - | - | 5,2 | - | - |
| **Vápeno-cementová** | 6,2 | 4,6 | - | - | 6,3 | - | - | 4,2 | - | - |
| **Sádrová** | 5,8 | 2,9 | 4,0 | 6,0 | 3,8 | 2,8 | 6,8 | 3,9 | 4,8 | 6,0 |
| **Cementová** | 16,0 | 13,8 | - | - | 10,9 | - | - | 7,0 | - | - |

*uvedené množství vlákenné výztuže je v hm%

Tab. 21 Průměrné hodnoty ekvivalentní difúzní tloušťky $S_d$ [m] omítkových kompozitů

| | | Krátká vlákna | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | čedič (basalt) | | | sklo | | | uhlík | | |
| omítka | 0 % | 1 % | 2 % | 3 % | 1 % | 2 % | 3 % | 1 % | 2 % | 3 % |
| **Vápenná** | 0,11 | 0,11 | - | - | 0,09 | - | - | 0,10 | - | - |
| **Vápeno-cementová** | 0,13 | 0,09 | - | - | 0,13 | - | - | 0,09 | - | - |
| **Sádrová** | 0,12 | 0,06 | 0,08 | 0,12 | 0,06 | 0,07 | 0,14 | 0,08 | 0,10 | 0,12 |
| **Cementová** | 0,33 | 0,29 | - | - | 0,22 | - | - | 0,14 | - | - |

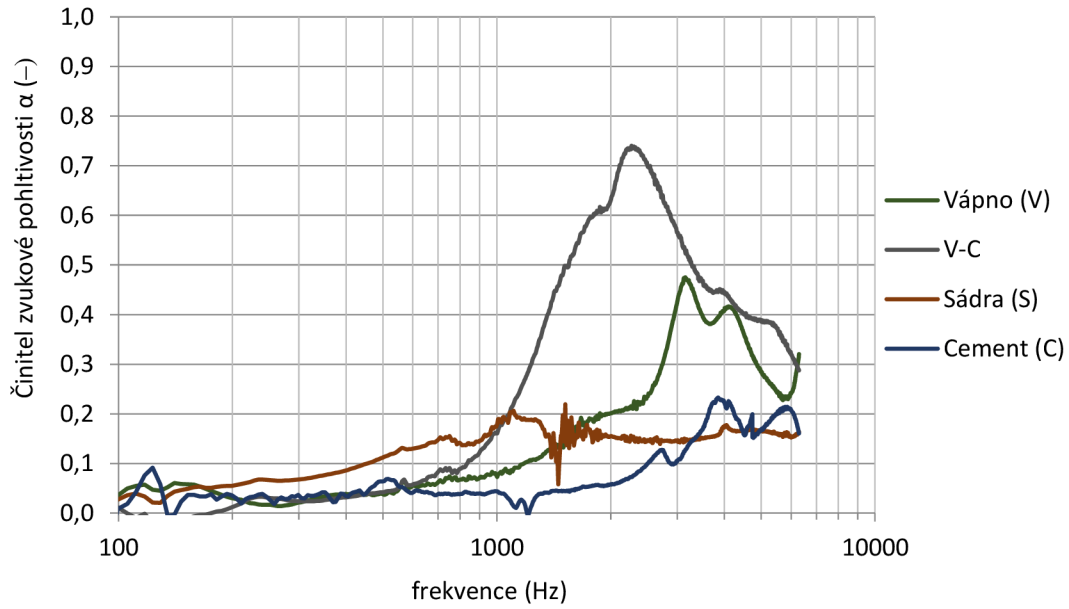
*uvedené množství vlákenné výztuže je v hm%

Z provedeného experimentu plynou tato zjištění:

- Faktor difúzního odporu sádrových kompozitů roste s přibývajícím množstvím vláken.
- Ekvivalentní difúzní tloušťka sádrových kompozitů dosahuje nejnižších hodnot přidáním 1 hm% vlákenné výztuže.

## 3.7 Akustické vlastnosti

Akustická pohltivost byla měřena na impedanční trubici podle normy ČSN ISO 10534-2 [121]. Schéma měřícího zařízení je na obr. 14 v kapitole 2.3.3. Impedanční trubice se skládá z trubice malého průměru, která je vhodná pro měření činitele zvukové pohltivosti při větších frekvencích (500 – 6400 Hz) a z velké trubice umožňující měření činitele zvukové pohltivosti při malých frekvencích (0 – 1600 Hz). Při frekvenci <500 – 1600> Hz se jedná o přechodovou oblast mezi oběma trubicemi. Proto byly pro toto měření vyrobeny dvě sady vzorků s průměrem 100 mm a 29 mm a tloušťkou 10 mm. Od každého typu vzorku bylo zhotoveno 5 ks. Činitel zvukové pohltivosti byl stanoven dle vztahů z kapitoly 2.3.3 (jedná se o průměrnou hodnotu z 5 měření).




Obr. 42 Činitel zvukové pohltivosti pro jednotlivé typy omítek

Na obrázku 42 je znázorněna závislost průměrných hodnot činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro jednotlivé typy omítek. Z výsledků je patrné, že nejvyšší pohltivosti dosahuje vápeno-cementová omítka.

Fyzikálním principem pohlcování zvuku je přeměna části zvukové energie na teplo. V momentě, kdy akustická vlna pronikne do porézního materiálu, jsou molekuly vzduchu nuceny vibrovat v pórech a ztrácejí energii. To se děje v důsledku tření o povrch částic tvořící strukturu materiálu.

Vzhledem k tomu, že vápeno-cementová omítka je termo-izolační a obsahuje duté křemičité kuličky a tyto kuličky dále ještě vytváří póry v omítce (obr. 43), je možné vysoký činitel zvukové pohltivosti předpokládat. Omítka má činitel zvukové pohltivosti 0,73 při frekvenci 2425 Hz (objemová hmotnost je 116 $kg \cdot m^{-3}$). U vápenné omítky má křivka činitele zvukové pohltivosti dva vrcholy. To znamená, že má dvě dominantní absorpční frekvence. První vrchol křivky zvukové pohltivosti vápenné omítky je 3375 Hz a dosahuje činitele 0,47 a druhá dominantní frekvence je 4523 Hz. Cementová a sádrová

omítka vykazují podobné výsledky zvukové pohltivosti jejich činitel zvukové pohltivosti je kolem hodnoty 0,2. V tabulce 22 jsou uvedeny průměrné hodnoty objemové hmotnosti pro jednotlivé typy omítek.

Obr. 43 Řez vápeno-cementovou omítkou

Tab. 22 Objemová hmotnost pro jednotlivé druhy kompozitů [kg·m$^{-3}$]

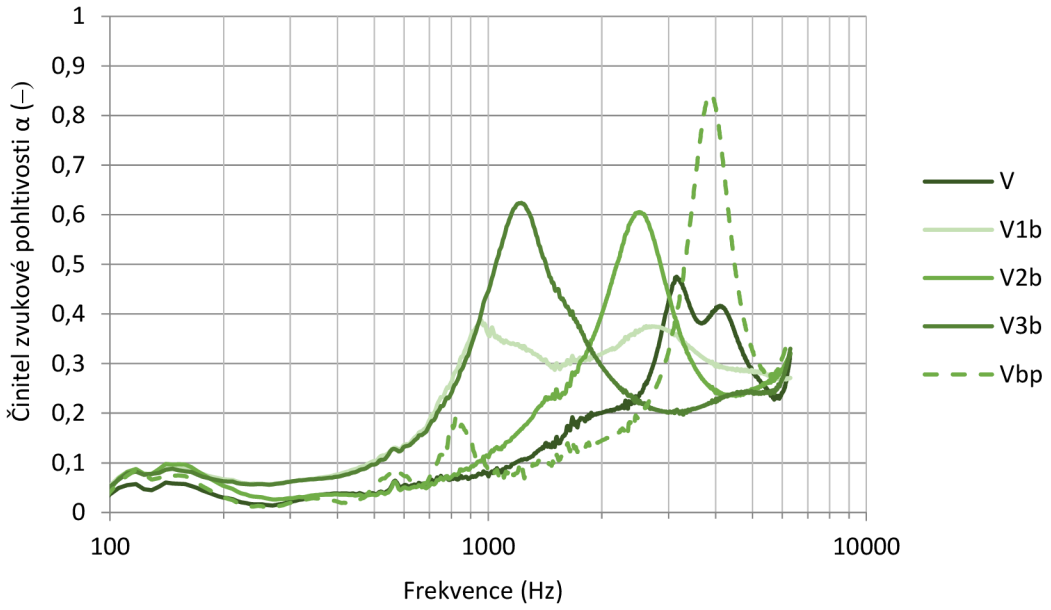
| | | krátká vlákna | | | | | | | | | perlinka | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **čedič (basalt)** | | | **sklo** | | | **uhlík** | | | čedič | sklo |
| omítka | 0% | 1% | 2% | 3% | 1% | 2% | 3% | 1% | 2% | 3% | | |
| **Vápenná** | 335 | 358 | 281 | 274 | 318 | 316 | 314 | 330 | 360 | 363 | 342 | 349 |
| **Vápeno-Cementová** | 66 | 74 | 81 | 87 | 93 | 104 | 118 | 81 | 94 | 99 | 109 | 129 |
| **Sádrová** | 249 | 211 | 203 | 199 | 221 | 229 | 209 | 235 | 229 | 223 | 216 | 212 |
| **Cementová** | 447 | 390 | 309 | 284 | 391 | 282 | 213 | 334 | 227 | 214 | 393 | 388 |

*uvedené množství vlákenné výztuže je v hm%

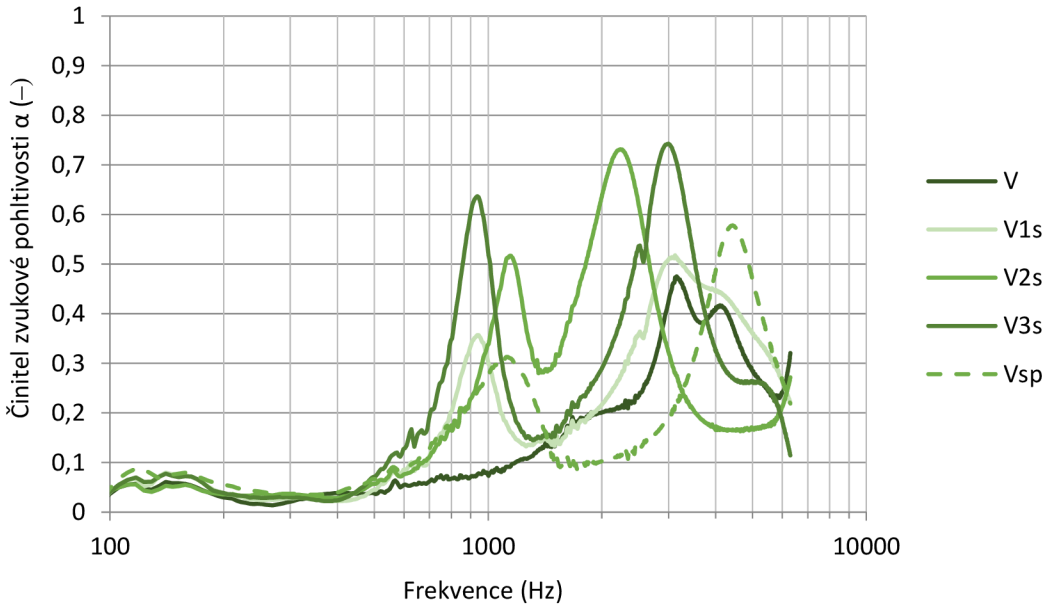
### 3.7.1 Vliv množství vlákenné výztuže na akustickou pohltivost omítkového kompozitu

U vápenného kompozitu s čedičovou výztuží (obr. 44a) dochází v porovnání s vápenným materiálem bez výztuže k rozšíření spektra pohlcovaných frekvencí při současném mírném poklesu (kolem frekvence 3 – 4 kHz) činitele zvukové pohltivosti při přidání 1 hm%. Průběh této křivky má 2 rezonanční píky, které dosahují stejných hodnot $\alpha$ (0,38). U vzorků se 2 a 3 hm% získáváme srovnatelné hodnoty činitele zvukové pohltivosti 0,6 a 0,62, rozdíl u těchto vzorků spočívá ve frekvenci, při které dosahují svého maxima (V2b rezonuje při frekvenci 2625 Hz, V3b při frekvenci 1260 Hz). Nejvyššího činitele zvukové pohltivosti bylo dosaženo u kompozitu s čedičovou perlinkou (0,84) při frekvenci 3926 Hz, kde došlo ke zlepšení vzhledem k samotné omítce o 78,7 %.

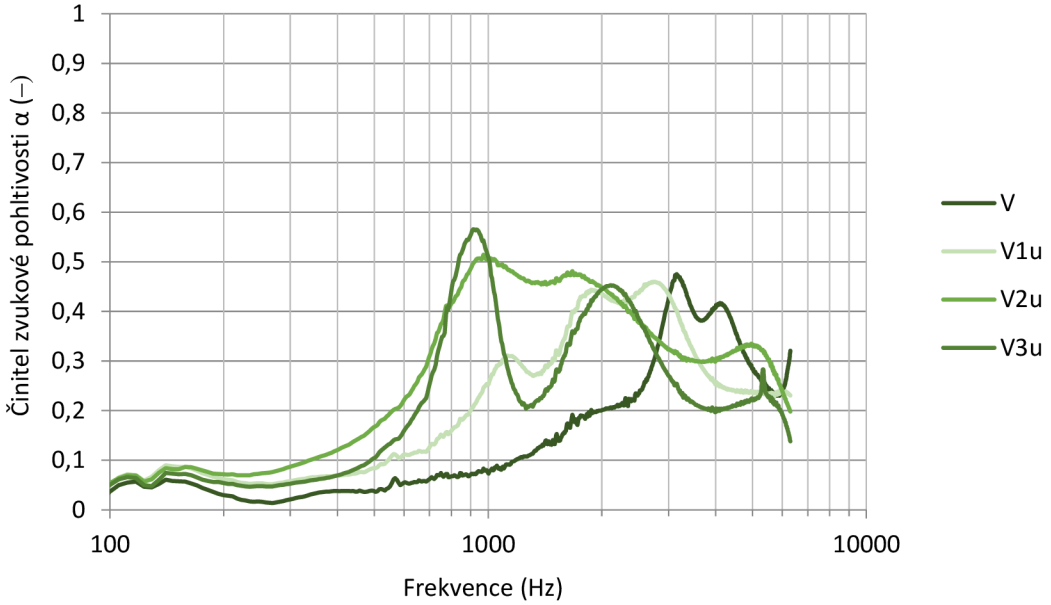
Při porovnání výsledků vápenných vzorku se skleněnými vlákny (obr. 44b) dosahují vzorky se 2 a 3 hm% obdobných hodnot α (0,72 a 0,73) při frekvencích 2309 a 3064 Hz. U těchto vzorků došlo k nárůstu α o 53,2 a 55,3 %. K nárůstu došlo také u vzorku se skleněnou perlinkou (21,3) při frekvenci 4564 Hz (α = 0,57). U vzorku V1s došlo pouze k nepatrnému nárůstu činitele α v porovnání s nevyztuženou omítkou.




a) Čedičová vlákna



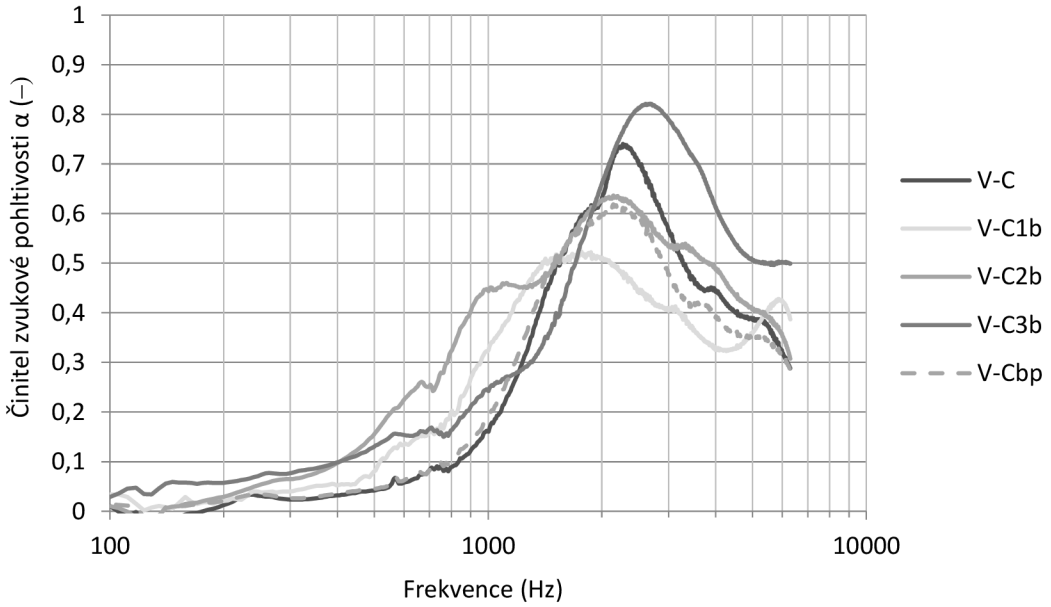

b) Skleněná vlákna



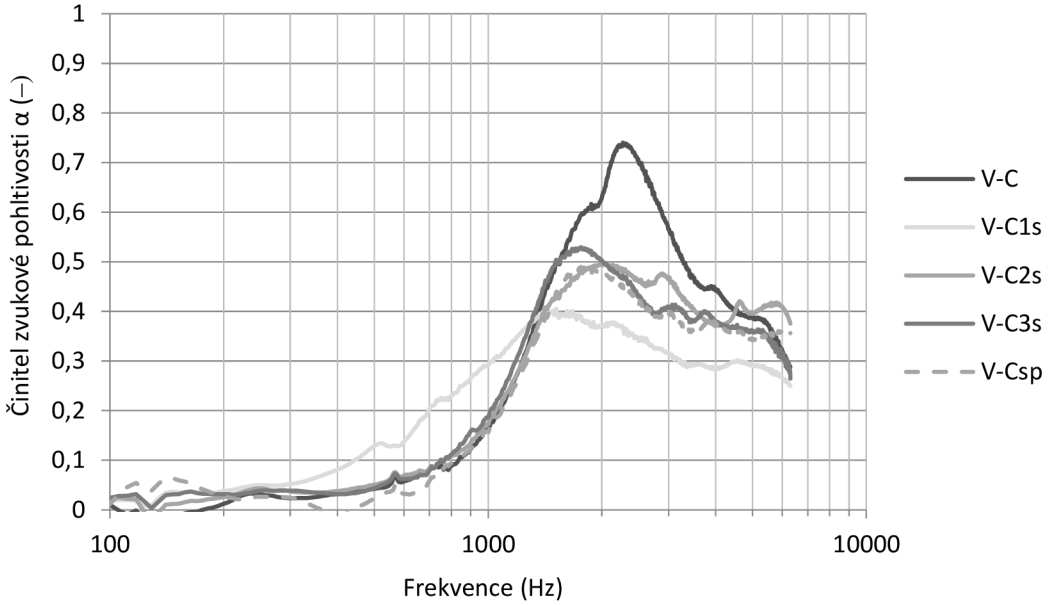

c) Uhlíková vlákna

Obr. 44 Vliv typu vlákenné výztuže na činitele akustické pohltivosti vápenné omítky

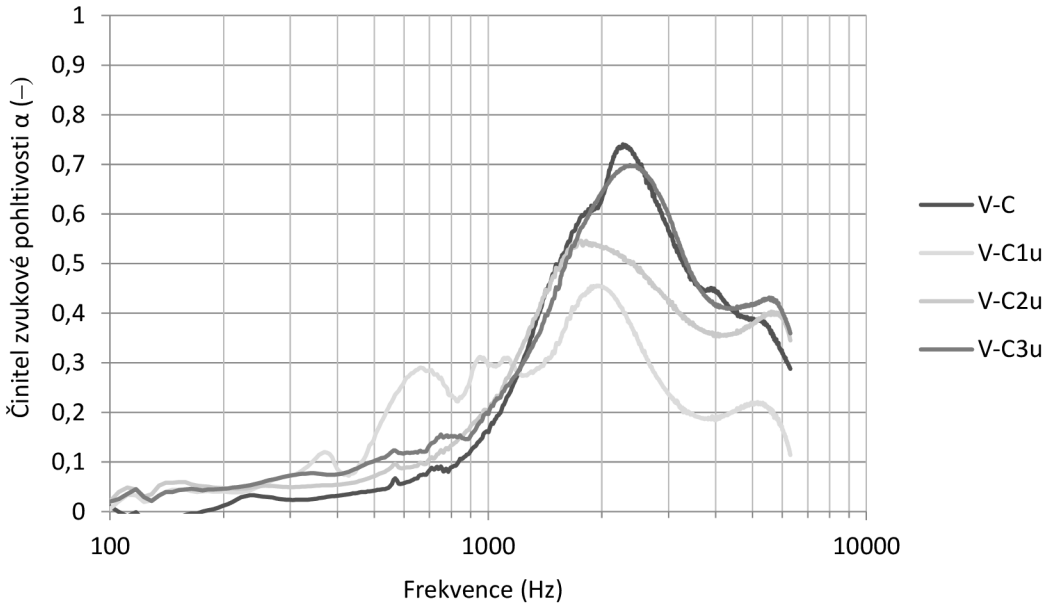
U vápenných vzorků s uhlíkovými vlákny (obr. 44c) došlo k rozšíření spektra pohlcovaných frekvencí při současném mírnému poklesu pohlcovaného maxima směrem k nižším frekvencím. Činitel zvukové pohltivosti vzorku V1u dosahuje hodnoty 0,45. K největšímu nárůstu (19,1 %) α oproti prázdnému vzorku došlo u omítky se 3 hm% (0,56). Tento vzorek má 2 dominantní píky, a to při frekvencích 949 Hz a 2203 Hz.




a) Čedičová vlákna




b) Skleněná vlákna




c) Uhlíková vlákna

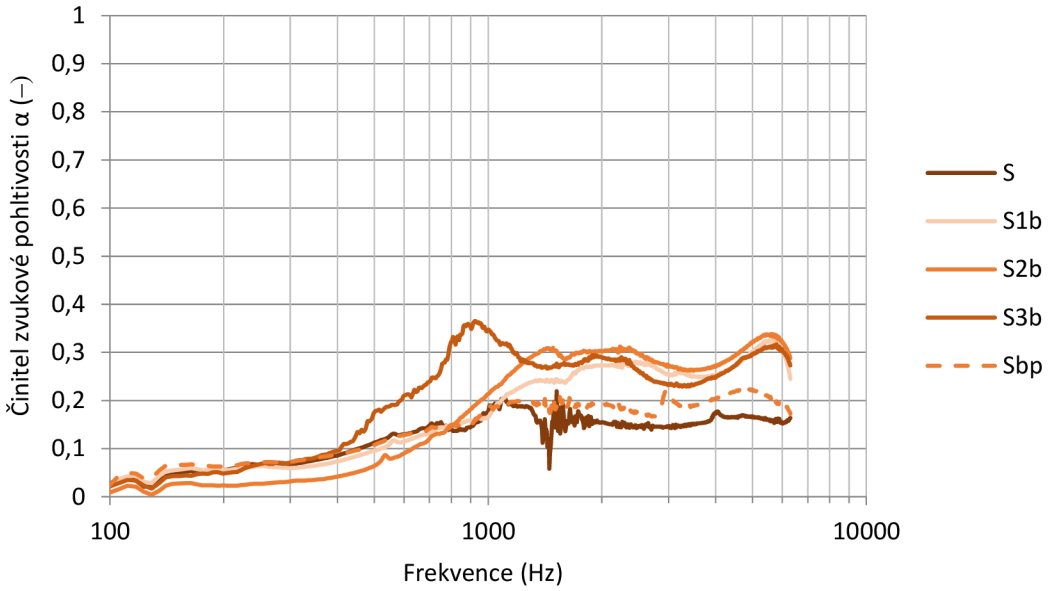
Obr. 45 Vliv typu vlákenné výztuže na činitele akustické pohltivosti vápeno-cementové omítky

Vápeno-cementová omítka obsahuje duté křemičité kuličky, které vytvářejí ve struktuře omítky póry. Tento fakt se projevil na hodnotě činitele zvukové pohltivosti samotné omítky (0,73) bez vlákenné výztuže.

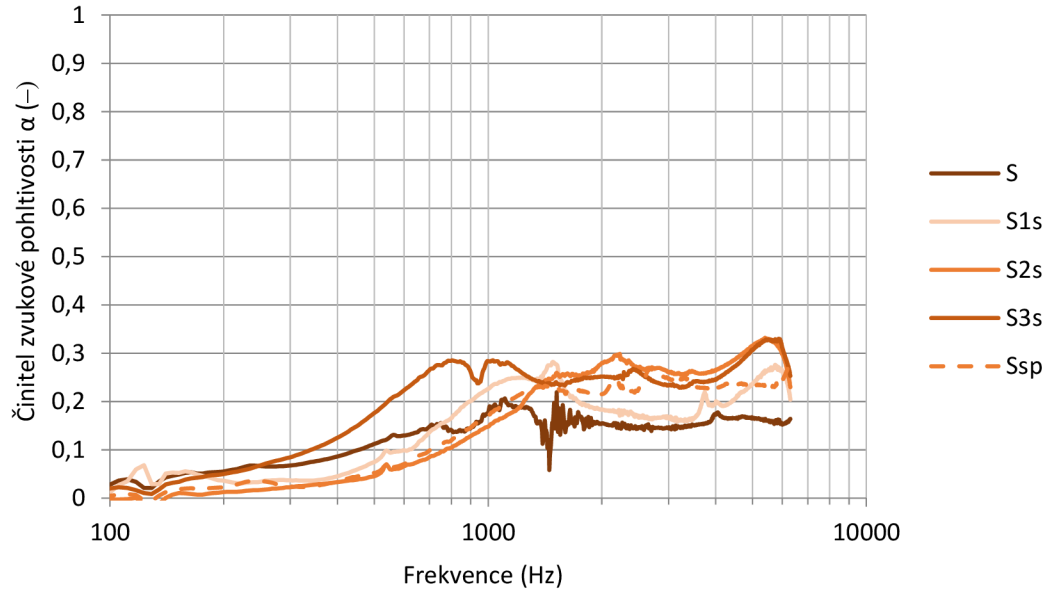
Na obrázku 45a je znázorněn průběh α vzorků s čedičovými vlákny. Z výsledků je patrný nárůst (12,3 %) činitele zvukové pohltivosti pouze u 3 hm% při frekvenci 2725 Hz. U vzorku V-C1b došlo k poklesu α o 30,1 % a Vzorky V-C2b a V-Cbp mají

obdobné hodnoty jako samotná omítka. Důvodem může být fakt, že vlákna tu budou sloužit spíše jako plnivo a budou vyplňovat póry, které křemičité kuličky vytváří ve struktuře.

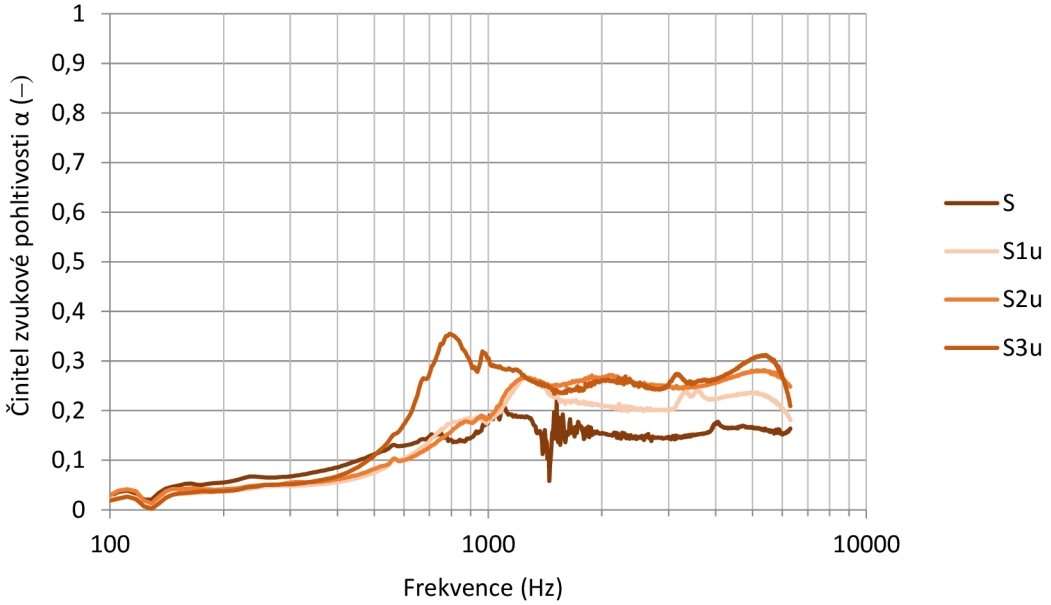
Z výsledků na obrázcích 45b a 45c je patrné, že přidání skleněných a uhlíkových vláken nevede k nárůstu činitele zvukové pohltivosti. Pouze vzorek se 3 hm% uhlíkových vláken se přibližuje hodnotě α samotné omítky (0,69) a rezonuje při frekvenci 2479 Hz (pokles o 5,5 %). U vzorků V-C1s a V-C1u můžeme pozorovat, že se průběh činitele zvukové pohltivosti od frekvence 400 Hz do 1000 Hz výrazně liší od ostatních vzorků a nabývá tu vyšších hodnot α.




a) Čedičová vlákna



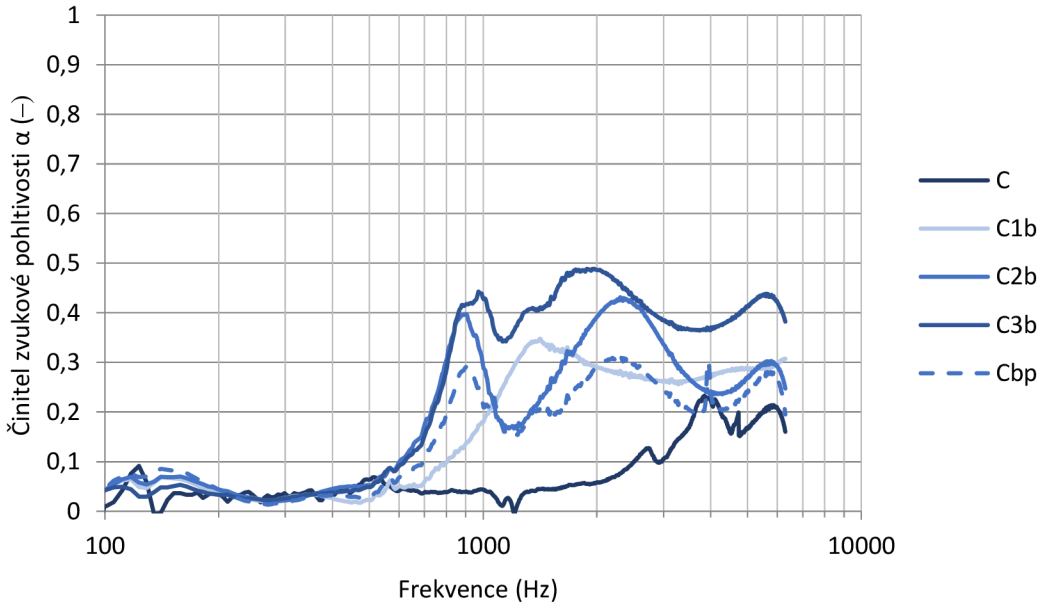

b) Skleněná vlákna



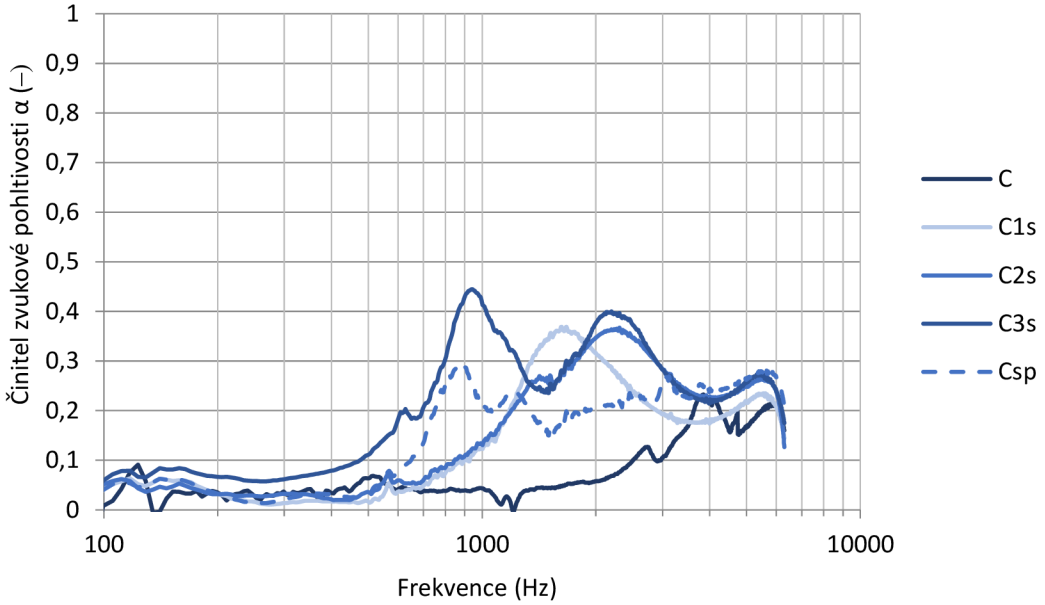

c) Uhlíková vlákna

Obr. 46 Vliv typu vlákenné výztuže na činitele akustické pohltivosti sádrové omítky

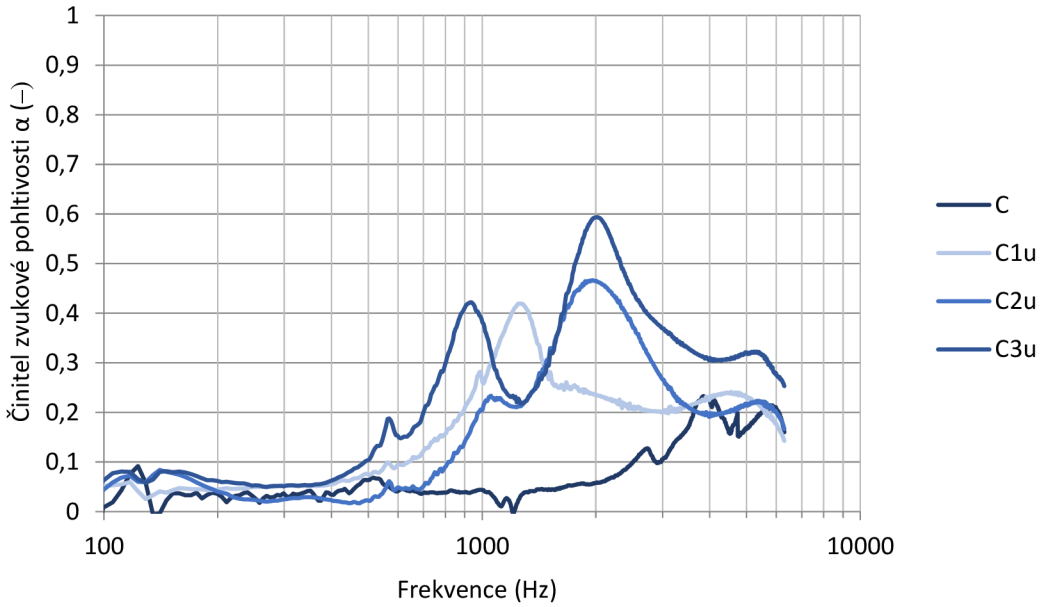
Při porovnání výsledků sádrové omítky (obr. 46) se zbylými typy omítek, nevykazují vzorky s vlákennou výztuží výrazného zlepšení oproti prázdnému vzorku. To by mohlo být dáno tím, že vlákna v omítce nemají možnost kmitat, a tudíž tu nedochází k žádné výraznější rezonanci. Nejvyšší hodnoty činitele zvukové pohltivosti dosahují vzorky S3b (0,36), S3s (0,33) a S3u (0,35), u těchto vzorků došlo k nárůstu α o 63,6; 50 a 59,1 %. Přičemž vzorky S3b (938 Hz) a S3u (814 Hz) rezonují při podobných frekvencích.




a) Čedičová vlákna




b) Skleněná vlákna




c) Uhlíková vlákna

Obr. 47 Vliv typu vlákenné výztuže na činitele akustické pohltivosti cementové omítky

Činitel zvukové pohltivosti cementové omítky dosahuje hodnoty 0,23 při frekvenci 3984 Hz. Přidání vlákenné výztuže (čedič, sklo, uhlík) vede obecně ke zvýšení činitele zvukové pohltivosti. Z průběhů křivek je patrný nárůst činitele zvukové pohltivosti u vzorků s výztuží od frekvence 500 Hz, u samotné omítky bez výztuže dochází k nárůstu až kolem frekvence 1100 Hz.

U čedičové výztuže (obr. 47a) dosahují vzorky se 3 hm% (0,49) a 2 hm% (0,42) podobných hodnot α při frekvencích 1893 Hz a 2432 Hz. U těchto vzorků dochází k nárůstu o 113 % a 82,6 %.

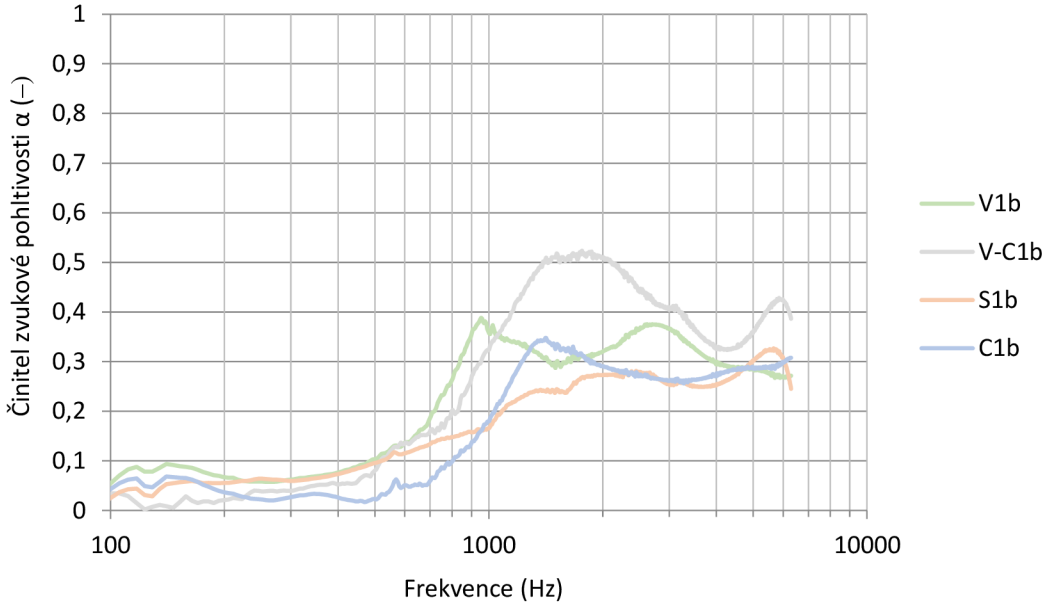
Z obrázku 47b lze vidět nejvyšší nárůst (91,3 %) α u vzorku C3s (0,44). Vzorky C2s a C1s dosahují stejné hodnoty $\alpha$ (0,36), avšak při frekvencích (1693 Hz a 2338 Hz) a dochází tu k nárůstu o 56,5 %.

Cementový kompozit se 3 hm% uhlíkových vláken dosáhl hodnoty $\alpha$ 0,59 při frekvenci 2063 Hz. Při stejné frekvenci rezonuje i vzorek se 2 hm% uhlíkových vláken (0,46). U těchto vzorků došlo k nárůstu α o 156,5 a 100 %.

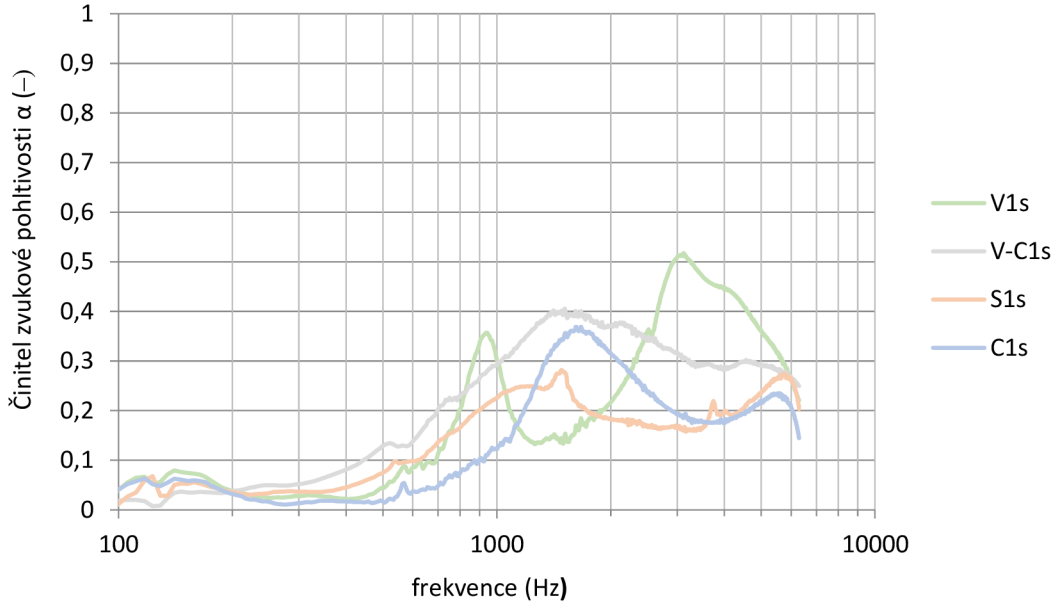
### 3.7.2 Vliv matrice na akustickou pohltivost omítkového kompozitu

Pokud porovnáme výsledky činitele akustické pohltivosti vzorků s 1 hm% čedičových vláken (obr. 48a) je patrné, že nejvyšší hodnoty dosahoval kompozit z vápenocementové omítky (objemová hmotnost V-C1b je 74 $kg \cdot m^{-3}$). Vápeno-cementová omítka je termoizolační (obsahuje křemičité kuličky) a přesto, že v porovnání s ostatními omítkami dosahuje vzorek V-C1b nevyšší hodnoty α v porovnání s prázdnou omítkou došlo poklesu o 30,1 %. Důvodem tohoto poklesu by mohlo být zaplnění dutinek, které vytvořily křemičité kuličky, vlákny.

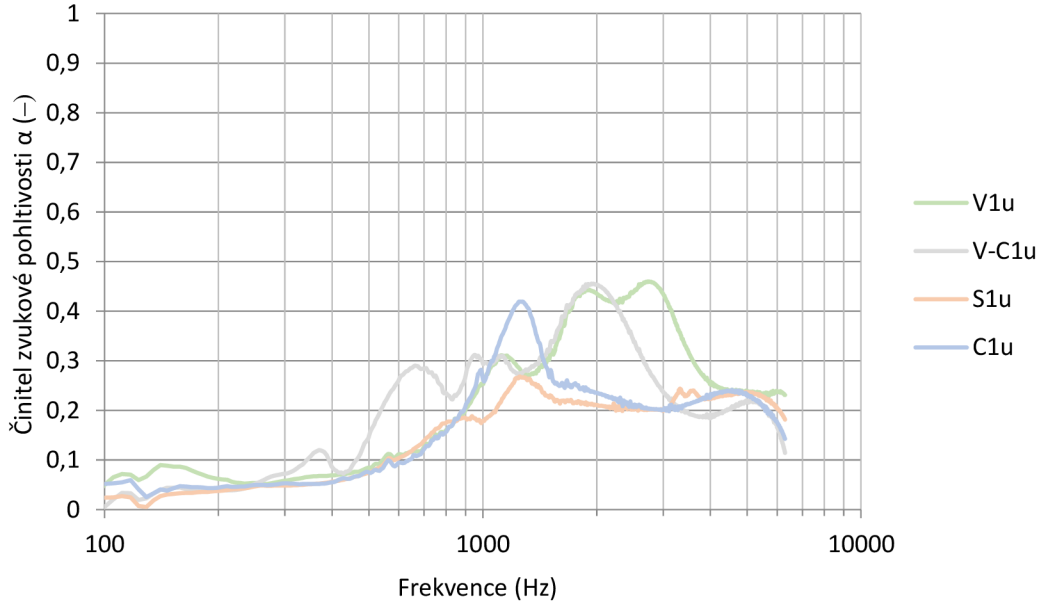
Na obrázku 48b jsou výsledky kompozitu s 1 hm% skleněných vláken. U vápenné omítky, která dosahovala nejvyšší hodnoty α (0,51) jsou patrné dvě dominantní absorpční frekvence 955 a 3223 Hz. Ostatní druhy omítek s 1 hm% skleněných vláken rezonují kolem hodnoty 1500 Hz.




a) Čedičová vlákna



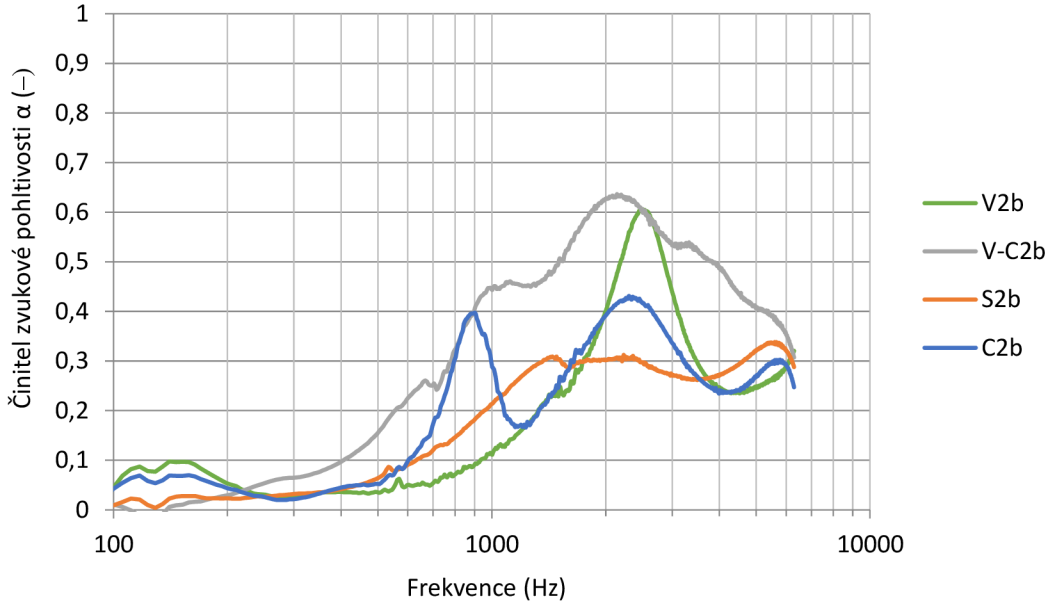

b) Skleněná vlákna



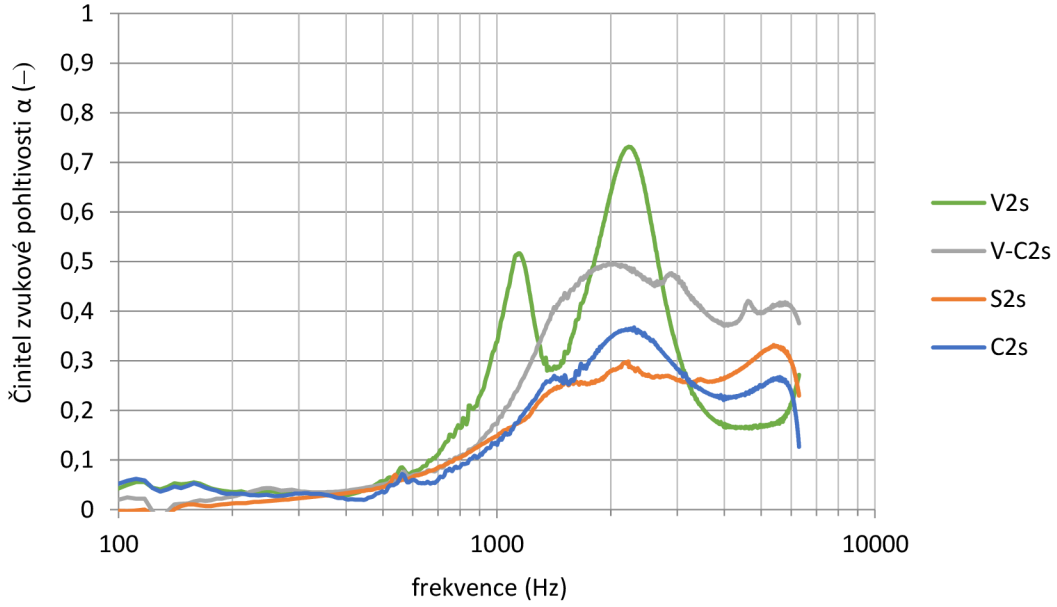

c) Uhlíková vlákna

Obr. 48 Vliv přidání 1 hm% vláken na činitele zvukové pohltivosti

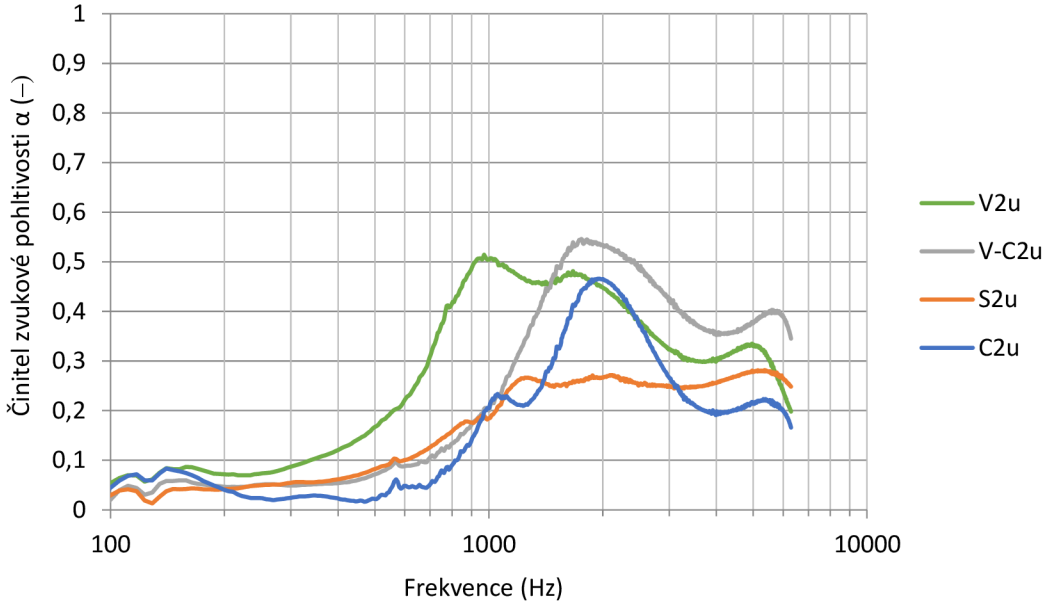
U kompozitů s 1 hm% uhlíkových vláken (obr. 48c) se pohybují hodnoty α v rozmezí 0,4 – 0,5 pro vápennou, vápeno-cementovou a cementovou omítku. Objemová hmotnost pro vzorek V1u je 330 kg·m$^{-3}$, pro vzorek V-C1u 81 kg·m$^{-3}$ a pro C1u 334 kg·m$^{-3}$. Přesto že má V-C omítka nejnižší hustotu, v kombinaci s uhlíkovými vlákny dochází k zaplňování pórů ve struktuře omítky, a tím i k výraznému poklesu zvukové pohltivosti vzorku (v porovnání se samotnou omítkou).




a) Čedičová vlákna




b) Skleněná vlákna

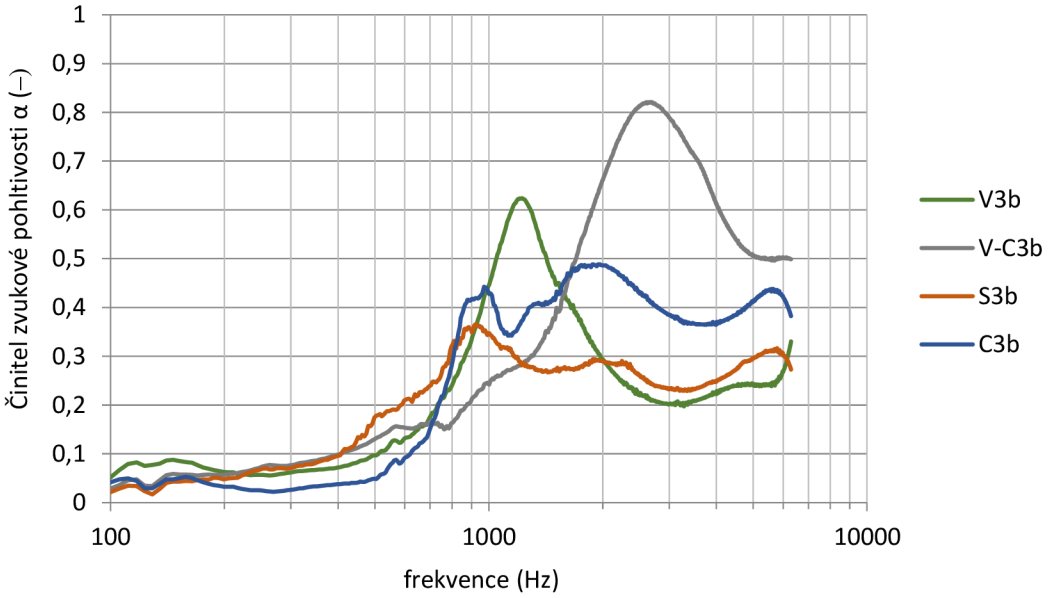



c) Uhlíková vlákna

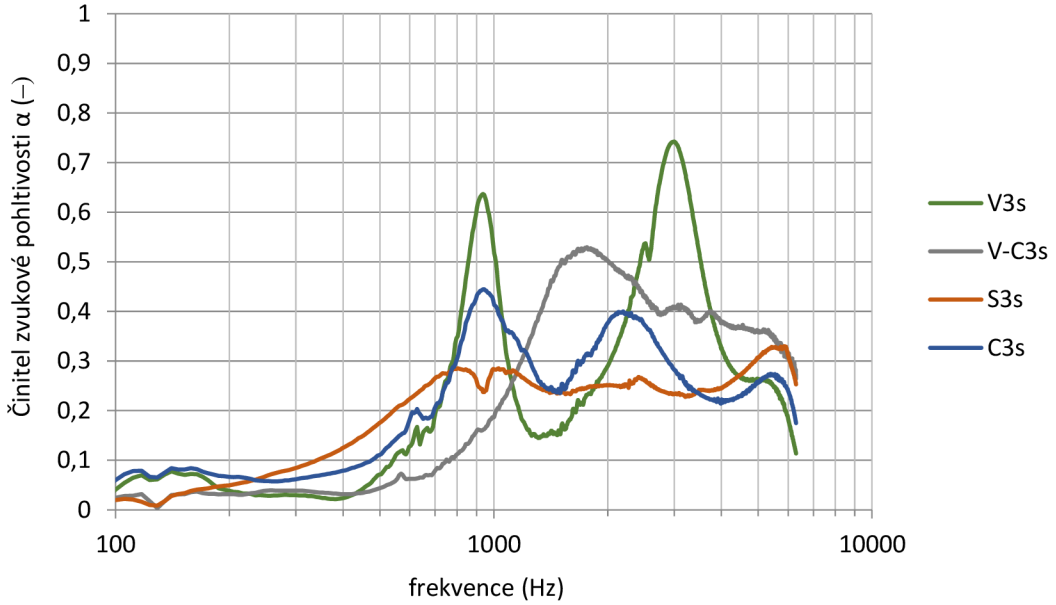
Obr. 49 Vliv přidání 2 hm% vláken na činitele zvukové pohltivosti

Vápenná omítka se 2 a 3 hm% čedičových vláken má činitele zvukové pohltivosti 0,6 a 0,62 (objemová hmotnost vzorků je 281 a 274 kg·m$^{-3}$), což značí, že stejné akustické pohltivosti dosáhneme i s menším množstvím vláken (2 hm%).

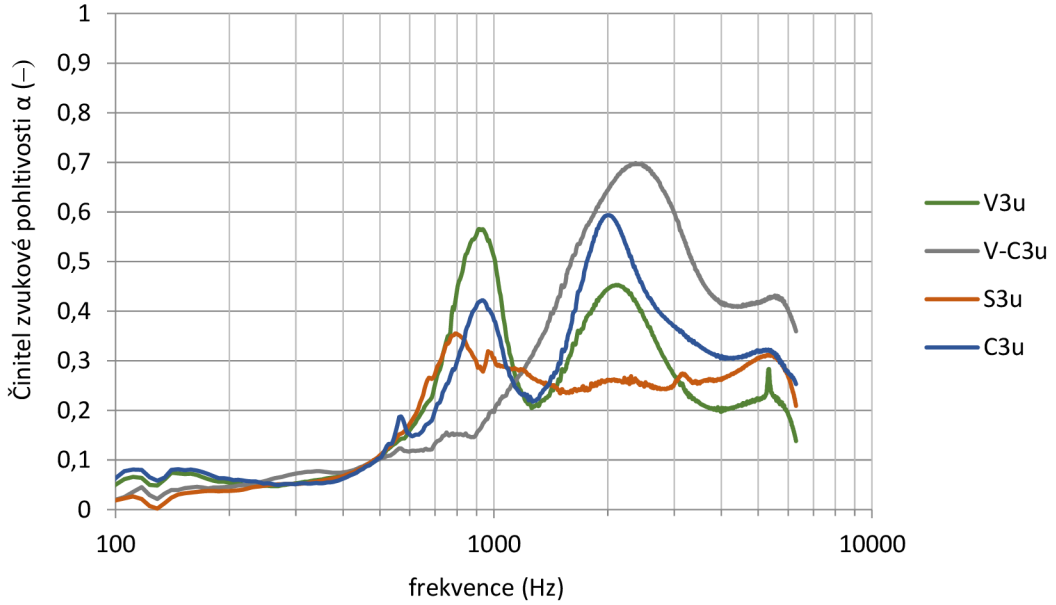
Nejlepších výsledků dosahují u vápenné omítky vlákna skleněná, která dosahují největší absorpce při frekvenci mezi 1000 - 2000 Hz. I zde se ukázal pouze nepatrný rozdíl mezi 2 a 3 hm% vláken (0,71; 0,73). Objemová hmotnost vzorků V2s a V3s je 316 a 314 kg·m$^{-3}$.




a) Čedičová vlákna




b) Skleněná vlákna




c) Uhlíková vlákna

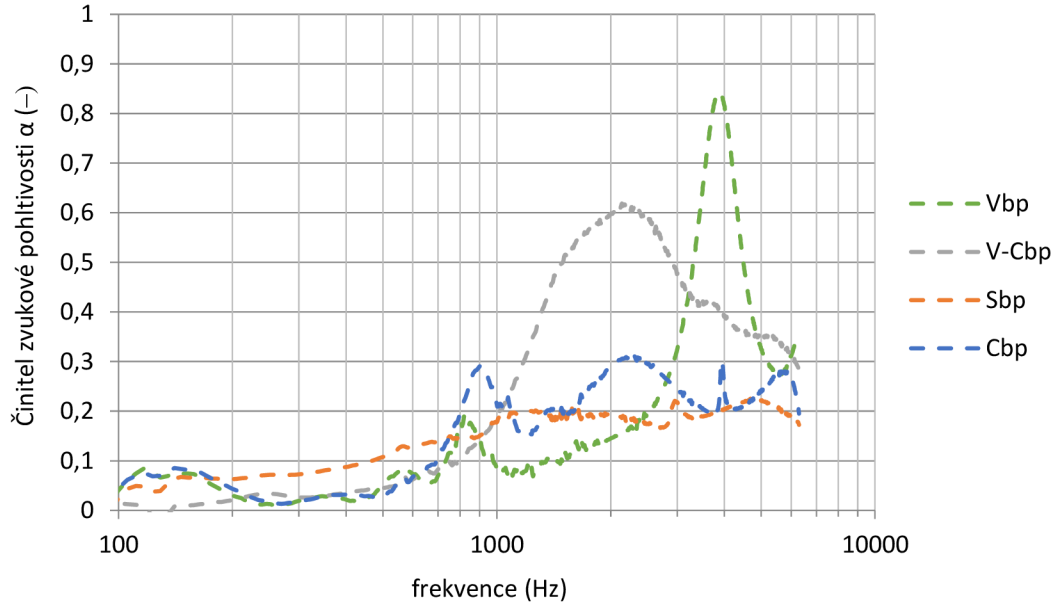
Obr. 50 Vliv přidání 3 hm% vláken na činitele zvukové pohltivosti

Sádrová omítka se 2 hm% vláken (sklo, čedič) vykazovala obdobné hodnoty činitele zvukové pohltivosti jako vzorky se 3 hm% vláken (obr. 49 a 50). Výjimku tvořila pouze vlákna uhlíková, kde rozdíl činitele mezi 2 a 3 hm% činil 1,25.

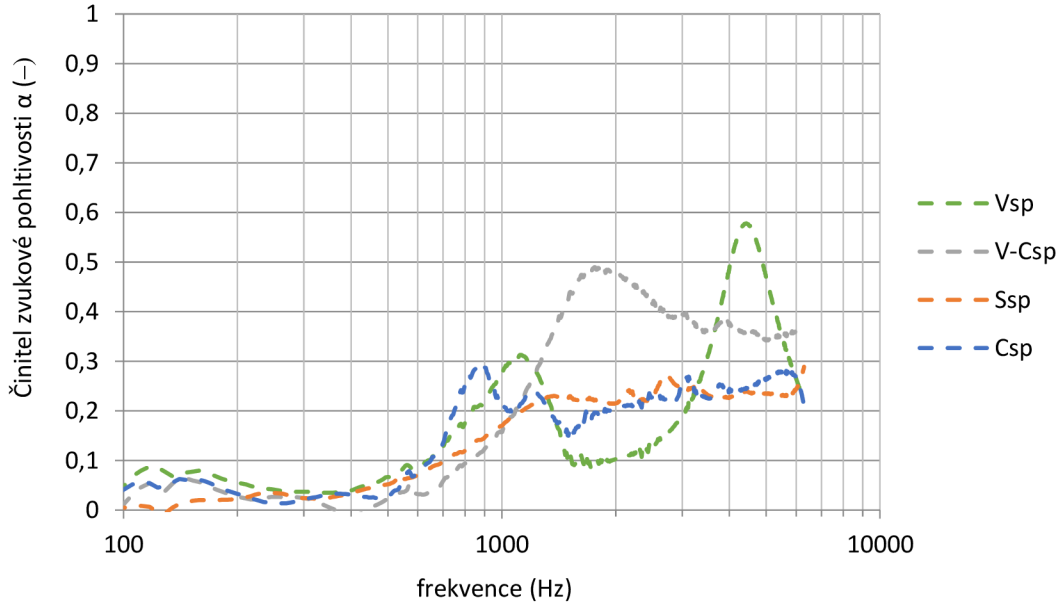
Při porovnání obrázků 48, 49 a 50 je patrný podobný trend výsledků. U kompozitů s čedičovými vlákny (1, 2 a 3 hm%) dosahuje nejvyšší hodnoty činitele zvukové pohltivosti vápeno-cementová omítka. Vápenná omítka má nejvyšší hodnotu

α se skleněnými vlákny a kompozity s uhlíkovými vlákny dosahují obdobných výsledků α u vápenné a cementové omítky.

Činitel zvukové pohltivosti u vzorků s perlinkou (obr. 51) je nejvyšší pro vápeno-cementovou a vápennou omítku. Vyšších výsledků α dosahují vzorky s čedičovou perlinkou, což by mohlo souviset s nižší objemovou hmotností těchto vzorků.




a) Čedičová perlinka




b) Skleněná perlinka

Obr. 51 Vliv perlinky na činitele zvukové pohltivosti

## 3.8 Hodnocení schopnosti materiálu stínit elektromagnetické pole

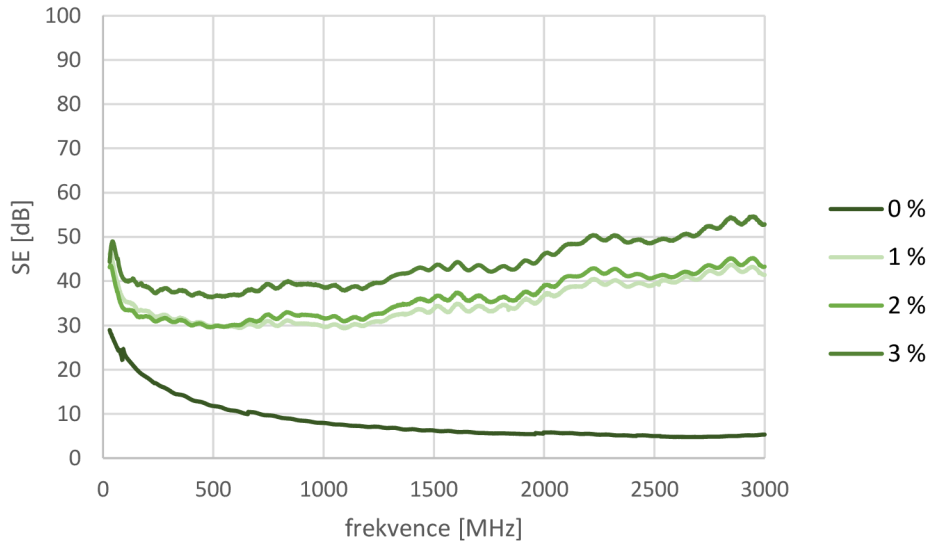
Účinnost elektromagnetického stínění (SE) jednotlivých vzorků byla měřena podle normy ASTM D 4935-18 [129]. Testovací zařízení je uvedeno na (obr. 16) v kapitole 2.3.4. Provedené testy byly v rozsahu 30 - 3000 MHz, což je nejrozšířenější pásmo používané pro veřejnou komunikaci a přenos dat. Pro experiment byla vyrobena testovací tělesa o rozměrech 100 x 100 x 10 mm. Aby měl materiál schopnost stínit elektromagnetické pole, musí být elektricky vodivý. Z toho důvodu byla jako výztuž pro tento experiment použita uhlíková vlákna. U ostatních vláken (sklo, čedič), které byly použity jako výztuž, nebyl předpoklad elektrické vodivosti, a tedy ani elektromagnetického stínění. Uhlíková vlákna byla použita v poměru 1, 2 a 3 hm%. Pro každý hm. poměr bylo vyrobeno 5 vzorků, umožňující další statistickou analýzu včetně odhadu polohy a variability hodnocené veličiny.

Účinnost elektromagnetického stínění byla měřena na testovacím zařízení (obr. 16), které se skládá z vektorového analyzátoru Rhode a Schwarz ZN3 a přerušeného koaxiálního vedení Electrometric model EM-2107A (držák vzorků). Měření probíhalo dle normy ASTM D 4935-18 v rozsahu 30 - 3000 MHz.

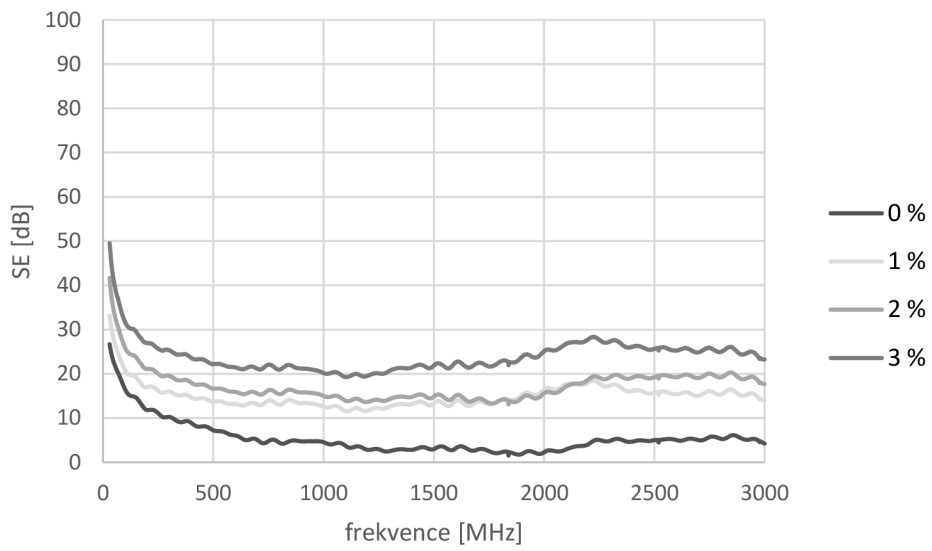
Studován bul vliv množství vlákenné výztuže, vliv matrice, vliv obsahu vlhkosti a vliv tloušťky kompozitu na výslednou hodnotu SE. Prostudovány jsou také jednotlivé mechanismy SE, které způsobují útlum elektromagnetického záření.

### 3.8.1 Vliv množství vlákenné výztuže na schopnost stínit elektromagnetické pole

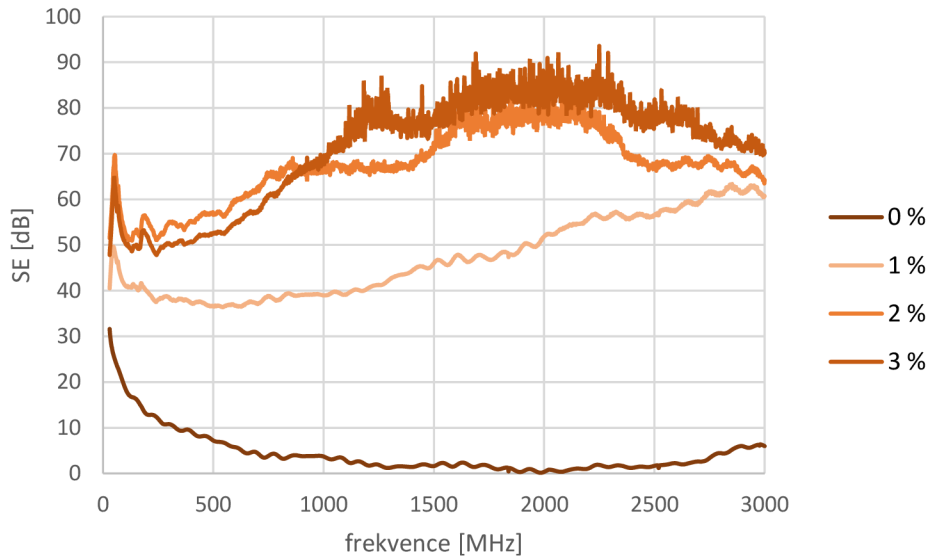
Pro tento experiment byla použita pouze uhlíková vlákna (u ostatních druhů výztuží nelze stínící schopnost předpokládat) v poměru 1, 2 a 3 hm%. Vzorky byly před samotným měřením klimatizovány po dobu 24 hodin při relativní vlhkosti vzduchu 65 ± 5 % a teplotě 20 ± 2 °C. Na obrázku 52 je zobrazena závislost SE na frekvenci pro vzorky, které se lišily jak obsahem vodivé komponenty, tak typem matrice.



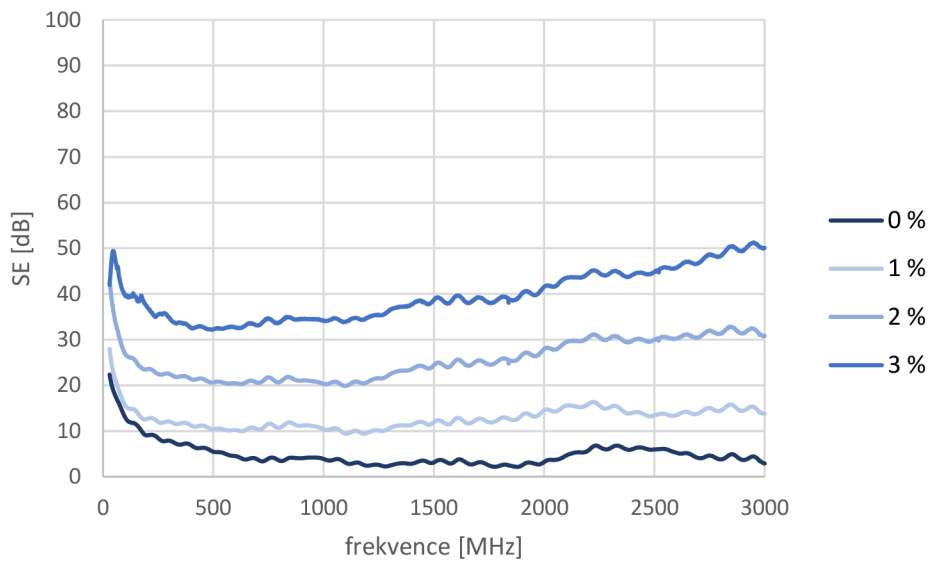

a) Vápenná omítka s uhlíkovými vlákny




b) Vápeno-cementová omítka s uhlíkovými vlákny




c) Sádrová omítka s uhlíkovými vlákny




d) Cementová omítka s uhlíkovými vlákny

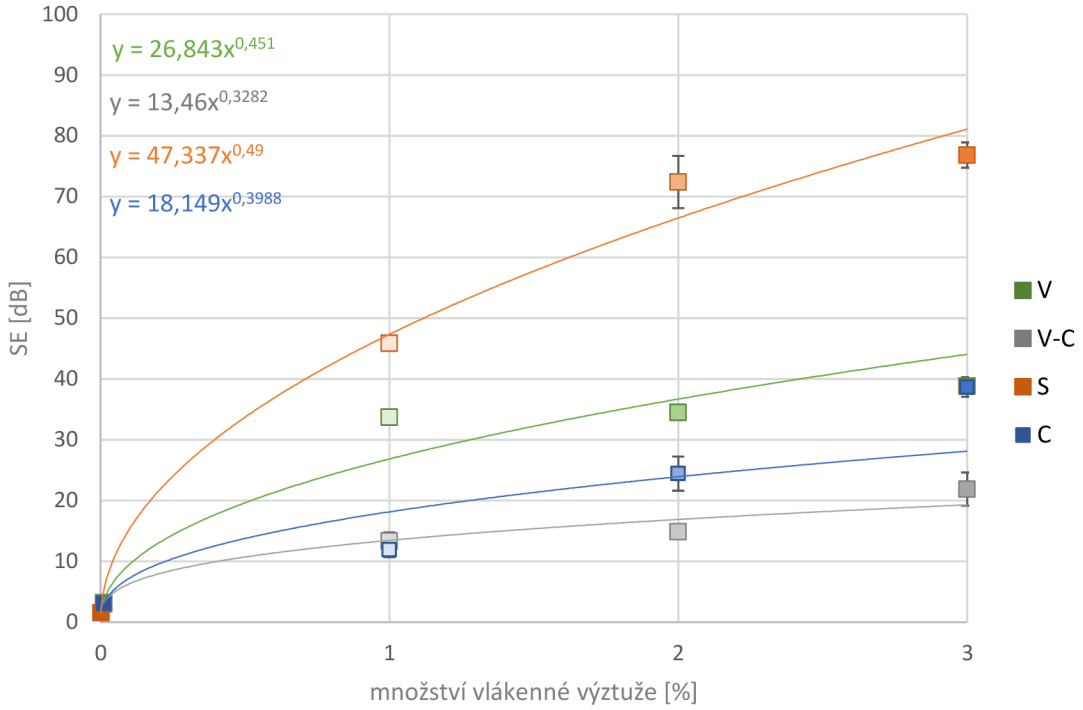
Obr. 52 Vliv vlákenného podílu na elektromagnetické stínění vzorku

Z výsledků je patrné, že se zvyšujícím se podílem uhlíkových vláken v matrici významně roste schopnost omítkových kompozitů stínit elektromagnetické pole, což potvrzuje teoretický rozbor. Navzdory této skutečnosti jsou kompozity s vyšším podílem uhlíkových vláken (3 hm%) méně vhodné s ohledem na zhoršení základních mechanických veličin (viz kapitola 8). Na obrázku 53 jsou znázorněny průměrné hodnoty SE při frekvenci 1500 MHz pro jednotlivé druhy omítek a pro dané množství výztuže. Pro každé množství vlákenné složky je uveden 95% IS. V grafu na obrázku je potvrzen významný vliv množství uhlíkových vláken na SE, přičemž čím vyšší množství uhlíkových vláken v kompoizitu, tím vyšší SE. Závislost množství vlákenné výztuže na SE je vyjádřena mocninou funkcí. Vhodnost použití tohoto modelu potvrzuje relativně vysoký koeficient determinace, a to 0,84 – 0,98.

Tab. 23.: Třídy elektromagnetické účinnosti pro profesionální použití

| Třída | 5<br>vynikající | 4<br>velmi dobrý | 3<br>dobrý | 2<br>průměrný | 1<br>uspokojující |
|---|---|---|---|---|---|
| Rozsah elektromagnetické účinnosti | SE > 60 dB | 60 dB ≥ SE > 50 dB | 50 dB ≥ SE > 40 dB | 40 dB ≥ SE > 30 dB | 30 dB ≥ SE > 20 dB |

Pokud porovnáme výsledky 1 a 2 hm% obsahu uhlíkových vláken s žebříčkem hodnot pro profesionální použití (tab. 23) zařadíme vzorky cementové omítky se 2 hm% uhlíkových vláken do skupiny „uspokojující“. Vzorky vápenné omítky s 1 i se 2 hm% uhlíkových vláken lze zařadit do skupiny „průměrný“ a vzorky sádrové omítky s 1 hm% vláken do skupiny „dobrý“ a se 2 hm% vláken do skupiny „vynikající“. Vápeno-cementová omítka při frekvenci 1500 MHz nedosáhla 20 dB, tudíž ji nelze zařadit do žádné ze tříd.




Obr. 53 SE pro jednotlivé typy omítek při frekvenci 1500 MHz

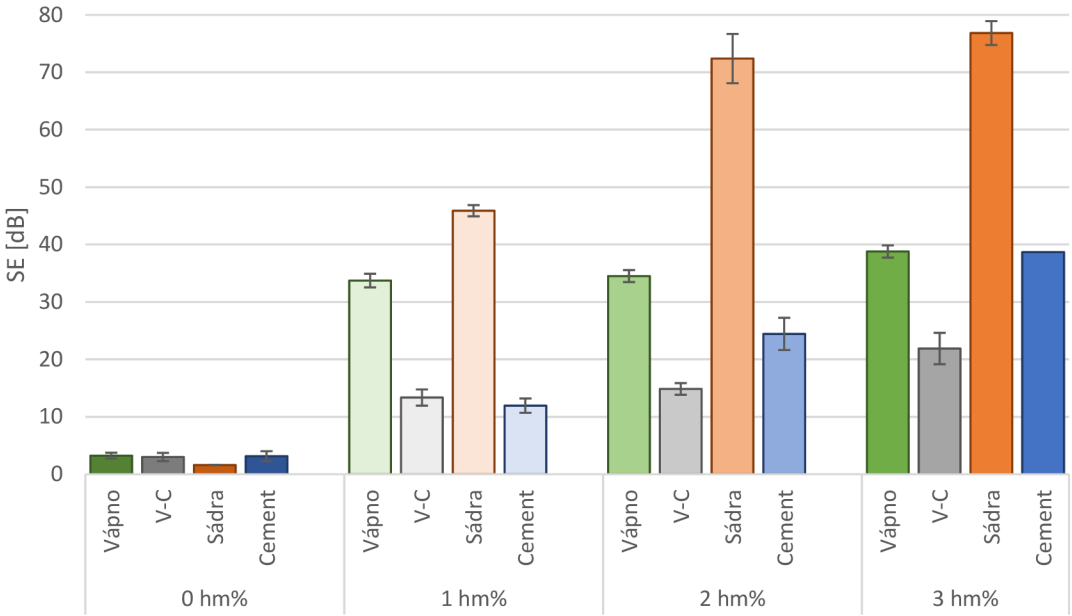
### 3.8.2 Vliv typu matrice na schopnost stínit elektromagnetické pole

Cílem této podkapitoly bylo prozkoumat, zda má matrice statisticky významný vliv na SE při zachování konstantního obsahu vlákenné složky.

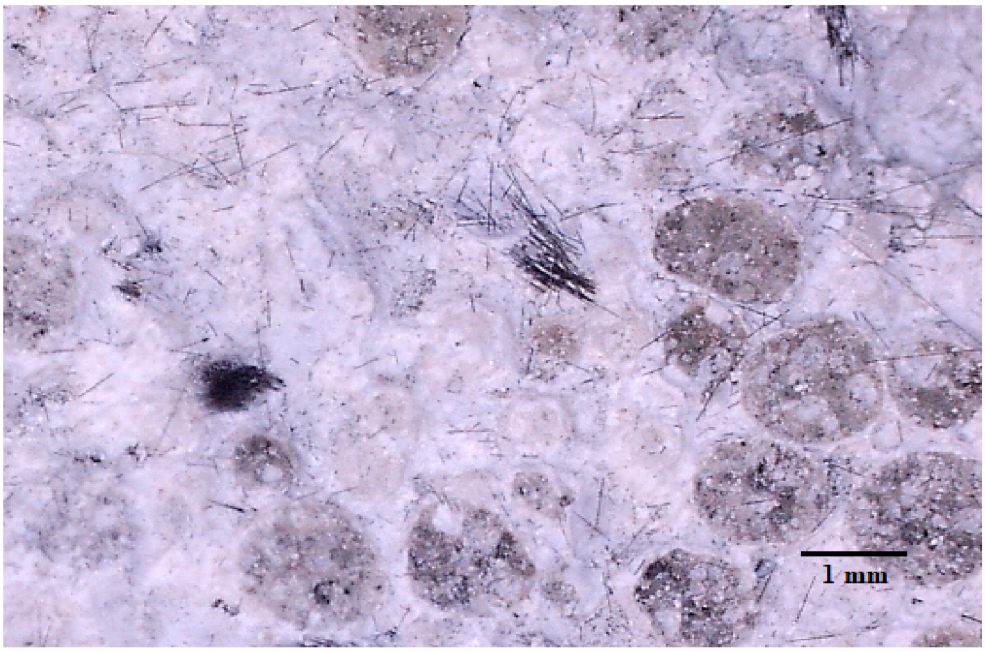
Pro názornější vizualizaci jsou na obrázku 54 porovnány účinky stínění jednotlivých omítek s odpovídajícím množstvím výztuže. Na obrázku jsou uvedeny průměrné hodnoty spolu s 95% IS získané při frekvenci 1500 MHz u „klimatizovaných“ vzorků.

Pokud porovnáme pouze samotné omítky bez uhlíkových vláken má sádrová omítka nejnižší stínící schopnost. Dále je pozorovatelné, že při nulovém obsahu vodivých vláken nedosahuje SE kompozitů více jak 5 dB při frekvenci 1,5 GHz bez ohledu na typ matrice. Při porovnání výsledků elektromagnetického stínění jednotlivých typů omítek při 1, 2 a 3 hm% mezi sebou je patrné, že nejlepších výsledků (tzn. nejvyšší SE) dosahuje právě sádrová omítka. Naopak nejmenšího stínícího efektu dosahuje vápeno-cementová omítka. Důvodem, proč je mezi těmito dvěma omítkami značný rozdíl v účinku stínění může být rozdílná distribuce vláken.

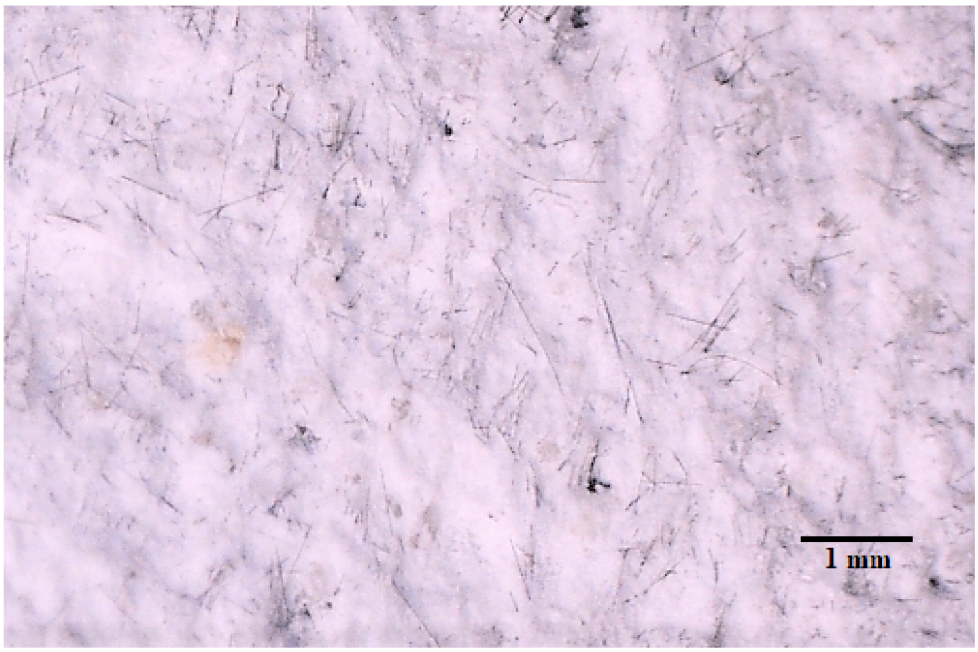
Vápeno-cementová omítka je termoizolační omítka obsahující křemičité kuličky. Tyto kuličky při přípravě kompozitu zhoršují dosažení co nejrovnoměrnější distribuce vláken a znemožňují propojení kontaktů vláken tak, aby byla vytvořena vodivá síť. Na obrázku 55 jsou zobrazeny řezy sádrové a vápeno-cementové omítky s 1 hm% uhlíkových vláken. Z obrázku je patrné, že u vápenocementové omítky dochází ke značně většímu shlukování vláken než u omítky sádrové.




Obr. 54 Porovnání účinnosti elektromagnetického stínění při frekvenci 1500 Hz




a) Vápeno-cementová omítka s 1 % uhlíkových vláken

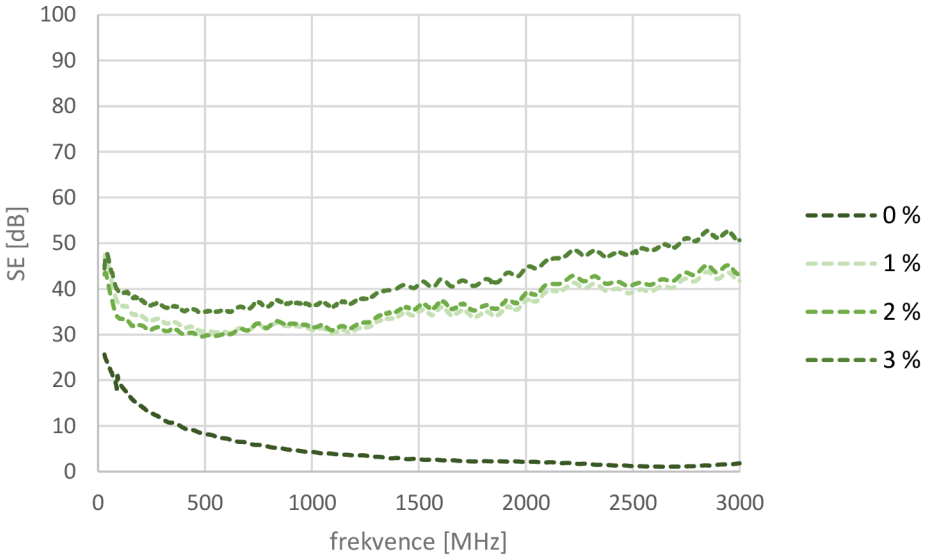



b) Sádrová omítka s 1 hm% uhlíkových vláken

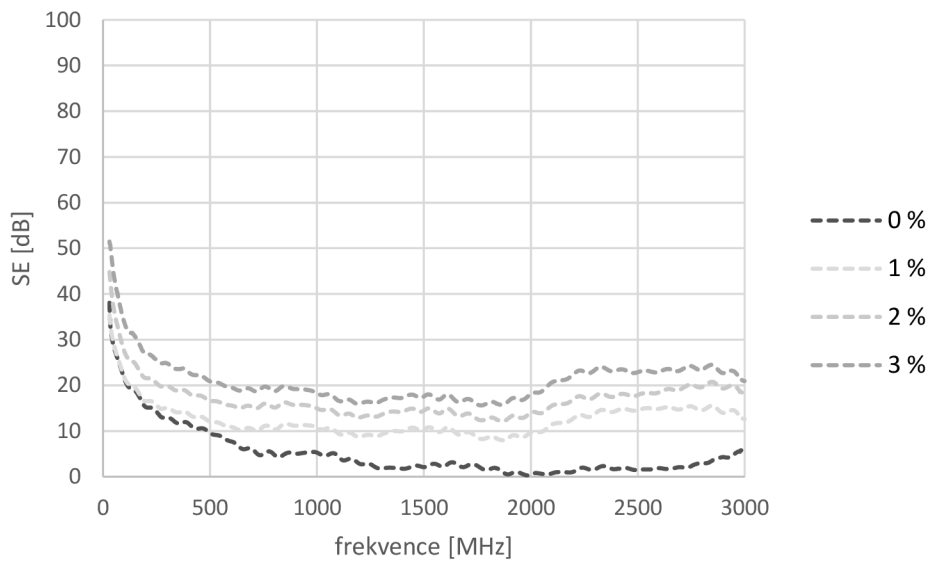
Obr. 55 Řez vápeno-cementovou a sádrovou omítkou

### 3.8.3 Vliv vlhkosti na schopnost stínit elektromagnetické pole

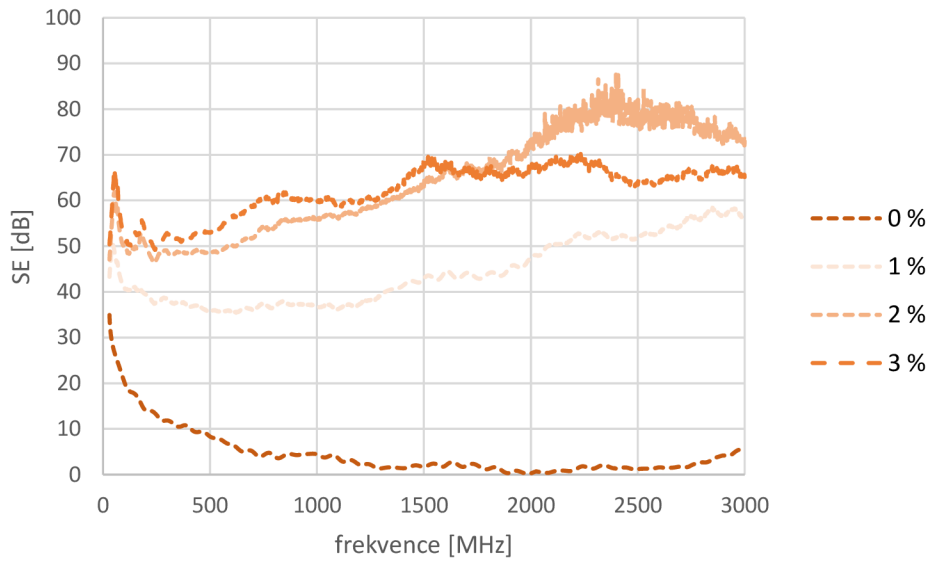
Vlhkost obecně může ovlivňovat vodivost materiálu. Vysoký obsah vlhkosti v omítkových kompozitech může tedy způsobit jejich vyšší elektrickou vodivost, tedy i lepší schopnost stínit elektromagnetické pole. Vzhledem k tomuto faktu byly vzorky vysoušeny po dobu 24 hodin při teplotě 180 °C a následně změřeny. Tyto vzorky jsou v experimentech označeny jako „vysušené“. Na obrázku 56 jsou zobrazeny průměrné hodnoty SE v závislosti na frekvenci pro „vysušené“ vzorky. V kapitole 3.8.1 byly vzorky klimatizovány (RH 65 ± 5 %, teplota 20 ± 2 °C) po dobu 24 hodin a následně bylo provedeno měření, proto jsou v dalších experimentech označovány jako „klimatizované“.



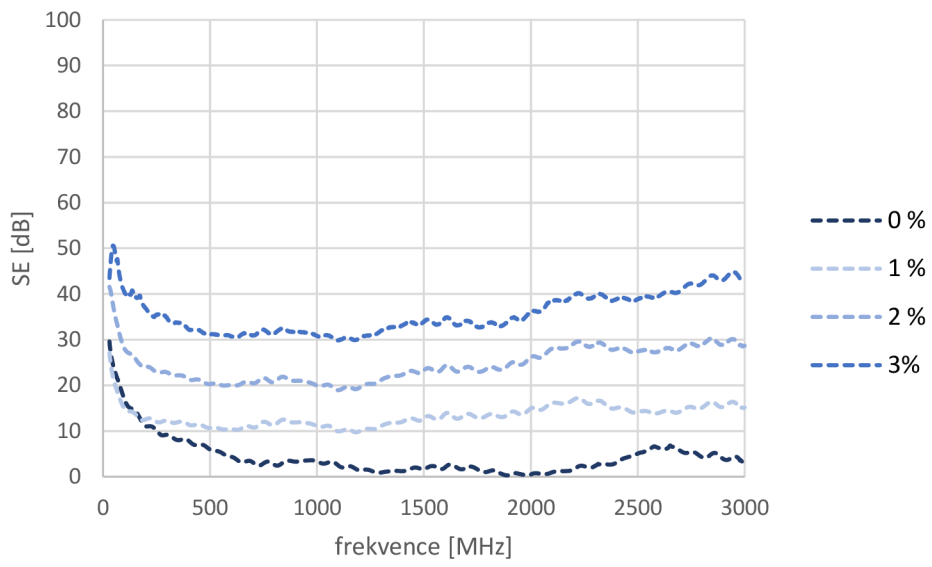

a) Vápenná omítka s uhlíkovými vlákny




b) Vápeno-cementová omítka s uhlíkovými vlákny



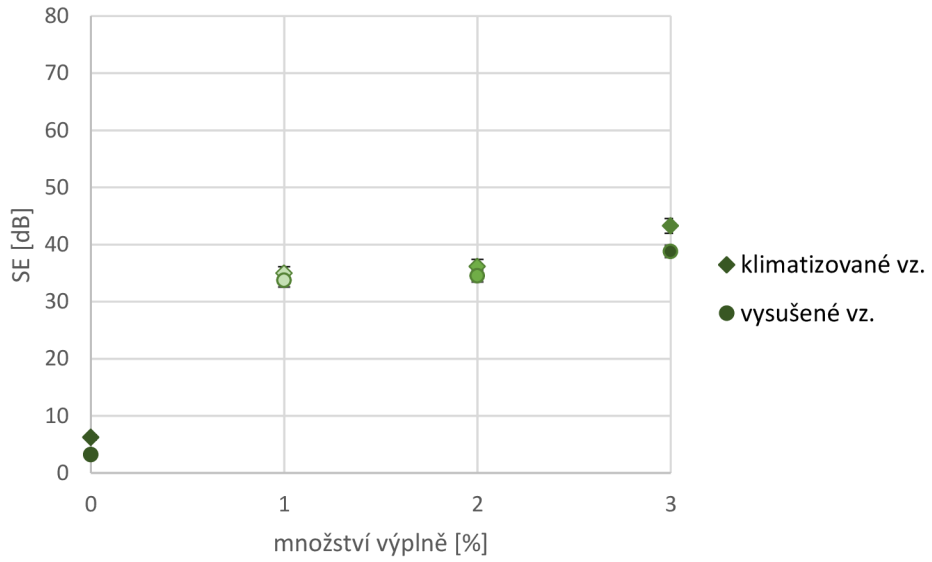

c) Sádrová omítka s uhlíkovými vlákny



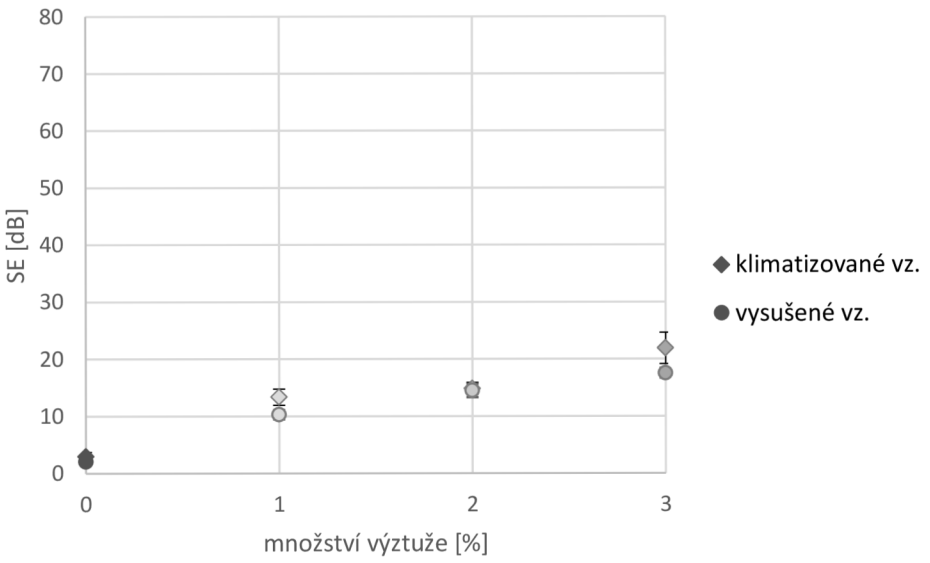

d) Cementová omítka s uhlíkovými vlákny
Obr. 56 Vliv vlhkosti na elektromagnetické stínění vzorku

Na obrázku 57 můžete v grafech vidět, že vzorky, které byly „vysušeny“ nedosahují takových stínících účinků jako vzorky „klimatizované“.

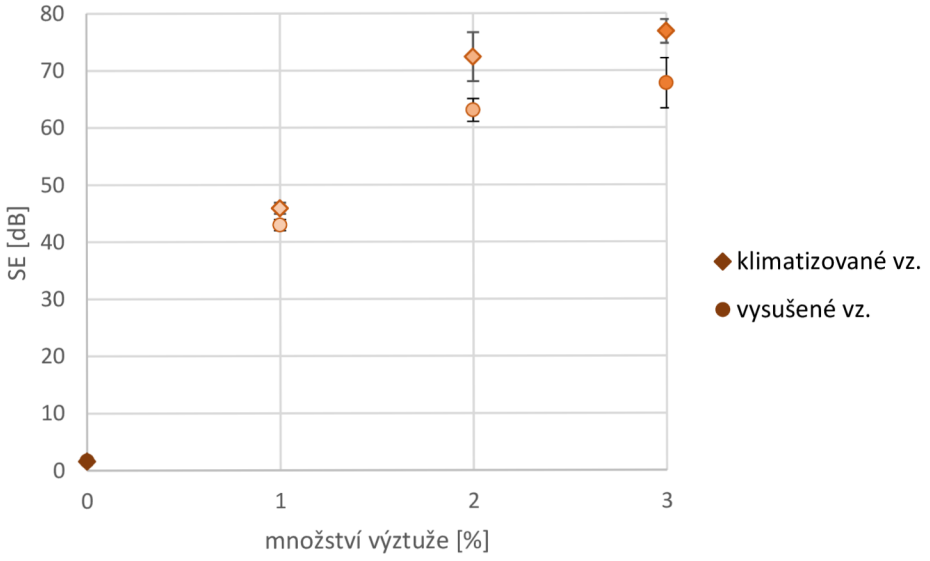
Nejběžnější bezdrátové technologie, jako je televizní a rozhlasové vysílání, mobilní telefony, satelitní rádio a televize, bezdrátové počítačové sítě, Bluetooth, GPS atd., využívají rádiové frekvence, které se pohybují od cca 10 kHz do 300 GHz. Velmi často se účinnost stínění vyhodnocuje pro frekvenci 1500 MHz, což je frekvence blízká pracovní frekvenci mobilních telefonů. Proto byly porovnány výsledky „klimatizovaných“ a „vysušených“ vzorků právě při této frekvenci (obr. 57). U všech typů omítek se potvrdil předpoklad vyšší stínící účinnosti u „klimatizovaných“ vzorků. Největších rozdílů elektromagnetického stínění dosahují vzorky se 2 a 3 hm% uhlíkových vláken u všech typů omítek.



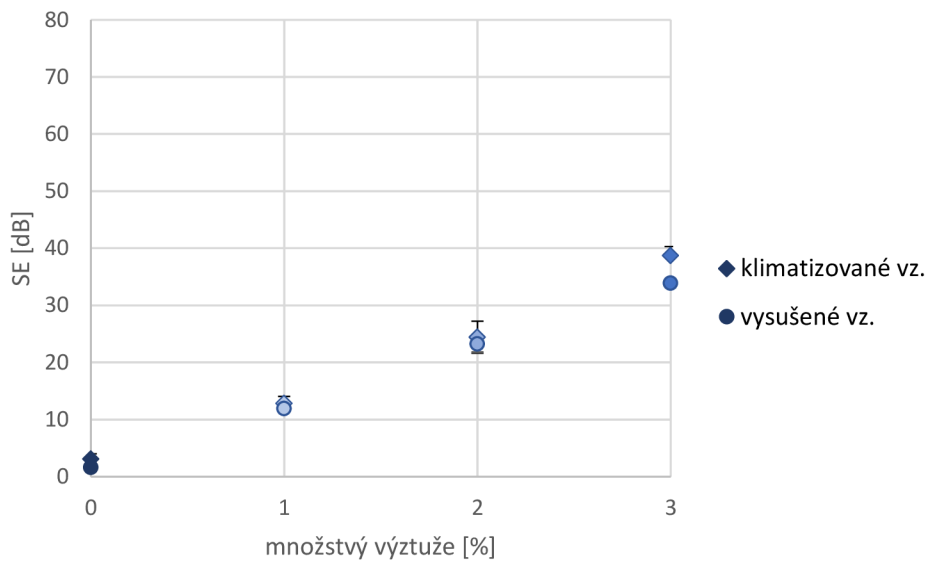

a) Vápenná omítka s uhlíkovými vlákny




b) Vápeno-cementová omítka s uhlíkovými vlákny




c) Sádrová omítka s uhlíkovými vlákny




d) Cementová omítka s uhlíkovými vlákny

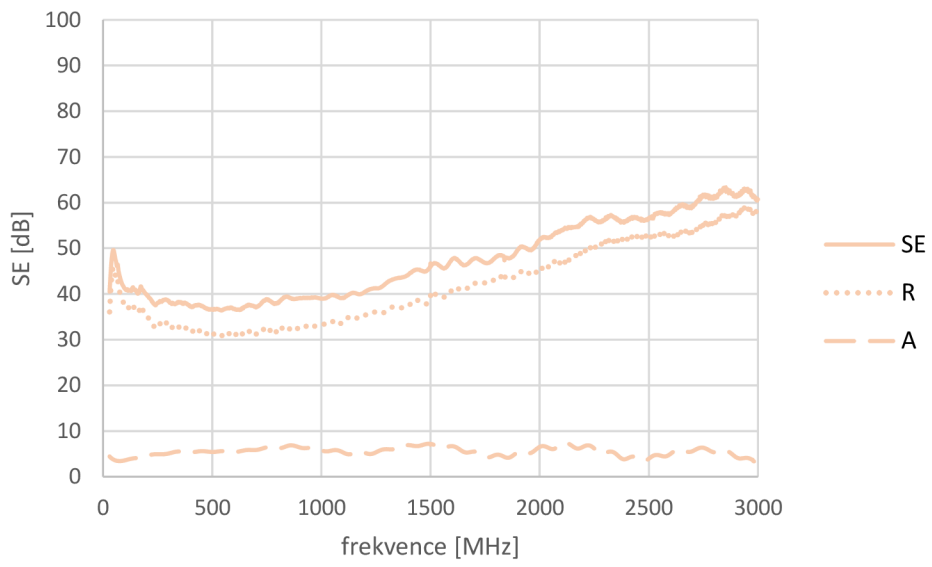
Obr. 57 Porovnání účinnosti elektromagnetického stínění klimatizovaných a vysušených vzorků při frekvenci 1500 MHz

### 3.8.4 Mechanismus elektromagnetického stínění

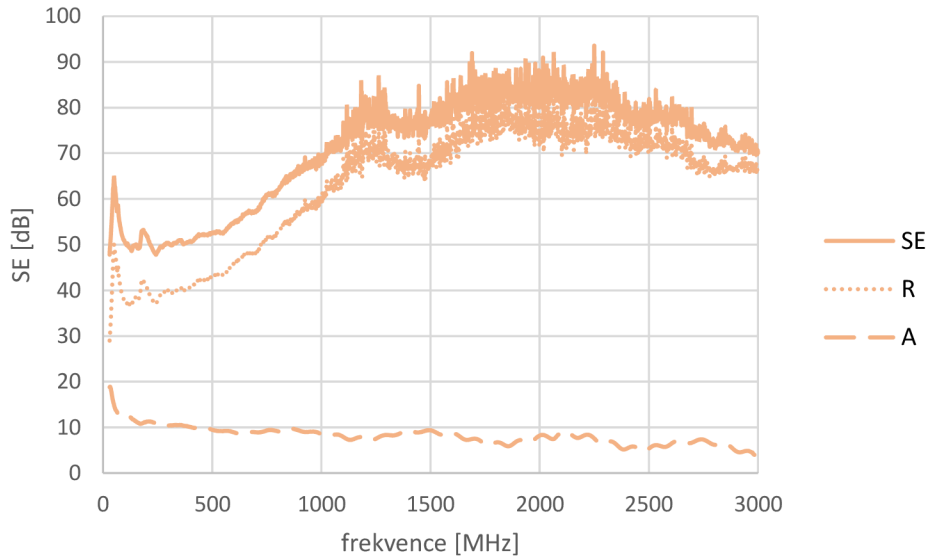
Účinnost elektromagnetického stínění lze popsat pomocí fyzikálních mechanizmů, kterými jsou zejména odraz a absorpce. Tyto mechanismy jsou blíže popsány v kapitole 2.3.4.

Na obrázku 58 a 59 jsou pro názornost uvedeny výsledky stínění a jejich mechanismy pro sádrovou a vápeno-cementovou omítku (nejvyšší a nejnižší stínící efekt viz kap. 3.8.2). S ohledem na nedostatečné mechanické vlastnosti omítkových kompozitů, jsou zde uvedeny výsledky pouze pro kompozity s 1 a 2 hm% uhlíkových vláken.

Z výsledků je patrné, že účinnost stínění omítkových kompozitů je dána převážně odrazem vlny od povrchu vzorku. U vzorků dochází pouze k nepatrnému absorpčnímu útlumu. Na obrázku 54 jsou uvedeny výsledky pro jednotlivé typy omítek. Nejvyšší stínící schopnosti dosahovala omítka sádrová. Pokud porovnáme křivky s vápeno-cementovou omítkou (nejhorší stínící schopnost) je patrné, že stínící mechanismus je pro obě omítky stejný (obr. 58 a 59).

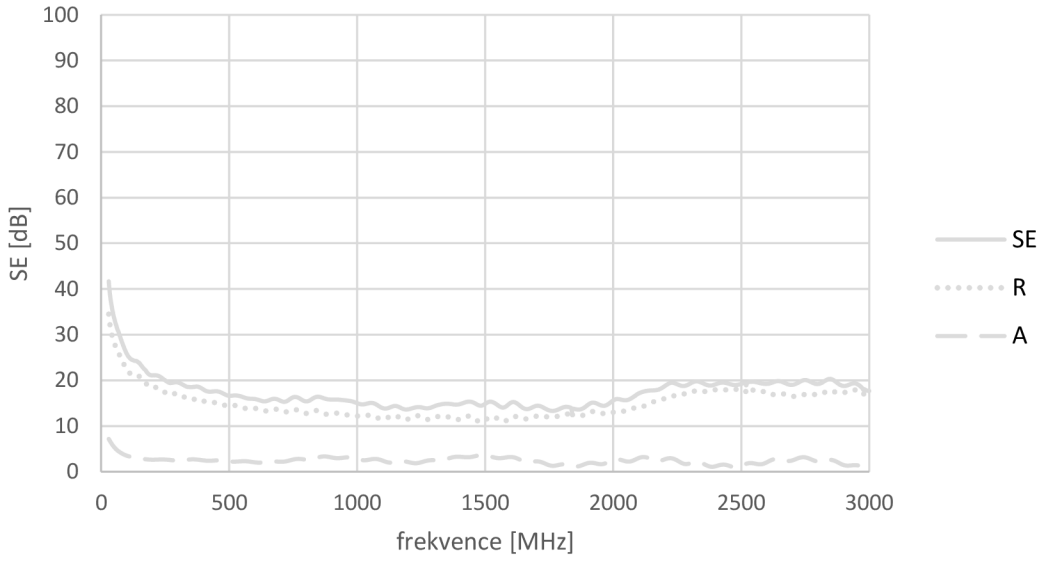



a) Sádrová omítka s 1 hm% uhlíkových vláken

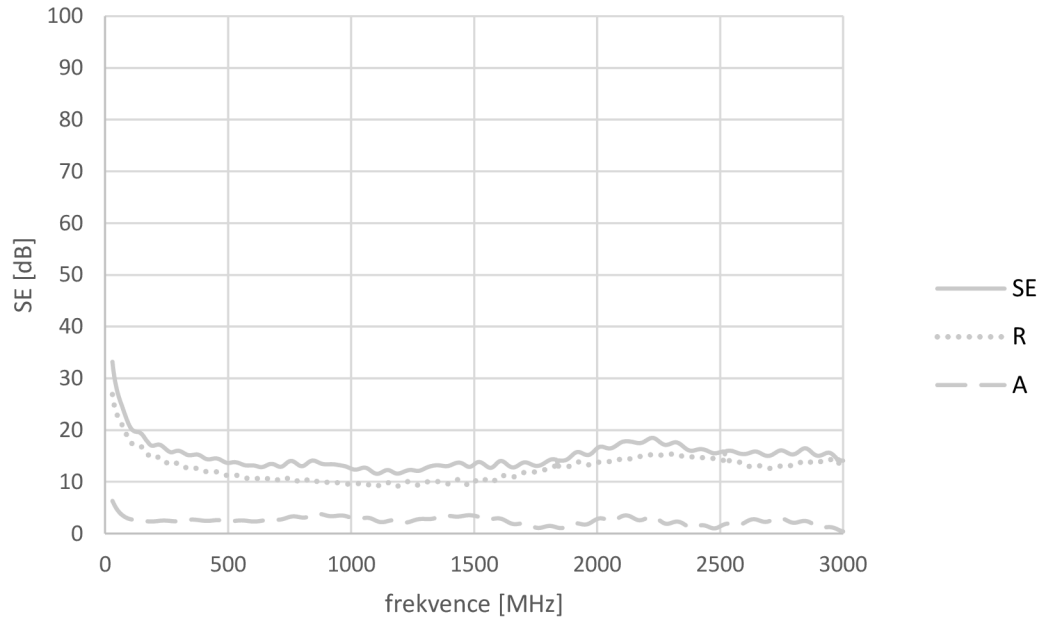



b) Sádrová omítka se 2 hm% uhlíkových vláken

Obr. 58 Mechanismus elektromagnetického stínění sádrových kompozitů




a) Vápeno-cementová omítka s 1 hm% uhlíkových vláken




b) Vápeno-cementová omítka se 2 hm% uhlíkových vláken

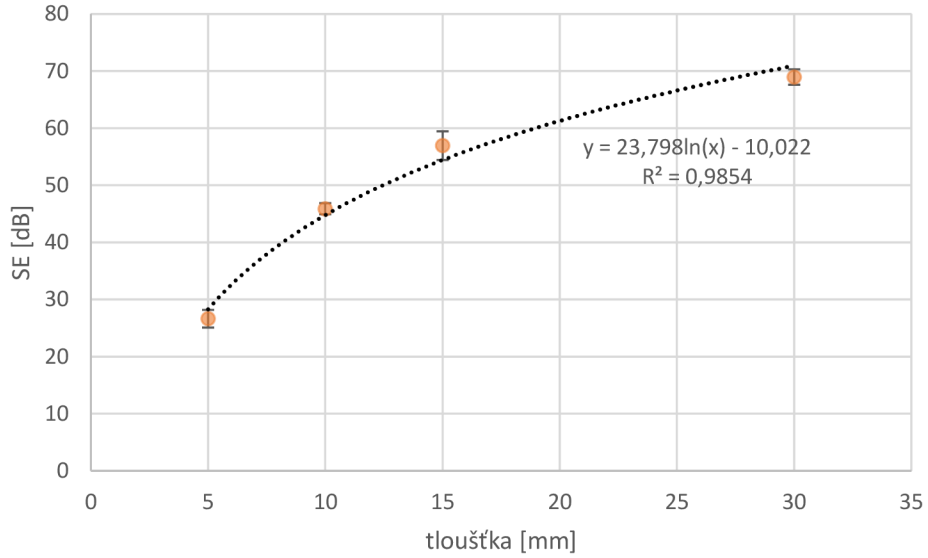
Obr. 59 Mechanismus elektromagnetického stínění vápenocementových kompozitů

### 3.8.5 Vliv tloušťky omítkového kompozitu na schopnost stínit elektromagnetické pole

Z uvedených výsledků omítkových kompozitů vyplývá, že k útlumu elektromagnetického záření u omítkových kompozitů dochází převážně odrazem energie vlny. K odrazu dochází nejen na vstupní straně kompozitu, ale také na straně výstupní. Proto byl zkoumán vliv tloušťky kompozitu na účinnost elektromagnetického stínění. Jak uvádí teoretický rozbor, tloušťka materiálu je také jedním z vlivných parametrů pro

celkovou stínící účinnost (viz kapitola 9). Cílem této kapitoly je prozkoumat, zda vliv tloušťky kompozitu je statisticky významný na SE.

Pro tento experiment byla s ohledem na všestranné použití, dobré mechanické vlastnosti (viz. kapitola 8) a zároveň velmi dobrou schopnost stínit elektromagnetické pole (obr. 54) vybrána sádrová omítka s 1 hm% uhlíkových vláken. V předchozích experimentech byly testovány vzorky o tloušťce 10 mm. Pro tento experiment byly zvoleny tloušťky 5, 10, 15 a 30 mm. Před samotným měřením byly vzorky klimatizované po dobu 24 hodin, relativní vlhkosti 65 ± 5 % a teplotě 20 ± 2 °C. Pro každou tloušťku bylo zhotoveno 5 vzorků, ze kterých byla následně vypočtena průměrná hodnota a stanoven 95% IS.




Obr. 60 Vliv tloušťky na účinnost elektromagnetického stínění

Na obrázku 60 je zobrazena závislost SE měřena při frekvenci 1500 MHz na tloušťce sádrového kompozitu obsahující 1 hm% uhlíkových vláken. Z obrázku je patrné, že tloušťka má statisticky významný vliv na SE. Tuto závislost je možno popsat logaritmickou funkcí s velmi vysokým koeficientem determinace (~0,99). Z předchozí kapitoly 3.8.4 vyplývá, že omítkový kompozit absorbuje pouze malou část vlny a samotné stínění je dané převážně odrazem. Z obrázku je vidět, že se zvyšující se tloušťkou roste účinek stínění, ale je zde patrný pokles rychlosti nárůstu účinku stínění v rozmezí tloušťky 15 a 30 mm. Předpokladem je, že při určité tloušťce dojde nejprve ke zmírnění, a poté k ustálení stínícího efektu a tloušťka kompozitu přestane mít vliv na účinnost stínění.

Z této kapitoly lze shrnout následující zjištění:

- S přibývajícím množstvím uhlíkových vláken roste schopnost kompozitu stínit elektromagnetické pole.
- Vyšší tloušťka kompozitu příznivě ovlivňuje účinnost SE.
- Množství vodivých vláken má statisticky významný vliv na SE. S přibývajícím množstvím vlákenné výztuže roste hodnota SE.

- Potvrzen byl i statisticky významný vliv typu matrice na SE, nejvyšší SE dosahují vzorky se sádrovou matricí.
- Potvrzen byl také vliv tloušťky kompozitu, přičemž zvýšení tloušťky z 5 na 10 mm způsobuje nárůst 19,25 dB.
- Zjištěno bylo také, že významný vliv má i obsah vlhkosti ve vzorku, vzrůst je ale nízký. Nejvyšší rozdíl mezi „vysušeným“ a „klimatizovaným“ vzorkem dosahoval 9,33 dB.

## 3.9 Stanovení užitné hodnoty pro omítkové kompozity

Index kvality (*QI*) shrnující vybrané vlastnosti lze použít pro hodnocení celkového výkonu pokročilých kompozitů viz kapitola 2.3.5. Pro stanovení indexu kvality byly vybrány vhodné vlastnosti charakterizující kompozitní materiál. S přihlédnutím k aktuálním cenám stavebních materiálů, které neustále rostou, byla k vlastnostem přidána cena kompozitu (stanovená pro 1 kg směsi). Vybrané vlastnosti, včetně dolní a horní hranice vyjadřující nevyhovující (*L*) a vyhovující (*H*) hodnoty jsou uvedeny v tabulce 24. Hodnoty *L*, *H* a váhy $w_i$ byly stanoveny na základě úvah o budoucím použití kompozitů. Po stanovení *QI* u všech druhů omítek se všemi druhy krátkovlákenné výztuže byly vzhledem k pořizovací ceně a dobrým mechanickým vlastnostem na prvních 5 příčkách pouze cementové kompozity (C1s, C2s, C1b, C2b, C1u). Při výběru stavebních materiálů je klíčovým faktorem kvalita a důraz na bezpečnost, proto byly pro další vyhodnocení vybrány pouze (na základě mechanických vlastností viz kap. 2.3.1) kompozity s 1 hm% krátkovlákenné výztuže.

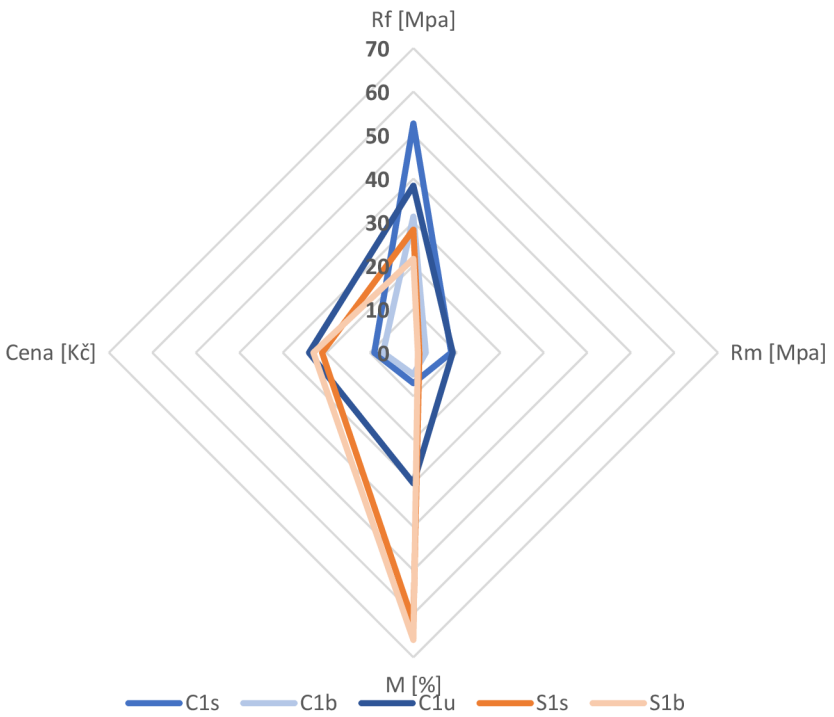
Tab. 24 Vlastnosti pro stanovení užitné hodnoty omítkových kompozitů

| Vlastnost | *L* | *H* | $w_i$ [-] |
|---|---|---|---|
| Pevnost v tahu za ohybu [MPa] | 3,5 | 26,9 | 0,3 |
| Pevnost v tlaku [MPa] | 0,15 | 5,15 | 0,2 |
| Transport kapalné vody [%] | 93 | 20 | 0,2 |
| Cena [Kč] | 50 | 1 | 0,3 |

V tabulce 25 jsou uvedeny hodnoty indexu kvality pro omítkové kompozity s 1 hm% krátkovlákenné výztuže. Dále je zde uvedeno pořadí od nejvhodnějšího typu vzorku, a to s ohledem na jeho mechanické vlastnosti, sorpční vlastnosti a pořizovací cenu omítky a vlákenné výztuže. Nejvyšší hodnoty *QI* dosáhl vzorek C1s (0,95). Do cementové, sádrové a vápenné matrice se pro 1 hm% nejvíce hodí použít skleněná výztuž. U vápeno-cementové omítky se ukázala jako nejlepší výztuž (s ohledem na všechny vybrané vlastnosti) vlákna uhlíková. Na obrázku 61 je zobrazeno prvních 5 vzorků s nejvyšší hodnotou QI a jejich závislost na vybraných vlastnostech.

Tab. 25 Index kvality omítkových kompozitů

| vzorek | C1s | C1b | C1u | S1s | S1b | S1u | V-C1u | V-C1s | V-C1b | V1s | V1b | V1u |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| QI | 0,95 | 0,87 | 0,83 | 0,60 | 0,52 | 0,36 | 0,30 | 0,27 | 0,26 | 0,24 | 0,20 | 0,12 |
| pořadí | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |




Obr. 61 Vliv jednotlivých vlastností na stanovení užitné vlastnosti omítkových kompozitů (v grafu je uvedeno prvních 5 vzorků)

### 3.9.1 Stanovení užitné hodnoty omítkových kompozitů pro speciální účely (EMS)

Díky širokému využívání moderních elektronických produktů a rozsáhlému pokrytí signálů bezdrátového přenosu v běžném životě jsou elektromagnetické vlny běžně přítomny v prostorech kolem nás. Nadměrná přítomnost elektromagnetických vln může mít negativní dopad na živé organismy. Proto je elektromagnetické stínění účinným nástrojem prevence proti nepříznivým účinkům elektromagnetického znečistění.

S ohledem na tyto znalosti byla stanovena také užitná hodnota pro omítkové kompozity s uhlíkovou výztuží. Tyto kompozity by mohly být využity jako omítky do místností, kde by bylo třeba odstínit elektromagnetické pole (místnosti se speciálním zařízením jako jsou rentgeny, magnetická rezonance, skenery, vysílače, radiolokátory, výpočetní střediska, …). Některá elektrická zařízení generují vysoké elektromagnetické pole a tento způsob by mohl vést k zmírnění úniku elektromagnetických vln z místnosti.

Při stanovování *QI* byla vyzdvihnuta hodnota SE pro frekvenci 1,5 GHz a naopak byly mírně potlačeny mechanické a sorpční vlastnosti. V tabulce 26 jsou uvedeny vybrané vlastnosti současně s horní (*H*) a dolní (*L*) mezí a hodnotou $w_i$.

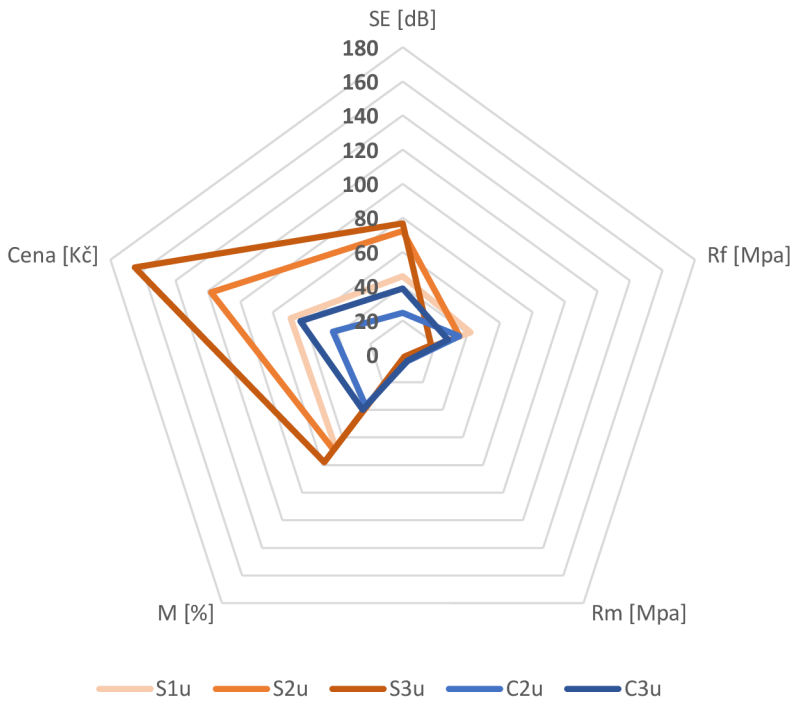
Tab. 26 Vlastnosti pro stanovení užitné hodnoty omítkových kompozitů s EMS

| Vlastnost | *L* | *H* | $w_i$ [-] |
|---|---|---|---|
| Pevnost v tahu za ohybu [MPa] | 3,5 | 26,9 | 0,15 |
| Pevnost v tlaku [MPa] | 0,15 | 5,15 | 0,10 |
| Transport kapalné vody [%] | 93 | 20 | 0,15 |
| Elektromagnetiské stínění [dB] pro $f$ = 1,5 GHz | 20 | 50 | 0,50 |
| Cena [Kč] | 100 | 1 | 0,10 |

V tabulce Tab. 27 jsou uvedeny hodnoty QI pro omítkové kompozity s uhlíkovou výztuží. S ohledem na vybrané vlastnosti a cenu kompozitu, která byla stanovena pro 1 kg směsi, se ukázal vzorek C3u s hodnotou 0,71 jako nejvhodnější k možnému využití k elektromagnetickému stínění. Pokud tento vzorek klasifikujeme dle třídy elektromagnetické účinnosti pro profesionální použití zařadíme ho do třídy 2 „průměrný“ viz kap. 3.8.1. Následují vzorky S1u a S2u, které lze zařadit do třídy 3 „dobrý“ a třídy 5 „vynikající“. Na obrázku 62 je zobrazeno prvních 5 vzorků s nejvyšší hodnotou QI a jejich závislost na vybraných vlastnostech.

Tab. 27 Index kvality omítkových kompozitů pro SE

| vzorek | C3u | S1u | S2u | S3u | C2u | C1u | V1u | V3u | V2u | V-C1u | V-C3u | V-C2u |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| QI | 0,71 | 0,69 | 0,63 | 0,56 | 0,44 | 0,30 | 0,29 | 0,24 | 0,23 | 0,19 | 0,18 | 0,16 |
| pořadí | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |




Obr. 62 Vliv dílčích vlastností na stanovení užitné vlastnosti omítkových kompozitů pro SE (v grafu je uvedeno prvních 5 vzorků)

Popsaný vztah pro určení indexu kvality (kap. 2.3.5) je univerzální. Pro jeho stanovení je možné použít i další charakteristiky, které budou žádoucí pro konečný účel použití. Při znalosti základních charakteristik vlastností a s ohledem na účel použití lze QI použít pro výběr vhodných materiálů.

# 4 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Cílem disertační práce bylo studium a vývoj stěžejních vlastností omítkových kompozitů s krátko-vlákennou výztuží.

V úvodní části práce byly vytipovány omítkové matrice (vápenná, vápeno-cementová, sádrová a cementová), které jsou běžně dostupné, a hlavně obvykle využívané v našem podnebním pásmu. Jako vyztužující prvek byla použita čedičová, skleněná a uhlíková vlákna. Čedičová a skleněná vlákna byla vybrána s ohledem na jejich vlastnosti, historii používání těchto vláken ve stavebnictví (např. ve formě armovacích tkanin a perlinek) a s možností potencionálního využití těchto vláken i na starších budovách. Omítka má zajišťovat především ochrannou a estetickou funkci. Neustálý pokrok ve všech odvětvích s sebou však přináší i řadu negativních dopadů, které můžou nepřímo klást nároky na nové funkce omítek. Z tohoto důvodu byla, pro možnost specifického využití, použita také uhlíková vlákna. Pro ucelenost informací a možnost porovnávání jednotlivých vlastností kompozitních materiálů byly do experimentů přidány tradiční vyztužující materiály v podobě skleněné a čedičové perlinky.

Před samotnou výrobou omítkových kompozitů byla testována soudržnost vláken a matrice. Na základě získaných výsledků byla následně vypočtena délka vlákenné výztuže pro každý typ vlákna a matrice. Vzhledem k malé variabilitě délek pro jednotlivá vlákna a s ohledem na aktuální nabídku vláken na trhu byla pro každé vlákno stanovena jedna délka, která byla použita u všech druhů omítek. Množství krátko-vlákenné výztuže bylo stanoveno s přihlédnutím k běžně používaným betonovým kompozitům, které se svým charakterem blíží omítkovým matricím. Obsah vlákenné výztuže byl nejprve zvolen 5, 6 a 7 hm%. Po smíchání matrice s takto vysokým obsahem vláken docházelo k velmi špatnému propojování omítkové matrice a vláken už při samotné výrobě kompozitních vzorků. Z tohoto důvodu byly pro následující experimenty použity 1, 2 a 3 hm% vyztužení.

V první fázi byly testovány mechanické vlastnosti omítkových kompozitů pomocí tradičně používaných metod, které jsou stanoveny normami a jsou detailně popsány u jednotlivých kapitol této práce.

**Pevnost v tahu za ohybu**

Výsledky poukazují na skutečnost, že nelze vybrat jeden druh krátkovlákenné výztuže, která by zvyšovala pevnost v tahu za ohybu u všech použitých omítek. Množství a druh vlákenné výztuže se tak jeví jako důležitý faktor ovlivňující strukturu kompozitů, a tím i jejich základní fyzikální vlastnosti. Bylo zjištěno, že použitím vyššího obsahu vláken ve vzorcích se napětí v ohybu snižuje. Při snižování obsahu matrice dochází k horšímu propojení mezi vlákny a matricí a ke špatnému přenosu napětí mezi jednotlivými vlákny. Při testování kompozitů s krátkovlákennou výztuží se po prasknutí vzorku projevilo přemostění trhliny vlákny jako velmi pozitivní. U některých kompozitů nebyla trhlina na první pohled patrná, u vzorků s viditelným defektem, vlákna přemosťovala trhlinu a zabezpečovala celkovou kompabilitu bez dalšího drolení materiálu či destrukce omítkového kompozitu. Tento fakt by obecně mohl mít pozitivní vliv na prodloužení životnosti omítky.

**Pevnost v tlaku**

Z výsledků testování pevnosti v tlaku se prokázal 1% hmotnostní podíl mezi vlákny a matricí nejlepší. Ukázalo se, že při tomto množství vláken vzniká optimální spojení mezi vláknem a matricí, což umožňuje dobrý přenos zatížení. Výjimku tvoří cementová omítka, u které čedičová výztuž způsobila celkové zhoršení této vlastnosti oproti samotné omítce.

V průběhu testování byl patrný pozitivní vliv krátkých vláken na celistvost testovaných těles. Na rozdíl od vzorků bez vlákenné výztuže a vzorků s perlinkou nedocházelo při stlačování k odpadávání kusů od těla vzorku a k rozpadu materiálu na jemné částice.

**Rázová houževnatost**

Omítkové kompozity (vápno, sádra, cement) s vyšším obsahem vlákenné výztuže prokázaly vyšší schopnost odolávat rázu. U vápeno-cementové omítky se přidání krátkovlákenné výztuže projevilo zhoršením této vlastnosti. Při porovnání krátkovlákenné výztuže a výztuže ve formě perlinky se pro schopnost kompozitu odolávat rázu ukázala, pro všechny použité matrice, perlinková výztuž jako více vyhovující.

**Sorpční vlastnosti**

Vzhledem k povaze stavebních hmot (hydrofilita, porozita) dochází k rychlému transportu vody do struktury materiálu, a proto bylo potřeba otestovat jaký vliv má množství a tip vlákenné výztuže na transport vody omítkovými kompozity.

Pokud zhodnotíme, jaký vliv má typ vlákna na transport kapalné vody, je patrné že u vápeno-cementové a sádrové omítky se projevila skleněná výztuž jako vyhovující, neboť došlo snížením hmotnostního přibytku oproti samotné omítce. Stejně můžeme hodnotit i vápennou omítku s 1 hm% skleněných vláken, kde došlo k nárůstu hmotnostního přibytku o 2 %. Jedním z důvodů by mohl být fakt, že použitá skleněná vlákna jsou určená do betonů a mají povrchovou úpravu, která je vhodná pro tento typ materiálů. Výjimku tvoří cementový kompozit, kde došlo k nejnižšímu přírůstku u čedičových vláken.

Použití krátkých vláken do matrice vede obecně ke zvýšení pórů ve struktuře omítek, což způsobuje jednak vyšší hodnoty *M*, a zároveň u většího množství pórů dochází k jejich pomalejšímu zaplňování, a tedy zpomalení sání.

Při zhodnocení výsledků vlivu typu matrice na transport kapalné vody je zřejmé, že z použitých matric došlo k největšímu hmotnostní přírůstku u vápenné omítky (93 %), následovala sádrová omítka, vápeno-cementová omítka a nejmenší hmotnostní přírůstek měla cementová omítka (20 %). Při porovnání kompozitů s 1 hm%, 2 hm% a 3 hm% je patrné, že vlákenná výztuž tento fakt nezměnila. Nejmenší procento vody přijímá cementový kompozit, kterému zároveň trvá nejdelší dobu, než dojde k jeho nasycení vodou (50 – 70 h).

S ohledem na množství vzorků byl transport vodní páry stanoven v celkovém rozsahu pouze u sádrové omítky. S přihlédnutím k mechanickým vlastnostem

a výsledkům transportu kapalné vody byl u zbývajících omítek měřen transport vodní páry u vzorků s 1 hm%. Z naměřených výsledků byl vypočten faktor difúzního odporu a ekvivalentní difúzní tloušťka.

Přidání 3 hm% vláken vede k nárůstu faktoru difuzního odporu z čehož vyplývá, že transport vodní páry bude těmito vzorky více omezen. Zároveň se ukázalo, že nižší obsah vlákenné výztuže vede k nižším hodnotám ekvivalentní difúzní tloušťky.

U vápenné, vápeno-cementové a cementové omítky s 1 hm % vláken došlo v porovnání s nevyztuženými vzorky k poklesu faktoru difúzního odporu. Výjimku tvoří vzorek V-C1s, který dosahuje obdobné hodnoty $\mu$ jako má samotná vápeno-cementová omítka. Vápeno-cementová omítka obsahuje křemičité kuličky, které vytváří póry ve struktuře, přidání skleněné výztuže ve formě vlákenných svazečků může vést k snazšímu zaplňování pórů než u vzorků s ojednocenými čedičovými a uhlíkovými vlákny. A z tohoto důvodu může u těchto kompozitů docházet k obtížnějšímu transportu vodní páry. Výsledky ekvivalentní difúzní tloušťky vápenné, vápeno-cementové omítky jsou srovnatelné a dosahují průměrné hodnoty 0,1 m. Nejvyšší hodnoty $S_d$ dosahuje samotná cementová omítka a cementová omítka s 1 hm% čedičových vláken (0,3 m).

**Akustické vlastnosti**

Akustická pohltivost omítkových kompozitů byla měřena na impedanční trubici v rozsahu 0 - 6400 Hz. Z výsledků měření byla stanovena závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci. Při porovnání výsledků činitele zvukové pohltivosti samotných omítek bez vlákenné výztuže, dosahuje nejvyšších hodnot (0,72 při frekvenci 2425 Hz) vápeno-cementová omítka. Což je dáno pravděpodobně tím, že vápeno-cementová omítka obsahuje duté křemičité kuličky (viz obr. 21a), které vytváří ve struktuře póry, a tím dochází k útlumu akustické vlny.

Přidání krátkovlákenné výztuže k vápeno-cementové matrici není vzhledem k zvukové pohltivosti této omítky zcela vyhovující. K nárůstu činitele zvukové pohltivosti došlo pouze u vzorku se 3 hm% čedičových vláken a kompozit se 3 hm% uhlíkových vláken dosahoval obdobných výsledků jako samotná omítka.

Sádrový kompozit dosáhl nejvyšších hodnot činitele zvukové pohltivosti se 3 hm% čedičových a uhlíkových vláken. Z výsledků je ale zřejmé, že v porovnání s ostatními kompozity se nejedná o významné zlepšení oproti samotné omítce.

Vápenná omítka má nejlepší výsledky akustické pohltivosti v kombinaci se skleněnými vlákny. Ukázalo se, že přidáním 2 a 3 hm% vláken získáme velmi srovnatelné výsledky, což značí, že stejné akustické pohltivosti dosáhneme i s menším množstvím vláken (2 hm%).

Přidání vlákenné výztuže (čedič, sklo, uhlík) k cementové matrici vede obecně ke zvýšení činitele zvukové pohltivosti. Jako optimální se ukázalo použití 3 hm% uhlíkových vláken, kde dochází k nárůstu $\alpha$ o 156,5 %.

**Elektromagnetické stínění**

Dále byla testována schopnost kompozitu stínit elektromagnetické pole. Aby měl materiál schopnost stínit elektromagnetické pole, musí být elektricky vodivý. Z toho důvodu byla jako výztuž pro tento experiment použita uhlíková vlákna. U ostatních

vláken (sklo, čedič), které byly použity jako výztuž, nebyl předpoklad elektrické vodivosti, a tedy ani elektromagnetického stínění. Provedené testy byly v rozsahu 30 - 3000 MHz, což je nejrozšířenější pásmo používané pro veřejnou komunikaci a přenos dat.

Z výsledků je patrné, že se zvyšujícím se podílem uhlíkových vláken v matrici významně roste schopnost omítkových kompozitů stínit elektromagnetické pole. Avšak s přihlédnutím k již testovaným mechanickým vlastnostem je použití většího množství vlákenné výztuže (3 hm%) v matrici méně vhodné. Porovnáme-li výsledky kompozitů s 1 a 2 hm% s žebříčkem hodnot pro profesionální použití, zařadíme vzorky cementové omítky se 2 hm% uhlíkových vláken do skupiny „uspokojující“. Vzorky vápenné omítky s 1 i se 2 hm% uhlíkových vláken lze zařadit do skupiny „průměrný“ a vzorky sádrové omítky s 1 hm% vláken do skupiny „dobrý“ a se 2 hm% vláken do skupiny „vynikající“. Vápeno-cementová omítka při frekvenci 1500 MHz nedosáhla 20 dB, tudíž ji nelze zařadit do žádné ze tříd.

Přítomnost vlhkosti, a tedy i náchylnost materiálu k navlhání může ovlivnit elektrickou vodivost materiálu. Z tohoto důvodu bylo potřeba otestovat také vliv vlhkosti na schopnost stínit elektromagnetické pole. V tomto experimentu byly nejprve testovány vzorky, které byly vysoušeny po dobu 24 hodin při teplotě 180 °C. Následně po změření byly vzorky klimatizovány (RH 65±5, 20±2 °C) po dobu 24 hodin a znovu změřeny. Velmi často se účinnost stínění vyhodnocuje pro frekvenci 1500 MHz, což je frekvence blízká pracovní frekvenci mobilních telefonů. Proto byly porovnány výsledky „klimatizovaných“ a „vysušených“ vzorků právě při této frekvenci. Výsledky ukazují, že vzorky, které byly „vysušeny“ nedosahují takových stínících účinků jako vzorky „klimatizované“. Největší rozdíly elektromagnetického stínění mají vzorky se 2 a 3 hm% uhlíkových vláken u všech typů omítek (maximální rozdíl činní 9,33 dB), což může poukazovat na fakt, že větší množství uhlíkových vláken v matrici, může mít také vliv i na přijímání většího množství vlhkosti omítkovým kompozitem. Dojde tedy k „součtu“ dvou vlivů na výsledné elektromagnetické stínění: množství uhlíkových vláken a vlhkosti.

Dále byl posouzen vliv typu matrice na schopnost stínit elektromagnetické pole. Při porovnání samotných omítek bez vlákenné výztuže dosahuje sádrová omítka nejnižší hodnoty SE. Výsledky omítkových kompozitů s 1, 2 a 3 hm% vláken ukazují, že nejvyšších výsledků SE dosahuje právě sádrová omítka. Jedním z faktorů, které můžou ovlivňovat schopnost stínění SE je vnitřní struktura kompozitů. Vápeno-cementová omítka obsahuje křemičité kuličky a cementová omítka drobné kamínky. Tyto kuličky/kamínky při přípravě kompozitu zhoršují dosažení co nejrovnoměrnější distribuce vláken a znemožňují propojení kontaktů vláken tak, aby byla vytvořena vodivá síť.

Účinnost elektromagnetického stínění lze popsat pomocí fyzikálních mechanizmů, kterými jsou zejména odraz a absorpce. Proto byly tyto mechanismy spočítány pro omítkové kompozity. Z výsledků je patrné, že účinnost stínění omítkových kompozitů je dána převážně odrazem vlny od povrchu vzorku. U vzorků dochází pouze k nepatrnému absorpčnímu útlumu. Nejvyšších hodnot SE dosahovala omítka sádrová a pokud

porovnáme výsledky absorpce a odrazu s vápeno-cementovou omítkou (nejhorší stínící schopnost) je patrné, že stínící mechanismus je pro obě omítky stejný.

Jak již bylo řečeno k útlumu elektromagnetického záření u omítkových kompozitů dochází převážně odrazem energie vlny. K odrazu dochází nejen na vstupní straně kompozitu, ale také na straně výstupní. Proto byl zkoumán vliv tloušťky kompozitu na účinnost elektromagnetického stínění. Pro tento experiment byla, s ohledem na všestranné použití, dobré mechanické vlastnosti a zároveň velmi dobrou schopnost stínit elektromagnetické pole, vybrána sádrová omítka s 1 hm% uhlíkových vláken. Pro tento experiment byly vyrobeny vzorky s tloušťkou 5, 10, 15 a 30 mm. Z výsledků je patrný vliv zvyšující se tloušťky kompozitu na rostoucí účinek stínění. Ovšem je zde patrný pokles rychlosti nárůstu účinku stínění v rozmezí tloušťky 15 a 30 mm. Předpokladem je, že při určité tloušťce dojde nejprve ke zmírnění a poté k ustálení stínícího efektu a tloušťka kompozitu přestane mít vliv na účinnost stínění.

**Užitná hodnota**

Celkový výkon omítkových kompozitů byl zhodnocen pomocí indexu kvality. Pro stanovení indexu kvality byly vybrány vhodné vlastnosti pro charakteristiku kompozitního materiálu s přihlédnutím k aktuálním cenám stavebních materiálů. Po stanovení QI u všech druhů omítek se všemi druhy krátkovlákenné výztuže, byly vzhledem k pořizovací ceně a dobrým mechanickým vlastnostem na prvních 5 příčkách pouze cementové kompozity (C1s, C2s, C1b, C2b, C1u).

Při výběru stavebních materiálů je klíčovým faktorem kvalita a důraz na bezpečnost, proto byly pro další vyhodnocení vybrány pouze (na základě mechanických vlastností) kompozity s 1 hm% krátkovlákenné výztuže. Výsledky ukázaly, že do cementové, sádrové a vápenné matrice se pro 1 hm% nejvíce hodí použít skleněná vlákna. U vápeno-cementové omítky se ukázala jako nejlepší výztuž (s ohledem na všechny vybrané vlastnosti) vlákna uhlíková.

Vzhledem k testování schopnosti stínit elektromagnetické pole byla stanovena také užitná hodnota pro omítkové kompozity s uhlíkovou výztuží. Tyto kompozity by mohly být využity jako omítky do místností, kde by bylo třeba odstínit elektromagnetické pole. Jako nejvhodnější k možnému využití k elektromagnetickému stínění se ukázal cementový kompozit se 3 hm% vláken. Pokud tento vzorek klasifikujeme dle třídy elektromagnetické účinnosti pro profesionální použití, zařadíme ho do třídy 2 „průměrný“. Následují vzorky S1u a S2u, které lze zařadit do třídy 3 „dobrý“ a třídy 5 „vynikající“.

Popsaný vztah pro určení indexu kvality je univerzální. Pro jeho stanovení je možné použít i další charakteristiky, které budou žádoucí pro konečný účel použití. Při znalosti základních vlastnostních charakteristik a s ohledem na účel použití ho lze aplikovat pro selekci vhodných materiálů.

# 5 ZÁVĚR

Omítka slouží zejména k ochraně povrchu proti poškození. Proto jsou životnost a celistvost omítek důležité faktory, které ovlivňují vlastnosti stavebních systémů a ve výsledku také spotřebu stavebního materiálu. Při jejím porušení může docházet k snadnějšímu pronikání vlhkosti dovnitř do stavební konstrukce, a to může být příčina rychlejší degradace materiálu. Z tohoto důvodu bylo vhodné navrhnout omítkové kompozity s optimálními užitnými vlastnostmi, které prodlouží dobu mezi prováděním oprav a tím i životnost konstrukce.

Disertační práce byla zaměřena na vytvoření omítkového kompozitu: směsi omítky a krátkých vláken, konkrétně čedičových, skleněných a uhlíkových jako výztuže ke čtyřem běžně využívaným omítkám (vápenné, vápeno-cementové, sádrové, cementové). Cílem bylo vytvořit takové omítkové kompozity, které by prodlužovaly životnost těchto materiálů a zároveň by měly pozitivní vliv i na další funkce omítky, a tím by mohly přispět ke zdraví a pocitu komfortu obyvatel. Navržené omítkové kompozity se skleněnými a čedičovými vlákny jsou zároveň akceptovatelné z pohledu historie používání těchto vláken ve stavebnictví a s možností jejich případného využití i na starších budovách (jejichž použití není v rozporu s požadavky na ochranu památek). Omítky s uhlíkovou výztuží mají potenciál jako stínící materiál pro zmírnění problémů znečištění elektromagnetickým zářením a daly by se využít v laboratořích, nemocnicích a jiných místech, kde je potřeba minimalizovat expozici tohoto záření.

Základní přínos práce lze shrnout v následujících bodech:

- Pro jednotlivé experimenty byly vyrobeny kovové nebo silikonové formy tak, aby odpovídaly rozměrům potřebným k danému testování.
- Na základě měření soudržnosti vláken a matrice byla pro jednotlivé omítky vypočtena délka vlákenné výztuže. Dále bylo stanoveno množství vláken na 5, 6 a 7 hm%. Výroba vzorků a následné mechanické testování však ukázala nevhodnost tak vysokého procenta vláken z hlediska zpracovatelských vlastností omítkových kompozitů, proto bylo množství výztuže upraveno na 1, 2 a 3 hm%.
- Testování omítkových kompozitů ukázalo skutečnost, že nelze vybrat jeden druh krátkovlákenné výztuže, která by vedla k celkovému zlepšení testovaných vlastností u všech použitých matric. Avšak použití 1 až 2 hm% vláken má pozitivní vliv zejména na pevnostní charakteristiky u všech omítek.
- U sorpčních vlastností se ukázala zejména skleněná výztuž jako vyhovující, neboť došlo k poklesu nebo jen k mírnému nárůstu těchto vlastností u vápenné, vápeno-cementové a sádrové matrice. Také byl testován transport vodní páry, z naměřených dat byly vypočteny faktor difúzního odporu a ekvivalentní difúzní tloušťka. Přidání 3 hm% vláken vede k nárůstu faktoru difuzního odporu z čehož vyplývá, že transport vodní páry bude těmito vzorky více omezen. Výsledky ekvivalentní difúzní tloušťky vápenné

a vápeno-cementové omítky jsou srovnatelné a dosahují průměrné hodnoty 0,1 m.

- Pro měření akustické pohltivosti pomocí impedanční trubice byly vyrobeny dva druhy vzorků, tak aby bylo možné měřit při větších i malých frekvencích. Ze získaných dat byl vypočten činitel zvukové pohltivosti, který ukázal pozitivní vliv většího množství vláken u vápenného, sádrového a cementového kompozitu na výslednou akustickou pohltivost omítky.
- Schopnost kompozitu stínit elektromagnetické pole roste s rostoucím hmotnostním podílem uhlíkové výztuže. Z naměřených dat byla vypočtena účinnost stínění omítkových kompozitů a na základě těchto výsledků byl navržen experiment zabývající se vlivem tloušťky na SE. Na základě tohoto experimentu byl vytvořen model, který ukázal, že vliv tloušťky vzorku na SE není lineární a s přibývající tloušťkou dochází ke zmírnění nárůstu SE. Dále byl zkoumán mechanismus elektromagnetického stínění, který ukázal, že účinnost stínění je u omítkových kompozitů dána převážně odrazem.
- Na závěr práce bylo vhodné zhodnotit celkový výkon omítkových kompozitů. Pro tento účel byl vypočten index kvality, který umožňuje shrnout vybrané vlastnosti, které lze stanovit a měnit na základě úvah o budoucím použití kompozitů. Ukázalo se, že optimální kombinace testovaných vlastností a ceny, která je z hlediska spotřebitele důležitá, dosahují na prvních 5 příčkách pouze cementové kompozity (C1s, C2s, C1b, C2b, C1u). Použitý vztah je díky své variabilitě a možnosti volby požadovaných vlastnostních charakteristik vhodný pro použití při výrobě omítkových kompozitů.

Bylo také vhodné porovnat vyrobené kompozity s odbornými pracemi jiných autorů. Ukázalo se, že autoři Iucolano a spol.[135] testovali sádrový kompozit vyztužený 1 a 2 hm% skleněných vláken (délka vl. 10 mm). Autoři zaznamenali zvýšení pevnosti v tahu za ohybu u 1 hm% o 10 %. U odpovídajícího vzorku z této studie (sádra s 1 hm% skleněných vláken) došlo také ke zvýšení této vlastnosti, ale o 49,7 %. Demircan a spol. [137] testovali vápenné kompozity s 1,2 hm% čedičových (6 mm), uhlíkových (6 mm) a skleněných (6 mm) vláken. Zjistili, že při tomto hmotnostním podílu dochází k poklesu pevnosti v tahu za ohybu v porovnání s referenčním vzorkem. V této disertační práci bylo zjištěno že přidání 1 hm% k vápenné matrici má pozitivní vliv na tuto vlastnost.

Dále se ukázalo, že převážná většina odborných prací zabývající se elektromagnetickým stíněním v oblasti stavebnictví používá jako matrici pouze cementové materiály. Cementová matrice má však špatnou účinnost elektromagnetického stínění. Tato disertační práce se zabývala využitím i jiných než cementových matric a díky tomu přináší ucelenější informatice o dané problematice.

Závěrem je tedy možné říct, že práce přináší všeobecný přehled základních vlastností pro omítkové kompozity, které vychází z běžně dostupných a obvykle používaných omítek v našem podnebním pásmu. Zároveň lze konstatovat, že přidání krátkých vláken k omítkové matrici má pozitivní vliv na vlastnosti a životnost omítek. Ovšem je důležité vybrat vhodnou kombinaci omítky a vlákenné výztuže vzhledem k požadovaným výsledným vlastnostem.

# 6 Literatura


[1] E. Lenticchia, R. Ceravolo, and C. Chiorino, "Damage scenario-driven strategies for the seismic monitoring of XX century spatial structures with application to Pier Luigi Nervi's Turin Exhibition Centre," *Eng. Struct.*, vol. 137, pp. 256–267, Apr. 2017.

[2] A. Brückner, R. Ortlepp, and M. Curbach, "Textile reinforced concrete for strengthening in bending and shear," *Mater. Struct. Constr.*, vol. 39, no. 292, pp. 741–748, 2006.

[3] C. Ding, L. P. Guo, and B. Chen, "Theoretical analysis on optimal fiber-matrix interfacial bonding and corresponding fiber rupture effect for high ductility cementitious composites," *Constr. Build. Mater.*, vol. 223, pp. 841–851, Oct. 2019.

[4] J. Gao, Z. Wang, T. Zhang, and L. Zhou, "Dispersion of carbon fibers in cement-based composites with different mixing methods," *Constr. Build. Mater.*, vol. 134, pp. 220–227, Mar. 2017.

[5] A. Izaguirre, J. Lanas, and J. I. Alvarez, "Effect of a polypropylene fibre on the behaviour of aerial lime-based mortars," *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 2, pp. 992–1000, Feb. 2011.

[6] S. Eve, M. Gomina, and G. Orange, "Effects of Polyamide and Polypropylene Fibres on the Setting and the Mechanical Properties of Plaster," *Key Eng. Mater.*, vol. 264–268, pp. 2531–2536, May 2004.

[7] F. G. Carozzi and C. Poggi, "Mechanical properties and debonding strength of Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) systems for masonry strengthening," *Compos. Part B Eng.*, vol. 70, pp. 215–230, Mar. 2015.

[8] C. Lu and C. K. Y. Leung, "Effect of fiber content variation on the strength of the weakest section in Strain Hardening Cementitious Composites (SHCC)," *Constr. Build. Mater.*, vol. 141, pp. 253–258, Jun. 2017.

[9] M. Li and V. C. Li, "Rheology, fiber dispersion, and robust properties of engineered cementitious composites," *Mater. Struct. Constr.*, vol. 46, no. 3, pp. 405–420, 2013.

[10] G. Zak, C. B. Park, and B. Benhabib, "Estimation of three-dimensional fibre-orientation distribution in short-fibre composites by a two-section method," *J. Compos. Mater.*, vol. 35, no. 4, pp. 316–339, 2001.

[11] B. Boulekbache, M. Hamrat, M. Chemrouk, and S. Amziane, "Flowability of fibre-reinforced concrete and its effect on the mechanical properties of the material," *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 9, pp. 1664–1671, Sep. 2010.

[12] M. Cao, Y. Mao, M. Khan, W. Si, and S. Shen, "Different testing methods for assessing the synthetic fiber distribution in cement-based composites," *Constr. Build. Mater.*, vol. 184, pp. 128–142, Sep. 2018.

[13] L. Martinie and N. Roussel, "Simple tools for fiber orientation prediction in industrial practice," *Cem. Concr. Res.*, vol. 41, no. 10, pp. 993–1000, Oct. 2011.

[14] P. Stähli, R. Custer, and J. G. M. Van Mier, "On flow properties, fibre distribution, fibre orientation and flexural behaviour of FRC," *Mater. Struct. Constr.*, vol. 41, no. 1, pp. 189–196, Jan. 2008.

[15] J. Bochen and S. Gil, "Properties of pore structure of thin-layer external plasters under ageing in simulated environment," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 8, pp. 2958–2963, Aug. 2009.

[16] C. Nunes, L. Pel, J. Kunecký, and Z. Slížková, "The influence of the pore structure on the moisture transport in lime plaster-brick systems as studied by NMR,"

*Constr. Build. Mater.*, vol. 142, pp. 395–409, Jul. 2017.
[17] M. Jerman *et al.*, "Effect of cyclic wetting and drying on microstructure, composition and length changes of lime-based plasters," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 104, p. 103411, Nov. 2019.
[18] H. Yang, H. Cui, W. Tang, Z. Li, N. Han, and F. Xing, "A critical review on research progress of graphene/cement based composites," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 102, pp. 273–296, Nov. 2017.
[19] L. Liu *et al.*, "Investigation of pore structure and mechanical property of cement paste subjected to the coupled action of freezing/thawing and calcium leaching," *Cem. Concr. Res.*, vol. 109, pp. 133–146, Jul. 2018.
[20] A. V. Arundel, E. M. Sterling, J. H. Biggin, and T. D. Sterling, "Indirect health effects of relative humidity in indoor environments.," *Environ. Health Perspect.*, vol. VOL. 65, pp. 351–361, 1986.
[21] A. P. Jones, "Indoor air quality and health."
[22] H. Viitanen *et al.*, "Moisture and bio-deterioration risk of building materials and structures," *J. Build. Phys.*, vol. 33, no. 3, pp. 201–224, Jan. 2010.
[23] N. Karagiannis, M. Karoglou, A. Bakolas, M. Krokida, and A. Moropoulou, "Drying kinetics of building materials capillary moisture," *Constr. Build. Mater.*, vol. 137, pp. 441–449, Apr. 2017.
[24] B. Seng, C. Magniont, and S. Lorente, "Characterization of a precast hemp concrete. Part I: Physical and thermal properties," *J. Build. Eng.*, vol. 24, p. 100540, Jul. 2019.
[25] L. Randazzo, G. Montana, A. Hein, A. Castiglia, G. Rodonò, and D. I. Donato, "Moisture absorption, thermal conductivity and noise mitigation of clay based plasters: The influence of mineralogical and textural characteristics," 2016.
[26] N. Benmansour, B. Agoudjil, A. Gherabli, A. Kareche, and A. Boudenne, "Thermal and mechanical performance of natural mortar reinforced with date palm fibers for use as insulating materials in building," *Energy Build.*, vol. 81, pp. 98–104, Oct. 2014.
[27] M. Palumbo, F. McGregor, A. Heath, and P. Walker, "The influence of two crop by-products on the hygrothermal properties of earth plasters," *Build. Environ.*, vol. 105, pp. 245–252, Aug. 2016.
[28] Y. Jiang *et al.*, "Moisture buffer, fire resistance and insulation potential of novel bio-clay plaster," *Constr. Build. Mater.*, vol. 244, p. 118353, May 2020.
[29] E. Latif, M. Lawrence, A. Shea, and P. Walker, "Moisture buffer potential of experimental wall assemblies incorporating formulated hemp-lime," *Build. Environ.*, vol. 93, no. P2, pp. 199–209, Nov. 2015.
[30] C. J. Tsenoglou, S. Pavlidou, and C. D. Papaspyrides, "Evaluation of interfacial relaxation due to water absorption in fiber-polymer composites," 2006.
[31] S. P. Subramaniyan, M. A. Imam, and P. Prabhakar, "Fiber packing and morphology driven moisture diffusion mechanics in reinforced composites A R T I C L E I N F O," *Compos. Part B*, vol. 226, pp. 1359–8368, 2021.
[32] Y. Cui, Y. Zhang, and H. Janssen, "EMPD-based moisture buffering quantification with moisture-dependent properties (I): Modelling and simulations," *Build. Environ.*, vol. 205, p. 108266, Nov. 2021.
[33] H. Wan, G. Huang, S. Liu, S. Fan, X. Xu, and J. Yu, "Optimal moisture buffering thickness of the hygroscopic material layer: Modeling and derivation," *Build. Environ.*, vol. 205, p. 108257, Nov. 2021.
[34] D. Welch, D. Shepherd, K. N. Dirks, and R. Reddy, "Health effects of transport noise," *Transp. Rev.*, pp. 1–21, Jun. 2023.

[35] Hakzah, A. I. Pawelloi, N. Nasir, and S. Hamzah, "The effect of traffic noise on public health," *Enfermería Clínica*, vol. 30, pp. 249–253, Oct. 2020.
[36] J. Hong, H. Kang, T. Hong, H. S. Park, and D. E. Lee, "Construction noise rating based on legal and health impacts," *Autom. Constr.*, vol. 134, p. 104053, Feb. 2022.
[37] M. S. Andargie, M. Touchie, and W. O'brien, "A review of factors affecting occupant comfort in multi-unit residential buildings," 2019.
[38] C. Díaz and A. Pedrero, "An experimental study on the effect of rolling shutters and shutter boxes on the airborne sound insulation of windows," *Appl. Acoust.*, vol. 70, no. 2, pp. 369–377, Feb. 2009.
[39] M. Frontczak and P. Wargocki, "Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments."
[40] D. Cuiyun, C. Guang, X. Xinbang, and L. Peisheng, "Sound absorption characteristics of a high-temperature sintering porous ceramic material."
[41] B. Marques *et al.*, "Rice husk cement-based composites for acoustic barriers and thermal insulating layers," *J. Build. Eng.*, vol. 39, p. 102297, Jul. 2021.
[42] M. A. Pedre ~ No-Rojas, M. J. Morales-Conde, F. P Erez-G Alvez, and C. Rodríguez-Li, "Eco-efficient acoustic and thermal conditioning using false ceiling plates made from plaster and wood waste," 2017.
[43] T. Januševičius, J. Mažuolis, and D. Butkus, "Sound reduction in samples of environmentally friendly building materials and their compositions," 2016.
[44] A. D. T. Le, C. Maalouf, T. H. Mai, E. Wurtz, and F. Collet, "Transient hygrothermal behaviour of a hemp concrete building envelope," *Energy Build.*, vol. 42, pp. 1797–1806, 2010.
[45] Z. M. Ghermezgoli, M. Moezzi, J. Yekrang, A. Rafat, P. Soltani, and F. Barez, "Sound absorption and thermal insulation characteristics of fabrics made of pure and crossbred sheep waste wool," *J. Build. Eng.*, vol. 35, p. 102060, 2021.
[46] F. Karimi, P. Soltani, M. Zarrebini, and A. Hassanpour, "Acoustic and thermal performance of polypropylene nonwoven fabrics for insulation in buildings," *J. Build. Eng.*, vol. 50, p. 104125, 2022.
[47] E. T. Dönmez and E. Türker, "Thermal and Sound Insulation Performances of Building Panels Produced by Recycling Waste Fibres of Yarn Factories," *Text. Appar.*, vol. 32, no. 1, pp. 9–23, Mar. 2022.
[48] I. Oancea, C. Bujoreanu, M. Budescu, M. Benchea, A. Mihaela, and G. Adinaru, "Considerations on sound absorption coefficient of sustainable concrete with different waste replacements," 2018.
[49] A. P. Fantilli and D. Jóźwiak-Niedźwiedzka, "Influence of Portland cement alkalinity on wool-reinforced mortar," *https://doi.org/10.1680/jcoma.20.00003*, vol. 174, no. 3, pp. 172–181, Dec. 2020.
[50] N. Neithalath, J. Weiss, and J. Olek, "Acoustic performance and damping behavior of cellulose–cement composites," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 26, no. 4, pp. 359–370, May 2004.
[51] P. Glé, E. Gourdon, and L. Arnaud, "Acoustical properties of materials made of vegetable particles with several scales of porosity," 2010.
[52] D. A. Savitz, "Epidemiologic Studies of Electric and Magnetic Fields and Cancer: Strategies for Extending Knowledge," *Environ. Health Perspect.*, vol. 101, pp. 83–91, Jun. 1993.
[53] T. J. Bender *et al.*, "Cancer incidence among semiconductor and electronic storage device workers," *Occup. Environ. Med.*, vol. 64, no. 1, pp. 30 LP – 36, Jan. 2007.
[54] Z. Lou, R. Li, J. Liu, Q. Wang, Y. Zhang, and Y. Li, "Used dye adsorbent derived N-doped magnetic carbon foam with enhanced electromagnetic wave absorption

performance," *J. Alloys Compd.*, vol. 854, p. 157286, Feb. 2021.
[55] D. Wanasinghe, F. Aslani, and G. Ma, "Effect of water to cement ratio, fly ash, and slag on the electromagnetic shielding effectiveness of mortar," *Constr. Build. Mater.*, vol. 256, p. 119409, Sep. 2020.
[56] J.-M. Thomassin, C. Jé Rôme, T. Pardoen, C. Bailly, I. Huynen, and C. Detrembleur, "Polymer/carbon based composites as electromagnetic interference (EMI) shielding materials," 2013.
[57] X. Li, X. Yin, S. Liang, M. Li, L. Cheng, and L. Zhang, "2D carbide MXene Ti 2 CT X as a novel high-performance electromagnetic interference shielding material," 2019.
[58] C. Xiang *et al.*, "Lightweight and ultrathin TiO 2-Ti 3 C 2 T X /graphene film with electromagnetic interference shielding," 2018.
[59] W. wu Jin, W. kai Wang, S. Mazumdar, G. zhong Xu, and Q. Q. Zhang, "Carbon foams with Fe-organic network-derived Fe3O4 for efficient electromagnetic shielding," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 304, p. 127797, Aug. 2023.
[60] X. Zhang and W. Sun, "Microwave absorbing properties of double-layer cementitious composites containing Mn-Zn ferrite," 2010.
[61] W. Meng, D. Yuping, L. Shunhua, L. Xiaogang, and J. Zhijiang, "Absorption properties of carbonyl-iron/carbon black double-layer microwave absorbers," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 321, pp. 3442–3446, 2009.
[62] R. A. Khushnood, S. Ahmad, P. Savi, J.-M. Tulliani, M. Giorcelli, and G. A. Ferro, "Improvement in electromagnetic interference shielding effectiveness of cement composites using carbonaceous nano/micro inerts."
[63] Y. Li, Y. Liu, C. Jin, J. Mu, and J. Liu, "Research on mechanical and electromagnetic shielding properties of cement paste with different contents of fly ash and slag," *NDT E Int.*, vol. 133, p. 102736, Jan. 2023.
[64] L. Baoyi, Y. ⇑ Duan, and L. Shunhua, "The electromagnetic characteristics of fly ash and absorbing properties of cement-based composites using fly ash as cement replacement," 2011.
[65] M. Ozturk and D. D. L. Chung, "Enhancing the electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon-fiber reinforced cement paste by coating the carbon fiber with nickel," *J. Build. Eng.*, vol. 41, p. 102757, Sep. 2021.
[66] M. Ozturk, O. Akgol, K. Sevim, M. Karaaslan, M. Demirci, and E. Unal, "Experimental work on mechanical, electromagnetic and microwave shielding effectiveness properties of mortar containing electric arc furnace slag."
[67] H. Süleyman Gökçe, D. Hatungimana, and K. Ramyar, "Effect of fly ash and silica fume on hardened properties of foam concrete."
[68] I. W. Nam and H. K. Lee, "Synergistic effect of MWNT/fly ash incorporation on the EMI shielding/absorbing characteristics of cementitious materials," *Constr. Build. Mater.*, vol. 115, pp. 651–661, Jul. 2016.
[69] D. Micheli *et al.*, "Shielding effectiveness of carbon nanotube reinforced concrete composites by reverberation chamber measurements," *Proc. 2015 Int. Conf. Electromagn. Adv. Appl. ICEAA 2015*, pp. 145–148, Oct. 2015.
[70] D. Micheli *et al.*, "Electromagnetic properties of carbon nanotube reinforced concrete composites for frequency selective shielding structures," 2016.
[71] A. P. Singh *et al.*, "Multiwalled carbon nanotube/cement composites with exceptional electromagnetic interference shielding properties," *Carbon N. Y.*, vol. 56, pp. 86–96, May 2013.
[72] Z. Liu, H. Ge, J. Wu, and J. Chen, "Enhanced electromagnetic interference shielding of carbon fiber/cement composites by adding ferroferric oxide

nanoparticles," 2017.
[73] J. Chen, D. Zhao, H. Ge, and J. Wang, "Graphene oxide-deposited carbon fiber/cement composites for electromagnetic interference shielding application," 2015.
[74] H. N. Yoon, D. Jang, H. K. Lee, and I. W. Nam, "Influence of carbon fiber additions on the electromagnetic wave shielding characteristics of CNT-cement composites," *Constr. Build. Mater.*, vol. 269, p. 121238, Feb. 2021.
[75] G. Logesh *et al.*, "Carbon fiber reinforced composites from industrial waste for microwave absorption and electromagnetic interference shielding applications," *Ceram. Int.*, vol. 49, no. 2, pp. 1922–1931, Jan. 2023.
[76] M. del Río Merino, J. Santa Cruz Astorqui, P. Villoria Sáez, R. Santos Jiménez, and M. González Cortina, "Eco plaster mortars with addition of waste for high hardness coatings," *Constr. Build. Mater.*, vol. 158, pp. 649–656, Jan. 2018.
[77] L. C. M. Eberhardt, H. Birgisdottir, and M. Birkved, "Potential of Circular Economy in Sustainable Buildings," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 471, no. 9, 2019.
[78] J. Markarian, "Reducing the environmental impact of manufacturing," *Pharm. Technol.*, vol. 40, no. 1, pp. 36–38, 2016.
[79] H. Ku, H. Wang, N. Pattarachaiyakoop, and M. Trada, "A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites," *Compos. Part B Eng.*, vol. 42, no. 4, pp. 856–873, Jun. 2011.
[80] G. Di Bella, V. Fiore, G. Galtieri, C. Borsellino, and A. Valenza, "Effects of natural fibres reinforcement in lime plasters (kenaf and sisal vs. Polypropylene)," *Constr. Build. Mater.*, vol. 58, pp. 159–165, May 2014.
[81] M. Le Troedec *et al.*, "Influence of various chemical treatments on the composition and structure of hemp fibres," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 39, no. 3, pp. 514–522, Mar. 2008.
[82] I. Van de Weyenberg, T. Chi Truong, B. Vangrimde, and I. Verpoest, "Improving the properties of UD flax fibre reinforced composites by applying an alkaline fibre treatment," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 37, no. 9, pp. 1368–1376, Sep. 2006.
[83] T. Gurunathan, S. Mohanty, and S. K. Nayak, "A review of the recent developments in biocomposites based on natural fibres and their application perspectives," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 77, pp. 1–25, Oct. 2015.
[84] F. Iucolano, B. Liguori, P. Aprea, and D. Caputo, "Evaluation of bio-degummed hemp fibers as reinforcement in gypsum plaster," *Compos. Part B Eng.*, vol. 138, pp. 149–156, Apr. 2018.
[85] Krishan K. Chawla, *Composite Materials Science and Engineering*. Springer New York, NY, 2012.
[86] K. Daďourek, *Kompozitní materiály - druhy a jejich použití*, 1st ed. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007.
[87] Gottfried W. Ehrenstein, *Polymerní kompozitní materiály*. Scientia, 2006.
[88] B. Míšek, *Kompozity*. Brno: TDS Brno-SMS,s.r.o., 2003.
[89] J. Militký, *Textilní vlákna klasická a speciální*. Liberec, 2012.
[90] J. Navarro-Gregori, J. R. Martí-Vargas, and A. Llano-Torre, *Fibre Reinforced Concrete: Improvements and Innovations*. Springer Nature Switzerland AG, 2021.
[91] T. Deák and T. Czigány, "Chemical Composition and Mechanical Properties of Basalt and Glass Fibers: A Comparison," *Text. Res. J.*, vol. 79, no. 7, pp. 645–651, May 2009.
[92] B. Pratima, *Carbon Fiber*. Elsevier, 2020.

[93] D. L. C. Deborah, *Carbon Fiber Composites*. Butterworth-Heinemann, 1994.
[94] Grégr J, *Povrchové vlastnosti uhlíkových vláken*. 2004.
[95] L. Hong, *Fiberglass Science and Technology Chemistry, Characterization, Processing, Modeling, Application, and Sustainability*. Springer Cham, 2021.
[96] F. T. Wallenberger and P. A. Bingham, Eds., *Fiberglass and Glass Technology: Energy-Friendly Compositions and Applications*. Springer, 2010.
[97] G. Gardiner, "The making of glass fiber," *Composites World*, 2009. [Online]. Available: https://www.compositesworld.com/articles/the-making-of-glass-fiber.
[98] L. Svoboda and kolektiv, *Stavební hmoty*, 3 vydání. Bratislava: Jaga Groups s. r. o., 2005.
[99] P. Lízal, *Technologie stavebních prací II Modul 5 Provádění omítek*. Brno, 2005.
[100] J. Adámek and a kolektiv, *Stavební látky modul LÁTKY BI01-M02 maltoviny a kamenivo*. Brno.
[101] M. Bláha, *Omítky*, Profi & Ho. Grada Publishing, a. s., 2004.
[102] J. Adámek and a kolektiv, *Stavební látky modul BI01-M02*. .
[103] J. Bydžovský and J. Novák, *Maltoviny - laboratoře (M) modul 01*. .
[104] P. Kotlík and kolektiv, *Vápno*. Praha: Společnost pro technologie ochrany památek - STOP, 2001.
[105] J. Jirásek and M. Vavro, "Nerostné suroviny a jejich využití," 2008. [Online]. Available: http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/anorganicka_pojiva.html?fbclid=IwAR2bVd_D7O19PnU-idHttrsdARFWp91XU-UI6-6LfEGq-Jtvj7t0tsThtkQ.
[106] P. Rovnaníková and P. Rovnaník, *Stavební chemie modul 2 anorganická chemie a chemie anorganických stavebních materiálů*. Brno, 2004.
[107] J. Jirásek and M. Vavro, *Nerostné suroviny a jejich využití*. Ostrava: Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy ČR & Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2008.
[108] P. Hewlett and M. Liska, *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. Butterworth-Heinemann, 2019.
[109] ČSN EN 197-1 ed. 2, "Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití," *Praha Úřad pro Tech. Norm. Metrol. a státní zkušebnictví*, 2012.
[110] ČSN EN 1015-11, "Zkušební metody malt pro zdivo část 11: Stanovení pevnosti zatvrdlých malt v tahu za ohybu a v tlaku." Praha: Český normalizační institut., 2020.
[111] ČSN EN ISO 197-2, "Plasty - Stanovení rázové houževnatosti Charpy." Praha: Český normalizační institut., 2000.
[112] ČSN EN ISO 15148, "Tepelně vlhkostní chování stavebních materiálů a výrobků - Stanovení nasákavosti částečným ponořením." 2004.
[113] ČSN 727030, "Stanovení součinitele difúzní páry stavebních materiálů. Všeobecná část." 1974.
[114] M. Balík and Kolektiv, *Odvlhčování staveb - 2*. Grada, 2008.
[115] M. Pinterić, *Building Physics*. Springer Cham, 2021.
[116] M. Binnewies, R. Glaum, M. Schmidt, and P. Schmidt, *Chemical Vapor Transport Reactions*. De Gruyter, 2012.
[117] L. Ptáček, *Nauka o materiálu I*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001.
[118] J. Kaňka, *Akustika stavebních objektů*. Era - vydavatelství, 2009.
[119] D. A. Bies and C. H. Hansen, *Engineering Noise Control - Theory and Practice*, Spon Press. London, UK, 2009.
[120] R. Ďuriš and E. Labašová, "The design of an impedance tube and testing of sound

absorption coefficient of selected materials," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1050, p. 12003, Jan. 2021.
[121] "ČSN ISO 10534-2 Akustika - Určování činitele zvukové pohltivosti a akustické impedance v impedančních trubicích − Část 2: Metoda přenosové funkce." Praha: Český normalizační institut., 2000.
[122] M. Möser, *Engineering Acoustic: An Introduction to Noise Control*. Springer, 2009.
[123] S. Duquesne, C. Magniez, and C. Giovanni, *Multifunctional Barries for Flexible Structure*. Springer, 2010.
[124] V. Schejbal, K. Dvořák, and J. Šroll, "Electromagnetic compability and shielding," *Electrorevue*, vol. 13, 2011.
[125] P. A. Chatterton and M. A. Houlden, *Electromagnetic Theory to Practical Design*. Wiley, 1992.
[126] J. Svačina, "Elektromagnetická kompatibilita," 2002. [Online]. Available: https://home.pilsfree.net/fantom/FEL/EMC/EMC_skripta.pdf.
[127] H. W. Ott, *Electromagnetic Compatibility Engineering*. New Jersey: Wiley, 2009.
[128] R. Perumalraj, B. S. Dasaradan, R. Anbarasu, P. Arokiaraj, and S. Leo Harish, "Electromagnetic shielding effectiveness of copper core-woven fabrics," *J. Text. Inst.*, vol. 100, no. 6, pp. 512–524, 2009.
[129] ASTM 4935-18, "Test method for measuring the electromagnetic shielding effectivness os planar materials." Conshohocken, 2018.
[130] J. E. Ross, *Total Quality Management*. CRC Press, 1999.
[131] J. M. Juran, *Juran's Quality Handbook*, 5 th ed. NY USA: McGraw-Hill, 1998.
[132] S. Keen, "Use-Value, Exchange Value, and the Demise of Marx's Labor Theory of Value," *J. Hist. Econ. Thought*, vol. 15, pp. 107–121, Mar. 1993.
[133] V. Tunakova, M. Tunak, and J. Novotna, "Porous, low thickness carbon-fiber reinforced epoxy composites with excellent flexibility and superior electromagnetic radiation protection," *J. Ind. Text.*, vol. 53, p. 15280837231159868, Jan. 2023.
[134] W. D. Callister and J. G. David Rethwisch, *Material science and Engineering*. John Wiley a Sons, 2014.
[135] F. Iucolano, L. Boccarusso, and A. Langella, "Hemp as eco-friendly substitute of glass fibres for gypsum reinforcement: Impact and flexural behaviour," *Compos. Part B Eng.*, vol. 175, p. 107073, Oct. 2019.
[136] M. I. Romero-Gómez, R. V. Silva, I. Flores-Colen, and P. Rubio-de-Hita, "Mechanical performance of waste fishing net fibre-reinforced gypsum composites," *Constr. Build. Mater.*, vol. 387, p. 131675, Jul. 2023.
[137] R. K. Demircan, B. A. Tayeh, D. N. Celik, G. Kaplan, and D. E. Tobbala, "The effect of animal and synthetic fibers on the physico-mechanical durability and microstructure properties of natural hydraulic lime-based mortars," *Mater. Today Commun.*, vol. 35, p. 106041, Jun. 2023.

**Publikace**


[138] A. Samková, P. Kulhavý, M. Pechočiaková, *Effect of fibrous reinforcement on moisture absorption of plaster composites*, Aachen-Dresden-Denkendorf International textile conference Book of abstracts, Aachen, p. 263, 1 pages, 2019.

[139] A. Samková, P. Kulhavý, R. Jirkovec, *Impact of the plaster medium on fibres degradation*, International Ph.D. students Day - book of extended abstracts, Liberec, Technická univerzita v Liberci, 1, 4 pages, 2019.

[140] P. Kulhavý, A. Samková, M. Petrů, M. Pechočiaková, *Improvement of the Acoustic Attenuation of Plaster Composites by the Addition of Short-Fibre Reinforcement*, Advances in Materials Science and Engineering, Hindawi Publishing Corporation, 1, 15 pages, ISSN: 1687-8434, [Online], 2018.

[141] A. Samková, P. Kulhavý, V. Tunáková, M. Petrů, *Improving Electromagnetic Shielding Ability of Plaster-Based Composites by Addition of Carbon Fibers*, Advances in Materials Science and Engineering, London, Hindawi Limited, 1, p. 1-14, 14 pages, ISSN: 1687-8434, n. 7, [Online], 2018.

[142] A. Samková, P. Kulhavý, M. Pechočiaková, *Possibilities to improve electromagnetic shielding of plaster composites adding carbon fibers*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Institute of Physics Publishing, 6 pages, ISSN: 1757-899X, n. 4, 2017.

[143] P. Kulhavý, A. Samková, *Study of the acoustic attenuation in plaster composites in dependency on added fiber reinforcement*, Vibroengineering Procedia, JVE International, p. 179-185, 6 pages, ISSN: 2345-0533, [Online], 2017.

[144] A. Samková, P. Kulhavý, M. Pechočiaková, *The influence of fiber reinforcement on the properties of gypsum plaster*, International Ph.D. Students Day, Liberec, Technická univerzita v Liberci, 1, ISBN: 978-80-7494-355-3, p. 106-109, 138 pages, 2017.

[145] A. Samková, P. Kulhavý, *Influence of carbon fiber fraction on plaster composites ability to electromagnetic shielding*, Workshop for Ph.D. Students of Faculty of Textile Engineering and Faculty of Mechanical Engineering TUL, Liberec, Technická univerzita v Liberci, 1, ISBN: 978-80-7494-293-8, p. 115-118, 4 pages, 2016.

[146] A. Samková, P. Kulhavý, M. Pechočiaková, *Optimization parameters of plaster composites*, EAN 2016 - 54th International Conference on Experimental Stress Analysis, 1, ISBN: 978-80-261-0624-1, 6 pages, 2016.

[147] A. Samková, P. Pokorný, T. Kalous, J. Erben, M. Pechočiaková, P. Kryšková, *Fibre reinforcement effect on plaster composite properties*, Nanofibers, Applications and Related Technologies - NART 2015, Conference Proceedings, Technical University of Liberec, 2015, Technical University of Liberec, Czech Republic, 1, ISBN: 978-80-7494-265-5, p. 189-195, 7 pages, 2015.

## Seznam obrázků

Obr. 1 Synergické chování složek kompozitu ... 16
Obr. 2 Typy vlákenných kompozitů ... 17
Obr. 3 Schéma výroby čedičových vláken ... 18
Obr. 4 Schéma výroby uhlíkových vláken ze smol ... 20
Obr. 5 Schéma výroby skleněných vláken ... 22
Obr. 6 Karbonatace vápenné omítky ... 26
Obr. 7 Zjednodušené schéma výroby cementu ... 30
Obr. 8 Zatěžování zkušebního tělesa při zkoušce trojbodým ohybem ... 33
Obr. 9 Zatěžování zkušebního tělesa pro stanovení pevnosti v tlaku ... 33
Obr. 10 Schéma testování rázové houževnatosti ... 34
Obr. 11 Schéma měřícího zařízení pro transport kapalné vody ... 35
Obr. 12 Princip nestacionární difúze ... 36
Obr. 13 Rozklad dopadající zvukové vlny ... 38
Obr. 14 Schéma měření akustické pohltivosti pomocí impedanční trubice ... 38
Obr. 15 Skládání vlny vlivem mnohonásobného odrazu ve stěně přepážky ... 42
Obr. 16 Testovací zařízení EMS ... 42
Obr. 17 Diagram konstrukce užitné hodnoty ... 43
Obr. 18 Testování soudržnosti vláken s matricí ... 49
Obr. 19 Pevnost v tahu za ohybu pro jednotlivé omítky ... 52
Obr. 20 Vliv matrice a množství krátkovlákenné výztuže na pevnost v tahu za ohybu . 54
Obr. 21 Řezy vzorkem ... 55
Obr. 22 Porovnání pevnosti v tlaku pro jednotlivé typy omítek ... 56
Obr. 23 Vliv matrice a množství krátkovlákenné výztuže na pevnost v tlaku ... 58
Obr. 24 Porovnání rázové houževnatosti pro jednotlivé typy omítek ... 59
Obr. 25 Vliv typu matrice a krátkovlákenné výztuže na rázovou houževnatost ... 61
Obr. 26 Transport kapalné vody pro jednotlivé druhy omítek ... 62
Obr. 27 Transport kapalné vody pro vápennou omítku ... 64
Obr. 28 Transport kapalné vody pro vápeno-cementovou omítku ... 65
Obr. 29 Transport kapalné vody pro sádrovou omítku ... 67
Obr. 30 Transport kapalné vody pro cementovou omítku ... 68
Obr. 31 Hmotnostní přírůstek u kompozitů s 1 hm% vláken ... 70
Obr. 32 Hmotnostní přírůstek u kompozitů se 2 hm% vláken ... 71
Obr. 33 Hmotnostní přírůstek u kompozitů se 3 hm% vláken ... 73
Obr. 34 Hmotnostní přírůstek u kompozitů s perlinkou ... 74
Obr. 35 Hmotnostní přírůstek omítkových kompozitů s 1 hm% vlákenné výztuže ... 76
Obr. 36 Hmotnostní přírůstek omítkových kompozitů s 2 hm% vlákenné výztuže ... 78
Obr. 37 Hmotnostní přírůstek omítkových kompozitů s 3 hm% vlákenné výztuže ... 80
Obr. 38 Faktor difuzního odporu sádrového kompozitu ... 81
Obr. 39 Ekvivalentní difúzní tloušťka sádrových kompozitů ... 81
Obr. 40 Faktor difuzního odporu omítkových kompozitů s 1 hm% vláken ... 82
Obr. 41 Ekvivalentní difúzní tloušťka omítkových kompozitů s 1 hm% vláken ... 83
Obr. 42 Činitel zvukové pohltivosti pro jednotlivé typy omítek ... 84

Obr. 43 Řez vápeno-cementovou omítkou ... 85
Obr. 44 Vliv typu vlákenné výztuže na činitele akustické pohltivosti vápenné omítky . 87
Obr. 45 Vliv typu vlákenné výztuže na činitele akustické pohltivosti V-C ... 88
Obr. 46 Vliv typu vlákenné výztuže na činitele akustické pohltivosti sádrové omítky .. 90
Obr. 47 Vliv typu vlákenné výztuže na činitele akustické pohltivosti C ... 91
Obr. 48 Vliv přidání 1 hm% vláken na činitele zvukové pohltivosti ... 93
Obr. 49 Vliv přidání 2 hm% vláken na činitele zvukové pohltivosti ... 95
Obr. 50 Vliv přidání 3 hm% vláken na činitele zvukové pohltivosti ... 96
Obr. 51 Vliv perlinky na činitele zvukové pohltivosti ... 97
Obr. 52 Vliv vlákenného podílu na elektromagnetické stínění vzorku ... 100
Obr. 53 SE pro jednotlivé typy omítek při frekvenci 1500 MHz ... 101
Obr. 54 Porovnání účinnosti elektromagnetického stínění při frekvenci 1500 Hz ... 102
Obr. 55 Řez vápeno-cementovou a sádrovou omítkou ... 103
Obr. 56 Vliv vlhkosti na elektromagnetické stínění vzorku ... 105
Obr. 57 Porovnání účinnosti elektromagnetického stínění ... 107
Obr. 58 Mechanismus elektromagnetického stínění sádrových kompozitů ... 108
Obr. 59 Mechanismus elektromagnetického stínění vápenocementových kompozitů . 109
Obr. 60 Vliv tloušťky na účinnost elektromagnetického stínění ... 110
Obr. 61 Vliv jednotlivých vlastností na stanovení užitné vlastnosti ... 112
Obr. 62 Vliv dílčích vlastností na stanovení užitné vlastnosti ... 113

## Seznam tabulek

Tab. 1 Rozdělení omítek dle použitého pojiva ... 24
Tab. 2 Vlastnosti vápenné omítky uvedené výrobcem ... 44
Tab. 3 Vlastnosti vápenocementové omítky uvedené výrobcem ... 45
Tab. 4 Vlastnosti sádrové omítky uvedené výrobcem ... 45
Tab. 5 Vlastnosti cementové omítky uvedené výrobcem ... 46
Tab. 6 Vlastnosti skleněných svazků uvedené výrobcem ... 46
Tab. 7 Vlastnosti uhlíkových vláken uvedené výrobcem ... 47
Tab. 8 Vlastnosti čedičových vláken uvedené výrobcem ... 47
Tab. 9 Vlastnosti skleněné perlinky uvedené výrobcem ... 47
Tab. 10 Pevnost a protažení skleněné perlinky uvedené výrobcem (osnova/útek) ... 48
Tab. 11 Vlastnosti čedičové perlinky uvedené výrobcem ... 48
Tab. 12 Parametry svazků vláken ... 48
Tab. 13 Parametry svazků vláken zapuštěných do matrice/omítky ... 49
Tab. 14 Konečná délka krátkovlákenné výztuže ... 50
Tab. 15 Přehled označení vyrobených vzorků ... 50
Tab. 16 Průměrné hodnoty pevnosti v tahu za ohybu ... 54
Tab. 17 Průměrná hodnota pevnosti v tlaku [MPa] pro všechny typy kompozitů ... 58
Tab. 18 Průměrné hodnoty rázové houževnatosti ... 59
Tab. 19 Transport kapalné vody, hmotnostní přírůstek $M$ [%] v čas nasycení vzorku .. 68
Tab. 20 Průměrné hodnoty faktoru difúzního odporu $\mu$ [-] omítkových kompozitů ... 83
Tab. 21 Průměrné hodnoty ekvivalentní difúzní tloušťky ... 83

Tab. 22 Objemová hmotnost pro jednotlivé druhy kompozitů [kg·m$^{-3}$]..... 85
Tab. 23.: Třídy elektromagnetické účinnosti pro profesionální použití ..... 100
Tab. 24 Vlastnosti pro stanovení užitné hodnoty omítkových kompozitů ..... 111
Tab. 25 Index kvality omítkových kompozitů..... 111
Tab. 26 Vlastnosti pro stanovení užitné hodnoty omítkových kompozitů s EMS ..... 112
Tab. 27 Index kvality omítkových kompozitů pro SE..... 113

# Příloha 1 – Hmotnostní podíly vlákenných složek pro jednotlivé typy omítek

Tab. 1 Hmotnostní podíl vlákenné složky pro vápennou omítku

| | čedič | sklo | uhlík |
|---|---|---|---|
| $V_i$ [%] | $w_i$ [%] | | |
| 1 | 2,28 | 1,97 | 1,79 |
| 2 | 4,51 | 3,91 | 3,56 |
| 3 | 6,68 | 5,81 | 5,29 |

Tab. 2 Hmotnostní podíl vlákenné složky pro vápeno-cementovou omítku

| | čedič | sklo | uhlík |
|---|---|---|---|
| $V_i$ [%] | $w_i$ [%] | | |
| 1 | 5,05 | 4,38 | 4,00 |
| 2 | 9,70 | 8,47 | 7,74 |
| 3 | 13,80 | 12,13 | 11,28 |

Tab. 3 Hmotnostní podíl vlákenné složky pro sádrovou omítku

| | čedič | sklo | uhlík |
|---|---|---|---|
| $V_i$ [%] | $w_i$ [%] | | |
| 1 | 2,50 | 2,16 | 1,96 |
| 2 | 4,23 | 4,26 | 3,87 |
| 3 | 6,32 | 6,32 | 5,76 |

Tab. 4 Hmotnostní podíl vlákenné složky pro cementovou omítku

| | čedič | sklo | uhlík |
|---|---|---|---|
| $V_i$ [%] | $w_i$ [%] | | |
| 1 | 0,96 | 0,83 | 0,75 |
| 2 | 1,92 | 1,66 | 1,51 |
| 3 | 2,88 | 2,49 | 2,27 |

Tab. 5 Hmotnosti vlákenných složek pro výrobu 1 kg vápenné směsi

| | čedič | sklo | uhlík |
|---|---|---|---|
| Obsah vláken [%] | m [g] | | |
| 1 | 22,8 | 19,7 | 17,9 |
| 2 | 45,1 | 39,1 | 35,6 |
| 3 | 66,8 | 58,1 | 52,9 |

Tab. 6 Hmotnosti vlákenných složek pro výrobu 1 kg vápeno-cementové směsi

| | čedič | sklo | uhlík |
|---|---|---|---|
| Obsah vláken [%] | m [g] | | |
| 1 | 50,5 | 43,8 | 39,9 |
| 2 | 97 | 84,7 | 77,4 |
| 3 | 138 | 121,3 | 112,8 |

Tab. 7 Hmotnosti vlákenných složek pro výrobu 1 kg sádrové směsi

| | čedič | sklo | uhlík |
|---|---|---|---|
| Obsah vláken [%] | m [g] | | |
| 1 | 25 | 2,16 | 19,6 |
| 2 | 42,3 | 4,56 | 38,7 |
| 3 | 63,2 | 6,32 | 57,6 |

Tab. 8 Hmotnosti vlákenných složek pro výrobu 1 kg cementové směsi

| | čedič | sklo | uhlík |
|---|---|---|---|
| Obsah vláken [%] | m [g] | | |
| 1 | 9,6 | 8,3 | 7,5 |
| 2 | 19,2 | 16,6 | 15,1 |
| 3 | 28,8 | 24,9 | 22,7 |