



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍHO STAVITELSTVÍ

INSTITUTE OF BUILDING STRUCTURES

HLINĚNÉ OMÍTKY PRO VENKOVNÍ POUŽITÍ

CLAY PLASTERS FOR OUTDOOR USE

DISERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. arch. Barbora Jelínková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Milan Ostrý, Ph.D.

BRNO 2024

Abstrakt

Jedním z trendů současného stavitelství je využití přírodních materiálů, jako je například sláma nebo nepálená hlína. Tato tradiční kombinace materiálů naráží v moderních aplikacích na relativně nízkou odolnost proti povětrnostním vlivům, což omezuje jejich exteriérové aplikace. Tato disertační práce se zaměřuje na posouzení vlivu přírodních hydrofobizačních přísad, práškového kaseinu a ricinového oleje, na odolnost hliněných omítek. Hodnocení hydrofobizačních prostředků probíhalo na vybraných vzorcích prefabrikovaných hliněných omítek. Tyto vzorky byly podrobeny laboratorním zkouškám (pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu, vzlínavost, odolnost proti dešťové erozi, difuze vodní páry, hygroskopická sorpce) a vystaveny povětrnostním vlivům v exteriéru po dobu 3 let. Na základě provedených zkoušek lze konstatovat, že použití ricinového oleje a práškového kaseinu se při nízkých koncentracích jeví jako účinný hydrofobizační prostředek pro hliněné omítky. Vhodnost aplikace hydrofobizovaných hliněných omítek na slaměnou stěnu z hlediska tepelně-vlhkostního chování byla vyhodnocena pomocí numerických simulací v programu WUFI, založených na experimentálních datech. Výsledky simulací ukazují, že aplikace malého množství (do 2 %) zkoumaných hydrofobizačních přísad nemá výrazný vliv na tepelně-vlhkostní parametry simulované konstrukce a nezvyšuje tak ani riziko hniloby a růstu hub a plísní.

Klíčová slova

hliněné omítky, venkovní použití, hydrofobizační přísada, ricinový olej, práškový kasein, laboratorní měření, měření *in situ*, numerická simulace

Abstract

One of the trends in contemporary architecture is use of natural construction materials, such as straw bales combined with clay plasters. The drawback of this material combination is its low durability when exposed to Central European weather conditions. This dissertation therefore focuses on evaluation of two natural hydrophobic agents (casein and ricin oil) as additives increasing the durability of clay plasters exposed to external weather. The evaluation is based on laboratory (compressive and tensile strength, capillary action, water erosion resistance, water vapor diffusion and hygroscopic sorption) and (3-year long) on-site testing of plaster samples. The results show that both agents are a suitable hydrophobizers for clay plasters. The suitability of the application of hydrophobized clay plasters on the straw wall in terms of its thermal-moisture behavior is evaluated using numerical simulations in the WUFI software based on experimental data. The simulation results indicate that low quantities (below 2 %) of the evaluated agents don't have noticeable impact on parameters of the structure and therefore do not increase the risk of rotting or algae and fungi infestation.

Keywords

clay plaster, outdoor use, hydrophobic agent, castor oil, casein powder, laboratory tests, on-site tests, numerical simulation

Bibliografická citace:

Ing. arch. Barbora Jelínková *Hliněné omítky pro venkovní použití*. Brno, 2024. 99 s., 137 s. příl. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemního stavitelství. Vedoucí práce prof. Ing. Milan Ostrý, Ph.D.

Poděkování:

V první řadě bych ráda poděkovala mojí rodině, především mému manželovi, dcerám a rodičům, u kterých jsem našla oporu, trpělivost a empatii. Moc si vážím jejich pochopení a podpory v mé vědecké práci, díky čemuž jsem neztratila sílu a motivaci svůj výzkum a disertační práci dokončit.

Poděkování také patří mému školiteli prof. Ing. Milanovi Ostrému, Ph.D. za jeho odborné vedení a trpělivost. Děkuji Ondřeji Netíkovi za jeho zkušenosti a znalosti, které mně s ochotou během několika let práce s hliněnými omítkami předával. Děkuji Ing. Ivo Novákovi, díky jehož cenným radám jsem se lépe zorientovala v prostředí laboratorního výzkumu. Taktéž děkuji Ing. Tereze Komárkové, Ph.D. za pomoc při provádění laboratorních zkoušek na Ústavu stavebního zkušebnictví na Fakultě stavební VUT v Brně. A opětovně děkuji mému manželovi Ing. Petru Jelínkovi, Ph.D. za pomoc při výrobě měřicích aparatur.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci s názvem Hliněné omítky pro venkovní použití zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 29. 2. 2024

Ing. arch. Barbora Jelínková
autor práce

OBSAH

OBSAH	7
A. Úvod	10
Vlastní motivace k práci	11
B. Současný stav řešené problematiky	13
B.1 Nepálená hlína jako stavební materiál	13
B.1.1 Historie nepálené hlíny ve stavebnictví	13
B.1.2 Složení hliněných omítek	14
B.1.2.1 Pojivo – jíl	14
B.1.2.2 Plnivo – prach, písek, štěrk	16
B.1.2.3 Voda	16
B.1.2.4 Další doplňující složky	17
B.1.3 Materiálové vlastnosti	17
B.1.3.1 Odolnost proti degradaci	18
B.1.3.2 Objemová hmotnost	19
B.1.3.3 Pórovitost	19
B.1.3.4 Objemové změny	20
B.1.3.5 Pevnost v tlaku	21
B.1.3.6 Pevnost v tahu za ohybu	21
B.1.3.7 Hranová pevnost	22
B.1.3.8 Přílnavost	23
B.1.3.9 Tepelná vodivost	24
B.1.3.10 Součinitel teplotní vodivosti	24
B.1.3.11 Hygroskopicitá	25
B.1.3.12 Difuze vodní páry	26
B.1.3.13 Otěruvzdornost	27
B.1.3.14 Odolnost proti dešťové erozi	28
B.1.3.15 Kapilární absorpce	32
B.1.3.16 Smáčivost	33
B.1.3.17 Mrazuvzdornost	34
B.1.3.19 Zvuková pohltivost	34
B.1.4 Hliněné omítky z hlediska životního cyklu budovy a dopadů na životní prostředí	34
B.1.4.1 Svázané emise a energie	34
B.1.4.2 Recyklovatelnost a redukce odpadů	37
B.1.5 Průmyslově vyráběné hliněné výrobky	38

B.1.6	Použití hliněných omítek v budovách	39
B.1.6.1	Historické a současné použití hliněných omítek v budovách na našem území	39
B.1.6.2	Příprava podkladu pro použití hliněných omítek	40
B.1.6.3	Technologie provádění hliněných omítek.....	42
B.1.7	Zkoušení hliněných omítek.....	43
B.2	Hydrofobizační přísady a nátěry pro použití omítek v exteriéru	44
B.2.1	Princip hydrofobizace	44
B.2.2	Historické techniky.....	45
B.2.3	Vývoj a současný stav hydrofobizačních činidel.....	47
C.	Zhodnocení literárních poznatků	50
C.1	Vhodnost použití hliněných omítek do exteriéru.....	50
C.2	Bílá místa	50
D.	Cíle disertační práce.....	52
D.1	Specifikace cílů práce	52
D.2	Zdůvodnění volby cílů	52
D.3	Prostředky pro dosažení cílů.....	53
E.	Materiál a metody	54
E.1	Typ hydrofobizačního činidla.....	54
E.2	Koncentrace hydrofobizačního činidla	55
E.3	Prefabrikované hliněné směsi	57
E.3.1	Testování prefabrikovaných hliněných směsí	58
E.3.1.1	Objemová hmotnost.....	59
E.3.1.2	Pevnost v tahu za ohybu.....	59
E.3.1.3	Pevnost v tlaku.....	60
E.4	Testování hliněných omítek s obsahem činidla	60
E.4.1	Laboratorní testování.....	61
E.4.1.1	Objemová hmotnost.....	61
E.4.1.2	Pevnost v tahu za ohybu.....	61
E.4.1.3	Pevnost v tlaku.....	61
E.4.1.4	Kapilární absorpce (vzlínavost).....	61
E.4.1.5	Odolnost proti dešťové erozi (zkouška postřikem)	63
E.4.1.6	Difuze vodní páry	65
E.4.1.7	Hygroskopická sorpce.....	67
E.4.2	Zkoušení <i>in situ</i>	68

E.5	Numeric. simulace tepelně-vlhkostního chování vybrané konstrukce .	69
E.5.1	Skladba konstrukce a použité materiály	69
E.5.2	Nástroj pro numerickou simulaci.....	71
F.	Výsledky a diskuze	73
F.1	Prefabrikované hliněné směsi	73
F.2	Vlastnosti hliněných omítek s obsahem čínidla	73
F.2.1	Vliv přidání hydrofobizačního prostředku na konzistenci a zpracovatelnost hliněné směsi.....	73
F.2.2	Testování v laboratoři	74
F.2.2.1	Pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku	74
F.2.2.2	Kapilární absorpce (vzlínavost).....	77
F.2.2.3	Odolnost proti dešťové erozi	81
F.2.2.4	Difuze vodní páry	87
F.2.2.5	Hygroskopická sorpce.....	88
F.2.3	Testování <i>in situ</i>	91
F.2.4	Subjektivní smyslové posouzení.....	95
F.3	Numeric. simulace tepelně-vlhkostního chování vybrané konstrukce .	98
G.	Přínos pro technickou praxi a rozvoj vědního oboru.....	105
H.	Možnost navazujícího výzkumu.....	108
I.	Seznam použitých zdrojů.....	109
I.1	Literatura	109
I.2	Ostatní zdroje	118
I.3	WWW zdroje	121
J.	Seznam použitých zkratk a symbolů	122
K.	Seznam obrázků	123
L.	Seznam tabulek.....	128
M.	Přílohy	129
M.1	Porovnání parametrů hliněných omítek určených z laboratorních měření a z technických listů od výrobců	129
M.2	Měřicí technika klimatických parametrů v Brně - Kníničkách	131
M.3	Přehledová tabulka vzorků a prováděných zkoušek	132
M.4	Doplňkové grafy k měření kapilární absorpce vody	133
M.5	Fotografie vzorků hliněných omítek bezprostředně po instalaci panelů na pozemek	136
M.6	Doplňkový graf k numerické simulaci.....	137

A. ÚVOD

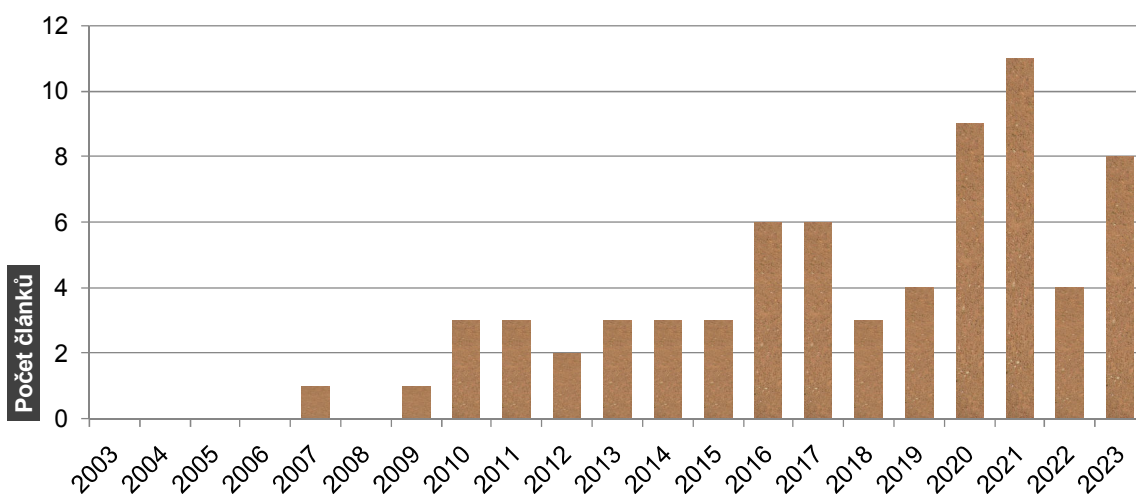
Zájem o hliněné omítky, pozorovaný v posledním desetiletí na našem území, je kromě počtu realizací možné ilustrovat také vzrůstající poptávkou po prefabrikovaných hliněných omítkách (Tab. 1). Hliněným omítkám se dostává zvýšené pozornosti také ve vědecké komunitě, což ilustruje nárůst publikovaných článků v databázi ScienceDirect za posledních 20 let, znázorněný na Obr. 1.

Tab. 1 – Vývoj prodeje hliněných omítek od roku 2014 u dvou výrobců (PICAS a CEMIX)

Výrobce	Nárůst prodeje hliněných omítek oproti předchozímu roku									
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
PICAS	+ 18 %	+ 0,1 %	+ 34 %	- 12 %	+ 21 %	- 7 %	+ 13 %	- 8 %	+ 14 %	
CEMIX	*	*	*	*	*	*	+ 68 %	+ 0 %	+ 5 %	

* údaje nejsou k dispozici

Zájem o hliněné omítky začal vzrůstat díky pozornosti upínající se ke kvalitě vnitřního prostředí budov a k použití přírodních materiálů (Chybík, 2009; Hudec, 2013). Dle výzkumu (Darling, 2012) je z hlediska subjektivního hodnocení kvality vzduchu a měření koncentrace aldehydů kvalita vzduchu v místnostech s hliněnými omítkami vyšší než u konvenčních materiálů. Ve srovnání s jinými materiály dokážou hliněné omítky rychleji a ve větší míře přijímat a vydávat vlhkost z okolního vzduchu, čímž přispívají ke stabilizaci vlhkosti v interiéru (Minke, 2009; Liuzzi, 2013).



Obr. 1 – Počty článků zabývajících se výzkumem hliněných omítek v databázi ScienceDirect za posledních 20 let

Na zvyšujícím se zájmu o hliněné omítky má taktéž podíl hledisko environmentální, jelikož vliv výroby hliněných omítek na životní prostředí je podstatně menší než u konvenčních omítek (Melià, 2014). Z toho důvodu postupně nacházejí hliněné omítky své uplatnění nejen v interiéru, ale i v exteriéru. A to nejen u budov v památkové péči, například u roubených staveb, kde jsou nenahraditelné (Madaj, 2015), ale i u novostaveb (RD v Kruplově, RD v Rapoticích, RD v Babicích nad Svitavou atd.).

Vzhledem k nízké odolnosti proti povětrnostním vlivům se hliněné omítky zpravidla chrání proti přímému působení deště pomocí přesahu střešní konstrukce (konstrukční ochrana), mnohdy však toto opatření není dostačující (větrem hnané deště). V některých případech tato forma ochrany není možná z architektonických, provozních či dispozičních důvodů, proto je nutné použít jiné opatření. Historicky byly na venkovní hliněné povrchy aplikovány hydrofobní nátěry, které však bylo nutné v pravidelných intervalech obnovovat. Jako jedno z možných dlouhodobých řešení se jeví použití hydrofobizačních přísad, které zvýší odolnost hliněných omítek vůči účinkům vody a tím prodlouží jejich životnost. Určení vhodného typu hydrofobizačního prostředku, díky němuž budou splněny požadavky na vyšší odolnost, životnost, estetické a uživatelské (údržba) vlastnosti povrchu omítky, je podstatou disertační práce.

Vlastní motivace k práci

Vlastní motivace k provedení výzkumu a sepsání disertační práce vycházela z předchozí mnohaleté zkušenosti s hliněnými omítkami. Na bakalářském studiu jsem se v rámci samostudia i studentských prací začala více zajímat a pronikat do problematiky hliněných omítek pod vedením M.Arch. Petry Orator. Na konci bakalářského studia jsem oslovila certifikovaného lektora SHS (Sdružení hliněného stavitelství, o.s.) a řemeslníka Ondřeje Netíka, pod jehož odborným vedením jsem následující roky prováděla hliněné omítky na sedmi stavbách (rekreační objekt v Popůvkách u Brna, RD v Babicích nad Svitavou, 2x RD v Pejškově, RD v Rapoticích, RD v Brně-Židenicích, RD v Brně-Kníničkách). Dále jsem absolvovala certifikovaný kurz ECVET Poznej hlínu (U2) a spolupracovala s Ing. Ivo Novákem, který se podílel na vývoji hliněných omítek ve společnosti LB CEMIX. Několikaletý přímý kontakt s řemeslníky a

stavebníky a vlastní zkušenosti s aplikací hliněných omítek mě formovaly a inspirovaly v následujícím směřování mé disertační práce a v přístupu k vědě. Setkala jsem se s mnoha stavebníky, kteří se i přes nedostatečnou probádanost rozhodli použít hliněné omítky do exteriéru s vědomím nejistého výsledku ohledně trvanlivosti a nutnosti obnovovat povrchovou úpravu. Na základě těchto zkušeností jsem našla potenciál své práce spočívající ve vývoji vhodného hydrofobizačního prostředku pro hliněné omítky pro venkovní použití, kdy zásadními kritérii mého výzkumu se stalo posouzení širokého spektra vlastností a přímá aplikovatelnost v praxi.

B. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

B.1 Nepálená hlína jako stavební materiál

B.1.1 Historie nepálené hlíny ve stavebnictví

Nepálená hlína patří mezi nejstarší stavební materiály. Zaznamenané případy použití hliněných cihel sahají až do Mezopotámie kolem roku 10 000 před naším letopočtem. Vzhledem k náchylnosti staveb z hlíny vůči projevům počasí zůstávají důkazy o jejich existenci pouze v extrémně suchém podnebí. Nejstarší známá existující hliněná stavba se nachází v Novém Mexiku a je stará 900 let (Heatcote, 1995).

Na našem území představuje hliněná architektura nezanedbatelnou část našeho památkového fondu. Od prehistorických dob se hlína používala na omazávání pletených konstrukcí, od středověku se hliněná mazanice používala též ve spojení s roubenou konstrukcí. Užití nepálené hlíny jako hlavního stavebního materiálu je u nás zmiňováno ve 13. až 14. století, masivní nástup hliněných konstrukcí však započal v 18. století vydáním tereziánského protipožárního opatření (Žabičková, 2002). Doba rozkvětu staveb z nepálené hlíny byla ukončena na přelomu 19. a 20. století, kdy se do našich zemí rozšířila technologie výpalu cihel v kruhové peci, díky které došlo k prudkému zvýšení objemu výroby a snížení ceny pálených cihel. Cihlářský průmysl ve snaze o další zvýšení výroby a zisků prosadil úplný zákaz používání nepálené hlíny ve stavbách, jak dokládá zákon č. 39 (Změna a doplnění stavebního řádu brněnského) z roku 1914 (Žabičková, 2002; Havlíček, 1958). Po druhé světové válce byl znovu zaznamenán návrat k hliněným stavbám, nicméně s nástupem moderních stavebních materiálů došlo k ukončení výstavby z nepálené hlíny. Tisíce domů z nepálené hlíny po celém území naší země se dochovalo do dnešní doby, nejstarší dochovanou známou hliněnou stavbou je jádro komory se žudrem (klenutým přístavkem u vchodu do domu) v Pouzdřanech, pocházející z 16. století (Syrová, 2002).

Návrat k nepálené hlíně v našich zemích nastal opět až na konci 20. století se zvyšujícím se zájmem o ekologickou výstavbu a materiály s příznivým účinkem na zdraví obyvatel.

B.1.2 Složení hliněných omítek

Hlavními a nezbytnými složkami hliněných omítek a jiných produktů z nepálené hlíny jsou jíly, plnicí funkci pojiva, kamenivo jako plnivo a voda. Podle toho, která z anorganických složek v hlíně převažuje, mluvíme o jílovité, prachové nebo písčité hlíně. Poměr jednotlivých komponent má rozhodující vliv na plasticitu hlíny a její další vlastnosti, jako jsou například pevnostní charakteristiky či hygroskopická sorpce. Hlína bohatá na jíl je velmi plastická a lepkavá, při vysychání se však hodně smršťuje a praská. Přídavkem nejílových složek, především písku, lze snížit míru smrštění a potlačit praskání v průběhu vysychání (Kotlík, 1999). Naopak s omítkami s příliš malým množstvím jílu se obtížněji pracuje a po zaschnutí jsou relativně prachovité (Hamard, 2013). Další doplňující složky se do směsi přidávají z důvodu zlepšení jejich vlastností, jako jsou například tepelně-technické či pevnostní charakteristiky, nebo za účelem zmírnění některých negativních vlastností hlíny (nedostatečná odolnost vůči vodě). Jedná se o různé příměsi a přísady rostlinného, živočišného, umělého a anorganického původu.

B.1.2.1 Pojivo – jíl

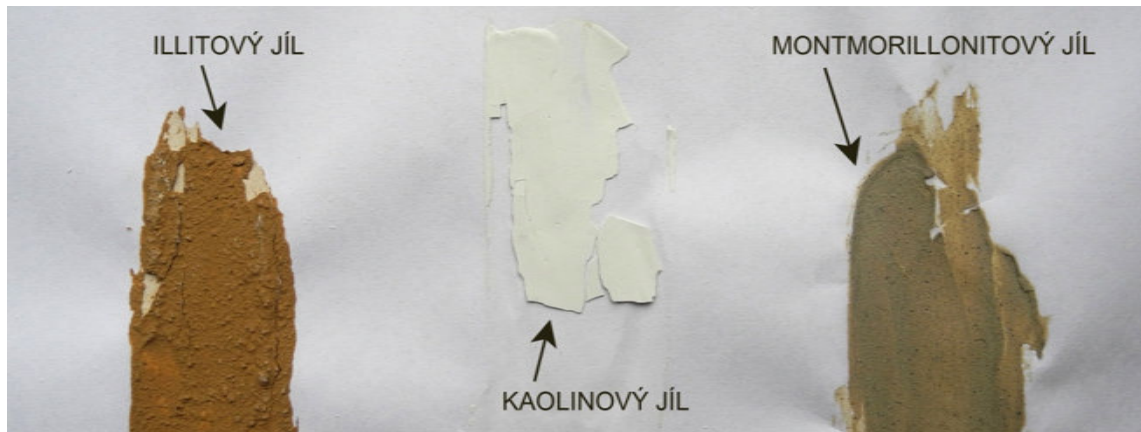
Jíl je nezpevněná hornina, složená z více než 50 % z částic jílové frakce (jílových minerálů), které jsou definovány jako nejjemnější částice, menší než 2 μm (Petránek, 2016). Všechny hlavní jílové minerály, jejichž primární částice jsou tvořeny tenkými destičkami obvykle hexagonálního tvaru, mají vrstevnatou krystalickou mřížku, složenou z navzájem svázaných vrstev tetraedrických a oktaedrických seskupení. Povaha vazeb mezi atomy, mezi vrstvami čtyřstěnů a osmistěnů a mezi destičkami není u všech jílu stejná a tato skutečnost má značný vliv na jejich technické vlastnosti, jak je znázorněno v Tab. 2. Pro jílové minerály je charakteristické, že ve styku s vodou bobtnají, protože voda proniká mezi destičky. Větší množství vody snižuje tření zvyšováním tloušťky vodního filmu kolem destiček a umožňuje kluzný pohyb, při vysychání vody z jílu se částice navzájem přibližují a hlína se stává pevnou (Hamer, 2004).

Tab. 2 - Struktura a srovnání vlastností nejčastěji se vyskytujících jílových minerálů
(Autor s využitím Hošek, 2007; Minke, 2009; Houben, 1994)

Minerál	Kaolinit	Illit	Montmorillonit
Struktura <ul style="list-style-type: none"> ● Al⁺⁺⁺ ○ OH⁻ ● Si⁺⁺⁺⁺ ○ O⁻ 			
Index plasticity	11 - 23	33 - 67	67 - 656
Bobtnání [%]	5 - 8	28 - 35	100 a více
Mezní obsah vody pro vznik trhlin [%]	25 - 29	15 - 17	8 - 15

Z mineralogického hlediska můžeme podle převládajícího jílového minerálu s vrstevnatou strukturou rozlišit tyto horniny (Legut, 2014; Houben, 1994; Žabičková, 2002):

- Kaolinové jíly (Obr. 2 uprostřed): Kaolinit je dvojrstvý minerál, který vzniká rozkladem živců, je bílý, žlutý, hnědavý, červenavý, případně modrý. Vyznačuje se pevným spojením mezi souvrstvími, jeho schopnost vázat vodu je poměrně malá a proto je obvykle v kontaktu s vodou stabilní.
- Illitové jíly (Obr. 2 vlevo): Illit je trojrstvý minerál, který vzniká zvětráváním hornin obsahujících slídy. Spojení mezi souvrstvími je středně pevné a schopnost vázat vodu je větší než u kaolinitu. Je extrémně jemnozrný (částice menší než tisícina milimetru) a je to velmi rozšířený minerál. Jíly s velkým podílem illitu jsou optimální pro výrobu hliněných omítek (Lima, 2020).
- Montmorillonitové jíly (Obr. 2 vpravo): Montmorillonit je trojrstvý minerál, vznikající větráním čedičových tufů, a tvořící hlavní složku bentonitových hornin. Je narůžovělý, bělavý, žlutavý, šedý či světle hnědý. Vyznačuje se slabým spojením mezi souvrstvími a proměnnou vzdáleností vrstev, schopnost přijímat a udržet vodu je extrémně vysoká (až několiknásobek hmotnosti vysušeného jílu).



Obr. 2 - Vzorky různých druhů jílu nanesených za mokra na list papíru, stav po vyschnutí (archiv autora)

B.1.2.2 Plnivo – prach, písek, štěrk

Prachová zrna, která tvoří zčásti funkci plniva a zčásti pojiva (Kříž, 2001, a), jsou částice s frakcí 2-20 μm tvořené obvykle směsí křemene, živce, kalcitu atd. Jako písek jsou definovány částice s frakcí 20 μm až 2 mm, jsou tvořeny hlavně SiO_2 a živcem. Obdobné složení má i štěrková frakce, což jsou částice nad 2 mm (Kotlík, 1999). Funkci plniva mohou plnit také umělá kameniva, jako jsou například keramzit, liapor, agloporit, zpěněná struska, expandovaný perlit a další.

B.1.2.3 Voda

Druh a množství vody obsažené v hlině významně ovlivňuje její vlastnosti. Rozlišujeme vodu krystalovou (strukturovanou), absorbovanou a pórovou (kapilární). Krystalová voda je chemicky vázána, absorbovaná voda je vázána jílovými minerály, které mají sorpční a iontovýměnnou schopnost, pórová voda proniká póry v hlině v důsledku kapilárních sil (Minke, 2009). Záměsová voda je ve směsi potřebná k zajištění dobré zpracovatelnosti. Její větší množství však po vysušení způsobuje ve větší míře smršťování a tvorbu smršťovacích trhlin a zanechává v materiálu více pórů, které zapříčiňují horší pevnostní charakteristiky (Žabičková, 2002). Optimální množství vody přidávané do směsi je závislé na jejím složení, např. norma (DIN 18947, 2018) stanovuje požadovanou konzistenci hliněné malty podle míry rozlití na hodnotu $175 \pm 5 \text{ mm}$.

B.1.2.4 Další doplňující složky

- **Složky rostlinného původu**

Jedná se o rostlinná vlákna, jako jsou například slaměná řezanka, pazdeří (konopné a lněné), dřevní odpad (piliny a hobliny), suchá tráva, plevy, jehličí, osiny apod., které jsou ve směsi použity za účelem redukce míry smrštění či zlepšení tepelně-technických a pevnostních charakteristik, přilnavosti atd. Množství rostlinných vláken ve směsi je zapotřebí optimalizovat s ohledem na zvýšení rizika růstu plísní a hub v materiálu (Kříž, 2001, a). Do této kategorie patří i rostlinné oleje, mouky a škroby, přidávané do směsi kvůli zvýšení odolnosti proti otěru a dešťové erozi (Minke, 2011).

- **Složky živočišného původu**

Zvířecí produkty, jako jsou například koňský či kravský trus, moč, volská krev, zvířecí srst (chlupy, štětiny, vlna), tvaroh (kasein) či syrovátka, jsou ve směsi používány mimo jiné za účelem zvýšení otěruvzdornosti, přilnavosti, odolnosti proti vlhkosti a zlepšení zpracovatelnosti (Kříž, 2001, a).

- **Stabilizační pojiva**

Stabilizace pojivy, jako jsou vzdušné a hydraulické vápno, cement, sádra, živice a pryskyřice, představuje spojení pojiva s většími zrny a vytvoření struktury odolávající vnějším tlakům a objemovým změnám jílu při absorpci vody (Žabičková, 2002).

- **Ostatní složky**

Jedná se o složky, které jsou do směsi z nepálené hlíny používány velmi okrajově. Mohou však tvořit alternativu k výše zmíněným složkám přidávaným do směsi kvůli zlepšení některých vlastností nebo z důvodu využití druhotných surovin či odpadních produktů. Jedná se například o celulózová vlákna, papírové vločky, textilní vlákna, odpady z vytvrzených plastů, polypropylenová vlákna, granulát z pěnového polystyrenu, popel, škváru, popílek apod.

B.1.3 Materiálové vlastnosti

V následujících kapitolách jsou popsány vlastnosti ovlivňující chování a potenciál nepálené hlíny jako vhodného stavebního materiálu:

- vlastnosti související s degradací omítek, na jejichž základě je možné kvantifikovat odolnost proti povětrnostním vlivům;
- funkční vlastnosti, které se mohou přidáním hydrofobizačních činidel výrazně změnit;
- vlastnosti, jimiž hliněné omítky oproti jiným konvenčním materiálům výrazně vynikají.

B.1.3.1 Odolnost proti degradaci

Omítky degradují kvůli působení:

- fyzikálních vlivů (mechanické vlivy, vysoké a nízké teploty a jejich změny, vlhkostní změny apod.);
- chemických vlivů (plynné agresivní látky v ovzduší, aerosoly roztoků kyselin, zásad a solí, organické látky);
- biologických vlivů (působení mikroorganismů, chemické působení produktů životních pochodů živočichů apod.).

Omítky na bázi jílových minerálů se vyznačují vysokou odolností vůči působení agresivních látek z ovzduší, ale extrémně nízkou odolností proti povětrnosti (mrazu, vodě, větru) a jejich stabilita závisí na tom, do jaké míry k nim proniká kapalná voda (Rovnaníková, 2002).

Pokud je vnější povrch porézního stavebního materiálu, jako je nepálená hlína, vystaven změnám teploty a obsahu vlhkosti, mají neustále se měnící gradienty vlhkosti a teploty za následek výrazný pohyb vlhkosti v materiálu. Tento pohyb spouští jev rozpínání a smršťování a vytváří tahové napětí a vnitřní pnutí v takové míře, že způsobuje poškození (praskání, odlupování a jiné vady). Odolnost závisí nejen na celkové pórovitosti materiálu, ale také na struktuře pórů a zejména na podílu drobných pórů: se snižujícím se podílem těchto pórů se odolnost nepálené hlíny zvyšuje (Ogunye, 2002, b).

Během dešťových srážek, krupobití a větrných poryvů dochází vlivem kinetické energie k vymývání a erozi drobných částic z povrchu materiálu a narušování struktury povrchu. U hliněných omítek dochází v případě trvalejšího styku s kapalnou vodou (dešťovou či povrchovou) k nasávání vody do mezivrstev

jílových minerálů a poté k jejich bobtnání, což může při následném vysušení či zmrazení omítky vést k jejímu rozpraskání a poté i rozpadu. V důsledku sušícího účinku opětovného zmrazování a rozmrazování výrobků z nepálené hlíny dochází k vytváření dalších mikrotrhlin, které mohou být naplněny vodou (Aubert, 2012).

Obecně nelze odolnost proti degradaci vlivem povětrnostních vlivů kvantifikovat, jelikož se jedná o složitý jev závislý na mnoha proměnných. Je však možné odolnost alespoň částečně predikovat na základě souboru ukazatelů (B.1.3.2 až B.1.3.17), kterými jsou některé související materiálové vlastnosti, jako například pórovitost, pevnostní charakteristiky, hygroskopická sorpce, paropropustnost, otěruvzdornost apod.

B.1.3.2 Objemová hmotnost

Objemová hmotnost výrobků z nepálené hlíny v suchém stavu se pohybuje v rozmezí 500 až 2200 kg/m³, kde nižších hodnot (500 až 1200 kg/m³) dosahují výrobky s velkým podílem lehčených příměsí, jako například pemza, expandovaný jííl nebo sláma. Vyšších hodnot (1700 až 2200 kg/m³) dosahují udusané stavební prvky a výrobky s větším podílem kameniva (Minke, 2009). Objemová hmotnost hliněných omítek se pohybuje v rozmezí 800 až 2000 kg/m³, dle normy (DIN 18947, 2018) jsou hliněné omítky s objemovou hmotností 800 až 1200 kg/m³ považovány za lehčené.

B.1.3.3 Pórovitost

Celková otevřená pórovitost a distribuce velikosti pórů vyplývají hlavně z tvaru a velikosti zrn, jejich relativního množství (poměr písčitého kameniva a pojiva) a postupu přípravy a nanášení směsi (Randazzo, 2016). Dle Votha (Voth, 1978, v Minke, 2009) může celková pórovitost, která je definována jako podíl objemu pórů mezi pevnými částicemi hlíny vzhledem k celkovému objemu vzorku hlíny, dosahovat u silně jílovitých hlín hodnoty až 0,474 (47,4 %). Číslo pórovitosti, které je definováno jako poměr objemu pórů k objemu pevných částic, může dosahovat hodnoty až 0,9 (90 %). Podíl pórů v hlíně nelze snadno určit a pro posouzení hlíny jako stavebního materiálu není příliš průkazný. Důležitější než celkový objem je velikost a tvar pórů (Minke, 2009). Nepálená hlína patří

do skupiny látek s heterogenní vnitřní pórovitostí, které obsahují póry patřící do více skupin, tříděných dle velikosti pórů – submikroskopické (ultrakapilární) póry, kapilární póry a makropóry (nekapilární póry) (Kutílek, 1984).

Prvky z nepálené hlíny obsahují otevřené spojitě póry, které vznikají postupným odpařováním (vysušováním) vody. Jelikož jsou tyto póry spojené kapilárami s prostředím, ve kterém se materiál nachází, může jimi hlína do svého objemu přijmout vodu i vzdušnou vlhkost. Otevřené póry proto ovlivňují navlhavost a vysychavost hlíny, schopnost pronikání (difúze) kapalin a plynů, schopnost pohlcování vzduchu a tepelně-fyzikální vlastnosti (součinitel tepelné vodivosti, měrnou tepelnou kapacitu) (Svoboda, 2013).

B.1.3.4 Objemové změny

Nepříznivou vlastností nepálené hlíny je, že jí při absorpci většího množství vody bobtná a při vysychání se smršťuje. Míra smrštění závisí na množství jílu (Lagouin, 2019; Pederghana, 2021) a druhu použitého jílu (vyšší obsah jílu vede k větší míře smrštění a montmorillonit se smršťuje výrazně více než illit a kaolinit). Protože rozhodujícím ovlivňujícím faktorem je množství jílu a složení ostatních nejílových částic, optimalizací zrnitostního složení lze při stejném množství jílu ve směsi dosáhnout snížení tvorby smršťovacích trhlin (Minke, 2009). Míru smrštění u hliněných omítek ovlivňuje ve velké míře také množství záměsové vody a způsob vysychání, který v důsledku odlišné kinetiky odnímání vlhkosti mezi dvěma stranami omítky závisí na použitém podkladu (Delinière, 2014). Eliminace míry smrštění při vysychání hliněné směsi lze dosáhnout přidáním vláken (Ashour, 2010, b; Gvahami, 1999; Bouhicha, 2005; Pederghana, 2021).

Dle normy (DIN 18947, 2018) by lineární smrštění hliněné omítkové malty nemělo být větší než 2 %, omítky vyztužené vlákny mohou mít lineární smrštění až 3 % a tenkovrstvé omítky vyztužené vlákny až 4 %. Dle provedených měření (Minke, 2011) na 30 různých vzorcích průmyslově vyráběných hliněných omítek dostupných na německém trhu se míra smrštění obvykle pohybuje v rozmezí 0,62 % až 3,34 %. Výsledky těchto zkoušek prováděných na zkušebních tělesech lze považovat za dostatečně vypovídající pro srovnání mezi různými složeními omítek. Skutečné smrštění pozorované při aplikaci na stěnu či strop

se však může lišit, jelikož podklad použitý pod omítkou zabraňuje smršťování a ovlivňuje proces vysychání (Delinière, 2014). Proto je pro ověření kompatibility mezi vybranou omítkou a jejím podkladem nutné provést zkoušky na konkrétním povrchu.

B.1.3.5 Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku hliněných stavebních prvků v suchém stavu se pohybuje obvykle v rozmezí 3 až 6 N/mm² a je závislá především na množství a druhu jílu a také na velikosti částic prachu, písku a šterku ve směsi (Minke, 2009). Směsi určené pro hliněné omítky jsou oproti ostatním hliněným prvkům charakteristické větším podílem písku. Hodnoty pevnosti v tlaku jsou proto nižší než u ostatních hliněných prvků a pohybují se obvykle v rozmezí hodnot 1 až 3 N/mm². U omítek s extrémně malým množstvím jílu může pevnost v tlaku klesnout i pod hodnotu 1,0 N/mm². Nezanedbatelný vliv na pevnost v tlaku má také množství vody přidávané do směsi, kdy se zvyšujícím se množstvím záměsové vody se pevnost snižuje (Emiroğlu, 2015). V Tab. 3 je uvedeno rozdělení hliněných omítek do pevnostních tříd dle normy (DIN 18947, 2018).

Tab. 3 – Třídy pevnosti pro hliněné omítky (Autor s využitím DIN 18947, 2018)

Třída pevnosti	Pevnost v tlaku [N/mm ²]	Pevnost v tahu za ohybu [N/mm ²]	Přídržnost [N/mm ²]	Otěruvzdornost [g]
S I	≥ 1,0	≥ 0,3	≥ 0,05	≤ 1,5
S II	≥ 1,5	≥ 0,7	≥ 0,10	≤ 0,7

B.1.3.6 Pevnost v tahu za ohybu

Z hlediska využití nepálené hlíny v budovách není pevnost v tahu za ohybu tolik významná veličina, neboť prvky z nepálené hlíny nejsou téměř vůbec zatěžovány ohybem. Při posuzování vlastností hliněných omítek přesto hraje důležitou roli. Čím nižší je pevnost v tahu za ohybu, tím větší hrozí riziko, že se omítka při odpovídajícím zatížení poškodí, praskne nebo se odtrhne. Pevnost v tahu za ohybu je závislá především na množství a druhu jílu obsaženého v hliněném prvku: hliněné směsi s větším podílem jílu a jíly s obsahem Montmorillonitu dosahují vyšších hodnot (Minke, 2009). V případě hliněných omítek jsou však možnosti volby typu a množství jílu omezené a v důsledku

toho jsou hodnoty pevnosti v tahu za ohybu velmi nízké (může klesnout až k hodnotě $0,1 \text{ N/mm}^2$). Pevnost v tahu za ohybu hliněných omítek je možné účinně zvyšovat přidáním rostlinných vláken, jako jsou např. slaměná řezanka, konopná vlákna apod. Rozdělení hliněných omítek do pevnostních tříd dle normy (DIN 189747, 2018) je uvedeno v Tab. 3.

B.1.3.7 Hranová pevnost

Hranová pevnost je u omítek na bázi vápna a cementu veličina, které není zapotřebí věnovat příliš pozornosti, jelikož jejich pevnostní charakteristiky zaručují dostatečnou odolnost hran proti odtržení či deformaci. U hliněných omítek, jež jsou charakteristické velmi nízkými hodnotami pevnostních veličin, však hranová pevnost hraje zásadní roli při posuzování vhodnosti použití a návrhu konstrukčních opatření. Pro stanovení hranové pevnosti byla v roce 2000 ve výzkumné laboratoři pro experimentální stavitelství v Kasselu (FEB) vyvinuta zkušební metoda, jejíž princip spočívá v simulaci nárazu pomocí padajícího závaží, které je spuštěno ve svislém směru proti hraně vodorovně upevněného zkušebního tělesa (Minke, 2009). Minke uvádí, že odolnost hran hliněných cihel je tím vyšší, čím vyšší je jejich pevnost v tahu za ohybu. Nedostatečná hranová pevnost hliněných omítek se řeší vhodnými konstrukčními opatřeními, jako jsou například viditelné dřevěné krycí lišty (zabudované lišty pod svrchní vrstvou omítky nejsou příliš účinné) a zaoblené hrany. Zaoblení hran, které je patrné na Obr. 3 a Obr. 4 je nejčastějším způsobem řešení a stává se tak charakteristickým rysem pro stavby s hliněnými omítkami.



Obr. 3 – Provedení hran hliněných omítek na ostěních a nárožích domu v areálu střediska ekologické výchovy Kaprálov mlýn (archiv autora)



Obr. 4 – Detail provedení zaobleného ostění okna v RD autora v Brně-Kníničkách (archiv autora)

B.1.3.8 Přilnavost

Přilnavost k podkladu (pevnost ve smyku) hraje u hliněných omítek významnou roli. Na vazbu mezi omítkou a zdí má vliv mnoho faktorů: typ jílového materiálu, podíl složek půdy, obsah vody, velikost zrna frakce písku, přítomnost přísad, typ stěny a příprava podkladu. Dle provedených zkoušek (Stazi, 2016; Hamard, 2013) se přilnavost hliněných omítek zlepšuje se zvyšujícím se množstvím jílu ve směsi. V případě příliš velkého podílu jílu však začne převládat účinek smrštění, který pevnost ve smyku naopak snižuje. Na základě těchto poznatků se stanovuje optimální rozsah podílu jílu ve směsi pro hliněné omítky, který se obvykle pohybuje v rozmezí 5 % až 12 %.

Z dlouhodobého hlediska má na přilnavost vliv také mechanická kompatibilita mezi stěnou a omítkou, která se odvíjí od rozdílu mezi moduly pružnosti v tahu (tzv. Youngův modul) omítky a podkladu. Pokud je rozdíl příliš velký, změny napětí vyvolané přílišným zatížením nebo změnami vlhkosti či teploty vytvářejí rozdílné napětí mezi omítkou a stěnou, což může vést k poškození omítky (Hamard, 2013). Z tohoto hlediska jsou hliněné omítky nejvíce kompatibilní s hliněnými stěnami.

B.1.3.9 Tepelná vodivost

Tepelná vodivost hliněných omítek je ovlivněna celkovou otevřenou pórovitostí a distribucí velikosti pórů ve vzorku (Randazzo, 2016) a je závislá na jejich objemové hmotnosti. Výrobky, které obsahují velký podíl lehčených příměsí, se mohou přiblížit k hodnotě součinitele tepelné vodivosti 0,14 W/mK (Tab. 4). Pro hliněné omítky, u kterých se objemová hmotnost pohybuje obvykle v rozmezí 800 až 2000 kg/m³, se hodnoty součinitele tepelné vodivosti pohybují cca od 0,25 do 1,1 W/(m.K).

Tab. 4 – Součinitele tepelné vodivosti pro hliněné stavební materiály (Autor s využitím DIN 4108-4, 2007, v Minke, 2009)

Objemová hmotnost ρ [kg/m ³]	Součinitel tepelné vodivosti λ [W/(m.K)]
2000	1,10
1800	0,91
1600	0,79
1400	0,59
1200	0,47
1000	0,35
800	0,25
500	0,14

Objemová hmotnost není jediným parametrem, který ovlivňuje tepelnou vodivost, jelikož při stejné hustotě lze pozorovat rozdíly v hodnotách tepelné vodivosti. Jak ukazují výzkumy, má na tepelnou vodivost hliněných omítek vliv nejen množství (Liuzzi, 2018), ale i typ přidaných vláken, které jsou ve směsi použity (Ashour, 2010,a).

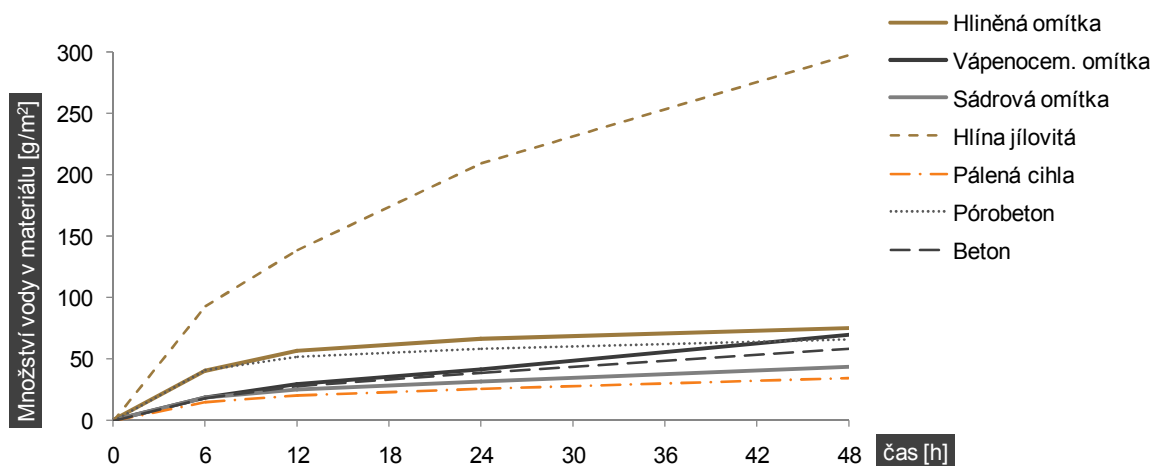
B.1.3.10 Součinitel teplotní vodivosti

Součinitel teplotní vodivosti je schopnost materiálu o definované vlhkosti vyrovnávat rozdílné teploty při neustáleném vedení tepla. Odolnost proti změnám teploty se zvyšuje, když klesá součinitel teplotní vodivosti. Díky schopnosti nepálené hlíny pojmát velké množství vzdušné vlhkosti je součinitel teplotní vodivosti hliněných materiálů nižší než u jiných konvenčních materiálů (beton, pálená cihla, vápenocementová omítka). Dle provedených měření se hodnoty součinitele teplotní vodivosti u produktů z nepálené hlíny pohybují

přibližně v rozmezí $2,7 \cdot 10^{-7}$ až $4 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (Liuzzi, 2018; Abanto, 2017; Goodhew, 2005).

B.1.3.11 Hygroskopicita

Nepálená hlína, stejně jako všechny porézní stavební materiály, se vyznačuje schopností přijímat a vydávat vlhkost z okolního vzduchu, čímž může přispívat ke stabilizaci vlhkosti v interiéru a zlepšování vnitřního mikroklimatu. Schopnost stavební látky regulovat vlhkost nezávisí pouze na maximální vlhkosti, kterou je materiál schopen absorbovat (rovnovážná vlhkost), ale především na tom, jak rychle materiál reaguje na zvýšení či snížení relativní vlhkosti okolního vzduchu (Kříž, 2001, b). Nepálená hlína je specifická rychlou reakcí na zvýšení vzdušné vlhkosti a strmým počátečním nárůstem průběhu sorpční křivky (v závislosti na čase). Dle provedeného měření (Vares, 2017) je míra absorpce vlhkosti hliněných omítek nejvyšší během první hodiny, kdy absorbuje cca 9 % z celkového obsahu vlhkosti přijatého za 5 dní (při zvýšení relativní vlhkosti vzduchu z 50 % na 80 %). Ve srovnání s jinými konvenčními materiály dokážou hliněné omítky rychleji absorbovat (případně uvolňovat) větší množství vlhkosti (Minke, 2009; Liuzzi, 2013), jak je znázorněno v grafu na Obr. 5.



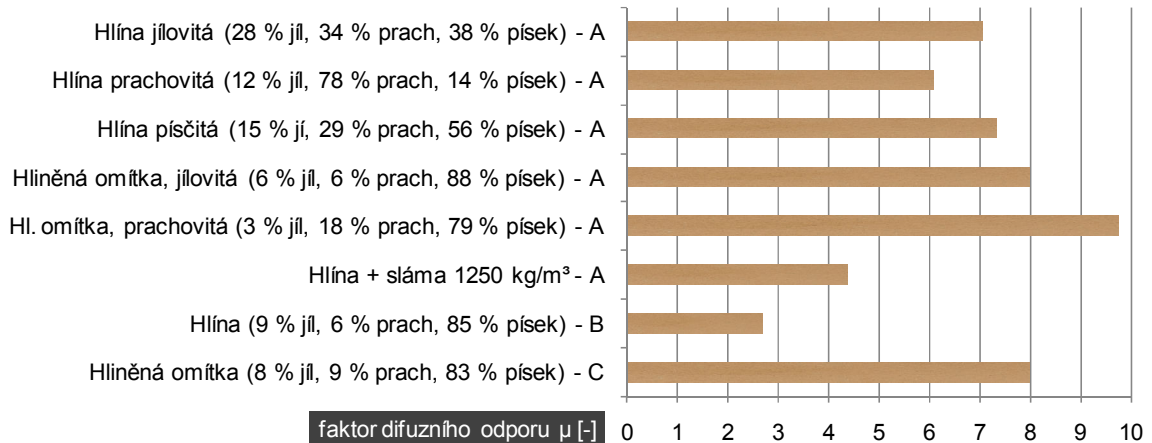
Obr. 5 – Sorpční křivky vzorků materiálu o tloušťce 15 mm při teplotě 21°C a nárůstu vlhkosti vzduchu v místnosti z 50 % na 80 % v závislosti na čase (autor s využitím Minke, 2009)

Během sorpce a desorpce pára proniká pouze do určité hloubky omítky, proto pro každý materiál existuje optimální tloušťka, po jejímž překročení nedochází ke zvýšení sorpční nebo desorpční kapacity vlhkosti. Dle provedených měření se tato hloubka u hliněných omítek pohybuje do 10 mm (Maskell, 2018).

Na rovnovážný obsah vlhkosti nepálené hlíny má zásadní vliv poměr anorganických složek v materiálu: se zvyšujícím se podílem jílu ve směsi se zvyšuje množství absorbované vlhkosti (Richter, 2014; Randazzo, 2016). Velký vliv má také druh jílového minerálu, který je ve směsi použit (Minke, 2011; Diviš, 2021). Dle provedených měření ovlivňuje rovnovážnou vlhkost hliněných omítek obsah organických vláken, jejich množství (Liuzzi, 2018; Thomson, 2015; Randazzo, 2016) i typ (Ashour, 2011), kdy směsi s vyšším podílem vláken vykazují schopnost absorbovat více vlhkosti. Současně má přítomnost vláken ve směsi vliv na dynamiku sorpce (Palumbo, 2016; Maddison, 2009), přičemž směsi s větším množstvím vláken vykazují rychlejší reakci na nárůst vlhkosti.

B.1.3.12 Difuze vodní páry

Nepálená hlína se ve srovnání s jinými materiály vyznačuje vysokou schopností propouštět vodní páru obsaženou ve vzduchu. Faktor difuzního odporu (μ), který uvádí kolikrát je větší difuzní odpor materiálu ve srovnání se stejně silnou vrstvou klidného vzduchu při stejné teplotě, je závislý na objemové hmotnosti a pórovitosti materiálu. Velmi nízkých hodnot faktoru difuzního odporu ($\mu = 2,2$) dosahují prvky z lehčené hlíny o nízké objemové hmotnosti, nejvyšších hodnot ($\mu = 9,7$) dosahují prachovité hliněné omítky (Minke, 2009). U hliněných omítek je paropropustnost ovlivněna zrnitostí, jak je prezentováno na Obr. 6, povrchovou úpravou finální vrstvy (způsob hlazení či filcování) a případnou přítomností vláken či hydrofobních přísad. Dle provedených měření (Minke, 2009; Stazi, 2016) se může u hydrofobních hliněných omítek zvýšit faktor difuzního odporu až o 80 %.

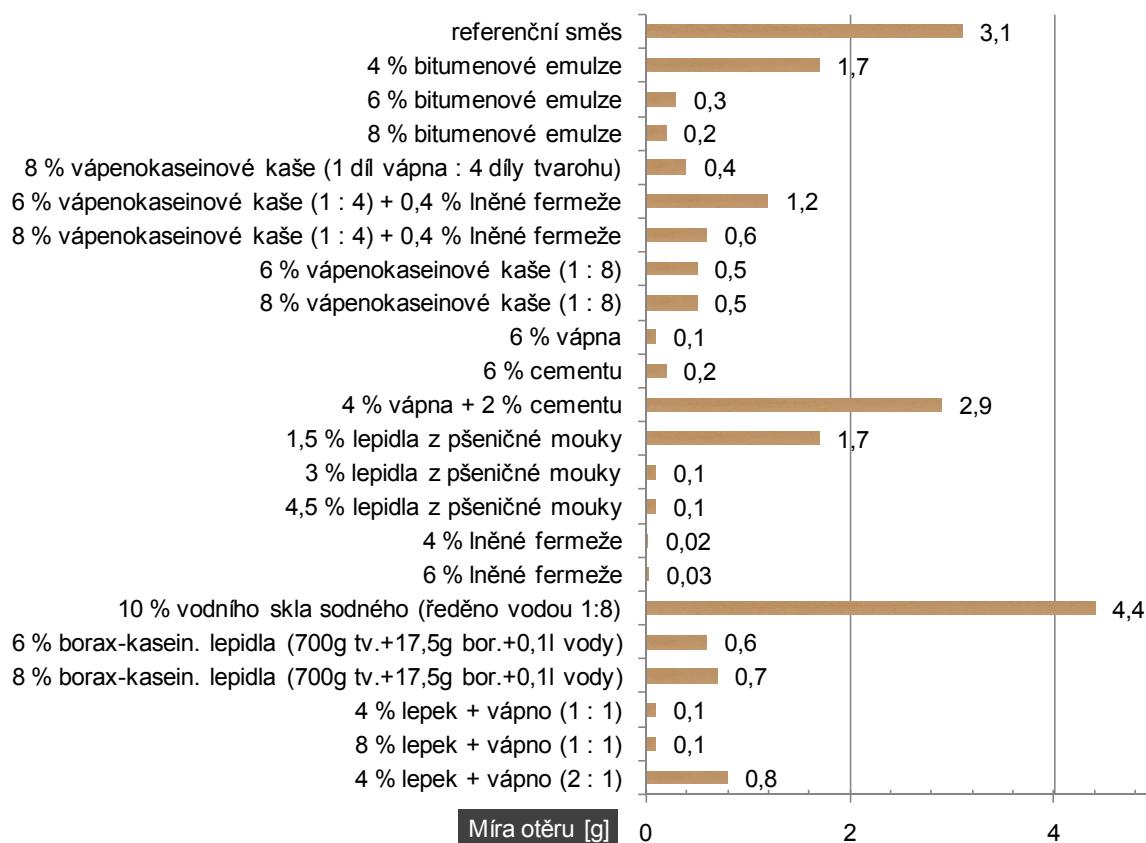


Obr. 6 – Hodnoty faktoru difuzního odporu (μ) hliněných materiálů: A - (Minke, 2009), B – (Eires, 2017), C - (Stazi, 2016)

B.1.3.13 Otěruvzdornost

Otěruvzdornost, která u nepálené hlíny do jisté míry souvisí s pevností v tahu za ohybu, je u hliněných omítek tím vyšší, čím je jejich povrch hladší a souvislejší. Rozhodujícím faktorem je zrnitostní složení a dostatečný podíl jílu, záleží však také na druhu použitého jílu (Minke, 2009). Míru otěru hliněných povrchů je možné redukovat přidáním stabilizátorů či rostlinných vláken (Minke, 2011; Bamogo, 2020; Mattone, 2005; Millogo, 2014).

Pro stanovení otěruvzdornosti hliněných povrchů neexistují žádné jednotné normované postupy a různí autoři výzkumů používají rozdílné metody měření, proto není možné hodnoty mezi sebou navzájem porovnávat. Obecně udává veličina „míra otěru“ množství materiálu, které se odstraní z povrchu v důsledku působení rotačního pohybu brusného kartáče či papíru. V laboratoři FEB na Univerzitě v Kasselu byla vyvinuta metoda stanovení otěruvzdornosti hliněných omítek, na jejímž základě bylo provedeno rozsáhlé měření. Dle tohoto měření prováděného na 34 různých vzorcích průmyslově vyráběných hliněných omítek dostupných na evropském trhu se hodnoty míry otěru pohybují v rozmezí 0,1 g až 12,8 g (Minke, 2011). Taktéž byl dle této metody posuzován vliv stabilizačních přísad, jak je znázorněno v grafu na Obr. 7. Rozdělení hliněných omítek do pevnostních tříd dle otěruvzdornosti stanovené metodou vyvinutou v laboratoři FEB je uvedeno v Tab. 3 (DIN 18947, 2018).



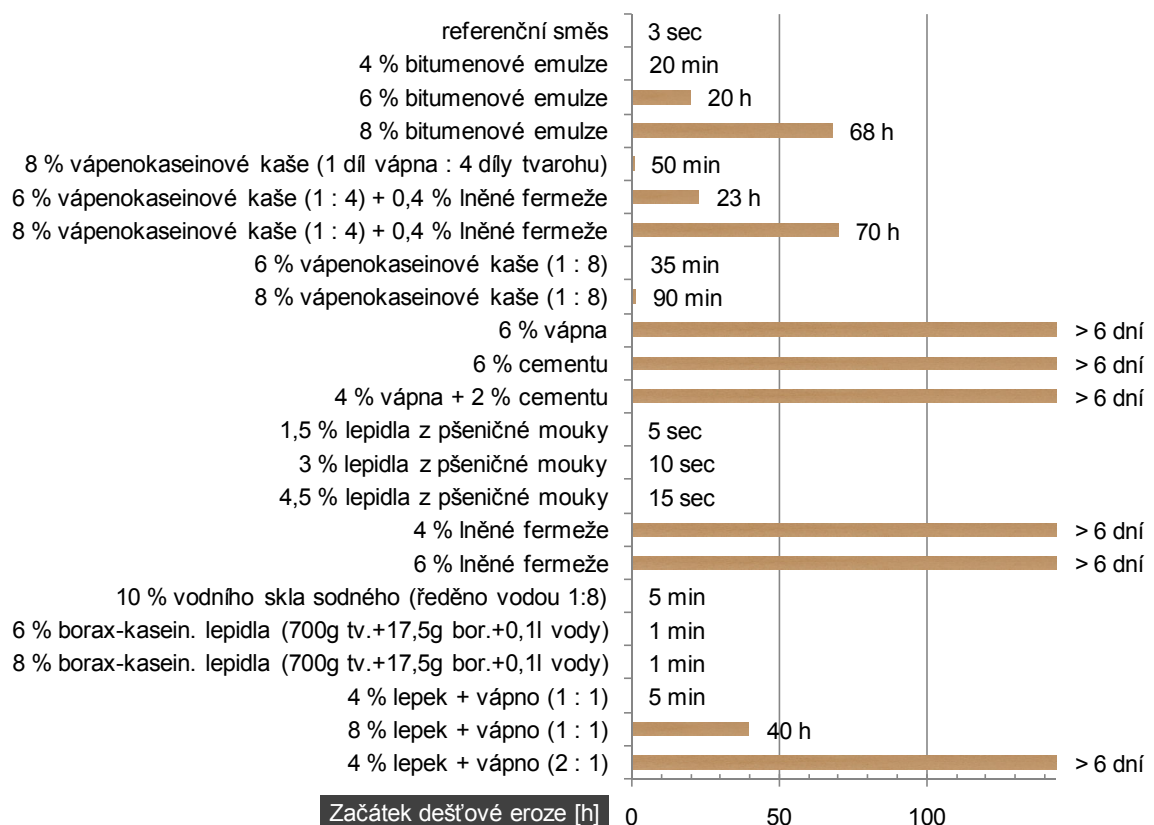
Obr. 7 – Míra otěru stabilizovaných hliněných omítek, měření provedeno pomocí metody vyvinuté v laboratoři FEB na Univerzitě v Kasselu (autor s využitím Minke, 2011)

B.1.3.14 Odolnost proti dešťové erozi

Hlavním mechanismem, který způsobuje odstraňování materiálu z povrchu hliněných stěn, je uvolňování kinetické energie spojené s dešťovými kapkami dopadajícími na povrch. Míra eroze je závislá na intenzitě, úhlu a typu srážek, kdy krátké objemné lijáky jsou obvykle méně erozivní než trvalejší srážky stejné intenzity (Heatcote, 1995). U trvalých srážek dochází k hromadění vlhkosti na povrchu, z něhož není schopná se odpařit, což může způsobit zhoršení materiálových vlastností (především pevnostních charakteristik) v důsledku bobtnání a následně rychlejší splavování (Walker, 2001). Nebezpečí může představovat také ojedinělý intenzivní větrem hnaný déšť, kdy je úhel dopadu na exponovaný povrch větší a stěna je nárazově vystavena nebezpečí rozrušení jednotlosti povrchu.

Na odolnost nepálené hlíny proti dešťové erozi má vliv druh použitého jílu ve směsi (García-Vera, 2018) a jeho množství. Z testování vzorků hliněné

omítky, vystavených tříletému působení povětrnostních vlivů, bylo vyzkoušeno, že hlína s malým množstvím jílu vykazuje nízkou odolnost vůči dešťové erozi oproti hlíně s větším podílem jílu (Minke, 2009). Dle provedených laboratorních měření lze odolnost hliněných omítek proti erozi dešťovými srážkami zvyšovat přidáním přírodních stabilizátorů (Minke, 2011; Bamogo, 2020; Mattone, 2005; Paul, 2020), syntetických přísad (Lanzón, 2017) nebo použitím hydrofobizačních nátěrů (García-Vera, 2020; Stazi, 2016). V grafu na Obr. 8 je znázorněno srovnání vlivu přidání různých hydrofobizačních přísad do hliněných omítek na odolnost proti dešťové erozi. Hodnoty byly stanoveny dle laboratorní metodiky vyvinuté v laboratoři FEB.



Obr. 8 – Grafické znázornění začátku dešťové eroze hydrofobizovaných hliněných omítek měřeného pomocí metody vyvinuté v laboratoři FEB (autor s využitím Minke, 2011)

Pro stanovení odolnosti povrchů proti dešťové erozi laboratorní metodou neexistují žádné jednotné normované postupy. Metodiky měření použité v různých výzkumech mají za úkol zrychleným způsobem simulovat působení dešťových kapek, jsou mezi nimi však výrazné rozdíly, díky nimž není možné jednotlivá měření mezi sebou porovnávat. Odchytky v metodikách měření, které jsou shrnuty v tabulce (Tab. 5 a Tab. 6), jsou patrné jak ve způsobu simulace

deště (směr pohybu vody, intenzita postřiku, vzdálenost a úhel dopadu, typ simulačního zařízení), tak v délce expozice či způsobu vyhodnocení (hloubka eroze, procento ztráty materiálu, počátek eroze). Tyto zrychlené laboratorní testy zvětrávání, i když jsou empirické, mnohdy přesně nemodelují terénní podmínky a proto se zřídka shodují s výsledky pozorovanými v terénu. Testy jsou často příliš agresivní (průtoky ze sprchových hlavíc jsou výrazně vyšší než za silného deště), zjednodušené, nereplikují skutečné podmínky prostředí a nesou malou praktickou korelaci se skutečným dlouhodobým chováním v terénu. Z těchto důvodů poskytují laboratorní testy pouze přibližný odhad trvanlivosti (Ogunye, 2002, b; Ventakarama Reddy, 1987). Spolehlivější metodou pro posouzení trvanlivosti hliněných materiálů jsou proto dlouhodobé zkoušky expozice v exteriéru.

Tab. 5 – Metody stanovení odolnosti povrchu proti dešťové erozi (část a)

Název	Norma / Primární zdroj	Popis metodiky (simulace)	Způsob hodnocení	Zdroj
Test for resistance to air and water penetration	Zkušební metodika vycházející z britské normy BS 4315-2: 1970 - Methods of test for resistance to air and water penetration: part 2 - permeable walling constructions (water penetration).	Hliněná stěna umístěná mezi 2 klimatické simulační komory (interiér a exteriér) je vystavena vodním srážkám a tlakovému rozdílu (simulace silného tlaku větru). Stěna je vystavena 5 cyklům, kdy 1 cyklus představuje 1 den (6 hodin dešťových srážek a tlakového rozdílu, 18 hodin sušící cyklus).	Měření celkové suché hmotnosti zachycených částic.	(Hall, 2007)
Geelong Drip Test	Novozélandský standard NZS 4298 (Materials and workmanship for earth buildings; Wellington, NewZeeland; 1998) / The Australian Earth building handbook: HB 195	Kapání vody o objemu 100 ml na vzorek po dobu od 20 do 60 minut. Kapky padají z výšky 400 mm na vzorek umístěný se sklonem 50% (27°) od vodorovné roviny.	Měří se konečná hloubka eroze.	(Stazi, 2016) (Heatcote, 1995) (Walker, 2001)
Pressure spray test / Accelerated Erosion Test / Bulletin 5 Spray Test	Novozélandský standard NZS 4298 (Materials and workmanship for earth buildings; Wellington, NewZeeland; 1998) / The Australian Earth building handbook: HB 195	Na vzorek proveden postřík horizontálním vodním paprskem ze vzdálenosti 470 mm pod tlakem 50 kPa po dobu 1 hodiny.	Po 15 minutových intervalech se zaznamenává hloubka eroze, která nesmí překročit 1 mm/min.	(Stazi, 2016) (Heatcote, 1995) (Walker, 2001) (Obonyo, 2010) ⁽¹⁾ (Eires, 2017) ⁽¹⁾
Swinburne Accelerated Erosion Test	The Australian Earth building handbook: HB 195	Tenký nepřetržitý proud vody se nechá vertikálně padat na povrch vzorku.	Měří se hloubka eroze.	(Walker, 2001)

⁽¹⁾ Ve výzkumu byly oproti primárnímu zdroji upraveny vstupní podmínky (tlak vody, vzdálenost)

Tab. 6 – Metody stanovení odolnosti povrchu proti dešťové erozi (část b)

Název	Popis metodiky (simulace)	Způsob hodnocení	Zdroj
Rain test	Kapání destilované vody / roztoky kyseliny sírové / roztoky kyseliny chlorovodíkové (simulace kyselého deště) na povrch omítek z nádob v konstantní výšce po dobu 10 minut.	Určení hmotnostního rozdílu zvážením vzorku před a po zkoušce a stanovení procenta úbytku hmotnosti.	(García-Vera, 2018)
Test eroze vyvinutý v laboratoři FEB	Na testovaný hliněný povrch dopadá pod úhlem 45° proud vody o průměru 4 mm a rychlosti 3,24 m/s.	Odplavené částice se usazují ve sběrné nádobě, zachytí se filtrem a zváží v suchém stavu. U jednotlivých vzorků se vizuálně porovnává šířka a hloubka rýh vyplavených vodou a určí se počátek eroze.	(Minke, 2011) (Minke, 2009)
Izrael test	Stříkání vody svisle dolů ze sprchové růžice upevněné 250 mm nad vzorkem, tlak vody 50 kPa a množství vody během 33 minut zkoušky je vypočítán jako ekvivalent 7500 mm deště.	Blok se považuje za vyhovující, pokud se během zkoušky nezhorší více než dva jeho rohy a pokud povrchová eroze nepřesáhne 10% hmotnosti bloku.	(Heatcote, 1995)
Spray test	Svislý postřik vodou o průtoku 5 l/min na vzorek umístěný se sklonem 30° ve vzdálenosti 120 mm.	Určení procenta ztráty materiálu zvážením vzorku před a po zkoušce (po vysušení).	(Millogo, 2014) (Bamogo, 2020)
Rainfall test	Na vyvinutém zařízení probíhá postřik svislým paprskem vody na vzorky umístěné pod variabilním sklonem 15° - 45° ke směru stříkající vody. Lze simulovat širokou škálu podmínek, proměnlivé intenzity od 75 do 200 mm jsou vytvářeny při měnícím se tlaku 0,5 - 3,5 kg/cm ² a výšce pádu 0,8 - 2 m.	Stanovení procentuální ztráty hmotnosti zvážením vzorku před a po zkoušce (po vysušení).	(Ogunye, 2002, a)
Wolfskill Spray test	Postřik vzorku vodorovným paprskem vody pod tlakem 0,07 MPa ze sprchové růžice umístěné ve vzdálenosti 175 mm.	Měření průměrné hloubky eroze.	(Ventakarama Reddy, 1987)

B.1.3.15 Kapilární absorpce

Kapilární absorpce vody je schopnost pórovitého materiálu absorbovat a přenášet vodu skrz kapilární sání z oblastí s vyšší vlhkostí do míst s nižší vlhkostí a poskytuje technické měřítko mikrostruktury a vlastností důležitých

pro trvanlivost materiálu. Transport kapaliny je závislý především na struktuře pórů pevné látky, tj. na velikosti, zakřivení a spojitosti kapilár (Uzoegbo, 2020).

Kapilární absorpci vody je možné kvantifikovat různými způsoby. Metodou částečného ponoření zkušebního tělesa do vody se stanoví vztlínavost, která je vyjádřena přírůstkem hmotnosti, případně rozdílem výšek hladiny vody v kapilárách oproti hladině vody, v níž je materiál ponořen. Dle této metody měření se stanoví koeficient kapilární absorpce vody. Ten je dle měření u některých výrobků z nepálené hlíny nižší než u pálených cihel (Eires, 2013; Minke, 2009), jelikož bobtnáním jílových částic dochází k ucpání pórů. Nicméně oproti jiným konvenčním materiálům hrozí u nepálené hlíny nebezpečí rozpuštění a odpadávání částic v důsledku ponoření vzorku do vody. Pomocí metody Karstenových trubic je simulován tlak kapek deště narážejících na zeď stálou rychlostí větru kolmo k povrchu za účelem analyzovat, do jaké míry může voda v případě silných dešťů proniknout povrchem (Vandevoorde, 2013). Tato metoda však bývá používána spíše v případě hodnocení vodotěsnosti hydrofobních povrchových úprav.

Míru kapilární absorpce vody u nepálené hlíny lze redukovat přidáním kravské mrvy (Bamogo, 2020) či nehašeného vápna, minerálních přísad a biopolymerů do směsi (Eires, 2014), případně použitím syntetických přísad a nátěrů (Stazi, 2016; García-Vera, 2020; Lanzón, 2017).

B.1.3.16 Smáčivost

Míra smáčivosti, schopnosti kapaliny přilnout k povrchu pevné látky, je charakterizována tzv. úhlem smáčení, který svírá tečna k povrchu přisedlé kapky vedená v místě styku kapky s rozhraním pevná látka/kapalina/plyn. Díky této veličině je možné částečně kvantifikovat odolnost povrchu vůči kapkám dešťové vody, kdy v případě kontaktního úhlu $< 90^\circ$ se jedná o hydrofilní (smáčivé) povrchy a v případě úhlu $> 90^\circ$ o hydrofobní (nesmáčivé) povrchy.

Struktura povrchu hliněných omítek má charakter vysoce hydrofilní povahy, tzn. úhel smáčení je blízký hodnotě 0° a k absorpci kapky vody dojde ihned po jejím dopadu na povrch. Úhel smáčení povrchu hliněných omítek lze účinně zvýšit přidáním hydrofobních přísad do směsi či použitím hydrofobních nátěrů do té míry, že se povrch stane silně hydrofobní (Stazi, 2016).

B.1.3.17 Mrazuvzdornost

U pórovitých nasákavých materiálů, jako je nepálená hlína, dochází při nízkých teplotách změnami skupenství vody v pórech k mechanickému rozrušování struktury a rozpadu materiálu. Rozsah a způsob porušení je závislý především na množství, velikosti a charakteru pórů, jelikož každý druh vody (volná, kapilární, adsorbovaná) v pórech mrzne při jiné teplotě v závislosti na velikosti pórů (Svoboda, 2013).

Mrazuvzdornost nepálené hlíny je závislá na její pórovitosti (čím vyšší podíl pórů, tím větší odolnost vůči mrazu) a množství a druhu použitého jílu. Směsi s větším podílem jílu mají sklon k tvorbě smršťovacích trhlin a jsou proto ohroženy namrzáním (Minke, 2009). Oblast zabývající se mrazuvzdorností nepálené hlíny jako stavebního materiálu je jen velmi málo prozkoumána a její kvantifikace se provádí spíše vystavením vzorku povětrnostním vlivům a následným vizuálním porovnáváním. Mrazuvzdornost se laboratorní metodou zjišťuje vystavením materiálu ve vlhkém stavu účinkům střídavého zmrazování a rozmrazování, u nepálené hlíny je však zapotřebí zkoušku modifikovat (Aubert, 2012).

B.1.3.19 Zvuková pohltivost

Ve vztahu s jinými běžně používanými stavebními materiály vykazují hliněné omítky vyšší činitele pohltivosti zvuku (α_w = poměr pohlceného akustického výkonu k dopadajícímu) (Blaschke, 2023). Na akustickou odezvu má vliv především pórovitost materiálu, tzn. že vzorky s vyššími hodnotami otevřené pórovitosti vykazují vyšší absorpci zvuku, ale také množství přidaných vláken (Randazzo, 2016).

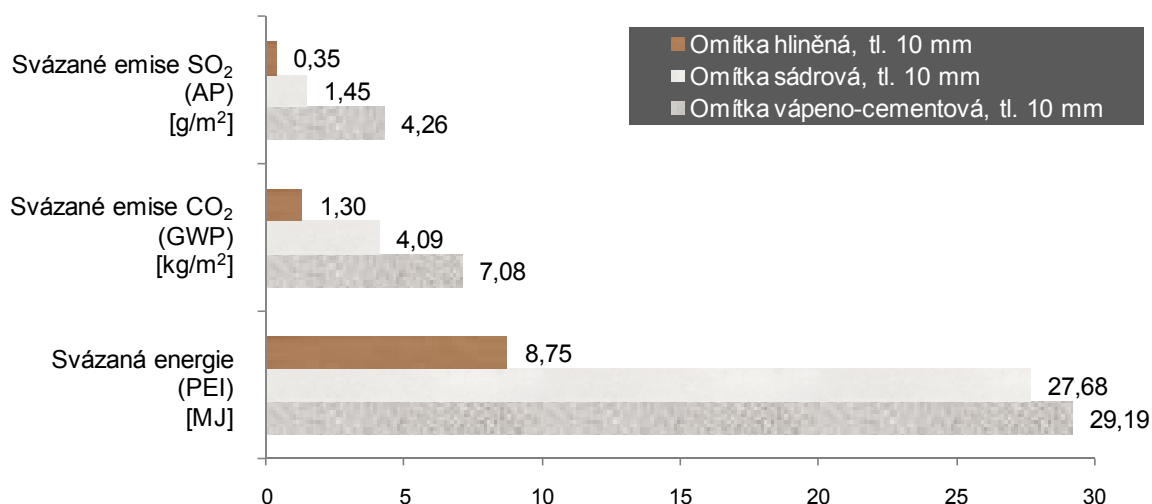
B.1.4 Hliněné omítky z hlediska životního cyklu budovy a dopadů na životní prostředí

B.1.4.1 Svázané emise a energie

Výroba stavebních materiálů a jejich přeprava významným způsobem přispívá ke zvýšení dopadů lidské činnosti na životní prostředí. Stavební sektor tvoří cca 40% podíl na celkové spotřebě energie v EU (Směrnice EP a Rady, 2010).

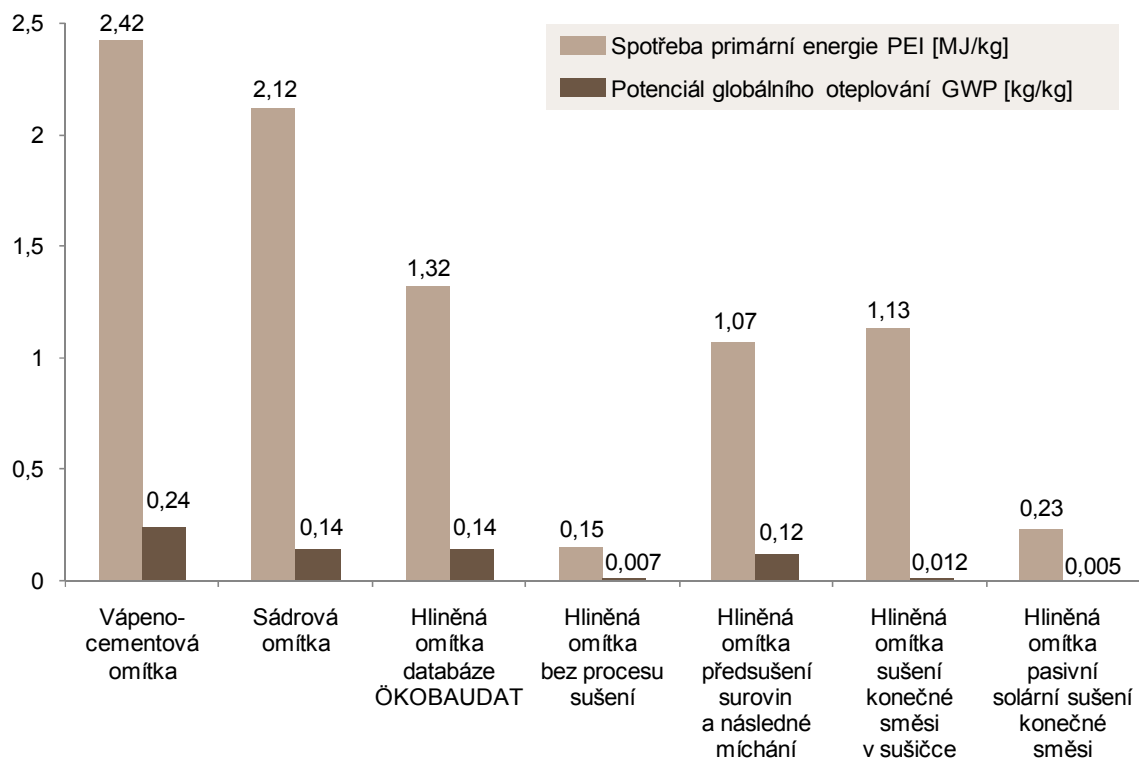
Měřitelné informace o vlivu stavebního materiálu na životní prostředí v průběhu jeho životního cyklu se zjišťují metodou analýzy životního cyklu (LCA) podle příslušných norem (ČSN EN ISO 14040; ČSN EN ISO 14044). Při hodnocení dopadů stavebních materiálů na životní prostředí by do posuzování měly vstupovat údaje z celého jeho životního cyklu, tzn. od těžby primárních surovin přes výrobu, dopravu, zabudování až po likvidaci, případně recyklaci. Pro možnost porovnávání materiálů mezi sebou se v praxi zpravidla zahrnují pouze prvotní fáze dle systémové hranice „Cradle to Gate“ zahrnující těžbu surovin, dopravu do výroby a výrobu materiálu.

Jak prezentuje studie (Fernandes, 2019), může použití hliněných stavebních prvků v budově vést ke snížení potenciálních dopadů na životní prostředí až o 50 % ve srovnání s konvenčními materiály. Jak ukazují údaje z databáze Envimat (Envimat, 2021) znázorněné v grafu na Obr. 9 a výsledky studie (Melià, 2014), vliv výroby omítek ze surové hlíny a písku na životní prostředí je podstatně menší než u konvenčních omítek. Výroba hliněných omítek je založena na jednoduchých procesech vyžadujících relativně malé množství energie. Přísady hliněných omítek jsou suroviny, které se jednoduše těží, prosévají a mísí při pokojové teplotě, na rozdíl od cementu a vápna, jejichž výroba vyžaduje velmi vysoké teploty (pro výrobu slínku až 1450°C) a následně vysokou spotřebu energie.



Obr. 9 – Graf srovnání hliněných, sádrových a vápenocementových omítek z hlediska dopadů na životní prostředí, data použita z databáze Envimat (autor s využitím Envimat, 2021)

V případě stavebních produktů z nepálené hlíny mohou být údaje z jednotlivých databází zabývajících se hodnocením životního cyklu stavebních materiálů velmi proměnlivé. Jak dokazuje studie (Melià, 2014), u průmyslově vyráběných omítek s nízkými hodnotami svázaných emisí a energie, jakými jsou hliněné omítky, hrají zásadní roli dopravní vzdálenosti mezi místem těžby surovin a výroby finálního produktu. Na celkové hodnocení průmyslově vyráběných hliněných omítek má velký vliv také technologie výroby, jak je znázorněno na Obr. 10 (Schroeder, 2020). Dle tohoto výzkumu mohou mít hliněné omítky využívající skleníkové sušení či zcela bez sušení řádově jiné hodnoty, než udává oficiální databáze.



Obr. 10 – Graf srovnání vlivu technologie výroby průmyslově vyráběných hliněných omítek z hlediska dopadů na životní prostředí (autor s využitím Schroeder, 2020)

Značný potenciál má výroba hliněných omítek z místních zdrojů jílu na místě staveniště, která se uplatňuje především u staveb svépomocí. Jak prezentují studie (Morel, 2001; Christoforou, 2016), může využití lokálních zdrojů hlíny značně ovlivnit celkový dopad na životní prostředí právě díky redukci dopravní vzdálenosti mezi výrobnou a místem stavby.

B.1.4.2 Recyklovatelnost a redukce odpadů

Více než polovinu celkové produkce všech odpadů v ČR tvoří stavební a demoliční odpady (MŽP, 2021). Opětovná použitelnost materiálů je důležitým kritériem ekologického hodnocení. Cílem udržitelného řízení zdrojů je přechod od lineárního ke kruhovému modelu výroby stavebních materiálů, který je charakterizován nepřetržitým cyklem recyklace – výroba – použití – recyklace, čímž se zabrání produkci odpadu.

Velkým přínosem hliněných materiálů z hlediska udržitelnosti životního cyklu budovy je skutečnost, že produkty z nepálené hlíny vyrobené bez přidání jakéhokoliv stabilizátoru, jako je cement nebo vápno, lze snadno recyklovat pouhým rozmělněním a přidáním vody při nízké spotřebě mechanické energie (Lima, 2016). Případně lze vrátit do přírodního prostředí v blízkosti staveniště při velmi malých environmentálních nákladech. Hliněné materiály mají potenciál být znovuzískány a použity v novém výrobním cyklu se stejnou funkcí a oproti konvenčním stavebním materiálům nedochází při jejich recyklaci ke ztrátě kvality. U výrobků z nepálené hlíny jsou procesy zpracování odpadu k získání nového materiálu srovnatelné s těmi pro získání prvotních surovin (Fernandes, 2019). Různé způsoby recyklace hliněné malty z hlediska dopadů na životní prostředí či potenciál využití hodnotí výzkum (Schroeder, 2020), který srovnává „suchý“ (drcení a recyklace bez oddělování a promývání) a „mokrá“ (separace a 5% ztráta surovin) scénář. Je patrné, že dopady hliněných materiálů na konci jejich životnosti mohou být výrazně nižší než dopady běžných stavebních materiálů.

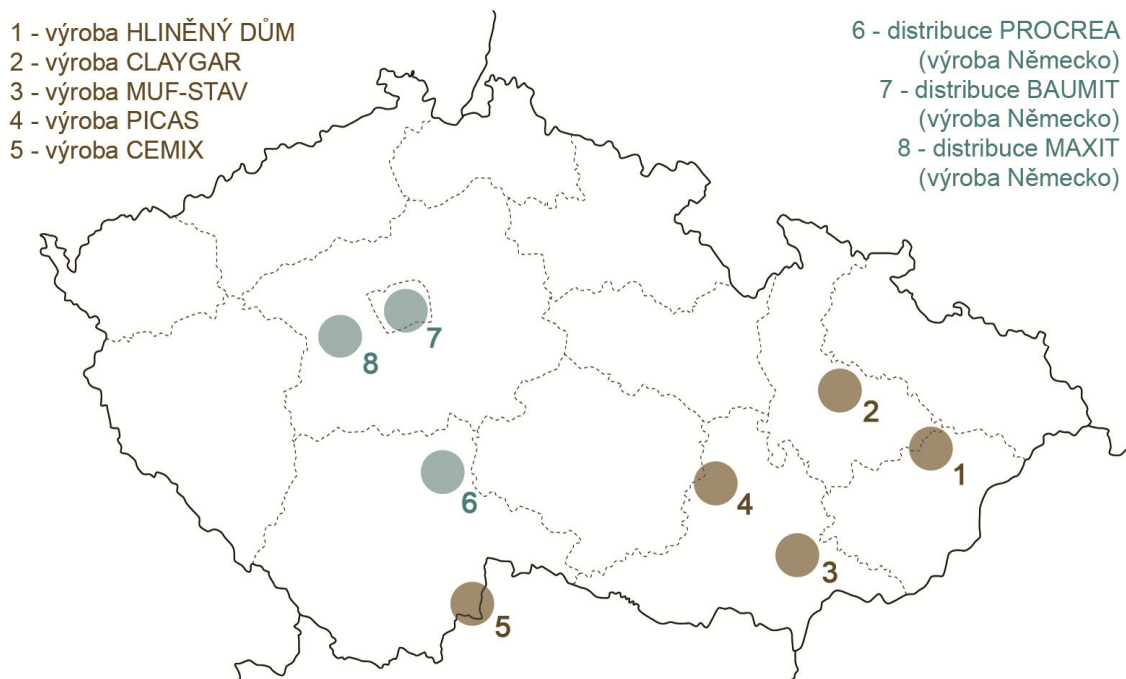
Pro výrobu hliněných omítek, cihel či dusaných stěn lze využít zdrojů hlíny od dodavatelů zemních prací. Tím se eliminuje těžba v lomech a současně se využije odpadní materiál ze stavenišť, který by se ukládal jako odpad v lomech či na skládkách nebo by se použil necyklickým způsobem na silniční infrastrukturu (De Cooman, 2020). Na tuto oblast se specializují některé evropské společnosti (BC Materials, 2021; Cycle Terre, 2021), které se zabývají transformací vyhloubené zeminy ze stavenišť na stavební materiály. Kromě tovární výroby hliněných produktů z regionálních zdrojů zeminy vytěžené na staveništích se zabývají výrobou přímo na místě stavby díky mobilním a flexibilním produkčním jednotkám. K výrobě produktů z nepálené hlíny lze

taktéž využít recykláty ze stavebních či demoličních odpadů. Bylo prokázáno (Klinge, 2020), že je technicky možné vyrobit hliněnou omítku na bázi recyklovaného kameniva místo písku z primárních surovin, aniž by došlo ke zhoršení deklarovaných vlastností materiálu.

B.1.5 Průmyslově vyráběné hliněné výrobky

Hliněné omítky jsou specifické svou možností využít místní zdroje jílu pro jejich výrobu, čehož je hojně využíváno převážně při stavbách svépomocí. Se zvyšujícím se povědomím veřejnosti o trvale udržitelné výstavbě roste na českém trhu i poptávka po průmyslově vyráběných produktech z nepálené hlíny. Oproti některým jiným zemím (Rakousko, Německo) je však jejich výroba ještě velmi okrajovou záležitostí. Sortiment vyráběných produktů v České republice je omezený (hliněné cihly, malty a omítky). Některé výrobky jsou dostupné pouze v rámci distribuce z okolních zemí (hliněné panely) a cena je vyšší (i přes mnohdy nižší výrobní náklady), než je tomu u konvenčních stavebních materiálů.

Nejrozšířenějším produktem z nepálené hlíny dostupným na českém trhu jsou průmyslově vyráběné hliněné omítky ve formě suché omítkové směsi. Vyrábí je jak malé firmy specializující se na hliněnou výstavbu, tak velké společnosti vyrábějící konvenční stavební materiály a mající hliněné omítky ve svém sortimentu jako okrajový produkt. Souhrn současných výrobců a distributorů hliněných omítek a jejich lokalizace v rámci České republiky je znázorněna v mapě na Obr. 11.



Obr. 11 – Průmyslově vyráběné hliněné omítky dostupné na českém trhu (autor)

B.1.6 Použití hliněných omítek v budovách

B.1.6.1 Historické a současné použití hliněných omítek v budovách na našem území

Historicky sloužily hliněné omítky a omazávky zpočátku jako univerzální krycí, těsnící a protipožární vrstva u dřevěných konstrukcí roubených a hrázděných staveb, o čemž svědčí například dochovaná původní hliněná mazanina na našem nejstarším známém srubu ze 14.století ve Znojmě. Později u konstrukcí z nepálených cihel, hlíny dusané do bednění či kamenného zdiva sloužily hliněné omítky spolu s vápenným šlemem či vrchním nátěrem (ličkou) jako krycí ochranná vrstva (Škabrada, 2000; Hošek, 2007). Na objektech s nepálenou hlínou bylo zapotřebí provádět pravidelnou údržbu, která spočívala v opravě popraskané omítky, jejím vymazávání a následném líčení vápenným mlékem. Vymazávání se provádělo jednou ročně, líčiválo se zpravidla dvakrát ročně (Novotný, 2014). Hliněné omítky byly u nás běžné ještě v první polovině minulého století, jak dokazují například některé zachované venkovské stavby na Soběslavsku (Hošek, 2007). Nicméně tak jako masivní hliněné zdivo i použití hliněných omítek posléze skončilo s nástupem moderních stavebních materiálů ve druhé polovině 20.století.

Návrat k hliněným omítkám u nás nastal na přelomu 20. a 21. století v souvislosti se zvýšenou poptávkou po ekologických stavebních materiálech, vytvářejících zdravé vnitřní prostředí. Hliněné omítky se tak staly častým řešením pro úpravu vnitřních povrchů převážně slaměných staveb, mnohdy stavěných svépomocí. K tomuto řešení vedly stavebníky mnohé důvody: možnost využití přírodních a lokálních zdrojů surovin, nenáročnost provádění, dobrá kompatibilita mezi slámou a hlinou či vysoká tepelná setrvačnost stěn ze slámy pokrytých hliněnou omítkou (Evrard, 2013). Své uplatnění v interiéru však našly hliněné omítky i u staveb z konvenčních stavebních materiálů, a to převážně u budov, kde je kladen vysoký důraz na ekologii a zdravé životní prostředí (mateřské školy, centra ekologické výchovy apod.). Okrajově se díky svým vysokým ekologickým benefitům začaly hliněné omítky aplikovat i v exteriéru s použitím hydrofobizačních přísad či nátěrů, byť často experimentálním způsobem.

Nezastupitelnou roli hraje použití hliněných omítek na některých památkově chráněných objektech. Na historické hliněné stavby z vepřovic je z hlediska kompatibility nejvhodnější aplikovat hliněné omítky. Při použití omítek s hydraulickými pojivy (zejména cementem) dochází především v důsledku rozdílné paropropustnosti a teplotní roztažnosti k oddělení mezi různými materiály, což z dlouhodobého hlediska vede k odlupování omítky (Gomes, 2018; Brotánek, 2001). Při rekonstrukci roubených staveb se na vymazávky spar používají hliněné omítky, jelikož dle zkušeností památkářů při použití vápenných omítek směs popraská a začne časem vypadávat (Madaj, 2015).

Své uplatnění nachází hliněné omítky i jako prostředek pro snižování obsahu solí v historickém zdivu z cihel a přírodního kamene jako tzv. „obětní omítky“ (Leiten, 2021). Hliněné omítky, které se aplikují, aby do sebe natáhly soli, a poté se odstraní, jsou levnější než jiné materiály na redukci solí. Vzhledem k tomu, že tyto omítky by měly být snadno odstranitelné z konstrukce, lze použít omítky s nízkou pevností třídy S1 (Rocher, 2020).

B.1.6.2 Příprava podkladu pro použití hliněných omítek

Hliněné omítky je možné aplikovat na všechny typy povrchů, na které lze nanášet i standardní omítkové směsi, tzn. povrchy určené pro mokré procesy.

Jelikož je v hliněných omítkách jediným pojivem jíla a adhezní mechanismus k podkladové stěně či stropu je čistě mechanický, je třeba zajistit dostatečně drsný povrch či vynášecí konstrukci. Z důvodu zajištění dostatečně dlouhé doby zpracování, rovnoměrného vysychání omítky a eliminace trhlin je zapotřebí silně a středně nasákavé povrchy před nanášením hliněných omítek dostatečně zvlhčit. Naopak materiály slabě nasákavé a nenasákavé vlhčeny být nemají. Z hlediska způsobu přípravy podkladu je možné konstrukce rozdělit do těchto kategorií:

- **Zděné a betonové povrchy**

Výsledky dosažené různými zkouškami (Santos, 2019) ukazují, že hliněné omítky lze aplikovat na historická a hliněná zdiva, ale také že aplikace může být (z hlediska smršťování, adheze, soudržnosti apod.) účinná a vhodná i na jiné typy zděných stěn (betonové bloky, kamenné a duté cihlové zdivo). Příprava spočívá v nanesení jílového kontaktního můstku, kterému u hladkých ploch (keramické tvarovky, beton, pórobeton) předchází aplikace adhezní vrstvy (například vápenný či cementový postřík). V případě konstrukcí z nepálené hlíny stačí povrch navlhčit, případně zdrsnit hřebenem s hřeby.

- **Slaměné balíky**

Hliněné omítky mohou být nanášeny přímo na slaměné balíky. Aplikaci omítek předchází vtažení hliněné omazávky do slaměných balíků a po vyschnutí omazávky její následné zvlhčení. Pokud jsou omítky aplikovány na konstrukci ze slaměných balíků s šikmým prkenným zavětrováním, je nutné do omítky vtlačit armovací sklotextilní síťovinu ve směru kolmém na směr prken.

- **Deskové materiály**

Příprava podkladu pro aplikaci hliněných omítek na deskové materiály je individuální dle použitého výrobku. Při aplikaci na tvrdé dřevoštěpové desky (OSB), případně prkenný záklop, je nutné povrch opatřit dodatečnou vynášecí konstrukcí ve formě rákosové rohože (pro menší tloušťky hliněných omítek) či dřevěných latěk (pro tloušťky omítek cca 4 cm a více). V případě aplikace omítky na sádkartonové či sádrovláknité desky je nutné podklad ošetřit zrnitým přilnavostním základem. Měkké dřevovláknité desky vhodné k omítání je třeba zdrsnit škrabkou na jemné omítky (SHS, 2015).

B.1.6.3 Technologie provádění hliněných omítek

Hliněné omítky se aplikují v provedení jednovrstvém i vícevrstvém, počet a tloušťka jednotlivých vrstev omítky záleží na typu podkladního materiálu a na požadavcích uživatele (rovinnost a struktura finálního povrchu, akumulční schopnost, použití omítek pro otopný systém apod.). Jednovrstvé hliněné omítky jsou vhodné na rovinné homogenní plochy, které jsou drsné a dobře savé (stěny z hliněných cihel, z dusané hlíny, pórobetonových tvárnic apod.), na hliněné, sádkartonové nebo sádrovláknité desky či hladký beton. Vícevrstvé omítky jsou nezbytné v případě podkladů, které jsou nerovné, heterogenní (stavební materiály různě drsné a savé), slabě nasákavé a velmi měkké (lehké desky z dřevěné vlny, slaměné balíky apod.) a na materiály, které vyžadují nosiče omítek (SHS, 2015).

Příprava čerstvé omítkové směsi z průmyslově vyráběných hliněných omítek spočívá ve smíchání sypké omítkové směsi s vodou v předepsaném poměru, následném důkladném rozmíchání, odležení (pár minut) a závěrečném promíchání. Vlastní omítání se z pohledu zedníka od jiných omítacích materiálů zásadně neliší. Nicméně vzhledem k tomu, že v hliněných omítkách nedochází k žádné chemické reakci a svoji pevnost získávají pouhým procesem vysychání, je nutné dbát na řádné utažení omítky. Ručně se omítka nanáší, utahuje a vyhlazuje lžící, hladítkem či spárovačkami u detailů (Kříž, 2001, a). Aplikaci hliněných omítek je po přidání vhodných přísad možné provádět také strojně (Obr. 12). Aby se zamezilo vytváření konstrukčních trhlin, je nutné do omítky na rozhraní různých materiálů nebo na ploše, kde se nachází styky desek, vtlačit výztužnou tkaninu. Po aplikaci finální vrstvy omítky je povrch obvykle filcován a po vyschnutí je provedeno ometení volných pískových částic. Na takto připravený povrch je možné nanést finální nátěr (například silikátový), v případě hliněných omítek však často zůstává štuková vrstva jako pohledová.

Specifickým rysem hliněných omítek je jejich neagresivní chování ve styku s pokožkou a možnost opětovného použití materiálu pouhým rozmočením. Proto tento materiál vybízí k různým kreativním záměrům, jako je například modelace reliéfů, provádění proškrabávaných a vícebarvených technik či zapojení amatérů do jejich provádění (Obr. 13). Při práci se mnohdy záměrně nechává vyniknout drobným nerovnostem a nepravidelnostem v detailu i

specifické modelaci a křivosti stěn v makroměřítku (například u stěn ze slaměných balíků).



Obr. 12 - Strojové omítání slaměného rodinného domu v Ludvíkově hliněnou omítkou (archiv autora)



Obr. 13 - Aplikace hliněných omítek na zkušební stěnu v rámci projektu Noc vědců 2019 na fakultě stavební VUT v Brně (archiv Karla Struhaly)

B.1.7 Zkoušení hliněných omítek

Schopnost vyhodnotit vlastnosti hliněných omítek pomocí laboratorních zkoušek komplikuje fakt, že nepálená hlína je v současných ČSN a související legislativě jen velmi málo zmiňována. Zkoušení vlastností výrobků z nepálené hlíny podle postupů určených pro jiné konvenční materiály není v některých případech vhodné, jelikož jsou v mnoha ohledech velmi specifické (například odpadávání částic při ponoření vzorku do vody během testů kapilární absorpce vody). V některých případech je tak nutné zkušební postupy modifikovat, případně odvodit ze zahraničních standardů týkajících se hliněných konstrukcí. Jedny z nejpokročilejších právních předpisů zabývajících se nepálenou hlínou jako stavebním materiálem má Německo, Nový Zéland a Austrálie (Pacheco-Torgal, 2012).

Úroveň regulace v oblasti hliněného stavitelství v Německu je v současné době lepší než v jakékoliv jiné zemi na světě. Německé normy pro hliněné stavební materiály slouží jako model pro normalizační práci v jiných zemích. První sada

stavebních předpisů pro hliněné stavební materiály vydaná jako Lehmbau Regeln v roce 1998 byla následována dvěma řadami oficiálních norem DIN vydaných v letech 2013 a 2018. V současné době probíhají práce na třetí generaci standardů (Ziegert, 2020). Aktuálně platné normy týkající se nepálené hlíny jsou DIN 18942 a DIN 18945 až DIN 18948 z roku 2018.

Austrálie byla jedna z prvních zemí, které zavedly zvláštní předpisy týkající se hliněných staveb. Prvotní předpisy byly publikovány v roce 1952 pod označením „Bulletin 5“ a po několika jejich revizích následovalo v roce 2002 nahrazení příručkou Australian Earth Building Handbook (Walker, 2001). Velmi pokročilé právní předpisy o hliněných stavbách má Nový Zéland, aktuálně platné jsou standardy NZS 4297 až NZS 4299 z roku 2020.

B.2 Hydrofobizační přísady a nátěry pro použití omítek v exteriéru

Použití hydrofobizačních přísad a nátěrů u hliněných omítek má v našich klimatických podmínkách své historické kořeny, mnohdy se však jednalo o úpravy, které měly jen krátkodobou trvanlivost a vyžadovaly časté opravy. I přes vzrůstající zájem o hliněné omítky je v současné době jejich použití v exteriéru pouze okrajovou záležitostí. Mnohé původní znalosti a osvědčené receptury byly zapomenuty, nové receptury jsou zkoušeny v omezené míře a požadavky stavebníků na trvanlivost jsou vyšší než v dobách, kdy se hliněné omítky na venkovních fasádách běžně používaly.

B.2.1 Princip hydrofobizace

Hydrofobizační úprava materiálu spočívá v potlačení průniku kapalné vody do porézního systému, ať už se jedná o působení dešťových srážek nebo vzlínající vlhkost. Podstatou hydrofobizace omítek je zvýšení úhlu smáčení povrchu, čímž se stává méně nasákovým (Barták, 1996; Hošek, 2007). Smáčivost je jedním z parametrů, který hraje zásadní roli při celkovém hodnocení odolnosti povrchu proti povětrnostním vlivům. Hydrofobizační úpravu hliněných omítek lze provést přidáním stabilizačních pojiv a přísad do připravované směsi či aplikací nátěrů na finální povrch.

Příměsi se stabilizujícím účinkem (například vápno, cement, bitumen či rostlinné a živočišné tuky) obklopují částice jílu a zabraňují tak pronikání vody do jeho struktury a tím také bobtnání a měknutí hlíny (Minke, 2009). Přítomnost některých přísad (kravská mrva) v hliněné omítce ovlivňuje její mineralogii reakcí s jílovými částicemi za vzniku nerozpustných látek, které slepují izolované částice jílu dohromady (Millogo, 2016). Přidáním hydrofobizačních přísad může dojít ke zhoršení zpracovatelnosti směsi a materiálových vlastností, které taktéž hrají významnou roli při posuzování trvanlivosti a odolnosti materiálu proti povětrnostním vlivům (například pevnostní charakteristiky).

Hydrofobní nátěry spočívají ve vytvoření tenké vodoodpudivé krycí vrstvy. Nátěry hliněných povrchů vystavených povětrnostním podmínkám je třeba pravidelně obnovovat, jelikož tenký film může být narušen mechanicky působením větru a mrazu nebo chemicky vlivem UV záření či kyselých dešťů. Jejich použití na exteriérovou stranu konstrukce může způsobit komplikace z hlediska kondenzace vodní páry, protože některé nátěry mají vysoký faktor difuzního odporu (Minke, 2009).

B.2.2 Historické techniky

V minulosti se k ochraně hliněných povrchů před povětrnostními vlivy používaly různé techniky - přidání stabilizačních pojiv a přísad do směsi a aplikace nátěrů z místně dostupných surovin. Účelem použití stabilizačních pojiv a hydrofobizačních přísad bylo mnohdy zlepšení dalších parametrů, jako je například zvýšení pevnosti či plastifikace směsi. Pro získání optimální kombinace vlastností často docházelo ke kombinování různých surovin. Zvýšení odolnosti proti povětrnostním vlivům se dosahovalo použitím těchto látek:

- **Minerální látky**

Historicky se jako přísada do hliněné směsi ve formě stabilizačního pojiva i na nátěry stěn hliněných staveb používalo v hojné míře vápno. Vápenný nátěr byl na území Čech a Moravy nejoblíbenější nátěrovou hmotou (ve městech i na venkově), doklady použití pochází již z doby kamenné (Rovnaníková, 2002; Barták 1996). V některých oblastech se společně s vápnem do hliněných směsí

na výrobu malt, omítek a hliněných stěn přidával pucolán, materiál s vysokou jemností (Eires, 2013). Za účelem zvýšení odolnosti proti vodě se používaly také soli (například soda) (SHS, 2015) či přírodní bitumen (Minke, 2009; Eires, 2013).

• Živočišné látky

Jak uvádí Tab. 7, byla dle literatury většina produktů živočišného původu (obsahujících lipidy či proteiny) tradičně používána ve formě přísady do hliněných směsí určených pro výrobu hliněných malt, omítek či cihel. Některé živočišné látky byly přidávány do nátěrových hmot aplikovaných na hliněné povrchy vystavené povětrnostním vlivům.

Tab. 7 – Známé tradiční přísady živočišného původu zlepšující odolnost proti povětrnostním vlivům

<i>Látka</i>	<i>Poznámka</i>	<i>Zdroj</i>
Tuky	velrybí olej, sádlo, máslo, lůj	(Eires, 2013) (Rovnaníková, 2002)
Syrovátka		(Eires, 2013)
Kasein	ve formě tvarohu; často v kombinaci s vápnem, jako přísada i na nátěry	(Minke, 2009) (SHS, 2015)
Vaječné bílky	používáno jako přísada	(Eires, 2013) (SHS, 2015)
Krev	u nás nejčastěji býčí; používáno jako přísada s vápnem i bez	(Minke, 2009) (Eires, 2013) (SHS, 2015)
Exkrementy	kravské, koňské, velbloudí; používáno jako přísada	(Minke, 2009) (Eires, 2013) (SHS, 2015)
Moč	kravská; používáno jako přísada	(Minke, 2009) (Eires, 2013) (SHS, 2015)
Kostní klič		(Minke, 2009)

• Rostlinné látky

Produkty rostlinného původu (polysacharidy, lipidy, pryskyřice, taniny) byly tradičně používány ve formě přísady do hliněných směsí i do nátěrů aplikovaných na hliněné povrchy. Souhrn látek rostlinného původu, které byly dle literatury historicky používány a u nichž je znám vliv na odolnost proti povětrnostním vlivům, je uveden v Tab. 8.

Tab. 8 – Znamé tradiční přísady rostlinného původu zlepšující odolnost proti povětrnostním vlivům

<i>Látka</i>	<i>Poznámka</i>	<i>Zdroj</i>
Mouky, škroby, melasa	pšeničná mouka, rýžový škrob; vařením vyrobené lepidlo jako přísada do směsi	(Minke, 2009) (Eires, 2013)
Gumy		(Eires, 2013)
Oleje	lněný, ricinový, kokosový, bavlněný, kapiokový, bambucký; jako přísada do směsi i jako nátěr	(SHS, 2015) (Eires, 2013) (Hošek, 2007)
Vosky	Karnaubský, včelí; jako přísada i jako emulze (nátěr)	(Eires, 2013) (SHS, 2015)
Pryskyřice		(Eires, 2013) (Hošek, 2007)
Tanin	třísloviny z hroznů, z kůry dubu, kaštanu, akácie, z černého a zeleného čaje	(Du, 2020) (SHS, 2015)
Vazelína		(Hošek, 2007)

B.2.3 Vývoj a současný stav hydrofobizačních činidel

S nástupem moderních stavebních materiálů a vývojem nových technologií se postupně začaly jako hydrofobizační činidla používat další materiály: cement, bitumenové emulze, vodní sklo a syntetické látky, jako jsou syntetická pryskyřice, parafín, syntetické vosky a latex, silany, silikony, siloxany, estery kyseliny křemičité a akryláty (Minke, 2009). Díky moderním technologiím se taktéž začaly používat materiály tradiční, u nichž byly upraveny materiálové vlastnosti nebo skupenství, například dehydratované oleje, práškový kasein, kyselina tříslová (SHS, 2015) či vysušený a následně rozdrčený (případně granulovaný) kravský trus (Bamogo, 2020; Pachamama, 2020). Své uplatnění nachází i různé nové alternativy přírodních materiálů (sušený prášek z žížalích exkrementů, zbytky z červené řepy a rajčat) (Eires, 2013).

Z rešerše výzkumných prací zabývajících se hodnocením hydrofobizačních prostředků hliněných omítek, jejichž soupis je uveden v tabulce (Tab. 9), je zřejmé, že současný výzkum se zaměřuje na posuzování efektivity a vhodnosti použití jak přírodních (tradičních i novodobých), tak syntetických nátěrů a přísad. Jelikož syntetické látky a materiály s vysokými hodnotami svázaných emisí a energie výrazně zhoršují příznivé ekologické vlastnosti hliněných omítek, zůstává hlavní okruh zájmu stavebníků převážně u přírodních hydrofobizačních činidel.

Tab. 9 – Výzkumné práce zabývající se hodnocením hydrofobizačních přísad a nátěrů hliněných omítek

<i>Reference</i>	<i>Hydrofobizační přísada / nátěr a použitá technika</i>	<i>Sledované parametry a prováděné zkoušky</i>
(Ventakarama Reddy, 1987)	Nátěry (různé kombinace vápna, živočišného lepidla a škrobu) na dusané hliněné stěny.	Odolnost proti dešťové erozi (Wolfskill spray test).
(Mattone, 2005)	Hliněná malta (omítka) stabilizovaná cementem, vápnem nebo kaktusovou dřeninou.	Pevnost v tahu za ohybu, otěruvzdornost, vodotěsnost (Karstenovy trubice), odolnost proti dešťové erozi (test postřikem).
(Martínez-Camacho, 2008)	Nátěr z kaktusu opuncie (pektin) na hliněné omítce historického objektu.	Odebrání vzorku z fasády, hodnocení povrchu pomocí rentgenové difrakce, elektronového mikroskopu, sorpce dusíku, termogravimetrické analýzy.
(Minke, 2009)	Nátěry na hliněné omítky (Iněná fermež, vápeno-kaseinový nátěr, včelí vosk, vodní kámen, zpevňovač kamene H Wacker, hydrofobní impregnace fasád Herbol, Hydrophobin Indula, BS 15 Wacker, Syltrit 1772 Metroark, Baysilone LD Bayer).	Kapilární absorpce vody, propustnost vodní páry.
(Minke, 2011)	Přísady do hliněných omítek (bitumenová emulze, Iněná fermež, vápenokaseinová kaše, vápno, cement, lepidlo z pšeničné mouky, vodní sklo, borax-kasein, lepidlo, lepek).	Odolnost proti dešťové erozi (test postřikem vyvinutý v laboratoři FEB), otěruvzdornost.
(Stazi, 2016)	Přísady do hliněných omítek (nanostrukturovaná polymerní disperze křemíku, vodní emulze organických derivátů křemíku, směs vápencového kameniva s příměsí mastných kyselin a syntetických polymerů). Nátěry na hliněné omítky (nanostrukturovaná emulze molekul na bázi křemíku, nanostrukturovaná suspenze titanu a oxidu křemičitého, vodní silan-siloxanová emulze, vodní emulze včelího vosku).	Pevnost v tlaku, propustnost vodní páry, barva povrchu, smáčivost, absorpce vody (vodotěsnost - Karstenovy trubice), odolnost proti dešťové erozi (Spray test), míra smrštění, přilnavost.
(Santos, 2017)	Přidání vápna do hliněných omítek.	Vizuální posouzení (barva, drsnost, degradace), tvrdost povrchu (tvrdoměrem a kyvadlovým sklerometrem), přilnavost, odolnost proti nárazu, soudržnost povrchu a absorpce vody (Karstenovy trubice) povrchů vystavených po dobu 2 let povětrnostním podmínkám (zkouška <i>in situ</i>).

Reference	Hydrofobizační přísada / nátěr a použitá technika	Sledované parametry a prováděné zkoušky
(Lanzón, 2017)	Stearan zinečnatý jako přísada do hliněné omítky.	Míra smrštění, analýza tuhosti omítek ultrazvukovým měřením, kapilární absorpce vody (vzlínavost), vodotěsnost (Karstenovy trubice), odolnosti proti vodě (test kapáním a test ponořením ve vodě, HCl a H ₂ SO ₄).
(García-Vera, 2020)	Nátěr na hliněné omítky (ethylsilikát Estel 1000®).	Test odlupování (Peeling test), kapilární absorpce vody (vzlínavost), vodotěsnost (Karstenovy trubice), odolnost proti dešťové erozi (Rain test – voda, HCl, H ₂ SO ₄), analýza texturních změn pomocí optické mikroskopie, analýza pórové struktury pomocí rtuťové penetrační porozimetrie.
(Paul, 2020)	Přísady do hliněných omítek (rýžový škrob, hlenový sekret ze sladkovodní ryby Varaal, rostlinný gel ze stonku rostliny Oonjalvalli, lepkavá tekutina z ovoce stromu Panachikaya.	Odolnost proti dešťové erozi (kapková metoda), otěruvzdornost, test s přitlačením mokré houby (Sponge test).
(Cicek, 2020)	Stabilizace hliněné směsi pomocí vápna, trasu a sádry.	Pevnost v tlaku, odolnost proti vodě (ponořením) a proti mrazu (cykly zmrazení-rozmrazení).
(Pachama, 2020)	Kravská mrva (odleželá, vysušená a přesátá) jako přísada do hliněné omítky.	Lineární smrštění, objemová hmotnost v suchém stavu, pevnost v tahu za ohybu a v tlaku, přilnavost.
(Bamogo, 2020)	Kravská mrva (vysušená a rozdrcená) jako přísada do hliněné omítky.	Granulometrie, chemické složení, mineralogické složení, lineární smrštění, pórovitost, PH, kapilární absorpce vody, odolnost proti dešťové erozi (test postřikem), tepelná vodivost, otěruvzdornost, pevnost v tahu za ohybu a v tlaku.
(Parracha, 2021)	Bioprodukt založený na kultuře Escherichia (E. coli) s přídatkem železa jako přísada do hliněné omítky	Lineární smrštění, objemová hmotnost v suchém stavu, pórovitost, dynamický modul pružnosti, pevnost v tlaku a v tahu za ohybu, povrchová tvrdost a soudržnost, tepelná vodivost, odolnost vůči vodě (zkouška kapkou vody, zkouška ponořením do vody).

C. ZHODNOCENÍ LITERÁRNÍCH POZNATKŮ

C.1 Vhodnost použití hliněných omítek do exteriéru

I přes převažující názor, že vzhledem ke špatné odolnosti nepálené hlíny proti povětrnostním vlivům a dostupnosti moderních materiálů nejsou v současnosti hliněné omítky pro použití v exteriéru vhodné, jsou oblasti, ve kterých přesto nachází svoje uplatnění. Je tomu tak v památkové obnově či u budov, kde je kladen velký důraz na environmentální aspekty. Z publikovaných odborných článků citovaných v Tab. 9, které se zabývají zkoumáním hliněných omítek pro venkovní použití, vyplývá, že zájem o ně roste jak u koncových uživatelů, tak u odborné veřejnosti a ve výzkumné sféře. Dá se předpokládat, že jako alternativa budou hliněné omítky v exteriéru využívány i do budoucna a vždy budou mít na trhu své místo.

Použití hliněných omítek v exteriéru má své limity a bez použití hydrofobizačních prostředků je jejich životnost velmi krátká. Hydrofobizací hliněné směsi či povrchu hliněné omítky lze odolnost proti povětrnostním vlivům výrazně zvýšit, avšak za cenu ne vždy žádoucích změn některých materiálových vlastností. Problémem by mohla být například změna přínavostních charakteristik, kdy může v dlouhodobějším horizontu dojít k odtržení omítky od podkladu. Komplikací se může stát zvýšení difuzního odporu venkovní omítky, které může u materiálů, jež jsou zabudované v konstrukci a citlivé na vlhkost (například sláma), způsobit jejich hnilobu a degradaci. Z toho důvodu je nutné pro posouzení vhodnosti použití hydrofobizačního činidla analyzovat vliv na širokou škálu materiálových vlastností.

C.2 Bílá místa

Z rešerše vědeckých prací je patrné, že většina výzkumů zabývajících se optimalizací hliněných omítek se zaměřuje na zkoumání jejich vlastností převážně pro účely použití v interiéru. Tzn., že ve velké míře jsou posuzovány vlastnosti jako například absorpce vlhkosti, pevnostní charakteristiky či tepelně-izolační vlastnosti základních hliněných směsí a jejich ovlivnění po přidání různých přísad a příměsí. V posledních letech se zvýšil zájem o výzkum

hliněných materiálů v oblasti exteriérového použití (Tab. 9). Nicméně jak je zřejmé (z Tab. 9), mnohé z prací omezují výběr zkoumaných parametrů na určení odolnosti proti kapalně vodě a pomíjí ostatní vlastnosti, které mohou být přidáním hydrofobizačních činidel výrazně ovlivněny. Rovněž jsou prováděny převážně testy v laboratorním prostředí a pouze okrajově zkoušky dlouhodobé trvanlivosti *in situ*, což nejen že může vést ke zkreslenému hodnocení, ale také neumožňuje provést korelaci mezi laboratorními a *in situ* zkouškami, užitečnou pro další výzkumné práce v oboru.

D. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

D.1 Specifikace cílů práce

Disertační práce řeší vhodnost použití vybraných hydrofobizačních činidel pro hliněné omítky určené k venkovnímu použití pomocí zkoušek prováděných v laboratoři a *in situ* a posuzuje jejich použití ve vybrané konstrukci pomocí simulace.

Cíl práce: Nalezení vhodného typu a množství hydrofobizačního činidla pro použití v hliněných omítkách za účelem zvýšení odolnosti proti povětrnostním vlivům, jehož použití ve výrazné míře neovlivní difuzi vlhkosti konstrukcí.

Dílčí cíle:

1. Výběr hydrofobizačních činidel vhodných k testování a stanovení jejich množství přidávaného do směsi.
2. Výběr prefabrikovaných hliněných směsí určených k testování.
3. Testování hydrofobizovaných hliněných omítek pomocí zkoušek prováděných v laboratoři (objemová hmotnost, pevnost v tlaku a v tahu za ohybu, vzlínavost, odolnost proti dešťové erozi, difuze vodní páry, hygroskopická sorpce) a *in situ*, srovnání výsledků.
4. Numerická simulace tepelně-vlhkostního chování vybrané konstrukce s použitím dat naměřených v laboratoři.

D.2 Zdůvodnění volby cílů

Aktuální trend zvyšování požadavků na kvalitu vnitřního prostředí a snižování dopadů stavebnictví na životní prostředí dostává některé v minulosti upozaděné materiály, mezi které patří i hliněné omítky, zpět do popředí zájmu laické i odborné veřejnosti. S ohledem na limity použití hliněných omítek v exteriéru se pozornost obrací i na výzkum a vývoj hydrofobizačních činidel zvyšujících odolnost omítek proti povětrnostním vlivům.

Práce svým rozsahem a zvoleným designem umožňuje vyhodnotit vliv různých hydrofobizačních činidel na dva různé typy omítek. Zároveň se zabývá vlivem

koncentrace čidel na zvolené vlastnosti hliněných omítek. Testování probíhalo za laboratorních a reálných podmínek. Výsledná data tak přispívají nejen k porovnání vlivu čidel, jejich koncentrace a omítek na jejich odolnost proti povětrnostním vlivům, ale zároveň generují reálná data a ukazují, do jaké míry lze v laboratorních podmínkách napodobovat reálné chování hliněných omítek.

Bez posouzení vlivu použití hydrofobizovaných hliněných omítek na schopnost difuze konstrukce nelze plně vyhodnotit celkovou vhodnost užití hydrofobizačního čidla. S ohledem na časovou a finanční náročnost provádění zkoušek na reálných objektech může ke svému účelu dostatečně posloužit numerická simulace, pomocí které je možné vyhodnotit, zda použití hydrofobizovaných hliněných omítek způsobuje tepelně-vlhkostní podmínky vedoucí k degradaci použitých materiálů.

D.3 Prostředky pro dosažení cílů

Měření laboratorních vlastností hydrofobizovaných hliněných omítek probíhalo ve 2 laboratořích na Ústavu stavebního zkušebnictví a na Ústavu pozemního stavitelství Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně. Pro dlouhodobé měření odolnosti hliněných omítek proti povětrnostním vlivům *in situ* byl vybrán soukromý pozemek v Brně - Kníničkách, na němž byly umístěny zkušební panely. Nákup materiálu a laboratorních pomůcek byl financován z programu Specifický výzkum FAST-J-15-2921 Optimalizace hliněných omítek pro venkovní použití (1.1.2015 – 31.12.2015).

Pro potřeby numerické simulace byl z dostupných simulačních nástrojů tepelně-vlhkostního chování vybrán program WUFI Pro 5.3, jenž slouží k dynamickému modelování jednorozměrného šíření tepla, vlhkosti a energie ve stavebních konstrukcích a umožňuje import vlastních dat u vlastností použitých materiálů.

E. MATERIÁL A METODY

E.1 Typ hydrofobizačního činidla

Výběru vhodných hydrofobizačních činidel pro účely testování předcházela rešerše historicky používaných i novodobých hydrofobizačních prostředků. Při výběru se v obecné rovině řídíme těmito kritérii:

- vliv na technologický postup a zpracovatelnost čerstvé směsi;
- vliv na estetické parametry a životnost výsledného povrchu;
- nutnost pravidelné údržby výsledného povrchu;
- vliv na recyklovatelnost výsledné hliněné směsi;
- dopad hydrofobizačního prostředku na životní prostředí;
- schopnost zajistit opakovatelnou kvalitu hydrofobizačního činidla (různorodost kravské či koňské mrvy);
- lokálnost suroviny, dostupnost na českém trhu;
- ekonomická dostupnost vycházející z předpokladu přijatelného navýšení ceny výsledné směsi;
- zdravotní nezávadnost a požární bezpečnost.

S ohledem na výše uvedené byly z výběru zcela vyřazeny prostředky ve formě hydrofobních nátěrů, které je třeba pravidelně obnovovat a jež jsou náchylné k odlupování. Dále byla z výběru vyloučena hydraulická pojiva, jejichž přidání do hliněné směsi představuje značné environmentální dopady (Ventakarama Reddy, 2010; Fernandes, 2019), znemožňuje recyklaci materiálu a dle dosavadních výsledků výzkumů nemají zásadní vliv na trvanlivost hliněných omítek (Santos, 2017; Gomes, 2018). S ohledem na recyklovatelnost a dopad na životní prostředí do výběru nebyly zahrnuty žádné látky syntetického charakteru.

K testování byla vybrána 2 hydrofobizační činidla – práškový kasein a ricinový olej. Jedná se o materiály, jejichž parametry byly v souvislosti s hliněnými omítkami zkoumány minimálně nebo vůbec. Z toho důvodu nebylo při výběru možné posoudit splnění některých kritérií uvedených v kapitole E.1 (např. vliv

na zpracovatelnost, estetické parametry, životnost). Při výběru byl kladen důraz na to, aby hydrofobizační činidla splňovala zcela nebo alespoň částečně všechna ostatní kritéria (minimální vliv na recyklovatelnost a dopad na životní prostředí, lokálnost, dostupnost apod.).

- **Práškový kasein**

Kasein, hlavní protein (bílkovina) mléka, představuje složitý soubor makromolekul, tvořených řetězcem asi 20 aminokyselin, které mají hydrofobní i hydrofilní části (Paul, 2020). Kasein je nerozpustný ve vodě (pouze bobtná), je rozpustný v kyselinách a alkáliích. Ve srovnání s ostatními bílkovinami má vysoký obsah kyseliny glutamové, což má za následek kyselý charakter, který umožňuje reagovat se zásadami za vzniku solí (Rovnaníková, 2002). Získává se vysrážením odtučněného mléka kyselinami nebo enzymy a následným vysoušením.

Výhodou práškového kaseinu je možnost použití ve směsi v suchém stavu, proto je možné vytvořit prefabrikovanou hliněnou směs pro venkovní použití a zajistit tak správnou koncentraci a dostatečné promísení. Jedná se o činidlo dostupné, lokální a s možností vrátit materiál do přírodního prostředí.

- **Ricinový olej dehydratovaný**

Ricinový olej je získáván ze semen skočce obecného (ricinovníku). Dehydratace spočívá v odstranění hydroxylové skupiny z dvanáctého uhlíku v řetězci, čímž se z původního nevysychavého oleje stává olej vysychavý. Obecně jsou tuky estery vyšších mastných kyselin s glycerolem, u nichž v alkalickém (zásaditým) prostředí dochází k hydrolýze a vzniku vápenatých solí vyšších mastných kyselin, které podobně jako tuky mají hydrofobní vlastnosti (Rovnaníková, 2002).

Ricinový olej je činidlo lokální, dostupné a jeho použití má minimální vliv na recyklovatelnost a cenu výsledné směsi.

E.2 Koncentrace hydrofobizačního činidla

Poměry jednotlivých hydrofobizačních prostředků, které byly zkoušeny na vzorcích v laboratorních podmínkách a v exteriéru (*in situ*), jsou uvedeny

v Tab. 10 a v Tab. 11. Práškový kasein byl přidáván do hliněné směsi v suchém stavu (z důvodu dostatečného promísení), proto se jedná o objemový poměr v suchém stavu. Ricinový olej byl ze stejného důvodu přidáván do čerstvé směsi hliněné omítky, proto se jedná o objemový poměr v mokřém stavu.

Tab. 10 – Objemové poměry ricinového oleje přidávané do hliněných omítek (v mokřém stavu)

<i>Ricinový olej</i>			
<i>In situ</i>	1 %	2 %	4 %*
Laboratorní zkoušky	0,5 %	1 %	2 %

*Tato koncentrace byla pro následná laboratorní měření vyřazena z důvodu tvorby šedých teček na povrchu vzorku (Obr. 14).

Tab. 11 – Objemové poměry kaseinu přidávané do hliněných omítek (v suchém stavu)

<i>Kasein</i>			
<i>In situ</i>	2 %	4 %	8 %*
Laboratorní zkoušky	1 %	2 %	4 %**

*Tato koncentrace byla pro následná laboratorní měření vyřazena z důvodu špatné zpracovatelnosti čerstvé směsi po delším odležení (cca 30 minut) a tvorby plísní na povrchu trámečků při jejich vysychání (Obr. 15)

** Tato koncentrace byla u několika posledních zkoušek vyřazena, jelikož se ukázalo, že po vystavení vzorků extrémním vlhkostním podmínkám v klimatické komoře v rámci měření hygroskopické sorpce se na povrchu vytváří plíseň (Obr. 16). Současně se obdobný problém v podobě šedých teček, které se postupně objevovaly po deštivém období a v průběhu času nezmizely, vyskytl i na vzorcích vystavených povětrnostním vlivům.

První fáze stanovení množství stabilizátorů přidávané do hliněné směsi bylo provedeno na základě rešerše výzkumů s obdobnými hydrofobizačními prostředky (viz Tab. 9). Vzorky omítek se stanovenými koncentracemi byly nejdříve vystaveny povětrnostním vlivům, aby byla zajištěna dostatečně dlouhá expozice. Po několika měsících se však na vzorcích s koncentrací 4 % ricinového oleje začaly objevovat šedé tečky (plíseň) (Obr. 14). Tento objemový poměr nebyl do následujícího laboratorního testování zahrnut a škála koncentrací pro ricinový olej byla posunuta. Následně prováděné laboratorní zkoušky ukázaly, že při koncentraci 8 % kaseinu ve směsi dochází při vysychání vzorků k vytváření plísní (Obr. 15) a směs se stává po delším odležení špatně zpracovatelnou. Tento objemový poměr taktéž nebyl do následujícího laboratorního testování zahrnut a škála koncentrací pro kasein

byla posunuta. Na vzorcích se 4 % kaseinu se po vystavení extrémním vlhkostním podmínkám v klimatické komoře vytvořila plíseň (Obr. 16), proto byly tyto koncentrace pro následující laboratorní zkoušky vyřazeny.



Obr. 14 – Šedé tečky, které vznikly na povrchu vzorku se 4 % ricinového oleje po dlouhodobém vystavení povětrnostním vlivům – stav po 15 měsících (archiv autora)



Obr. 15 – Bílý povlak, který vznikl při vysychání zkušebních trámečků s 8 % kaseinu (archiv autora)



Obr. 16 – Plíseň, která vznikla po vystavení vzorků se 4 % kaseinu extrémním vlhkostním podmínkám v klimatické komoře (archiv autora)

E.3 Prefabrikované hliněné směsi

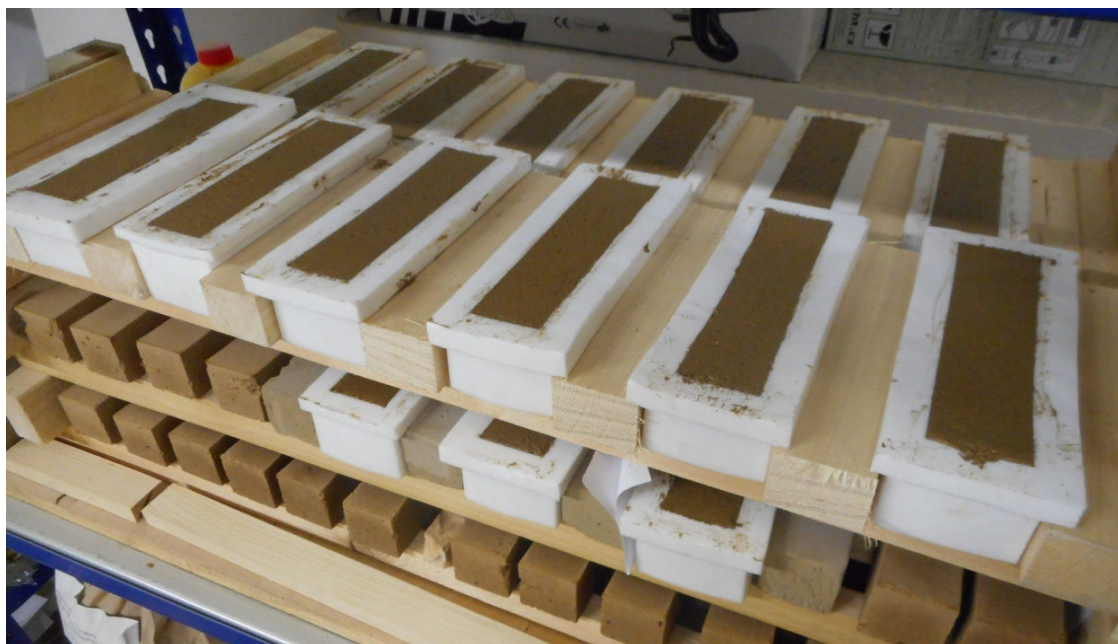
Výběr vhodné prefabrikované hliněné omítky pro účely testování, kterému předcházela rešerše hliněných výrobků dostupných na českém trhu, probíhal na základě zhodnocení těchto aspektů:

- lokálnost: preferovány byly produkty, jejichž výroba (včetně těžby surovin) je prováděna v České republice;
- množství parametrů udávaných výrobcem v produktovém listu: preferovány byly produkty, u nichž výrobce uvádí veličiny, které jsou zapotřebí pro numerickou simulaci (například faktor difuzního odporu);
- zhodnocení základních vlastností omítek získaných vlastním laboratorním měřením.

Parametry prefabrikovaných směsí měřené v laboratoři a veličiny uváděné výrobcem byly zjišťovány jak pro jemné, tak pro hrubé hliněné omítky. Celkem bylo rešerši a měření podrobeno 15 produktů (8 hrubých omítek, 7 jemných omítek) od 7 různých výrobců: Picas, Claygar, MUF-STAV, Maxit, Baunit, Cemix a Hliněný dům (viz tabulka v příloze M.1).

E.3.1 Testování prefabrikovaných hliněných směsí

Pro účely porovnání prefabrikovaných hliněných omítek dostupných na českém trhu byly prováděny laboratorní zkoušky pro určení objemové hmotnosti v suchém stavu, pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu za ohybu. Tyto zkoušky se provádí na trámečcích o rozměrech 160 mm x 40 mm x 40 mm, jejichž výroba obvykle spočívá ve vylití čerstvé směsi do kovové formy, která je vytřena odbedňovacím olejem. Jelikož olej se při přípravě do hliněného vzorku vsákne, mohlo by jeho působením dojít při zkouškách pevností, hygroskopické sorpce a difuze vodní páry ke zkreslení výsledků. Z toho důvodu byly pro účely této disertační práce na zakázku vyrobeny silikonové formy (Obr. 17), u nichž není zapotřebí aplikovat žádný přípravek proti přilnutí. Pro každý produkt bylo vyrobeno 6 zkušebních trámečků. Způsob zpracování čerstvé směsi a množství vody přidávané do suché směsi bylo určeno na základě doporučení v technickém listu od výrobce. Konzistence byla stanovena dle ČSN EN 1015-3 (ÚNMZ, 2000). Veškeré laboratorní zkoušky byly prováděny nejdříve 30 dní po zhotovení zkušebních trámečků.



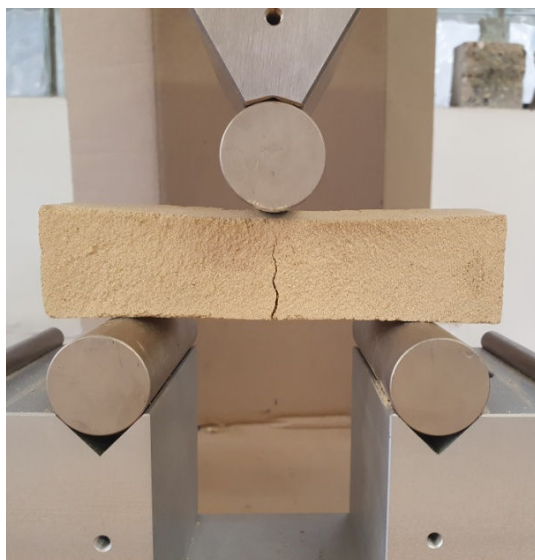
Obr. 17 – Výroba zkušebních trámečků pro laboratorní měření v silikonových formách (archiv autora)

E.3.1.1 Objemová hmotnost

Rozměry vzorků byly měřeny pomocí digitálního posuvného měřítka s přesností na setiny mm, každý rozměr byl měřen na 3 různých místech. Hmotnost vzorku byla určena pomocí digitální laboratorní váhy s rozlišením 0,1 g.

E.3.1.2 Pevnost v tahu za ohybu

Zkušební postup a výpočet byl určen dle ČSN EN 1015-11 (ČAS, 2020). Zkoušky byly provedeny na hydraulickém zkušebním lisu s rozsahem 5 kN pro ohybové zkoušky s přesností na setiny kN (Obr. 18) pracovníkem Ústavu stavebního zkušebnictví na Fakultě stavební VUT v Brně za dodržení stejné rychlosti zatěžování pro všechna tělesa.



Obr. 18 – Měření pevnosti v tahu za ohybu (archiv autora)



Obr. 19 – Měření pevnosti v tlaku (archiv autora)

E.3.1.3 Pevnost v tlaku

Zkušební postup a výpočet byl určen dle ČSN EN 1015-11. Zkoušky byly provedeny na hydraulickém zkušebním lisu s rozsahem 15 kN a přesností odečtu na 0,05 kN (Obr. 19.) pracovníkem Ústavu stavebního zkušebnictví na Fakultě stavební VUT v Brně za dodržení stejné rychlosti zatěžování pro všechna tělesa.

E.4 Testování hliněných omítek s obsahem činidla

Pro účely komplexního posouzení vlivu hydrofobizačních činidel na vlastnosti hliněných omítek byly stanoveny 3 okruhy, které zdůvodňují výběr a následnou realizaci zkoušek:

- základní parametry, které je zapotřebí sledovat z důvodu použitelnosti pro daný účel. Jedná se o pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu, které jsou u hliněných omítek oproti konvenčním materiálům nižší a pokud by přidáním hydrofobizačních činidel do směsi došlo k jejich výraznému zhoršení, ztratila by hydrofobizace své opodstatnění;
- parametry, na jejichž základě je možné vyvozovat odolnost proti degradaci (kapilární absorpce vody, odolnost proti dešťové erozi, hygroskopická sorpce, testování *in situ*);

- parametry, které jsou zásadní pro posouzení vhodnosti použití hydrofobizovaných omítek u některých kritických skladeb konstrukcí, viz dílčí cíl 4 (difuze vodní páry, hygroskopická sorpce).

E.4.1 Laboratorní testování

E.4.1.1 Objemová hmotnost

S ohledem na předpoklad, že přidáním hydrofobizačního činidla do čerstvé směsi může dojít ke změně její konzistence a je nutné upravit množství záměsové vody, byla u všech vzorků určených k laboratorním zkouškám měřena i objemová hmotnost v suchém stavu (zkušební postup viz E.3.1.1). Z tohoto parametru je možné odvozovat míru změny struktury omítky a hodnotit vliv na další měřené veličiny.

E.4.1.2 Pevnost v tahu za ohybu

Pro tuto zkoušku bylo pro každý vzorek zhotoveno 10 zkušebních těles o rozměrech 160 x 40 x 40 mm v silikonových formách (zkušební postup viz E.3.1.2.).

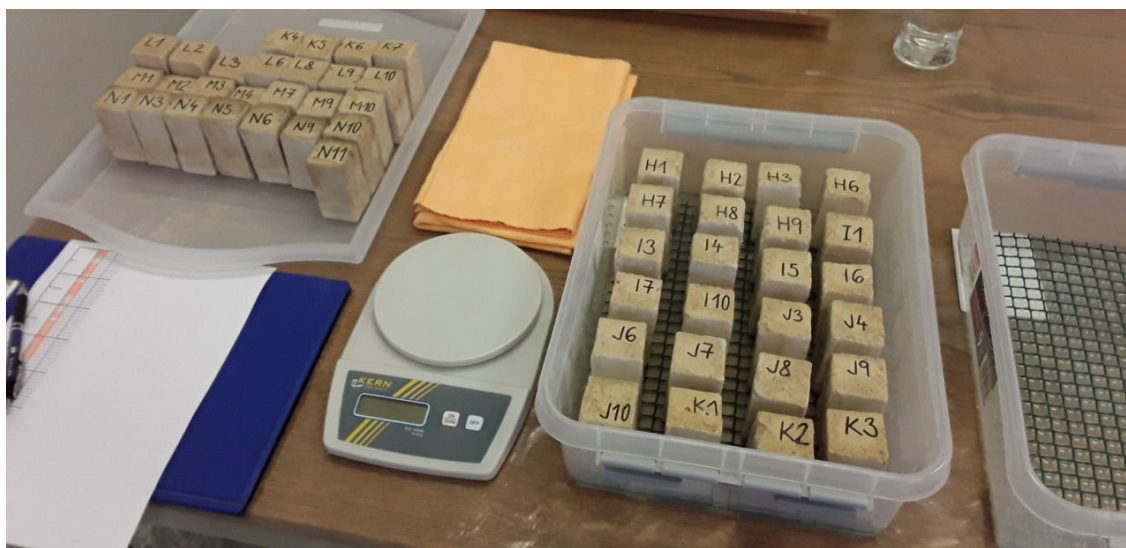
E.4.1.3 Pevnost v tlaku

Zkoušce bylo podrobena 10 zkušebních těles od každého vzorku (zkušební postup viz E.3.1.3).

E.4.1.4 Kapilární absorpce (vzlínavost)

Zkušební postup byl proveden dle ČSN EN 1015-18 (ÚNMZ, 2003) (Obr. 20) ponořením vzorků do vody a následným vážením po 10 a 90 minutách. Zkoušce bylo podrobena od každé směsi 7 zkušebních těles o rozměrech 80 x 40 x 40 mm. Při ponoření vzorků hliněných omítek do vody může docházet k odpadávání některých částí. Proto byl zkušební postup mírně modifikován dle doporučení laboratoře FEB (Minke, 2009) a na stranu zkušebního kvádrů určenou k ponoření byl připevněn filtrační papír, který byl po obvodu zajištěn těsnící hmotou (vosk), viz Obr. 21 a Obr. 22. Hmotnost vzorků byla měřena

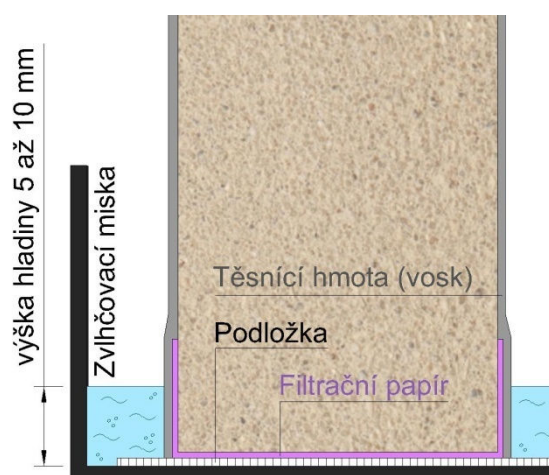
pomocí digitální laboratorní váhy s rozlišením 0,1 g. Výpočtem dle normy ČSN EN 1015-18 byl stanoven koeficient kapilární absorpce vody.



Obr. 20 – Měření kapilární absorpce vody: vkládání zkušebních trámečků do vody (archiv autora)



Obr. 21 – Upevnění filtračního papíru na spodní straně zkušebního trámečku pomocí vosku pro účely zkoušky kapilární absorpce vody (archiv autora)



Obr. 22 – Schéma (řez) modifikovaného zkušebního postupu dle doporučení laboratoře FEB (Minke, 2009) pro určení koeficientu kapilární absorpce vody

Jelikož u některých hliněných omítek došlo v průběhu zkoušky k nasycení vzorku (respektive vzlínající voda se dostala na horní povrch trámečku) a mohlo tak dojít ke zkreslení výsledků, byla použita ještě druhá metoda (Bamogo, 2020). Měření probíhalo na vzorcích o stejných parametrech a ve stejném množství, pouze s tím rozdílem, že hmotnost byla měřena po 1, 4, 9, 16, 36, 49 a 64 minutách. Za účelem stanovení absorpčního koeficientu, který se rovná směrnici sklonu přímky, byla hmotnost vody absorbované na jednotku povrchu

vystaveného vodě (v kg/m^2) vynesena proti druhé odmocnině času (v $\text{s}^{0,5}$) pro každou definovanou dobu.

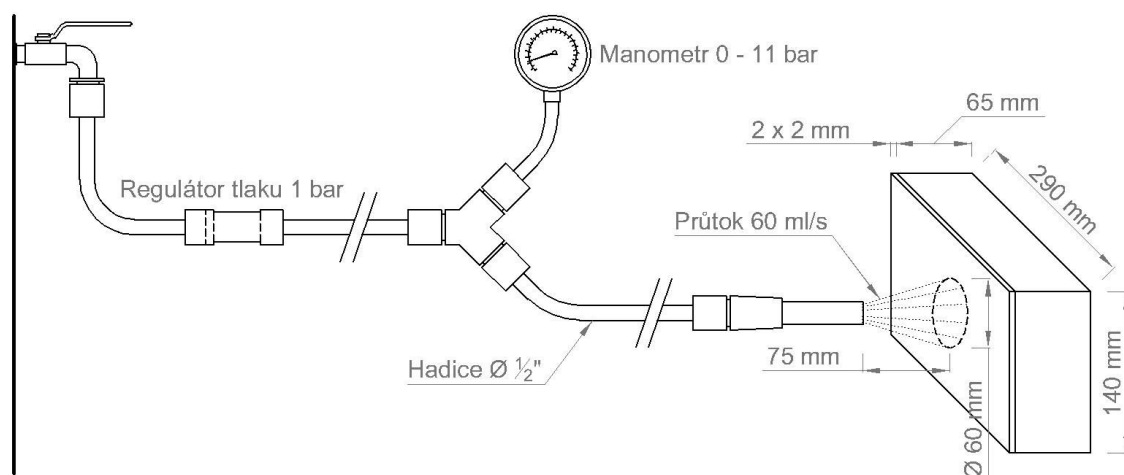
E.4.1.5 Odolnost proti dešťové erozi (zkouška postřikem)

Cílem zkoušky, která má za úkol simulovat hnaný déšť, bylo zaznamenat rozdíly mezi referenčními a hydrofobizovanými hliněnými omítkami a vyhodnotit tak zvýšení odolnosti omítek přidáním hydrofobizačních činidel. Proto bylo zapotřebí zvolit takovou metodu měření, která bude schopna kvantifikovat výsledky jak pro referenční směsi, u kterých se předpokládá velmi nízká odolnost, tak pro silně hydrofobizované směsi. Zároveň bylo třeba zvolit metodu, která nemá příliš dlouhého trvání, jelikož bylo třeba vyhodnotit velké množství vzorků. Žádná z metodik uvedených v Tab. 5 a Tab. 6 neodpovídá zcela těmto požadavkům, proto byl vyvinut způsob simulace a hodnocení, který se jimi pouze částečně inspiroval, s pracovním názvem „zkouška postřikem“.

Pro tuto zkoušku byla pro každý vzorek zhotovena 3 zkušební tělesa. Jejich příprava spočívala v nanesení dvou vrstev hliněné omítky o tloušťce přibližně 2 mm (stejná aplikace jako při provádění v praxi) na cihlu z nepálené hlíny o rozměrech 65 x 140 x 290 mm (Obr. 23). Následně byl povrch zafilcován a sprášen (byly odstraněny přebytečné částice). Měřicí aparatura se skládala ze systému hadic, spojek, rozdělovače a nastavitelné trysky pro vytvoření přiměřeného vodního proudu (Obr. 24). Jelikož byla sestava napojena na vodovodní řad s příliš velkým tlakem, byl do aparatury přidán regulátor tlaku s omezením na 1 bar a manometr pro kontrolu tlaku.



Obr. 23 – Výroba zkušebních vzorků pro měření odolnosti proti dešťové erozi zkouškou postřikem (archiv autora)



Obr. 24 - Schéma měřicí aparatury pro měření odolnosti proti dešťové erozi (zkouška postřikem)

Na stabilizované vzorky (min. 30 dní po zhotovení) byl proveden postřik horizontálním vodním paprskem kuželovitého tvaru ze vzdálenosti 75 mm pod tlakem 1 bar (Obr. 25). Kruhový průmět vodní trysky na zkušební vzorek měl průměr 60 mm, objemový průtok vody byl 60 ml/s. Zkušební vzorky byly vystaveny vodnímu paprsku minimálně do doby, než začalo docházet k jejich erozi (respektive narušení povrchu a počínajícímu odplavování částic), nejdéle však 30 minut. Jako hodnotící parametr byl zvolen počátek eroze. Po zaznamenání prvních známek eroze byly i nadále vzorky vystaveny zkoušce postřikem a byly v pravidelných časových intervalech kontrolovány a dokumentovány, aby bylo možné vyhodnotit rychlost a způsob následné degradace.



Obr. 25 – Měření odolnosti proti dešťové erozi – zkouška postřikem (archiv autora)

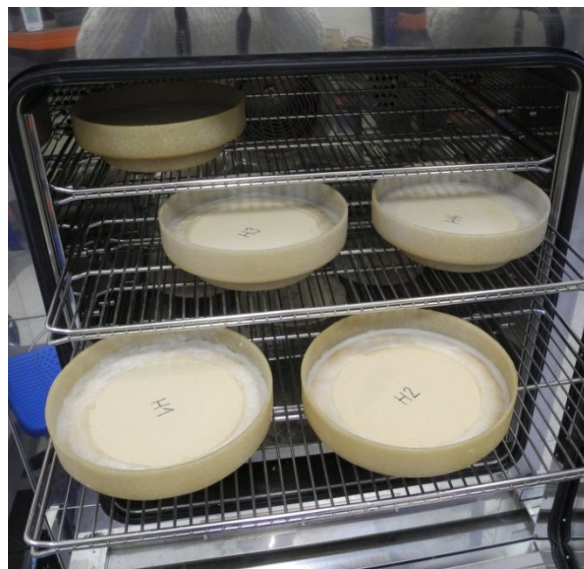
E.4.1.6 Difuze vodní páry

Výroba zkušebních vzorků, zkušební postup a výpočet faktoru difuzního odporu byl proveden dle ČSN EN ISO 12572 (ÚNMZ, 2018). Vzhledem k tomu, že se jednalo o měření vysoce propustného materiálu, byla při výpočtu započítána korekce na difuzní odpor vzduchové vrstvy mezi spodní plochou vzorku a vysoušedlem, která má v případě velmi tenkých vzorků na výsledky větší vliv (McGregor, 2017).

Pro každý vzorek bylo v kovových formách (Obr. 26) zhotoveno 5 zkušebních těles. Tloušťka zkušebních těles cca 6 mm byla zvolena tak, aby co nejvíce odpovídala reálné hodnotě při použití v konstrukci, a zároveň aby nedošlo při výrobě a manipulaci se vzorkem k jeho rozlomení. Z důvodu eliminace rizika rozlomení a snížení míry smrštění byla do zkušebních těles (včetně referenčních vzorků) při výrobě vtlačena sklotextilní síťovina s velikostí ok 5 x 5 mm. Stabilizované vzorky hliněných omítek byly umístěny do formy z epoxidové pryskyřice s výztužnými vlákny a utěsněny pomocí směsi 60 % mikrokrystalického vosku s 40 % rafinovaného krystalického parafínu. Jako vysoušedlo byl použit silikagel s indikátorem vlhkosti. Schéma zkušební sestavy je znázorněno na Obr. 28.

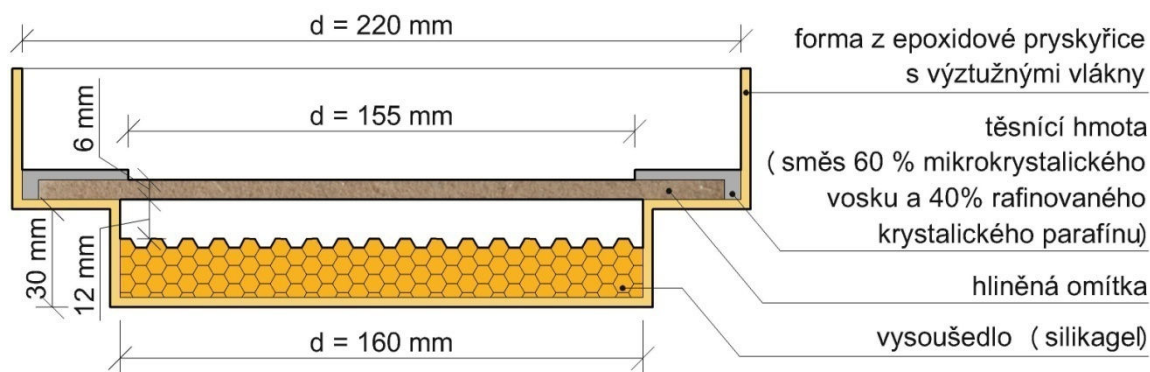
Měření bylo prováděno v klimatické testovací komoře Memmert CTC 256 (Obr. 27) metodou suché misky, jelikož při extrémních hodnotách relativní vlhkosti dochází v komoře k nepřesné distribuci vlhkosti a k rozptýlu kapek vody, což by v případě použití metody mokré misky mohlo mít za následek rozmočení vzorků

a ovlivnění výsledků měření. Okrajové podmínky měření jsou uvedeny v tabulce Tab. 12. Interval vážení vzorků, který byl určen na základě předchozího testovacího měření, byl stanoven na 30 minut. Hmotnost sestavy byla vážena pomocí digitální laboratorní váhy s přesností na setiny gramů.



Obr. 26 – Výroba zkušebních vzorků pro měření difuze vodní páry: nalévání čerstvé směsi do forem (archiv autora)

Obr. 27 – Měření difuze vodní páry: ukládání vzorků do klimatické komory (archiv autora)



Obr. 28 – Schéma zkušebního tělesa určeného pro měření difuze vodní páry

Tab. 12 – Okrajové podmínky pro měření difuze vodní páry v klimatické komoře

Teplota [°C]	Relativní vlhkost [%]	
	Suchý stav (silikagel)	Vlhký stav (klimatická komora)
23 (tolerance ± 1°C)	0 (tolerance +5 %)	50 (tolerance ± 5 %)

E.4.1.7 Hygroskopická sorpce

Zkušební postup a výpočet byl proveden dle ČSN EN ISO 12571 (ČAS, 2022) metodou klimatizační komory. Zkoušce bylo podrobena 6 zkušebních těles o rozměrech 40 x 40 x 40 mm od každého vzorku. Měření bylo prováděno v klimatické testovací komoře Memmert CTC 256 (Obr. 29) za okrajových podmínek uvedených v Tab. 13. Hmotnost sestavy byla určována pomocí digitální laboratorní váhy s přesností na setiny gramů.



Obr. 29 – Měření hygroskopické sorpce v klimatické komoře (archiv autora)

Tab. 13 – Okrajové podmínky pro měření hygroskopické sorpce v klimatické komoře

Teplota [°C]	Relativní vlhkost [%]											
	Sorpční křivka						Desorpční křivka					
23	30	40	55	70	85	90*	90*	80**	70	55	40	30

* Norma ČSN EN ISO 12571 udává maximální relativní vlhkost 95 %. Při této hodnotě docházelo v klimatické komoře ke kondenzaci vody, což při ulpění vody na vzorku způsobovalo zkreslení výsledků. Proto byla stanovena náhradní hodnota 90 %, při níž ke kondenzaci nedocházelo.

** Při desorpci byla původní hodnota 85 % změněna na 80 % z důvodu rovnoměrnějšího rozložení po sobě jdoucích hodnot následkem změny maximální relativní vlhkosti (viz předchozí bod*).

E.4.2 Zkoušení *in situ*

Pro účely zkoušení odolnosti hliněných omítek proti povětrnostním vlivům byly vyrobeny 4 dřevěné panely (Obr. 30), z nichž každý byl rozdělen na 4 samostatná pole o rozměrech 30 x 40 cm. Každý panel představoval vzorek jednoho druhu hliněné omítky a jednoho druhu hydrofobizačního činidla o různých koncentracích. Pro každý vzorek tedy bylo vyrobeno jedno samostatné pole.

Výroba vzorků spočívala v připevnění rákosové rohože na OSB desku pomocí kovových spon. Na rákos byla aplikována hrubá hliněná omítka tloušťky 5 cm, po jejímž vytvrzení byly na povrch nanесeny 2 vrstvy jemné hliněné omítky o celkové tloušťce 4 mm. Vzorky byly shora kryty malou stříškou s přesahem cca 5 mm. Instalace panelů proběhla až po vytvrzení finální hliněné omítky.

Zkušební panely byly osazeny na pozemek v městské části Brno – Kníničky (Obr. 31). Panely s hliněnými omítkami PICAS byly orientovány na jihovýchod, s omítkami CEMIX na jih. Odlišná orientace byla zvolena z důvodu prostorových omezení na pozemku. Pro sběr klimatických dat byla na místě instalována meteostanice WH 1080 se sestavou senzorů pro měření celkem 10 klimatických parametrů včetně teploty, relativní vlhkosti vzduchu a rychlosti větru (Obr. 73 a Obr. 74 v příloze M.2). Instalace panelů proběhla v září 2019, monitoring probíhal po dobu 3 let do srpna 2022. Kontrola zkušebních panelů a pořizování fotografické dokumentace bylo prováděno v nepravidelných intervalech v závislosti na aktuální klimatické situaci (např. po vydatných deštích). Kromě vizuálního hodnocení finálního povrchu s ohledem na barvu, drsnost a degradaci vzorků byla při posuzování věnována pozornost i chování finální vrstvy ve vztahu k hrubé omítce, kdy může vlivem odlišných vlastností vrstev docházet k odlupování (Brotánek, 2001).



Obr. 30 – Výroba panelů pro zkoušení odolnosti proti povětrnostním vlivům: výroba dřevěné konstrukce a aplikace rákosové rohože (archiv autora)



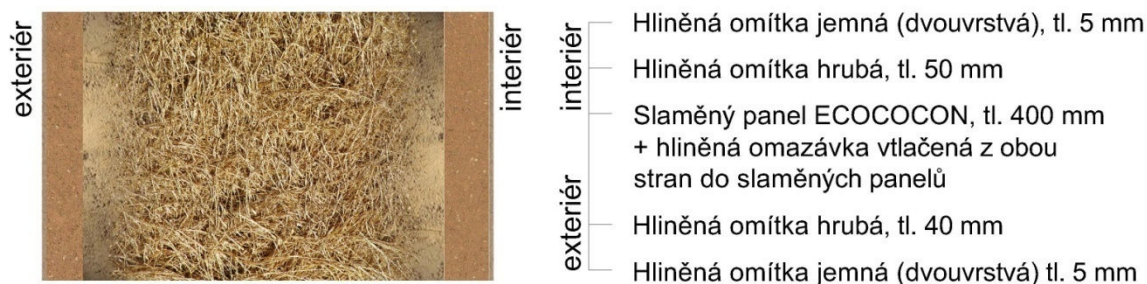
Obr. 31 – Osazení zkušebních panelů s hliněnými omítkami na pozemek v Brně – Kníničkách pro měření odolnosti proti povětrnostním vlivům (archiv autora)

E.5 Numerická simulace tepelně-vlhkostního chování vybrané konstrukce

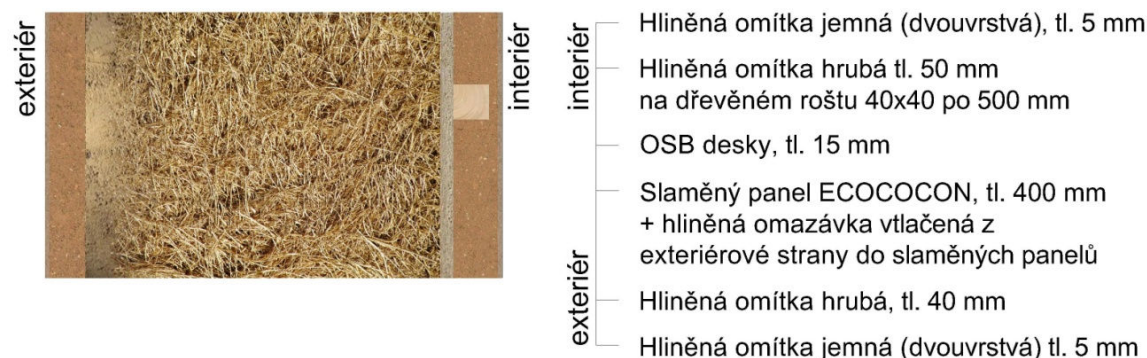
Při výběru skladby konstrukce pro účely simulace byly brány v potaz tyto aspekty: četnost použití materiálů v konstrukcích staveb na území České republiky a jejich náchylnost k degradaci.

E.5.1 Skladba konstrukce a použité materiály

Na základě rešerše realizovaných staveb s hliněnými omítkami byly pro účely simulace vybrány 2 typické skladby. Skladba S1 (Obr. 32) je jednou z nejčastěji používaných, jedná se o slaměnou stěnu oboustranně omítnutou hliněnými omítkami. Ve skladbě S2 (Obr. 33) je navíc na vnitřní straně slaměného balíku/panelu celoplošný záklop z OSB desek, používaný z důvodu zajištění vzduchotěsného obálky budovy a rovného povrchu.



Obr. 32 –Skladba S1



Obr. 33 – Skladba S2

V případě použití slámy jako výplňového tepelně izolačního materiálu v obvodové stěně je třeba věnovat pozornost riziku růstu mikroorganismů a hnití slámy způsobené případnou vysokou relativní vlhkostí uvnitř konstrukce. Kritickými faktory pro posouzení trvanlivosti slámy jsou teplota a vlhkost a jejich trvání v čase. Dle literatury (Márton, 2014) trvá po nasycení vodou nejméně 4-10 dní, než se organismy dostatečně rozmnoží. Růst hub (Obr. 34) může začít, pokud je udržena relativní vlhkost nad 80 %, a to po mnoho měsíců. Ke klíčení plísní dochází již při nižší vlhkosti, ale aktivní růst je až při stabilní vlhkosti 80 % a více. Rozklad slámy samotný (Obr. 35) pak potřebuje až 90 % podíl relativní vlhkosti, zároveň s teplotou nad 15°C.

Pro účely výpočtu vlhkostní bilance nebylo ve skladbě uvažováno použití slaměných balíků, jak je v praxi běžné, neboť technické parametry balíků jsou v závislosti na způsobu výroby velmi proměnlivé a lze tak obtížně stanovit vstupní údaje pro výpočet. Z toho důvodu je ve skladbě uvažován certifikovaný výrobek slaměného panelu Ecococon tl. 400 mm, jehož základní technické parametry udávané výrobcem (objemová hmotnost, pórovitost, měrná tepelná kapacita, součinitel tepelné vodivosti, faktor difuzního odporu) byly ručně zadány do simulačního programu. Doplňující parametry nutné pro výpočet

(funkce rovnovážné vlhkosti, závislost tepelné vodivosti na vlhkosti či teplotě apod.) byly převzaty z výzkumného projektu, který byl proveden v Kasselu (Danielewicz, 2008).



Obr. 34 – Slámohlinitý kompozit, který byl naočkován suspenzí spor hub a následně vystaven zátěžovým podmínkám v inkubační komoře (teplota 25°C, relativní vlhkost 95 %, 100 dní) (Danielewicz, 2008).



Obr. 35 – Vzorek pšeničné slámy vystavený vlhkosti 98 % po dobu, než došlo k jeho nasycení – objemové zvětšení, počínající hniloba a vytvoření plísně na povrchu (Lawrence, 2009)

Tloušťka venkovní hliněné omítky byla zvolena na základě doporučení ohledně ochrany proti splavování (Picas, 2023). Minimální tloušťka 40 mm je zásadní z hlediska odolnosti venkovní omítky při dešti, jelikož dokud je omítka schopná sát vodu, dochází k jejímu postupnému měknutí a teprve po nasycení začíná být splavována. Do simulačního programu byly zadávány parametry hliněných omítek získané laboratorním měřením (faktor difuzního odporu, objemová hmotnost, hygroskopická sorpce) a vlastnosti udávané výrobcem (pórovitost, součinitel tepelné vodivosti, měrná tepelná kapacita). Ostatní parametry byly převzaty z databáze simulačního programu.

E.5.2 Nástroj pro numerickou simulaci

Pro potřeby disertační práce byl z dostupných simulačních nástrojů tepelně-vlhkostního chování konstrukce vybrán program WUFI. Tento program byl zvolen z toho důvodu, že pro určení přesnějšího rozložení vlhkosti ve slaměném panelu je nutné zohlednit více vlivů než pouze ty, které jsme

schopni použít v klasickém stacionárním výpočetním postupu. Program WUFI Pro 5.3 je software pro dynamické modelování jednorozměrného šíření tepla, vlhkosti a energie ve stavebních konstrukcích a materiálech. WUFI využívá diferenciálních rovnic (Künzel, 1995), které umožňují oproti stacionárním výpočetním postupům zahrnout do výpočtu celou řadu dalších jevů: orientaci stavební konstrukce vůči světovým stranám, akumulaci vlhkosti v konstrukci, závislost faktoru difúzního odporu na množství vlhkosti v materiálu, absorpci hnaného deště na vnější povrch stavební konstrukce a další (WUFI, 2022).

Ve výpočtech jsou použita hodinová data referenčního klimatického roku pro Hradec Králové, který je vytvořen na základě dat Českého hydrometeorologického ústavu dle ČSN EN ISO 15927-4 (ÚNMZ, 2011). Jedná se o jediný soubor klimatických dat pro Českou republiku, který je v předmětném softwaru dostupný. Databáze vnitřních okrajových podmínek obsahuje parametry vnitřního vzduchu podle ČSN EN 15026 (ÚNMZ, 2007) a ČSN EN ISO 13788 (ÚNMZ, 2002). Simulace byla provedena pro období od 1.10.2019 do 31.12.2022.

F. VÝSLEDKY A DISKUZE

F.1 Prefabrikované hliněné směsi

Výsledky měření laboratorních zkoušek (objemová hmotnost, pevnost v tahu za ohybu, pevnost v tlaku) hrubých a jemných hliněných omítek od 7 různých výrobců a jejich srovnání s údaji uvedenými výrobcem jsou znázorněny v tabulce přílohy M.2. Na základě výsledků byly k následnému testování vybrány tyto prefabrikované hliněné směsi:

- Picas: hliněná omítka Econom jemná světlá (zrnitost 1 mm);
- Cemix: hliněná omítka jemná 433 (zrnitost 0,7 mm).

V obou případech se jedná o výrobky, jejichž těžba i výroba probíhá v České republice a výrobce u nich uvádí potřebné parametry (objemová hmotnost, faktor difuzního odporu).

F.2 Vlastnosti hliněných omítek s obsahem čínidla

Vzhledem k tomu, že se testovalo mnoho vzorků a byly podrobeny několika zkouškám, je jejich souhrn zpracován v přehledové tabulce v příloze M.3.

F.2.1 Vliv přidání hydrofobizačního prostředku na konzistenci a zpracovatelnost hliněné směsi

Během přípravy vzorků došlo u čerstvých hliněných směsí přidáním hydrofobizačního prostředku ke změně konzistence, proto bylo nutné upravit množství záměsové vody a postup zpracování. U některých směsí bylo velmi obtížné dosáhnout optimální konzistence, jelikož se měnila v průběhu času a bylo nutné přidávat záměsovou vodu postupně, například po odležení. Taktéž bylo zaznamenáno rozdílné chování pro různé výrobky hliněných směsí:

- ricinový olej (PICAS i CEMIX): směs se stala více „kluzkou“, bylo nutné snížit množství záměsové vody a udělat čerstvou směs hustší, poté přidat ricinový olej a případně dle potřeby přidat vodu;
- PICAS + kasein: vzhledem k tomu, že kasein byl přidávan a promíchán se směsí v sypkém stavu, bylo množství záměsové vody upravováno

individuálně a postupně dle potřeby. Při koncentraci kaseinu 4 % a 8 % došlo po odležení (5 minut) k výraznému zhoustnutí směsi a bylo nutné přidat další záměsovou vodu;

- CEMIX + kasein: po promíchání kaseinu se sypkou hliněnou směsí bylo množství záměsivé vody upravováno individuálně a postupně dle potřeby. Při koncentraci kaseinu 4 % a 8 % směs po delším odležení (cca 30 minut) velmi zřídla a stala se velmi obtížnou pro nanášení na povrch.

F.2.2 Testování v laboratoři

S ohledem na změnu konzistence směsí po přidání hydrofobizačního činidla (viz kapitola F.2.1) byla u vzorků určených k laboratornímu měření stanovována i objemová hmotnost v suchém stavu. Pokud došlo u některých vzorků k výrazné odchylce v objemové hmotnosti, bylo vyhodnocováno, zdali nemůže mít tento jev vliv na ostatní parametry měřené v laboratorních podmínkách.

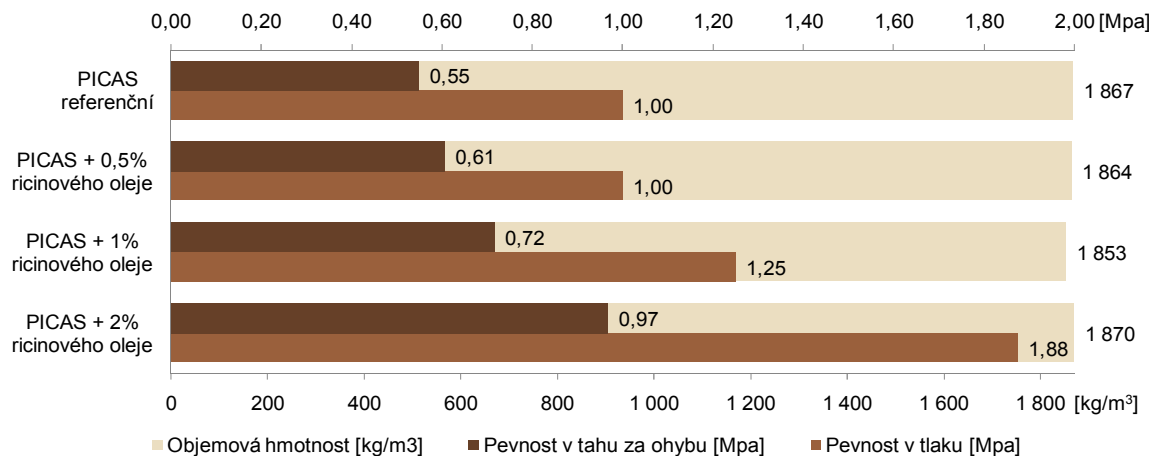
F.2.2.1 Pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku

Výsledky měření znázorněné v grafech na Obr. 36 a Obr. 37 ukázaly, že přidání ricinového oleje do hliněné omítky má nezanedbatelný vliv na zvýšení pevnosti v tlaku i pevnosti v tahu za ohybu. Tento trend byl až na jednu výjimku (při koncentraci 2 % u směsi CEMIX) zaznamenán u obou zkoušených omítkových směsí PICAS i CEMIX, nicméně byly zaznamenány určité rozdíly v chování.

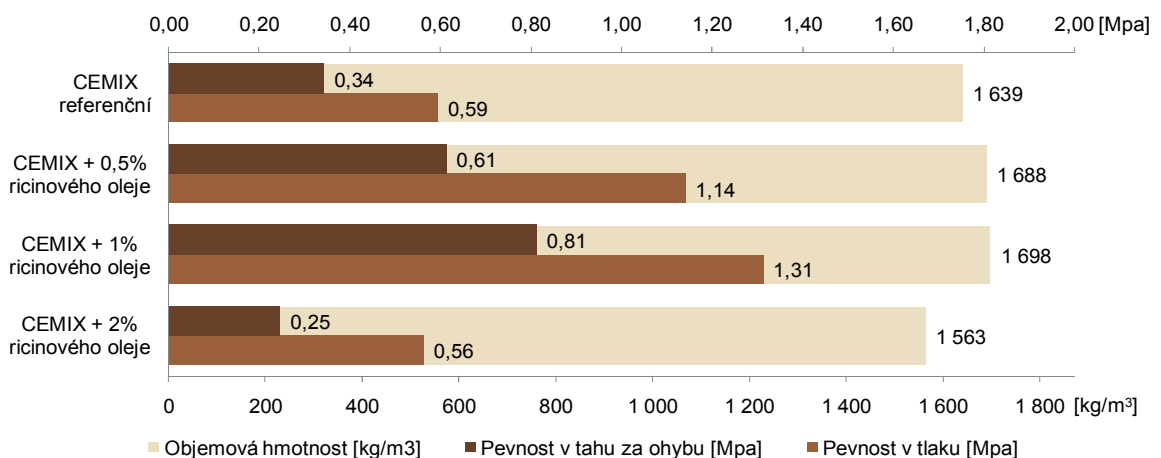
V případě hliněné omítky PICAS (Obr. 36) došlo po přidání 0,5 % ricinového oleje k 11% navýšení pevnosti v tahu za ohybu, zatímco pevnost v tlaku zůstala stejná jako u referenčních vzorků. Při koncentraci 1 % oleje se pevnost v tahu za ohybu navýšila o 31 % a pevnost v tlaku o 25 % oproti referenční směsi. Po přidání 2 % oleje došlo k velmi výraznému navýšení obou pevnostních charakteristik oproti referenčním vzorkům (o 76 % v případě pevnosti v tahu za ohybu, o 88 % u pevnosti v tlaku).

U hliněných omítek CEMIX (Obr. 37) došlo přidáním 0,5 % ricinového oleje k 79% navýšení pevnosti v tahu za ohybu a 93% navýšení pevnosti v tlaku

oproti referenční směsi. Při koncentraci 1 % se pevnost v tahu za ohybu zvýšila o 138 % a pevnost v tlaku o 122 % oproti referenčním vzorkům. Po přidání 2 % oleje došlo ke snížení obou pevnostních charakteristik oproti referenční směsi (o 26 % v případě pevnosti v tahu za ohybu a o 5 % u pevnosti v tlaku), nicméně tento jev lze přičíst faktu, že vzorky hliněných omítek s touto koncentrací měly výrazně nižší objemovou hmotnost než ostatní. Nižší objemová hmotnost zmiňovaných vzorků byla pravděpodobně zapříčiněna tím, že při výrobě se čerstvá směs po přidání ricinového oleje stala hůře zpracovatelnou a následně byla přidána další voda, která po vyschnutí způsobila větší pórovitost vzorků. Je pravděpodobné, že v případě nalezení optimálnějšího poměru přidané vody ve směsi CEMIX se 2 % ricinového oleje by bylo taktéž dosaženo zvýšení obou pevnostních charakteristik.



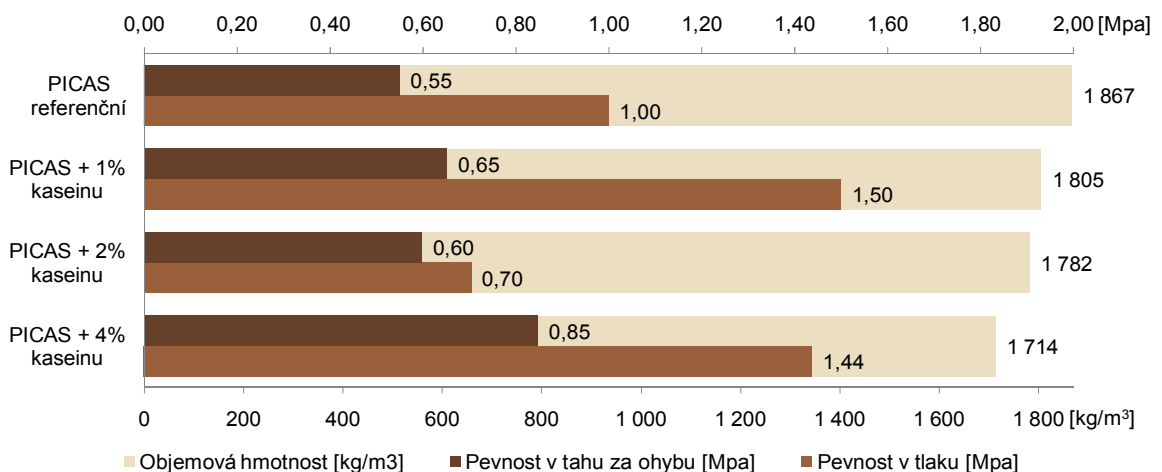
Obr. 36 – Graf závislosti pevnosti v tlaku a tahu za ohybu na koncentraci ricinového oleje přidávaného do omítkové směsi PICAS (medián, n = 10)



Obr. 37 – Graf závislosti pevnosti v tlaku a tahu za ohybu na koncentraci ricinového oleje přidávaného do omítkové směsi CEMIX (medián, n = 10)

Výsledky patrné z grafů na Obr. 38 a Obr. 39 ukazují, že taktéž přidání kaseinu do hliněné omítky má nezanedbatelný vliv na zlepšení pevnosti v tahu za ohybu i pevnosti v tlaku. Tento trend byl až na jednu výjimku (u pevnosti v tlaku při koncentraci 2 % u směsi PICAS) zaznamenán u obou zkoušených směsí PICAS i CEMIX.

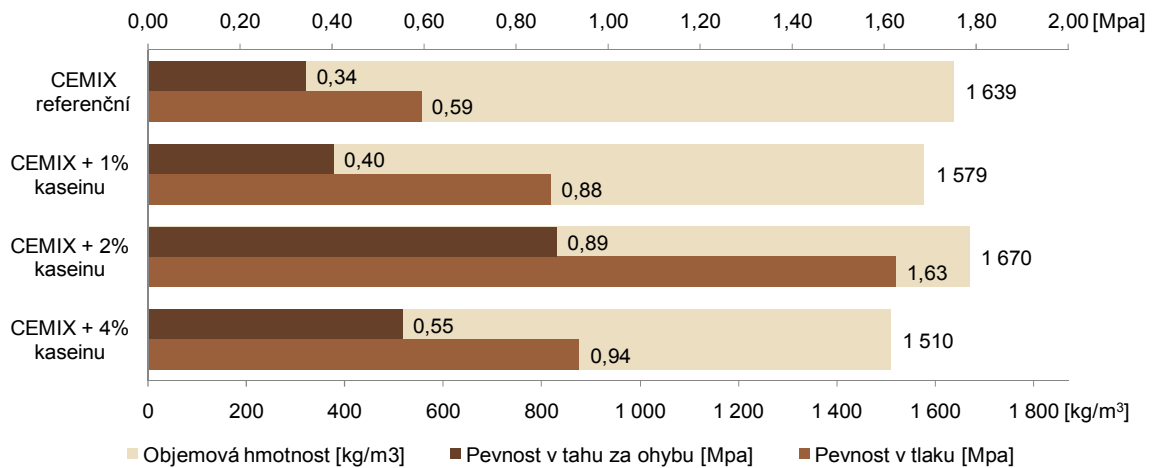
V případě hliněných omítek PICAS (Obr. 38) došlo po přidání 1 % kaseinu k 18% navýšení pevnosti v tahu za ohybu a k 50% navýšení pevnosti v tlaku oproti referenčním vzorkům. Při koncentraci 2 % kaseinu se pevnost v tahu za ohybu navýšila o 9 % a pevnost v tlaku snížila o 30 % oproti referenční směsi. Po přidání 4 % kaseinu došlo ke zvýšení pevnosti v tahu za ohybu o 62 % a pevnosti v tlaku o 44 % oproti referenční směsi. Trend zlepšujících se pevnostních charakteristik se zvyšující se koncentrací kaseinu ve směsi lze pozorovat i přesto, že vzorky s větší koncentrací kaseinu mají nižší objemovou hmotnost (Obr. 38).



Obr. 38 – Graf závislosti pevnosti v tlaku a tahu za ohybu na koncentraci kaseinu přidaného do omítkové směsi PICAS (medián, n = 10)

U hliněných omítek CEMIX (Obr. 39) došlo přidáním 1 % kaseinu k navýšení pevnosti v tahu za ohybu o 18 % a pevnosti v tlaku o 49 % oproti referenčním vzorkům. Při koncentraci 2 % kaseinu ve směsi se pevnosti zvýšily velmi výrazně (pevnost v tahu za ohybu o 161 % a pevnost v tlaku o 176 %) oproti referenční směsi. Příčinou může být kromě zvýšení koncentrace kaseinu ve směsi také vysoká objemová hmotnost zkoušených vzorků, a tudíž nalezení optimálnějšího poměru vody ve směsi oproti ostatním vzorkům. Po přidání 4 % kaseinu do směsi se zvýšila pevnost v tahu za ohybu o 62 % a pevnost v tlaku

o 59 % oproti referenčním vzorkům. I u směsi CEMIX lze pozorovat trend zlepšujících se pevnostních charakteristik se zvyšující se koncentrací kaseinu ve směsi i přesto, že některé ze vzorků (s 1 % a se 4 % kaseinu) mají nižší objemovou hmotnost (Obr. 39).



Obr. 39 – Graf závislosti pevnosti v tlaku a tahu za ohybu na koncentraci kaseinu přidaného do omítkové směsi CEMIX (medán, n = 10)

Obecně lze vyvodit závěr, že v případě nízkých koncentrací ricinového oleje (do 2 %) se pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu zlepšuje se zvyšující se koncentrací oleje ve směsi za předpokladu zachování obdobné objemové hmotnosti v suchém stavu. V případě nízkých koncentrací kaseinu (do 4 %) v hliněné omítce je pevnost v tlaku a tahu za ohybu oproti referenční směsi vyšší. Nedochozí tak k jevu, který je možné pozorovat u některých výzkumů (Pachamama, 2020), kdy se při překročení určité hranice koncentrace přísady začínají pevnostní charakteristiky oproti referenční směsi zhoršovat. Je však nutné dbát na dosažení optimální konzistence směsi, jelikož v případě výrazně nižší objemové hmotnosti hydrofobizované směsi může dojít i ke snížení pevnostních charakteristik oproti referenční hliněné omítce.

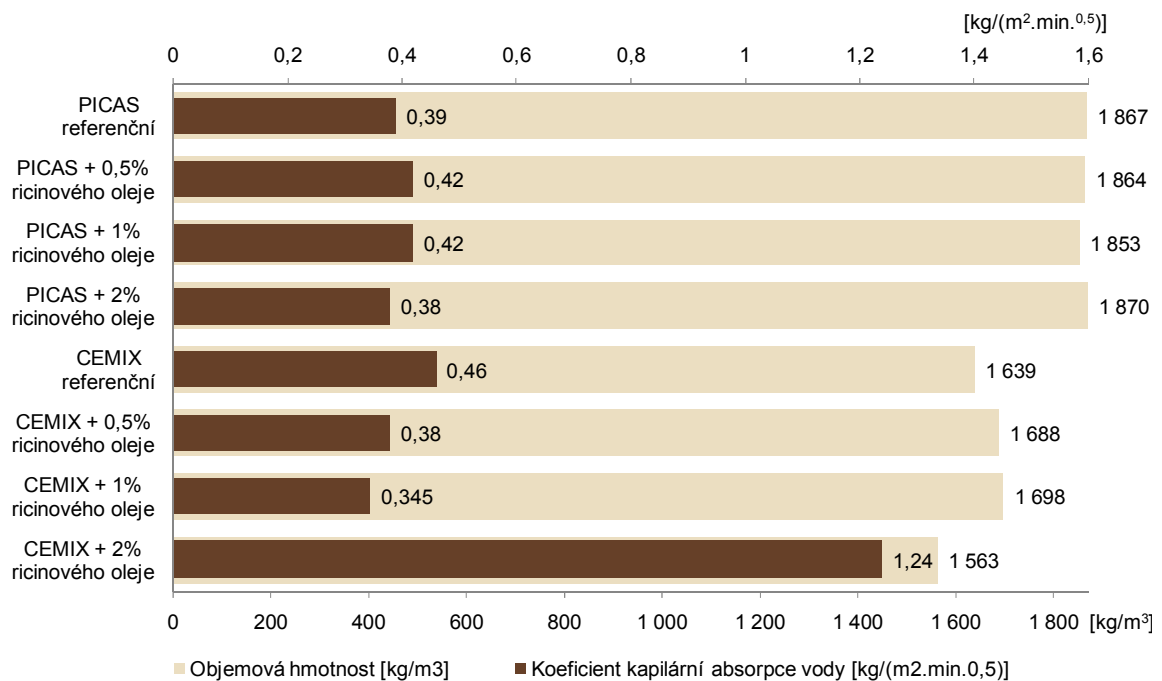
F.2.2.2 Kapilární absorpce (vzlínavost)

Výsledky měření kapilární absorpce vody všech zkoušených omítek jsou znázorněny ve dvojím provedení:

- v grafech na Obr. 40, Obr. 41 a Obr. 75 (viz příloha M.4) byl postup měření a výpočet koeficientu absorpce vody stanoven dle ČSN EN 1015-18;

- v grafech na Obr. 42, Obr. 43, Obr. 76 a Obr. 77 (viz příloha M.4) byl postup měření a výpočet proveden dle (Bamogo, 2020) - viz popis v kapitole E.4.1.4.

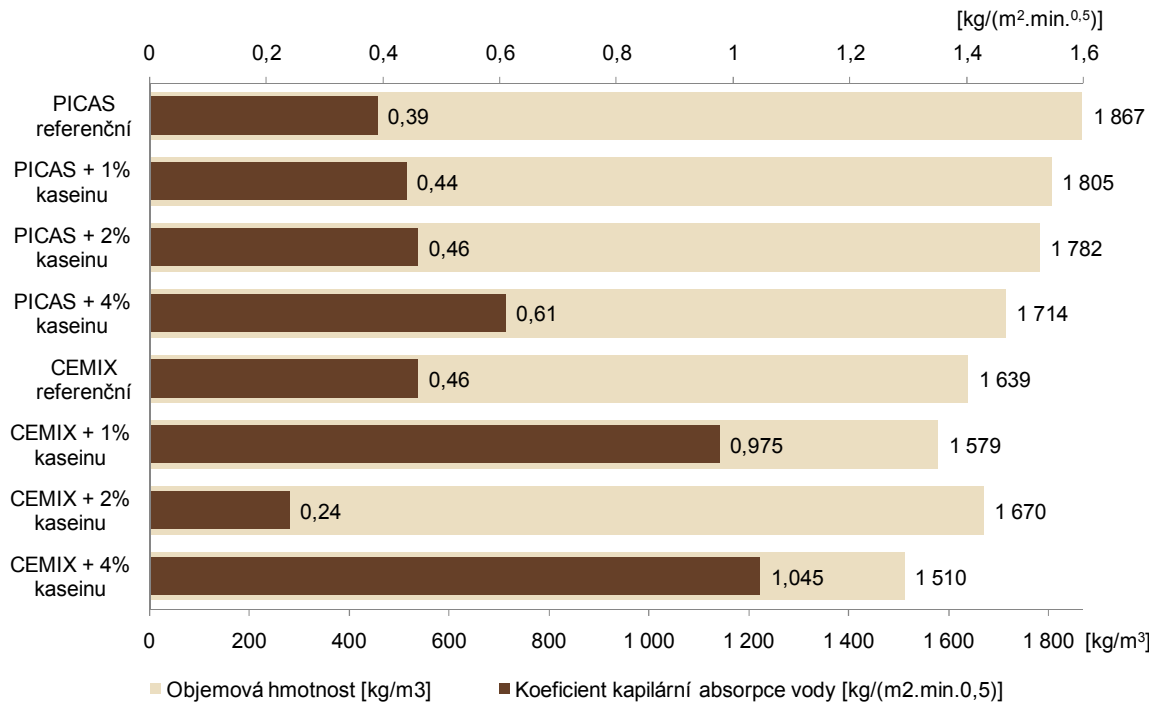
Z grafu na Obr. 40 je patrné, že přidáním ricinového oleje do hliněné směsi nedošlo až na jednu výjimku (CEMIX se 2 % ricinového oleje) k výrazné změně koeficientu kapilární absorpce vody. Tento jev je možné pozorovat u obou hliněných směsí, PICAS i CEMIX, u kterých se hodnoty pohybovaly v rozmezí 0,35 až 0,42 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$. Výjimkou byla směs omítky CEMIX se 2 % ricinového oleje, u které se hodnota koeficientu kapilární absorpce vody zvýšila na téměř trojnásobek oproti referenční směsi. Vysoká hodnota koeficientu kapilární absorpce této směsi je způsobena nízkou objemovou hmotností a vysokou pórovitostí vzorků, obdobně jako tomu je v případě pevnostních charakteristik (viz popis v kapitole F.2.2.1).



Obr. 40 – Graf závislosti koeficientu kapilární absorpce vody (dle ČSN EN 1015-18) na koncentraci ricinového oleje přidaného do omítkové směsi PICAS a CEMIX (medián, $n = 7$)

V případě přidání kaseinu do hliněné směsi je možné pozorovat větší rozptyl hodnot koeficientu kapilární absorpce vody (Obr. 41) než v případě ricinového oleje. U hliněné omítky PICAS se hodnoty pohybují v rozmezí 0,39 až 0,61 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$ a se zvyšující se koncentrací kaseinu se koeficient kapilární absorpce vody zvyšuje. V případě hliněné omítky CEMIX se hodnoty koeficientu

kapilární absorpce vody pohybují v rozmezí 0,24 až 1,05 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$, ale není zde možné pozorovat vztah mezi koncentrací kaseinu a koeficientem kapilární absorpce vody. Ten je více ovlivněn objemovou hmotností, kdy vzorky s nejnižší objemovou hmotností (1 % a 4 % kaseinu) mají větší pórovitost a voda v nich vzlíná rychleji.

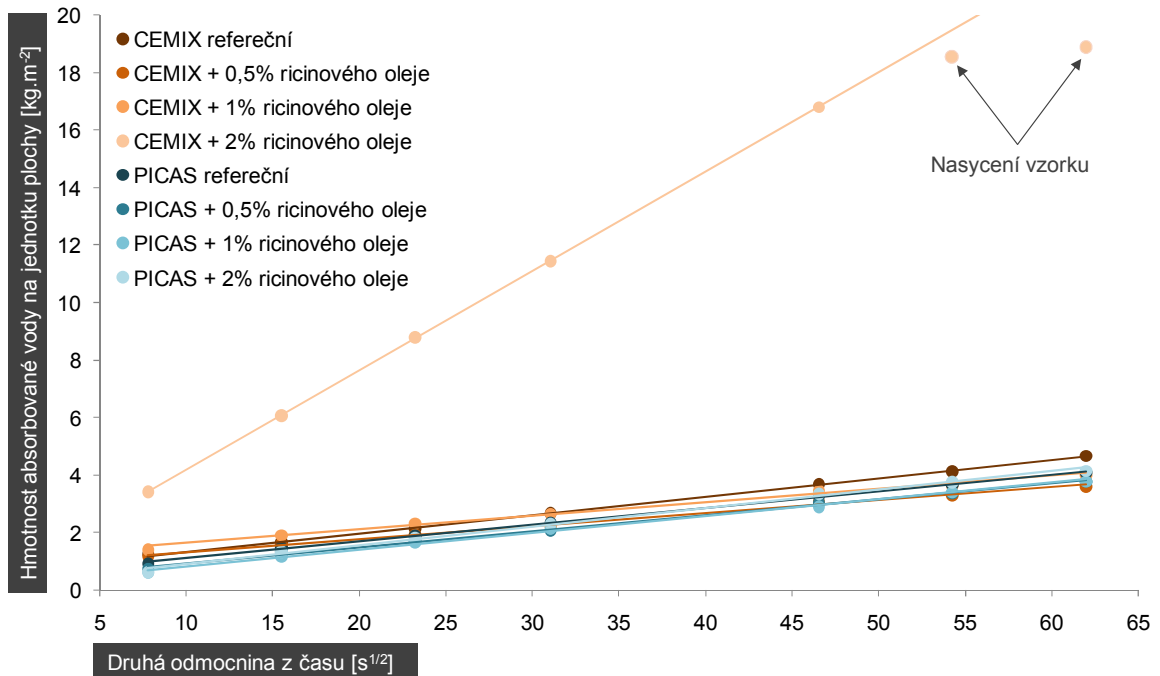


Obr. 41 – Graf závislosti koeficientu kapilární absorpce vody (dle ČSN EN 1015-18) na koncentraci kaseinu přidaného do omítkové směsi PICAS a CEMIX (medián, n = 7)

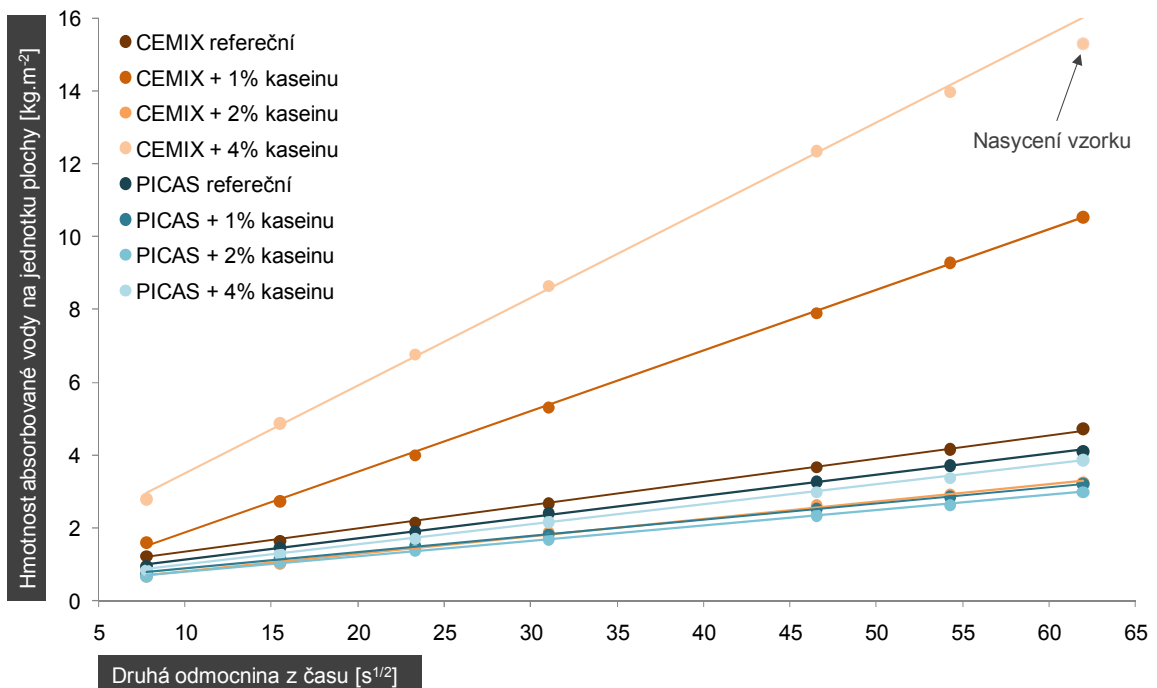
Z obou grafů na Obr. 40 a Obr. 41 nelze vyvodit obecný závěr pro vztah mezi koeficientem kapilární absorpce vody a koncentrací hydrofobizačního prostředku ve směsi. V grafech však lze pozorovat určitý vztah mezi koeficientem kapilární absorpce vody a objemovou hmotností. Tento vztah je lépe prezentován v grafu na Obr. 75 v příloze M.4. Z grafu je zřejmé, že v případě výrazného snížení objemové hmotnosti směsi v suchém stavu pod určitou hraniční hodnotu dochází k výraznému zvýšení koeficientu kapilární absorpce vody (viz červené elipsy).

Tento obecný závěr lze také dobře interpretovat z grafů na Obr. 42 a Obr. 43, ze kterých je zřejmé, že lineární regresní přímky, jejichž směrnice se rovnají absorpčním koeficientům, mají pro většinu směsí podobný průběh. Výjimku tvoří pouze 3 směsi CEMIX, které svým průběhem vybočují z průměru: se 2 % ricinového oleje, s 1 % kaseinu a se 4 % kaseinu (vzorky s nejnižší objemovou

hmotností). Detaily grafů, ve kterých jsou lépe vidět jednotlivé rozdíly v průběhu křivek, jsou znázorněny na Obr. 76 a Obr. 77 v příloze M.4. Současně jsou v těchto grafech k jednotlivým lineárně regresním přímkám vypsány rovnice regrese pro stanovení absorpčního koeficientu a hodnoty spolehlivosti.



Obr. 42 – Hmotnost vody absorbované na jednotku plochy v závislosti na čase pro vzorky PICAS a CEMIX s ricinovým olejem (medián, $n = 7$)



Obr. 43 – Hmotnost vody absorbované na jednotku plochy v závislosti na čase pro vzorky PICAS a CEMIX s kaseinem (medián, $n = 7$)

V grafech na Obr. 42 a Obr. 43 je možné pozorovat, jakým způsobem došlo u vzorků CEMIX se 2 % ricinového oleje, resp. se 4 % kaseinu k jejich nasycení v průběhu zkoušky, a to už po 49, resp. 64 minutách. Tímto byla potvrzena vhodnost použití druhé metody měření (Bamogo, 2020), u níž nemůže dojít vlivem částečného nasycení vzorků v průběhu zkoušky ke zkreslení výsledků a chybného stanovení koeficientu kapilární absorpce vody. Lze tedy předpokládat, že koeficienty kapilární absorpce vody, stanovené dle ČSN EN 1015-18, by měly mít ve skutečnosti u vzorků hliněných omítek CEMIX se 2 % ricinového oleje, resp. se 4 % kaseinu, ještě vyšší hodnotu. Je to z toho důvodu, že byly tyto vzorky po dobu posledních 41 minut, resp. 26 minut, ve stavu částečného nasycení a pojmání vody probíhalo pomalejším tempem.

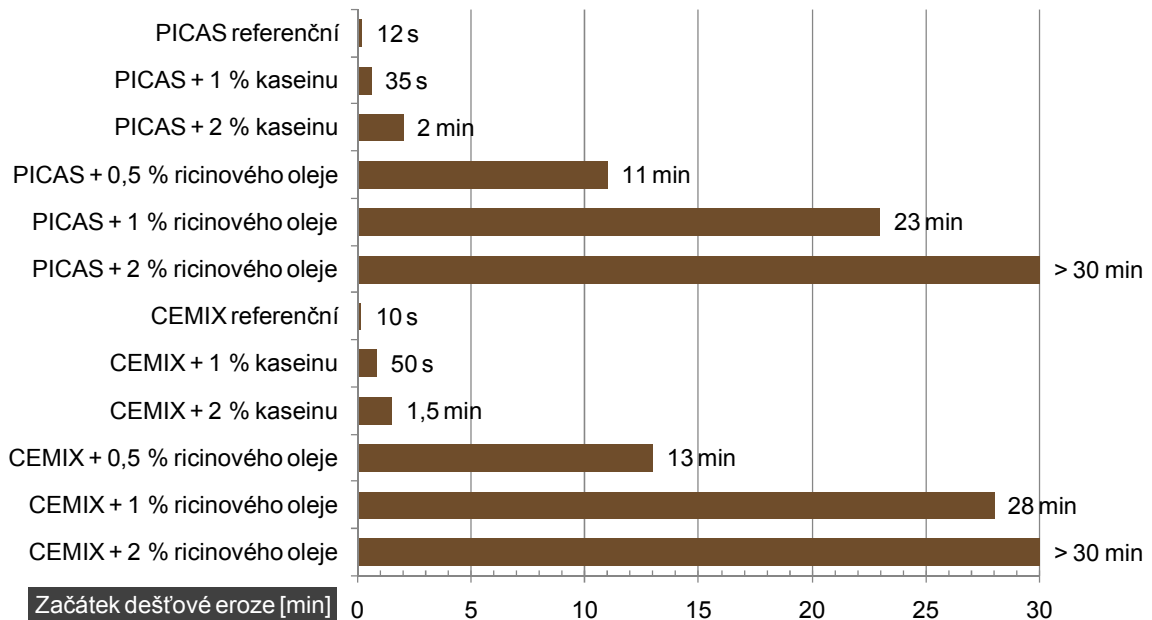
Obecně lze z výše uvedeného vyvodit závěr, že přidáním hydrofobizačního činidla do hliněné omítky se významně nezvýší koeficient kapilární absorpce vody za předpokladu zachování obdobné objemové hmotnosti v suchém stavu. Z pohledu kapilární absorpce je třeba optimalizovat množství záměsové vody v hydrofobizované omítce tak, aby nedošlo k podstatnému snížení objemové hmotnosti (zvýšení pórovitosti) a následnému výraznému zvýšení koeficientu kapilární absorpce vody.

F.2.2.3 Odolnost proti dešťové erozi

Při vyhodnocování odolnosti hliněných omítek vystavených zkoušce postřikem vodní tryskou je třeba brát v potaz skutečnost, že se jedná o měření, jehož výsledky mohou být ovlivněny mnoha faktory. Vstupní parametry, jako jsou například kvalita a délka úpravy finálního povrchu (filcování a sprašování), míra navlhčení podkladní vrstvy apod., nelze zajistit vždy ve zcela totožné míře. Jelikož se však jedná o zkoušku, která má za úkol vyhodnotit významný (nikoliv bezvýznamný) pozitivní vliv hydrofobizačního činidla na odolnost proti dešti, lze tyto ovlivňující faktory považovat za zanedbatelné.

Výsledky měření znázorněné na Obr. 44 ukázaly, že přidání ricinového oleje do hliněné omítky má značný vliv na zvýšení odolnosti proti dešťové erozi, dokonce i při velmi nízkých koncentracích. Zatímco počátek eroze u referenční směsi nastal již po 12 (PICAS), resp. 10 sekundách (CEMIX), v případě přidání 0,5 % oleje do směsi došlo k prodloužení intervalu na 11 (PICAS), resp. 13

(CEMIX) minut. U směsí s 1 % ricinového oleje nastala eroze po 23 (PICAS), resp. 28 (CEMIX) minutách. V případě omítek se 2 % ricinového oleje nebyly u žádné ze směsí (PICAS i CEMIX) po celou dobu měření (30 minut) zaznamenány viditelné známky odplavování částic.



Obr. 44 – Čas do počátku dešťové eroze hliněných omítek PICAS a CEMIX obohacených 0 – 2% ricinového oleje nebo kaseinu po vystavení zkoušce postříkem (průměr, n = 3)

Hliněné omítky, do kterých byl přidán práškový kasein, taktéž vykazují prodloužení intervalu počátku dešťové eroze oproti referenční směsi, ale v mnohem menší míře. U směsí s 1 % kaseinu nastal počátek eroze po 35 (PICAS), resp. 50 (CEMIX) sekundách. V případě omítek se 2 % kaseinu začalo odplavování částic po 2 minutách u omítky PICAS a po 1,5 min. u omítky CEMIX.

Pro komplexnější posouzení odolnosti proti dešťové erozi slouží obrazová časová dokumentace pořizená během zkoušky postříkem po dosažení počátku eroze, díky které lze dokreslit celkové chování omítek vůči hnané vodě. Vzhledem k tomu, že pro každou směs byly zkoušeny 3 vzorky a publikovány jsou vždy jen fotografie 1 vzorku, tak se jedná o velmi hrubě orientační časové zařazení. Celkové chování však bylo u všech vzorků jedné směsi obdobné.

Z fotografií na Obr. 45 je patrné, že u referenčních hliněných omítek PICAS dochází po 30 sekundách k celkovému rozbřednutí místa dopadu vodního

paprsku a širšího okolí, kde dochází k plavení vody. Po 2 minutách je možné v oblasti zasažené vodou pozorovat velkou míru odplavení materiálu a v dolní části odpadnutí celé vrstvy jemné hliněné omítky. V případě referenčních hliněných omítek CEMIX (Obr. 46) je míra rozbřednutí menší a je patrná spíše v místě dopadu paprsku vody, nikoliv v oblasti plavení vody. Po 2,5 minutách však taktéž dochází k částečnému odpadnutí celé vrstvy jemné hliněné omítky. Lze tedy konstatovat, že u obou referenčních směsí je po počátku eroze (v řádech sekund) patrná rychlá celková degradace materiálu, která nastává v řádech pár minut.



Obr. 45 – Vzorčky hliněné omítky PICAS referenční po vystavení zkoušce postřikem (archiv autora)



Obr. 46 – Vzorčky hliněné omítky CEMIX referenční po vystavení zkoušce postřikem (archiv autora)

V případě hliněných omítek s 0,5 % ricinového oleje nedošlo u žádné směsi (PICAS i CEMIX) po celou dobu zkoušky k rozbřednutí povrchu. U hliněné omítky PICAS (Obr. 47) i CEMIX (Obr. 48) jsou sice po 15 minutách zřetelně vidět mírné známky odplavení materiálu v místě dopadu paprsku vody, nicméně u obou směsí je celý povrch velmi soudržný a pevný. Hliněné omítky PICAS s 0,5 % ricinového oleje byly pro názornost chování podrobeny zkoušce postřikem po dobu 45 minut, avšak ani po jejím uplynutí povrch nebyl rozbředlý a míra eroze byla minimální (Obr. 47). Obecně lze tedy vyvodit závěr, že

u směsí s 0,5 % oleje dochází k postupnému odplavování, u kterého jsou rozdíly patrné v řádech desítek minut, ale nedochází k rozbřednutí materiálu.



Obr. 47 - Vzorky hliněné omítky PICAS s 0,5 % ricinového oleje po vystavení zkoušce postřikem (archiv autora)



Obr. 48 – Vzorky hliněné omítky CEMIX s 0,5 % ricinového oleje po vystavení zkoušce postřikem (archiv autora)

V případě hliněných omítek s 1 % a se 2 % ricinového oleje bylo chování během zkoušky obdobné u obou směsí PICAS i CEMIX (Obr. 49 a Obr. 50). Po celých 30 minut nedošlo k rozbřednutí materiálu a povrch byl velmi tvrdý a nevykazoval známky opotřebení. U omítek s 1 % oleje došlo během posledních pár minut ze 30-minutové zkoušky k odplavení velmi malého množství částic, u směsí se 2 % ricinového oleje se jevila struktura povrchu zcela neporušená. Obecně lze říci, že už při velmi malé koncentraci ricinového oleje ($\geq 0,5\%$) vykazují omítky velmi výraznou odolnost proti postřiku vodou oproti referenční směsi.

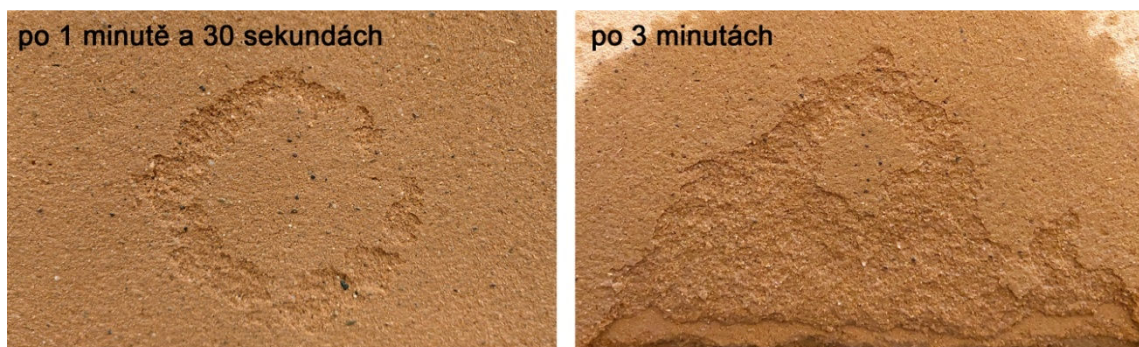


Obr. 49 – Vzorky hliněné omítky PICAS s 1 % a se 2 % ricinového oleje po vystavení zkoušce postříkem (archiv autora)

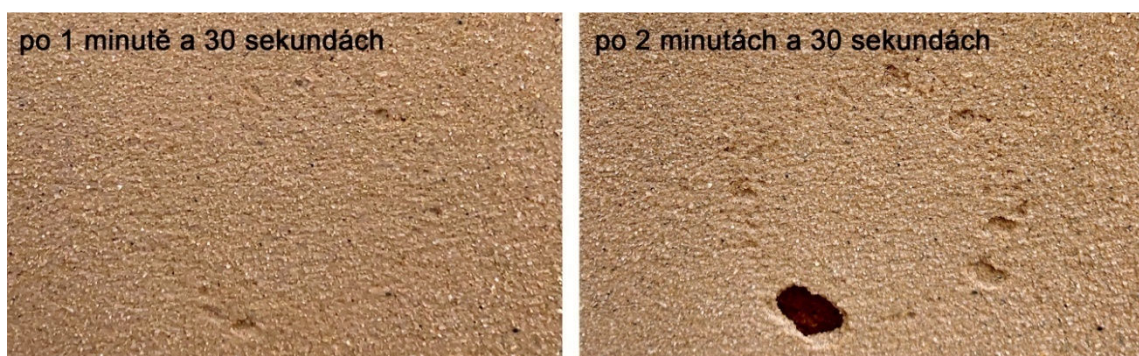


Obr. 50 – Vzorky hliněné omítky CEMIX s 1 % a se 2 % ricinového oleje po vystavení zkoušce postříkem (archiv autora)

Hliněné omítky s 1 % kaseinu vykazovaly u obou směsí PICAS i CEMIX oproti referenční směsi mírné zlepšení. V případě hliněné omítky PICAS (Obr. 51) nedošlo tak brzy k celkovému rozbřednutí povrchu a vymývání částic v prvních minutách probíhalo pouze v místě dopadu paprsku vody. Nicméně následná degradace byla rychlá a již po 3 minutách docházelo v dolní části vzorku k částečnému odpadnutí celé vrstvy jemné hliněné omítky. Hliněná omítka CEMIX s 1 % kaseinu (Obr. 52) vykazovala po 90 sekundách velmi malou míru odplavování částic v místě dopadu vodního paprsku. Po další minutě docházelo k degradaci stále pouze v místě dopadu vodního paprsku, nicméně v části vzorku došlo k vymytí celé vrstvy jemné omítky. Obecně lze konstatovat, že prodloužení odolnosti proti postříku je po přidání 1 % kaseinu velmi malé, v řádech desítek sekund.

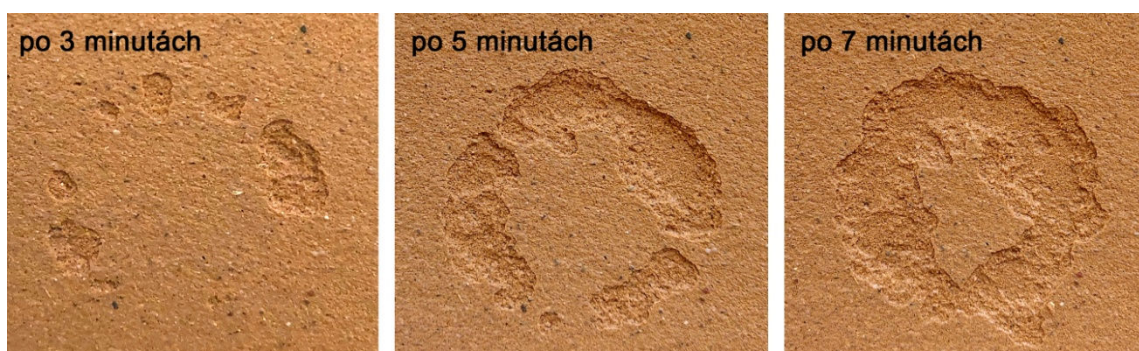


Obr. 51 – Vzorky hliněné omítky PICAS s 1 % kaseinu po vystavení zkoušce postřikem (archiv autora)

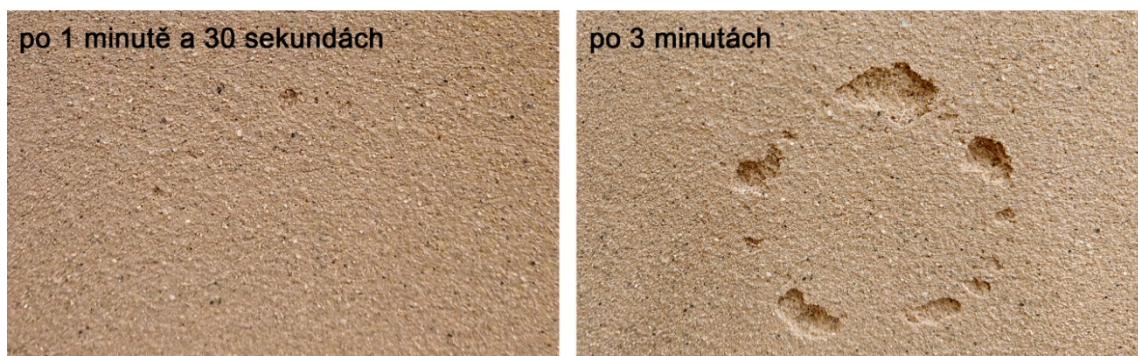


Obr. 52 – Vzorky hliněné omítky CEMIX s 1 % kaseinu po vystavení zkoušce postřikem (archiv autora)

U hliněných směsí se 2 % kaseinu byl účinek hydrofobizační přísady znatelnější. V případě hliněné omítky PICAS (Obr. 53) nedošlo během prvních minut k rozbřednutí povrchu, pouze docházelo k postupnému vymývání částic v místě dopadu paprsku vody. Obodobné chování bylo zaznamenáno u hliněné omítky CEMIX (Obr. 54). Obecně lze vyvodit závěr, že přidáním 1 % kaseinu se zvýšila odolnost proti postřiku v obou případech v řádech několika minut.



Obr. 53 – Vzorky hliněné omítky PICAS se 2 % kaseinu po vystavení zkoušce postřikem (archiv autora)

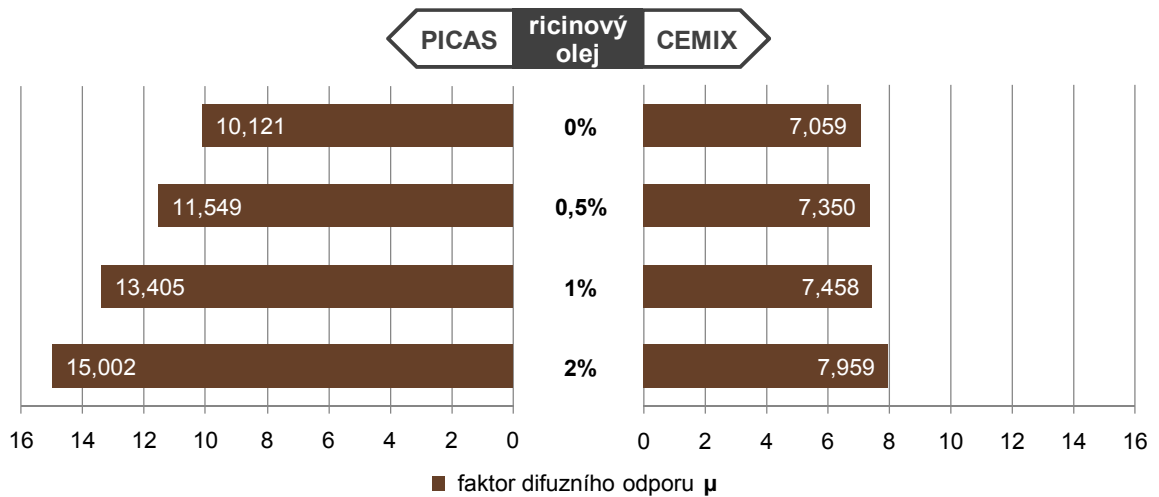


Obr. 54 – Vzorky hliněné omítky CEMIX se 2 % kaseinu po vystavení zkoušce postřikem (archiv autora)

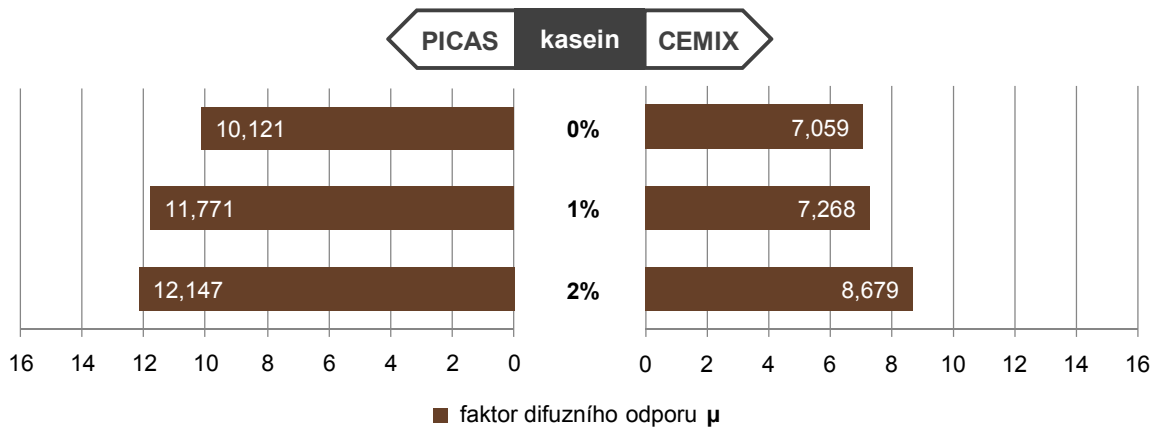
F.2.2.4 Difuze vodní páry

Výsledky měření znázorněné na Obr. 55 ukazují, že zvyšování faktoru difuzního odporu je přímo úměrné zvyšující se koncentraci ricinového oleje ve směsi. U takto malých koncentrací oleje ve směsi jsou však rozdíly velmi nízké a nárůst je pozvolný, nikoliv skokový. V případě hliněné omítky PICAS došlo oproti referenční směsi s faktorem difuzního odporu 10,121 k navýšení při koncentraci 2 % oleje na hodnotu 15,002. U hliněné omítky CEMIX jsou rozdíly méně patrné, po přidání 2 % oleje do směsi se zvýšil faktor difuzního odporu z hodnoty 7,059 na 7,959.

Dle výsledků měření na Obr. 56 má taktéž zvyšující se koncentrace kaseinu ve směsi za následek zvýšení faktoru difuzního odporu. Rozdíly jsou však ještě méně patrné než v případě ricinového oleje a nárůst je taktéž velmi pozvolný. Výjimku tvoří směs CEMIX se 2 % kaseinu, u které se zvýšil faktor difuzního odporu z hodnoty 7,05 pro referenční omítku na hodnotu 8,679.



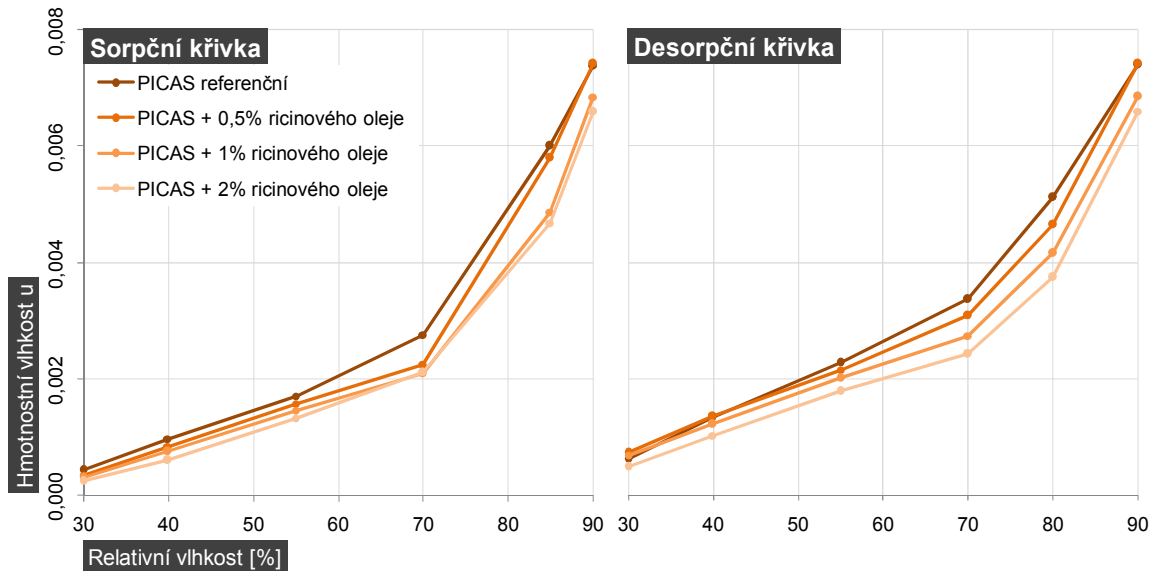
Obr. 55 – Graf závislosti faktoru difuzního odporu na koncentraci ricinového oleje v hliněné omítkě PICAS (vlevo) a CEMIX (vpravo) (medián, $n = 5$)



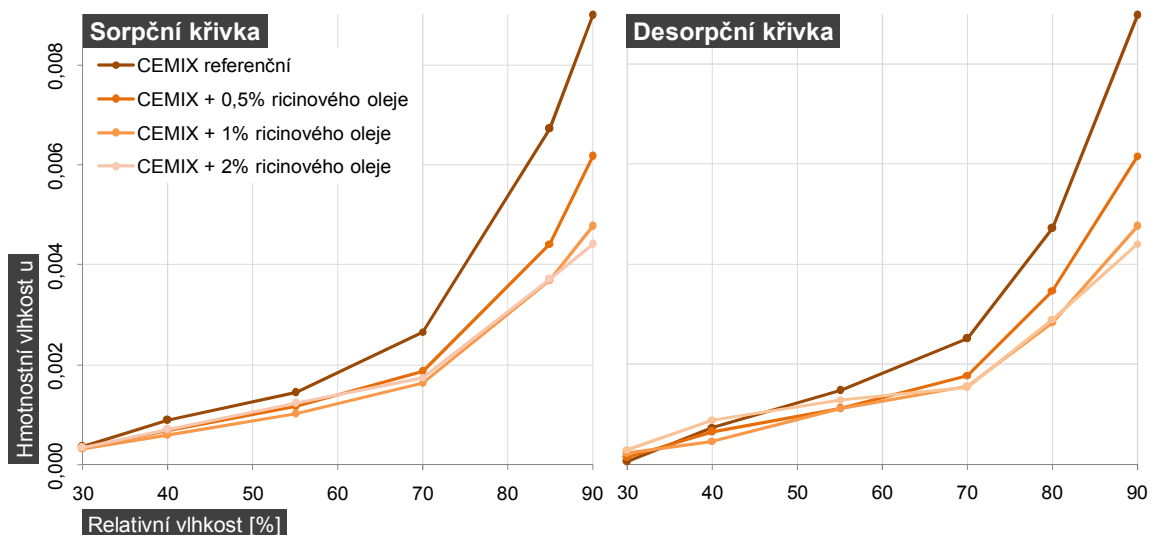
Obr. 56 – Graf závislosti faktoru difuzního odporu na koncentraci kaseinu v hliněné omítkě PICAS (vlevo) a CEMIX (vpravo) (medián, $n = 5$)

F.2.2.5 Hygroskopická sorpce

Výsledky měření znázorněné na Obr. 57 a Obr. 58 ukazují, že se zvyšující se koncentrací ricinového oleje v hliněné omítkě se snižuje její schopnost absorbovat vlhkost z okolního vzduchu. V případě hliněných omítek PICAS (Obr. 57) mají sorpční a desorpční křivky pro jednotlivé koncentrace velmi obdobný průběh, největší rozdíly jsou zřejmé v oblasti relativní vlhkosti okolního vzduchu mezi 70 a 85 %. U hliněné omítky CEMIX (Obr. 58) jsou největší rozptyly průběhů sorpčních a desorpčních křivek pro různé koncentrace oleje patrné v oblasti 70 % až 90 % relativní vlhkosti okolního vzduchu.



Obr. 57 – Sorpční a desorpční křivky pro hliněné omítky PICAS s ricinovým olejem (medián, $n = 6$)

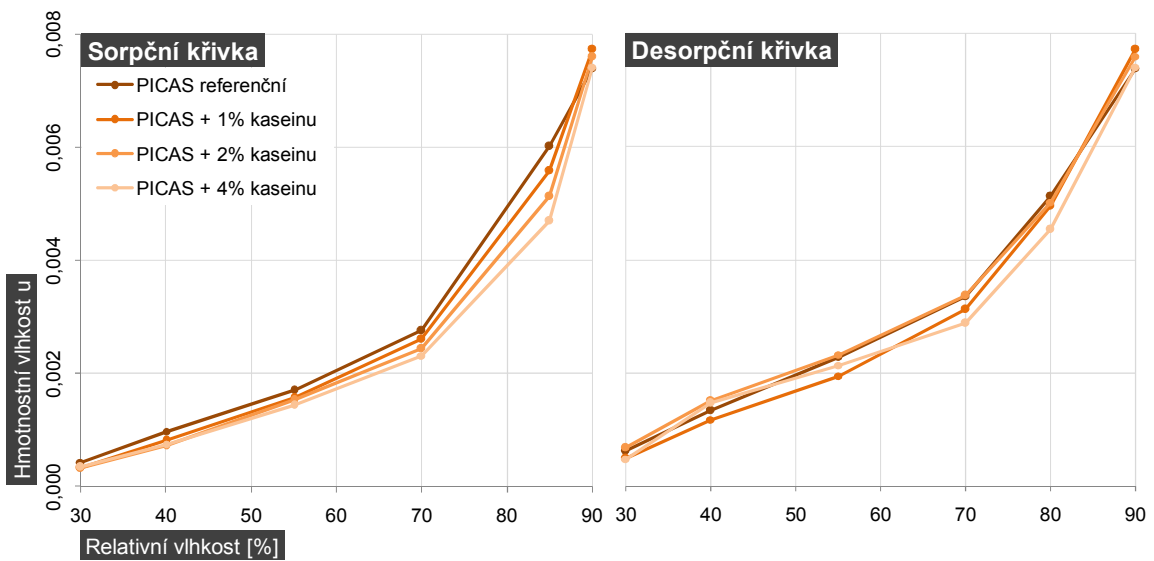


Obr. 58 – Sorpční a desorpční křivky pro hliněné omítky CEMIX s ricinovým olejem (medián, $n = 6$)

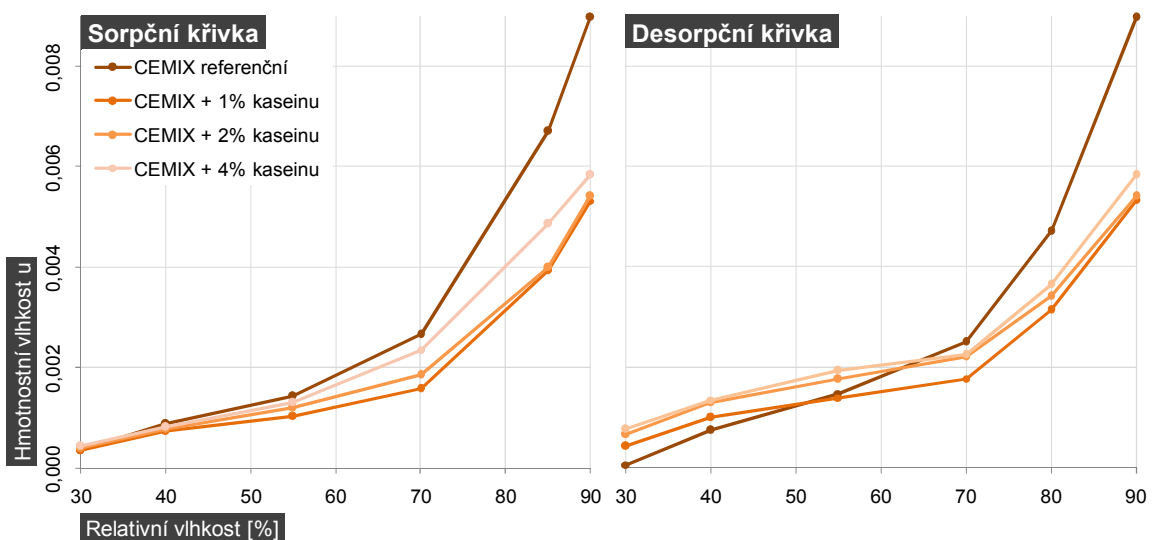
Z grafů na Obr. 59 a Obr. 60 nelze vyvodit obecný závěr pro vztah mezi koncentrací kaseinu ve směsi a schopností absorbovat vlhkost z okolního vzduchu. V případě hliněné omítky PICAS (Obr. 59) je závislost hmotnostní vlhkosti na koncentraci kaseinu ve směsi patrná pouze u sorpční křivky. Během desorpce jsou průběhy křivek velmi podobné, dochází k jejich křížení a je tedy obtížné závislost vyvodit. U vzorků hliněné omítky CEMIX (Obr. 60) je dle průběhu sorpčních křivek zřejmé, že omítky mají po přidání kaseinu nižší schopnost absorbovat vzdušnou vlhkost. Jejich schopnost desorpce je však

v oblastech nižší relativní vlhkosti okolního vzduchu (55 % až 30 %) naopak vyšší než u referenční hliněné omítky.

V průběhu zkoušky došlo u vzorků CEMIX i PICAS se 4 % kaseinu ke vzniku plísně na povrchu (Obr. 16 v kapitole E.2). V případě hliněné omítky PICAS vznikla povrchová plíseň přibližně po 24 hodinách, kdy byly vzorky vystaveny relativní vlhkosti okolního vzduchu 90 %. U hliněných omítek CEMIX byla plíseň za stejných podmínek viditelná po 2 dnech.



Obr. 59 – Sorpční a desorpční křivky pro hliněné omítky PICAS s kaseinem (medián, n = 6)



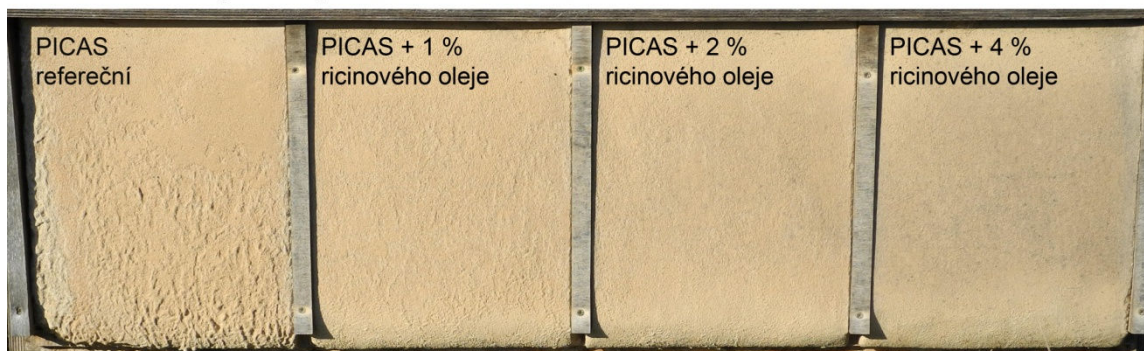
Obr. 60 – Sorpční a desorpční křivky pro hliněné omítky CEMIX s kaseinem (medián, n = 6)

F.2.3 Testování *in situ*

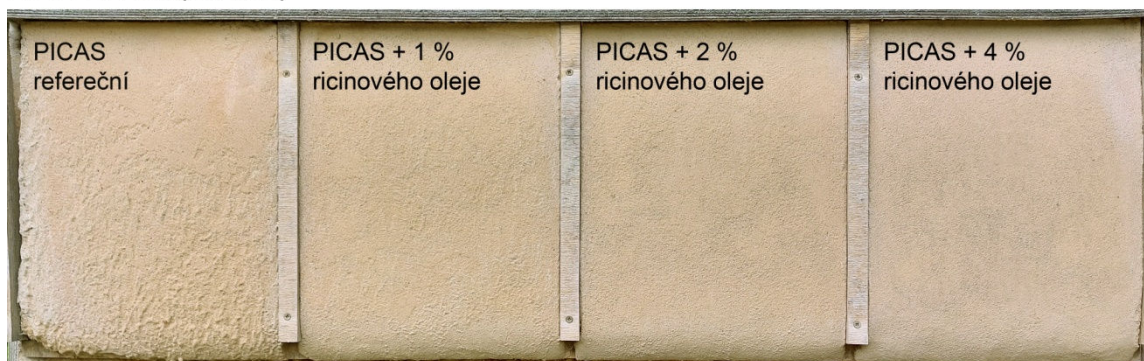
Při vyhodnocování odolnosti hliněných omítek proti povětrnostním vlivům je třeba brát v potaz skutečnost, že se jedná o zkoušku, jejíž výsledky mohou být ovlivněny mnoha faktory. Vstupní podmínky, jako jsou například kvalita a délka úpravy finálního povrchu (filcování a sprašování), míra navlhčení podkladní vrstvy apod., nelze zajistit vždy ve zcela totožné míře. Tento typ vstupních podmínek lze kontrolovat jen do určité míry, nicméně lze předpokládat, že případná variabilita v oblastech kvality finálního povrchu je náhodná a nebude výsledky ovlivňovat významně či ve specifickém směru. Významnou roli může hrát také odlišnost orientace panelů (vzorky PICAS jihovýchodním směrem, CEMIX jižním směrem) a případně poloha vůči okolním přírodním prvkům (stromy či keře, které mohou ovlivnit převažující směr větru). Umístění panelů na různé světové strany je bráno v potaz při diskuzi výsledků, zejména v případě, kdy je srovnávána dvojice omítka CEMIX versus omítka PICAS referenční či obsahující stejné množství hydrofobizačního činidla. Fotografie všech hliněných omítek bezprostředně po instalaci panelů na pozemek jsou zobrazeny v příloze M.5.

Z fotografií vzorků hliněných omítek PICAS s ricinovým olejem (Obr. 61) je zřejmé, že již při velmi nízké koncentraci oleje ve směsi (1 %) se odolnost proti povětrnostním vlivům významně zvýšila. Referenční směs začala vykazovat výrazné známky odplavování částic již po prvním měsíci expozice a na povrchu byly zřejmé pozůstatky mírného rozbřednutí během deště. Směs omítky PICAS s 1 % ricinového oleje začala vykazovat první známky degradace až po 10 měsících expozice. Směs se 2 % a se 4 % oleje nevykazovala známky degradace po celou dobu zkoušky (3 roky). Přibližně po 11 měsících se na vzorku PICAS se 4 % ricinového oleje začaly objevovat šedé skvrny, které měnily svoji intenzitu v průběhu roku (nejvíce zřetelné byly v zimním období, viz Obr. 61). Jak je zřejmé z detailů na Obr. 61, po ukončení zkoušky vykazovala nejlepší výsledky směs se 2 % ricinového oleje. U omítky referenční a s 1 % oleje byly zjevné výrazné známky eroze, na povrchu omítky se 4 % oleje byla zřejmá vada v podobě šedých teček po celém povrchu (plíseň).

PO 15 MĚSÍCÍCH (12/2020)



PO 3 LETECH (08/2022)



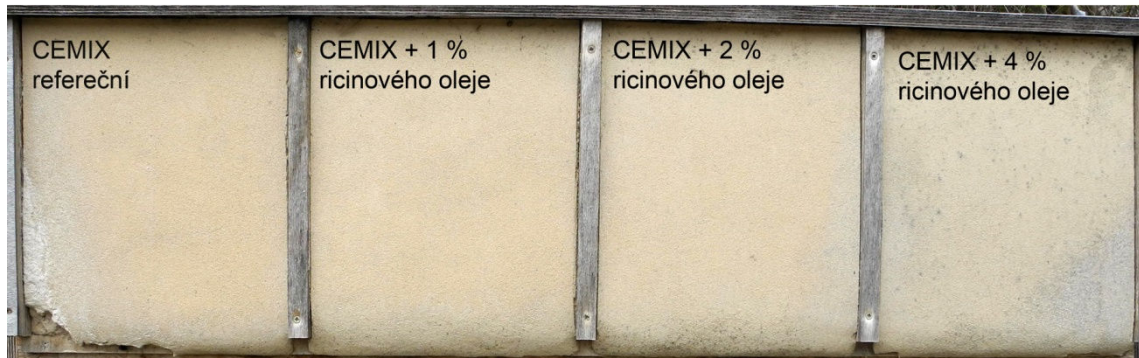
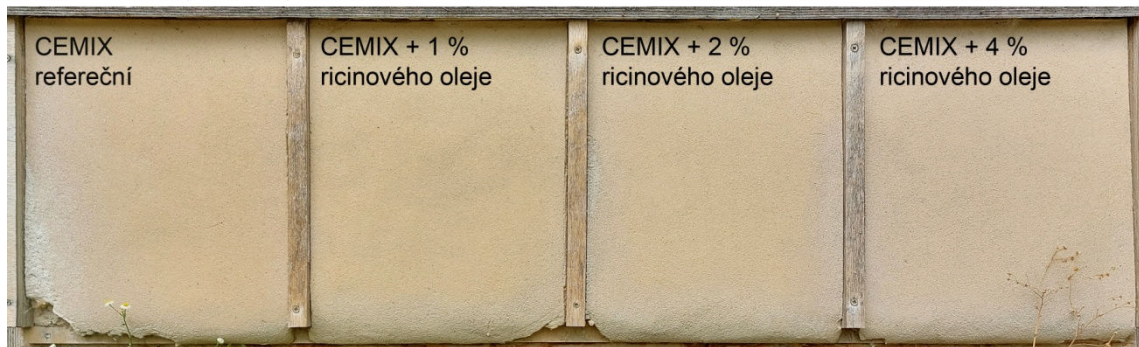
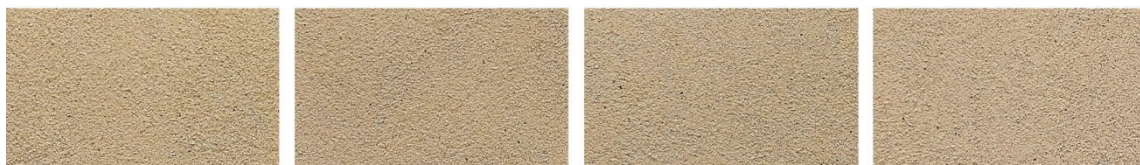
PO 3 LETECH - DETAIL



Obr. 61 – Vzorky hliněné omítky PICAS s ricinovým olejem po vystavení povětrnostním vlivům (archiv autora)

V případě hliněných omítek CEMIX s ricinovým olejem (Obr. 62) nejsou rozdíly mezi jednotlivými vzorky tak výrazné. Menší míra degradace všech vzorků CEMIX má pravděpodobně příčinu v odlišné orientaci panelů než u omítky PICAS, které byly více vystaveny převládajícímu směru větru a hnanému dešti. U referenční omítky CEMIX začaly vznikat mírné známky degradace po 3 měsících, ale ani po 3 letech nebyla eroze významná a povrch vykazoval velmi soudržnou strukturu. Směs s 1 % ricinového oleje začala vykazovat počínající erozi přibližně po roce vystavení povětrnostním vlivům a po 3 letech měla stále velmi soudržný povrch s minimální erozí. Omítky se 2 % a se 4 % oleje nevykazovaly po celou dobu zkoušky (3 roky) žádné známky degradace. Obdobně jako u omítky PICAS se i na vzorku CEMIX se 4 % ricinového oleje po 11 měsících vyskytly šedé skvrny (plíseň), které měnily svoji intenzitu v průběhu roku a nejvíce zřetelné byly v zimním období, viz Obr. 62. Omítky

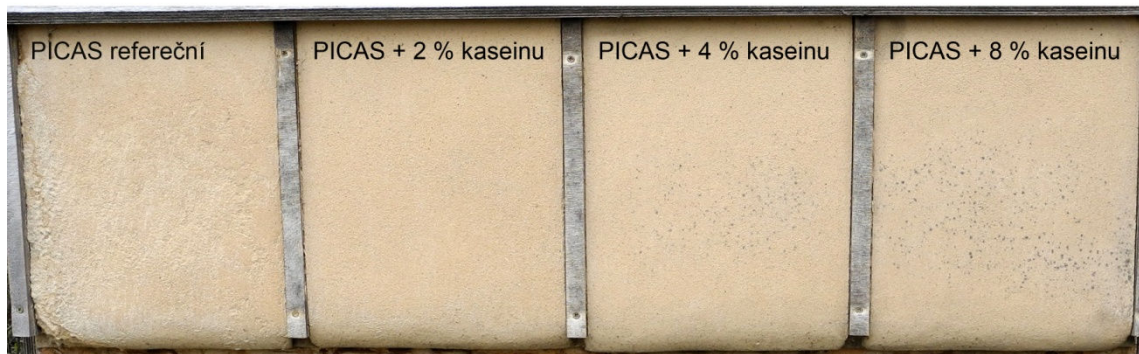
s koncentrací ricinového oleje 4 % a vyšší se nejeví z estetického, a pokud se jedná o nebezpečné plísně, tak potenciálně také zdravotního hlediska jako vhodné pro použití v exteriéru.

PO 16 MĚSÍCÍCH (01/2021)**PO 3 LETECH (08/2022)****PO 3 LETECH - DETAIL**

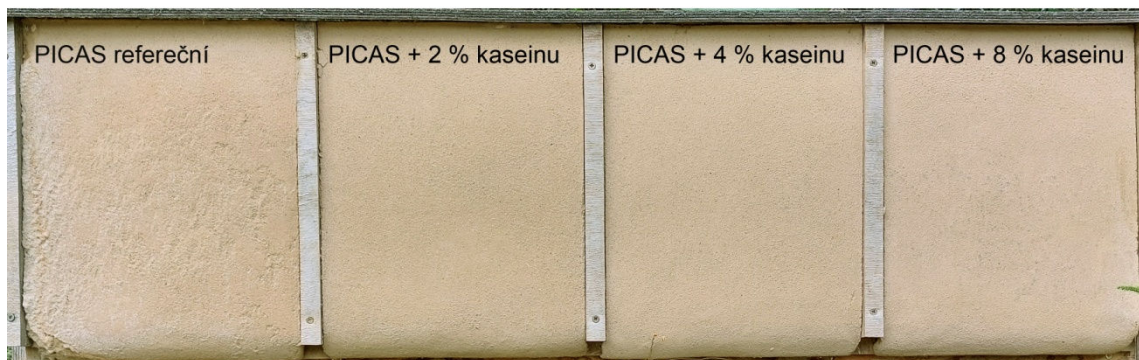
Obr. 62 – Vzorky hliněné omítky CEMIX s ricinovým olejem po vystavení povětrnostním vlivům (archiv autora)

Z fotografií vzorků hliněných omítek PICAS s kaseinem (Obr. 63) je zřejmé, že již při koncentraci kaseinu 2 % ve směsi se odolnost proti povětrnostním vlivům výrazně zvýšila. Oproti referenční směsi, která vykazovala první známky eroze v řádech týdnů, u omítky se 2 % kaseinu nebyly zřejmé známky eroze po celou dobu zkoušky (viz detail po 3 letech na Obr. 63). Směsi se 4 % a s 8 % kaseinu taktéž nevykazovaly žádnou míru degradace po celou dobu expozice, ale u obou směsí se na povrchu přibližně po 13 měsících začaly ve velké míře objevovat šedé skrvny, jejichž intenzita se v průběhu roku měnila. Omítky s koncentrací kaseinu 4 % a vyšší se nejeví z estetického hlediska jako vhodné pro použití v exteriéru.

PO 16 MĚSÍCÍCH (01/2021)



PO 3 LETECH (08/2022)



PO 3 LETECH - DETAIL



Obr. 63 – Vzorčky hliněné omítky PICAS s kaseinem po vystavení povětrnostním vlivům (archiv autora)

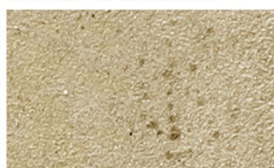
V případě hliněných omítek CEMIX s kaseinem (Obr. 64) došlo v průběhu zkoušky kvůli vadě konstrukce v části panelu k zatékání vody do vzorků se 2 % a se 4 % kaseinu. V důsledku toho došlo po 13 měsících k odpadnutí obou vzorků. Do té doby nevykazovala žádná hydrofobizovaná směs známky degradace (CEMIX s 8 % kaseinu ani po 3 letech), zatímco u referenční směsi byla zaznamenána malá míra eroze po 3 měsících. Po roce vystavení povětrnostním vlivům byly na vzorku s 8 % kaseinu zaznamenány šedé skvrny. Ty se objevily i u směsi se 2 % kaseinu, ale pouze v částech, kam zatékala voda (viz detaily na Obr. 64).

Z hlediska soudržnosti s podkladem nebyly u hydrofobizovaných vzorků jemných hliněných omítek zaznamenány jakékoliv vady (odlupování, vymílání celé vrstvy jemné omítky apod.).

PO 1 ROCE (08/2020)



PO 3 LETECH (08/2022)

DETAIL PO 3 LETECH
CEMIX referenčníDETAIL PO 1 ROCE
CEMIX + 2 % kaseinuDETAIL PO 1 ROCE
CEMIX + 4 % kaseinuDETAIL PO 3 LETECH
CEMIX + 8 % kaseinu

Obr. 64 – Vzorčky hliněné omítky CEMIX s kaseinem po vystavení povětrnostním vlivům (archiv autora)

F.2.4 Subjektivní smyslové posouzení

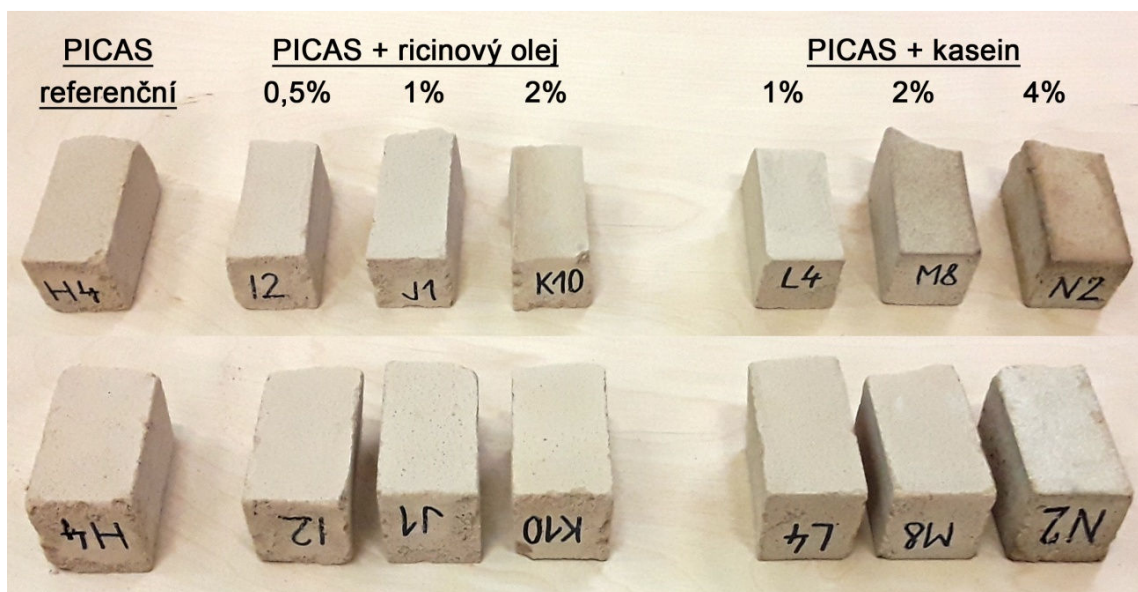
Během zkoušek prováděných v laboratoři a *in situ* byly v rámci zpracování čerstvé směsi a práce s různými typy vzorků pozorovány některé aspekty, které mohou mít vliv na celkové posouzení vhodnosti použití hydrofobizačních prostředků. Jedná se o subjektivní hodnocení parametrů, které nebyly experimentálně zkoušeny, ale rozdíly byly tak patrné, že je bylo možné hodnotit alespoň v rámci možností pomocí hmatu, zraku a čichu.

Při práci s čerstvou hliněnou směsí bylo zaznamenáno, že po přidání ricinového oleje i kaseinu byla směs mazlavější. U nízkých koncentrací však byla práce s čerstvou směsí stále vyhovující, problém nastal pouze u hliněných omítek se 4 % a 8 % kaseinu z hlediska časové omezenosti použití čerstvé směsi

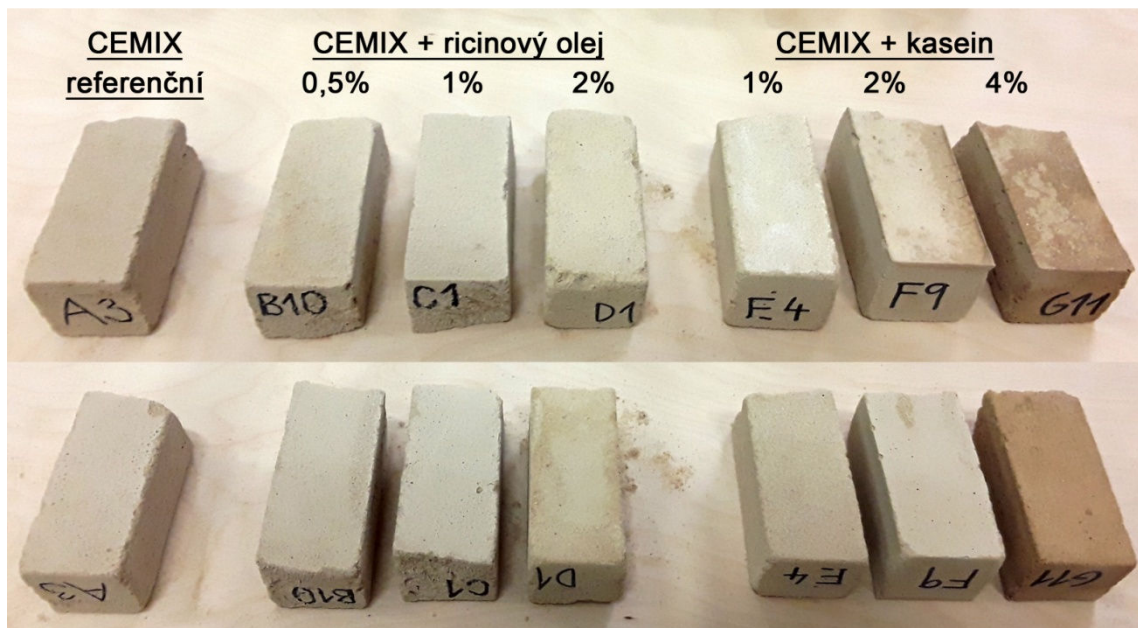
(viz kapitola F.2.1). Během provádění povrchové úpravy finální vrstvy (filcování, sprášování) nebylo u žádné směsi zaregistrováno jakékoliv problematické chování.

Během procesu vysychání vzorků s kaseinem pro laboratorní použití byl po několika dnech od uložení do formy zaznamenán silný zápach. Ten byl však patrný pouze během výroby zkušebních trámečků v silikonových formách, nikoliv v případě výroby těles pro zkoušku difuze vodní páry, odolnosti proti dešťové erozi či pro zkoušku *in situ* (kde byla rychlost vysychání ztelně rychlejší). Jelikož se v případě výroby zkušebních trámečků jedná z hlediska délky procesu o extrémní situaci, která v reálných podmínkách nikdy nenastane, neměl by tento fakt znamenat závažnou komplikaci při použití.

Na zkušebních trámečcích byly taktéž pozorovány vizuální změny z hlediska odstínu (ztmavnutí), hlavně u omítek s koncentrací kaseinu 4 % (Obr. 65 a Obr. 66). Tento jev však nebyl vůbec zřejmý u vzorků určených pro jiné zkoušky (odolnost proti dešťové erozi, *in situ*, difuze vodní páry), proto je obdobně jako zápach dáván do souvislosti s dlouhým vysycháním v silikonové formě.



Obr. 65 – Zkušební trámečky hliněné omítky PICAS po vyjmutí z formy (archiv autora)



Obr. 66 – Zkušební trámečky hliněné omítky CEMIX po vyjmutí z formy (archiv autora)

Po vyjmutí zkušebních těles s 8 % kaseinu ze silikonových forem byl na povrchu zřejmý bílý povlak (Obr. 15 v kapitole E.2). U směsi se 4 % kaseinu se objevila plíseň na povrchu během zkoušky hygroskopické sorpce v klimatické komoře (Obr. 16 v kapitole E.2). Během zkoušky *in situ* se objevily šedé tečky u směsi se 4 % ricinového oleje a se 4 % a 8 % kaseinu (Obr. 14, Obr. 61, Obr. 62, Obr. 63 a Obr. 64). Tyto koncentrace a vyšší lze tedy z estetického a zdravotního hlediska považovat za problematické.

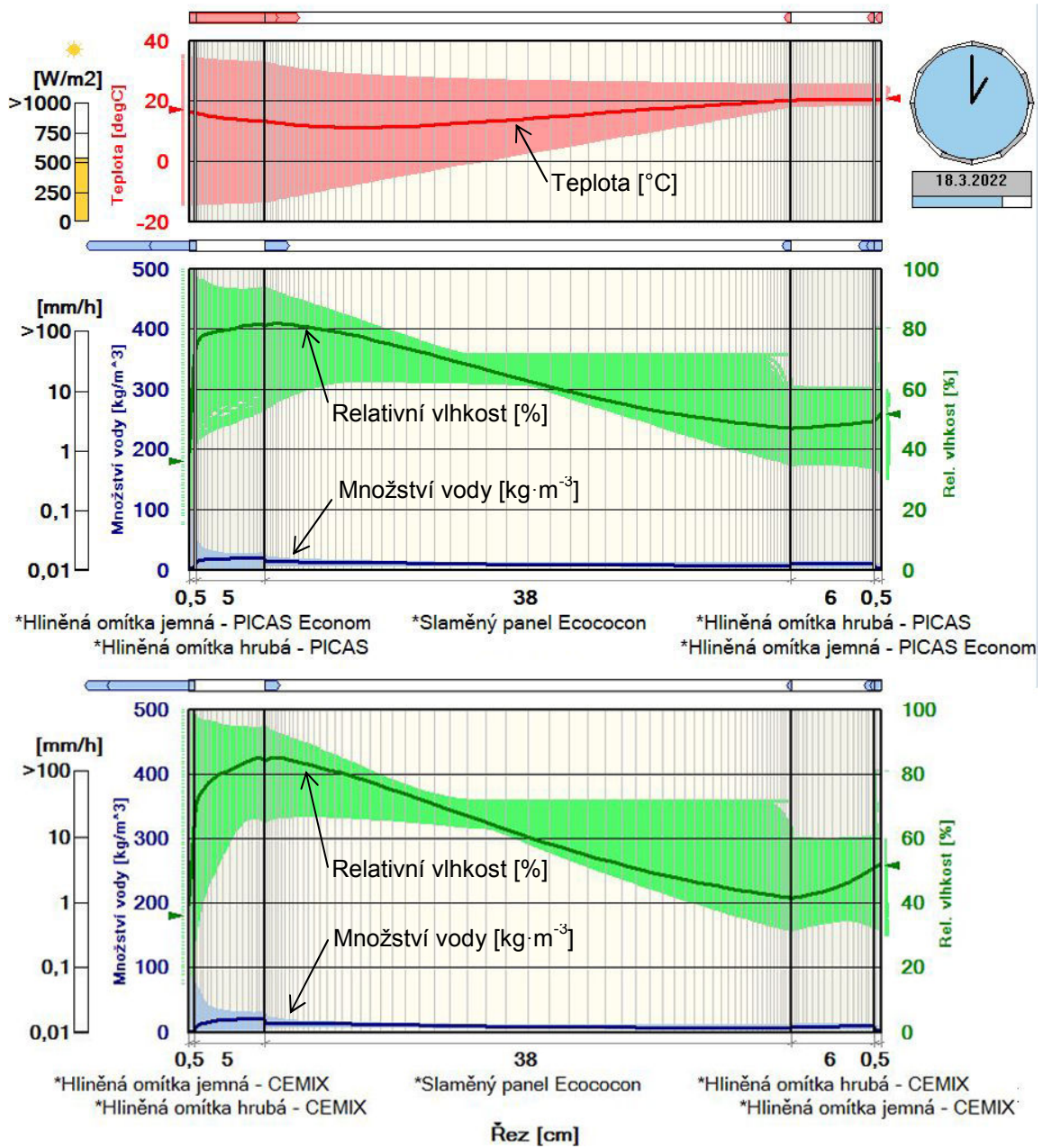
Vzorky hliněné omítky vykazovaly po přidání ricinového oleje i kaseinu mnohem větší míru odolnosti proti otěru, byly soudržnější (nedocházelo v takové míře k odpadávání drobných částic). Taktéž nebyly jejich hrany tak náchylné k odlomení a v případě kaseinu bylo zřejmé, že mají hrany mnohem ostřejší průběh (Obr. 65 a Obr. 66 – směsi se 2 % a se 4 % kaseinu).

F.3 Numerická simulace tepelně-vlhkostního chování vybrané konstrukce

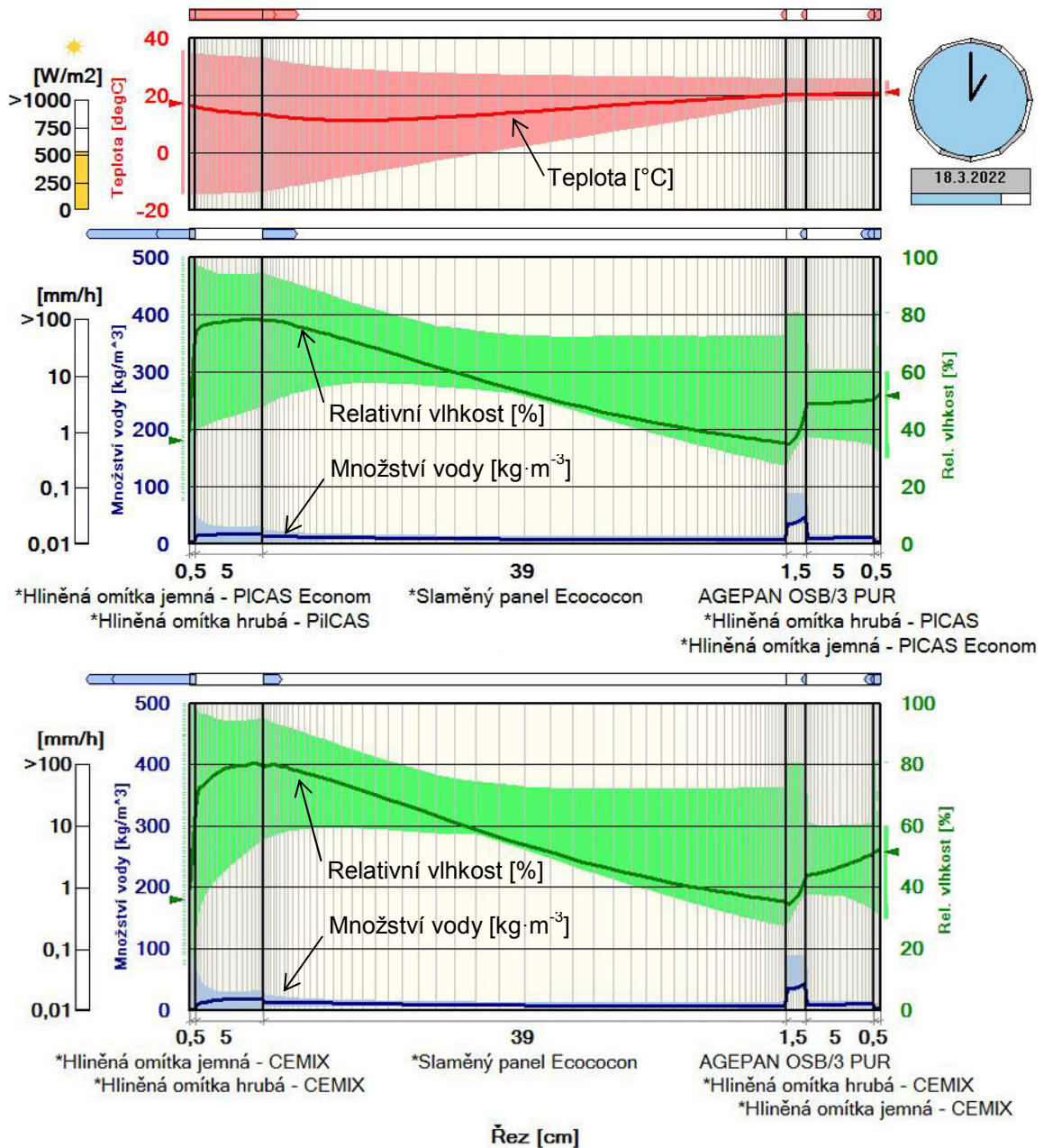
V programu WUFI Pro 5.3 byly provedeny simulace skladeb obvodových stěn S1 (Obr. 32) a S2 (Obr. 33) pro téměř všechny varianty hydrofobizačních prostředků a jejich koncentrace ve vnější jemné hliněné omítce. Ze souboru byly vyřazeny směsi se 4 % a 8 % kaseinu, jelikož byly vyhodnoceny jako problematické z hlediska zpracovatelnosti a vzniku plísní (viz kapitola F.2.4).

Na obrázcích je patrný průběh relativní vlhkosti, množství vody a teploty ve skladbách S1 (Obr. 67) a S2 (Obr. 68) s vnějšími jemnými hliněnými omítkami PICAS nebo CEMIX hydrofobizovanými 2 % ricinového oleje. Křivky vykreslují průběh vlhkosti a teploty pro den 18.3.2022 ve 13:00 hodin. Světlejší barevná pole znázorňují rozsah posuzovaných hodnot v rámci simulovaného období, tj. od 1.10.2019 do 31.12.2022. Z průběhů křivek a rozsahů vlhkosti a teploty je patrné, že z hlediska podmínek vhodných pro růst hub a plísní ve vrstvě slámy je kritickým místem rozhraní mezi vnější hrubou hliněnou omítkou a slaměným panelem. Toto místo, které je nejvíce zatíženo vysokou relativní vlhkostí, bylo vybráno jako stěžejní a posuzováno v následujících grafech s průběhy teplot a relativních vlhkostí. Data byla hodnocena pro období od 1.1. do 31.12.2022, jelikož u všech skladeb došlo k ustálení průběhu množství vody ve slaměném panelu na základě stejných okrajových podmínek (Obr. 78 v příloze M.5).

Za rizikové podmínky z hlediska růstu hub a plísní je považována relativní vlhkost vzduchu nad 80 % a teplota vyšší než 15°C (Márton, 2014), významnou roli hraje také faktor délky trvání těchto rizikových podmínek (viz kapitola E.5.1). Z důvodu kombinace vysoké relativní vlhkosti a vysoké teploty se jeví jako nejvíce problematické jarní a podzimní období.

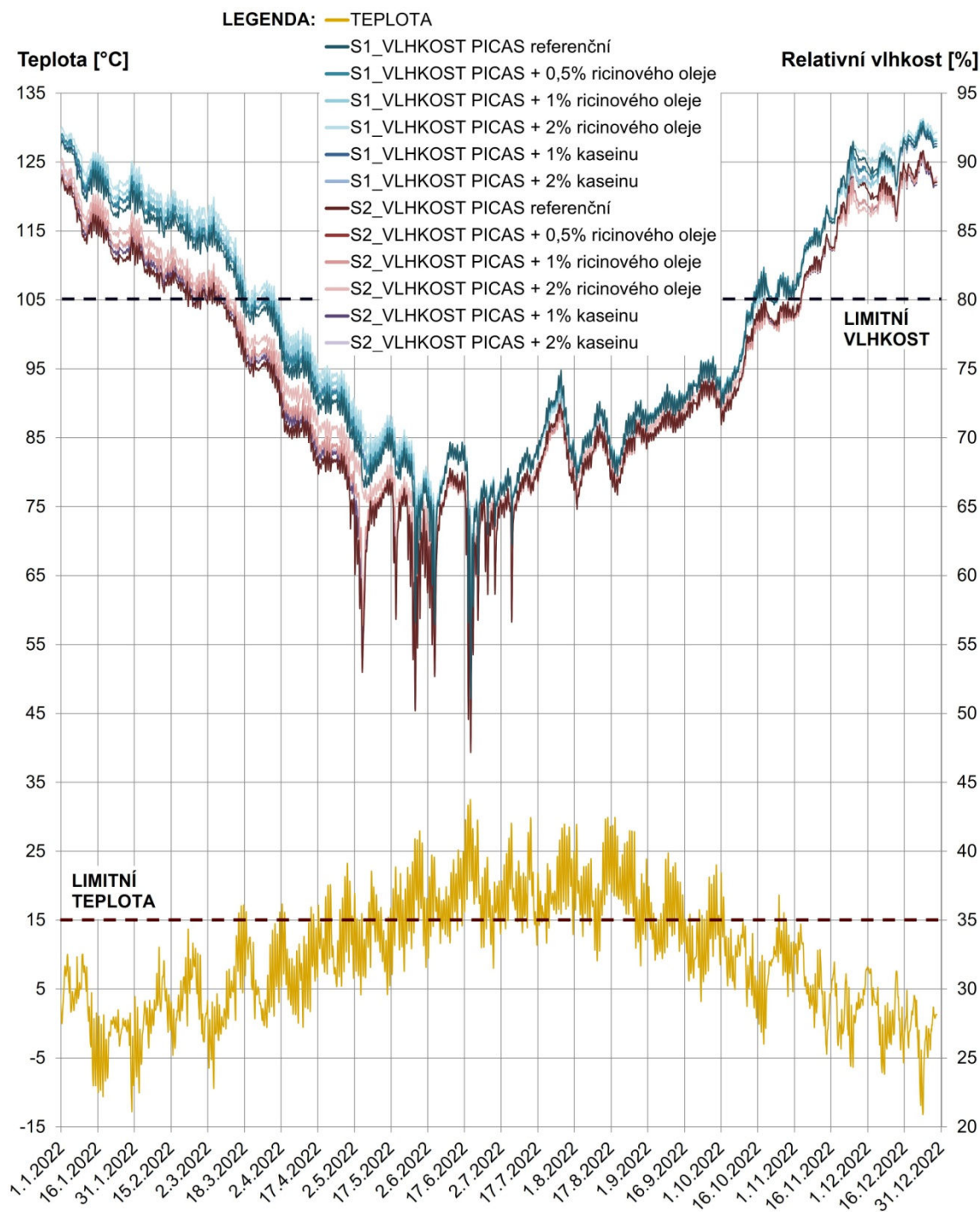


Obr. 67 – Simulace průběhu teploty, relativní vlhkosti a množství vody ve skladbě S1 s hliněnými omítkami PICAS (nahore) a CEMIX (dole) se 2 % ricinového oleje v programu WUFI Pro 5.3 pro den 18.3.2022, 13:00



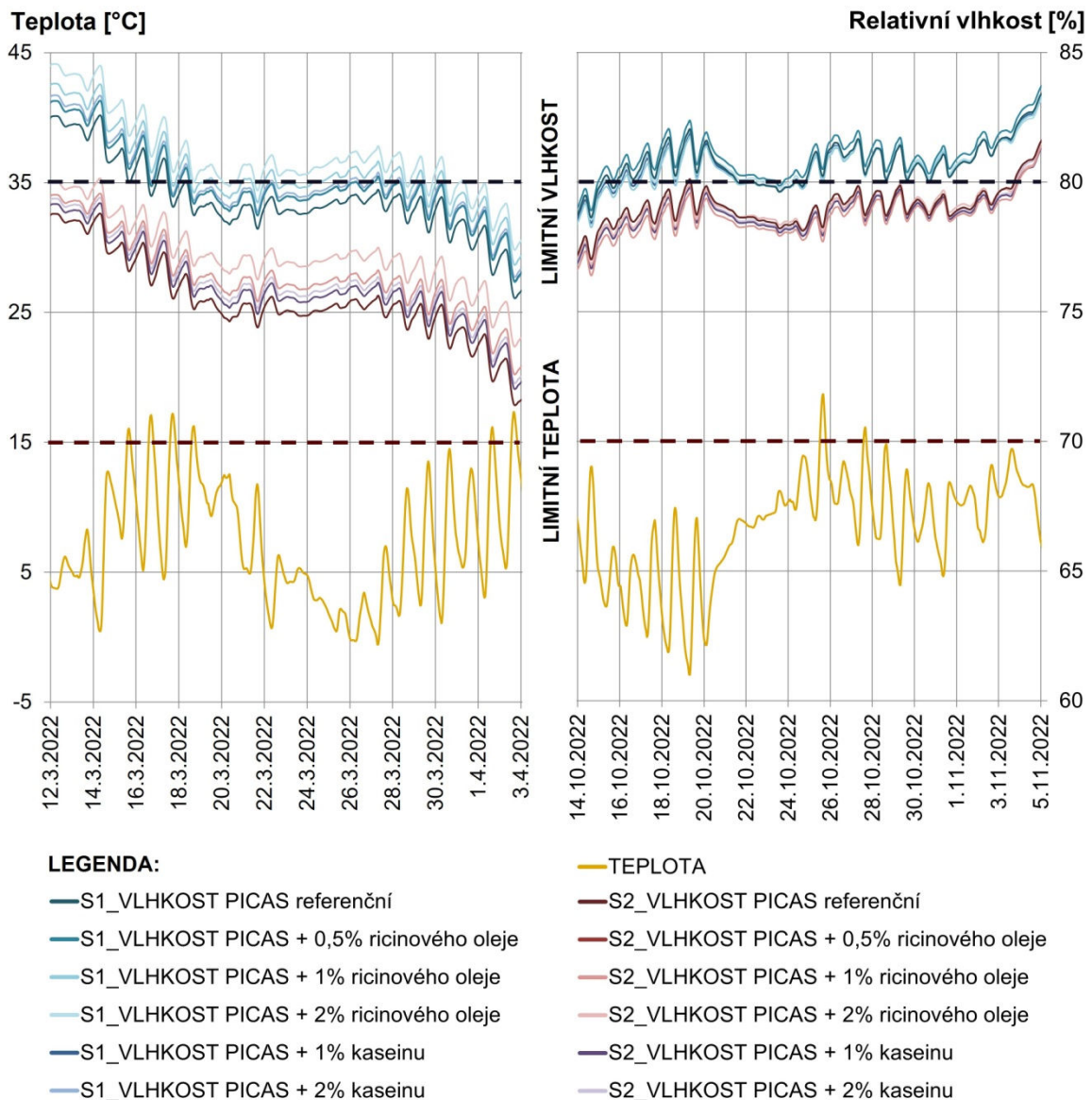
Obr. 68 – Simulace průběhu teploty, relativní vlhkosti a množství vody ve skladbě S2 s hliněnými omítkami PICAS (nahore) a CEMIX (dole) se 2 % ricinového oleje v programu WUFI Pro 5.3 pro den 18.3.2022, 13:00

Z grafu průběhu teploty a relativní vlhkosti u všech variant skladeb s omítkou PICAS (Obr. 69) je zřejmé, že přidání hydrofobizačního činidla do směsi má v některých obdobích (převážně v první polovině roku) značný vliv na průběh relativní vlhkosti v posuzovaném místě. Rozdíly způsobené změnou parametrů vnější jemné hliněné omítky (difúzní odpor a hygroskopická sorpce) jsou však menší než rozdíly mezi skladbami S1 (bez OSB desky) a S2 (s OSB deskou).



Obr. 69 – Graf průběhu teploty a relativní vlhkosti v místě rozhraní vnější hrubé omítky a slaměného panelu pro všechny varianty skladeb s omítkou PICAS v období 1.1. až 31.12.2022

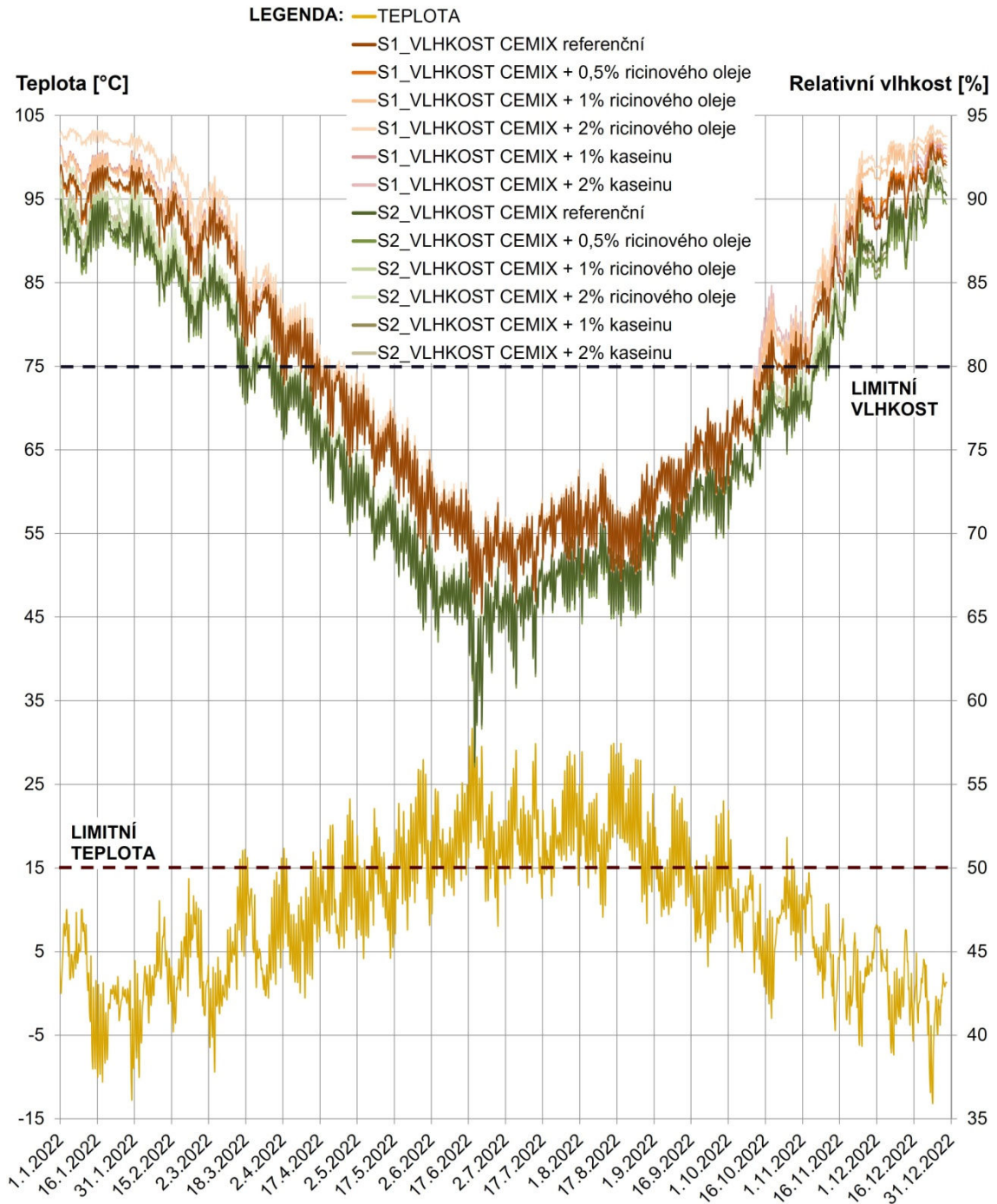
Z Obr. 70 je zřejmé, že kombinace vysoké relativní vlhkosti a teploty nastává pouze u skladby S1 a použití hydrofobizované hliněné omítky riziko růstu plísní a hub nijak nezvyšuje. Respektive období, po které je sláma rizikovým podmínkám vystavena, trvá u všech variant skladby S1 díky rychlým teplotním výkyvům řádově hodiny, nikoliv dny.



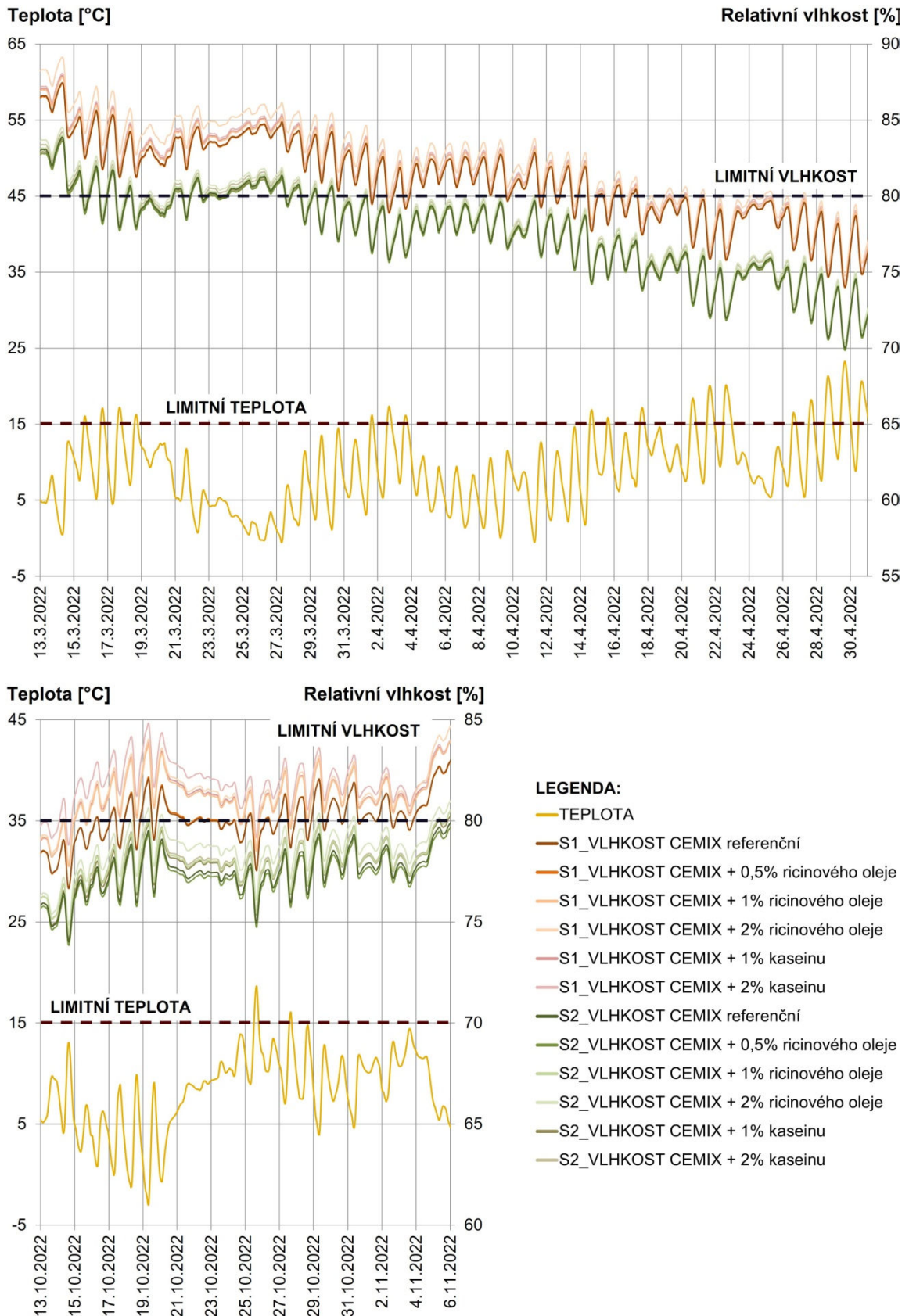
Obr. 70 – Graf průběhu teploty a relativní vlhkosti v místě rozhraní vnější hrubé omítky a slaměného panelu pro všechny varianty skladeb s omítkou PICAS v období, ve kterém je slaměný panel nejvíce ohrožen (12.3. až 3.4. a 14.10. až 5.11.2022)

Taktéž v případě hliněných omítek CEMIX je z Obr. 71 zřejmé, že přidání hydrofobizačního činidla do směsi má v některých obdobích (zejména od listopadu do dubna) značný vliv na průběh relativní vlhkosti v posuzovaném místě. Obdobně jako u omítky PICAS jsou i u omítek CEMIX rozdíly způsobené změnou parametrů vnější jemné hliněné omítky (difuzní odpor a hygroskopická sorpce) po většinu sledovaného období menší než rozdíly mezi skladbami S1 (bez OSB desky) a S2 (s OSB deskou). Ani v případě skladeb s hliněnými omítkami CEMIX se při použití hydrofobizované hliněné omítky nezvyšuje riziko růstu hub a plísní. Jak je zřejmé z grafu na Obr. 72, nastává kombinace vysoké

relativní vlhkosti a teploty u všech variant skladeb pouze v řádech hodin, nikoliv dní.



Obr. 71 – Graf průběhu teploty a relativní vlhkosti v místě rozhraní vnější hrubé omítky a slaměného panelu pro všechny varianty skladeb s omítkou CEMIX v období 1.1. až 31.12.2022



Obr. 72 – Graf průběhu teploty a relativní vlhkosti v místě rozhraní vnější hrubé omítky a slaměného panelu pro všechny varianty skladeb s omítkou CEMIX v období, ve kterém je slaměný panel nejvíce ohrožen (13.3. až 30.4. a 13.10. až 6.11.2022)

G. PŘÍNOS PRO TECHNICKOU PRAXI A ROZVOJ VĚDNÍHO OBORU

Disertační práce hodnotí vhodnost použití ricinového oleje a kaseinu jako hydrofobizačního prostředku do hliněných omítek. Z provedeného výzkumu, který zahrnoval sérii laboratorních a reálných (polních) experimentů, je možné vyvodit zásadní závěry:

1. Ricinový olej

Dehydratovaný ricinový olej lze ve vhodném množství považovat za vyhovující hydrofobizační prostředek hliněných omítek. Optimální koncentrace ricinového oleje ve směsi se pohybuje v rozmezí 1% až 2%. Jedná se o množství, u kterého je prokazatelně výrazně zvýšena odolnost proti povětrnostním vlivům a postřiku vodou. Současně nemá přidání tohoto množství oleje do směsi negativní vliv na estetické a potenciálně také zdravotní parametry, riziko vzniku plísní či zpracovatelnost směsi. Koncentrace 0,5 % nevykazuje tak výrazné zvýšení odolnosti proti povětrnostním vlivům a postřiku vodou, naopak koncentrace 4 % a vyšší může mít negativní vliv z hlediska vzniku plísní.

Ricinový olej má vliv na konzistenci hliněné směsi, proto je nutné upravit množství záměsové vody tak, aby bylo dosaženo optimální objemové hmotnosti (dát méně vody i za cenu horší zpracovatelnosti). V takovém případě je po přidání ricinového oleje zvýšena pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku. Výsledky naznačují, že při zachování obdobné objemové hmotnosti nemá přidání oleje negativní vliv na kapilární absorpci vody.

Přidáním ricinového oleje do směsi se zvýší její difuzní odpor a dojde ke změně průběhu sorpční a desorpční křivky (hygroskopická sorpce). Přesto tento fakt nemá výrazný vliv na simulovaný průběh relativní vlhkosti v posuzované skladbě obvodové stěny ze slaměného panelu. Respektive použití hliněné omítky hydrofobizované ricinovým olejem (v koncentraci do 2 % včetně) na vnější stranu konstrukce podle modelu WUFI nezvyšuje riziko vzniku a růstu hub, plísní či hniloby ve slámě.

2. Kasein

Práškový kasein lze považovat za vhodný hydrofobizační prostředek pouze při nižších koncentracích (kolem 2 %). Čerstvá hliněná směs se 4 a 8 % kaseinu vykazovala problematické chování z hlediska zpracovatelnosti a na povrchu vzorků hliněných omítek vystavených povětrnostním vlivům se po delší době (cca po roce) začaly objevovat šedé skvrny indikující s největší pravděpodobností vznik hub a plísní. U omítek se 2 % kaseinu se výrazně zvýšila odolnost proti povětrnostním vlivům, nicméně u odolnosti proti postříku vodou bylo zaznamenáno jen mírné zlepšení oproti referenční směsi.

Přidání kaseinu má vliv na konzistenci hliněné směsi, proto je nutné upravit množství záměsové vody, aby bylo dosaženo optimální objemové hmotnosti. V takovém případě je po přidání kaseinu zvýšena pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku. Při zachování obdobné objemové hmotnosti nemá přidání kaseinu negativní vliv na kapilární absorpci vody.

Přidáním kaseinu do směsi se zvýší její difuzní odpor a dojde ke změně průběhu sorpční a desorpční křivky (hygroskopická sorpce), nicméně na modelový průběh relativní vlhkosti v posuzované skladbě nemá tento fakt výrazný vliv. Použití hliněné omítky hydrofobizované kaseinem na vnější stranu obvodové stěny nezvyšuje podle modelu WUFI riziko vzniku ani růstu plísní, hub či hniloby ve slaměném panelu.

3. Optimalizace měřících metod a relevantnost výstupů

Při měření kapilární absorpce vody byly použity 2 metody měření, dle ČSN EN 1015-18 a dle provedeného výzkumu (Bamogo, 2020), která se v případě hliněných omítek ukázala být vhodnější. Jde sice o metodu složitější, nicméně vzhledem k rychlému vztlínání vody v trámečcích hliněných omítek a průběžnému měření hodnot nedochází na rozdíl od metody dle ČSN EN 1015-18 ke zkreslení výsledků. V případě testování hliněných omítek lze tedy metodu podle Bamogo a spol. doporučit k dalšímu testování.

Účelem zařazení zkoušky postříkem do výzkumu bylo kromě vyhodnocení odolnosti proti hnanému dešti také porovnání výsledků měření se závěry zkoušky *in situ*. Nalezení vztahu mezi těmito dvěma zkouškami by pomohlo

s urychlením budoucího vyhodnocování (redukce vzorků vhodných pro další testování apod.), jelikož vystavení vzorků povětrnostním vlivům je velmi časově náročné. V případě vzorků s ricinovým olejem by bylo možné jistý vztah vyvodit, protože u obou zkoušek byly zamenány značné rozdíly. Jako příklad lze uvést omítky PICAS, u kterých při koncentraci 1 %, resp. 2 % oleje došlo k prodloužení počátku eroze 10x, resp. více než 36x u zkoušky *in situ* a 115x, resp. více než 150x u laboratorní zkoušky odolnosti proti dešťové erozi oproti referenční směsi. Nicméně vzorky hydrofobizované kaseinem vykazovaly rozdílné chování. Například u hliněných omítek PICAS se 2 % kaseinu došlo k prodloužení eroze více než 36x u zkoušky *in situ*, zatímco pouze 10x u laboratorní zkoušky odolnosti proti dešťové erozi. Z toho lze vyvodit, že pokud hydrofobizovaná omítka vykazuje výrazné zvýšení odolnosti proti postřiku vodou měřené laboratorní metodou, bude pravděpodobně vykazovat i výrazné zlepšení odolnosti proti povětrnostním vlivům v reálných podmínkách. Avšak i přesto, že přidáním hydrofobizačního činidla dojde pouze k mírnému zvýšení odolnosti proti dešťové erozi měřené laboratorní metodou, může se odolnost proti povětrnostním vlivům v reálných podmínkách zvýšit výrazně (jako tomu bylo v případě kaseinu) a pro ověření tohoto jevu je třeba vzorky podrobit zkoušce *in situ*.

H. MOŽNOST NAVAZUJÍCÍHO VÝZKUMU

Na základě výsledků měření a numerické simulace bylo vytyčeno několik oblastí, kterými by bylo vhodné stávající výzkum doplnit a dále rozvíjet:

- doplnit výzkum o další koncentrace kaseinu (0,5 %; 1 % a 3 %):
 - ověřit, zdali nedojde k výraznému zvýšení odolnosti proti povětrnostním vlivům už při koncentraci 0,5 % a 1 % kaseinu ve směsi;
 - ověřit, zdali při koncentraci 3 % kaseinu dochází k problematickému chování z hlediska zpracovatelnosti čerstvé směsi a zdali vznikají při vystavení zkoušce *in situ* na povrchu vzorku plísně (jako tomu bylo při koncentraci 4 %). Na základě toho stanovit kritické množství kaseinu ve směsi.
- testovat optimální konzistenci čerstvé hydrofobizované směsi, respektive zkoušet úpravu množství záměsové vody pro dosažení optimální objemové hmotnosti v suchém stavu;
- rozšířit výzkum o další zkoušky zkoumající odolnost proti vodě:
 - měření smáčivosti pomocí kvalitativního hodnocení statického kontaktního úhlu kapky vody na vodorovné ploše vzorku (Stazi, 2016);
 - analýza chování pronikající kapky vody do materiálu pomocí rentgenové mikrotomografické techniky (Mauffré, 2021);
 - měření absorpce vody Karstenovou trubicí dle ČSN EN 16302.
- zkoumat vliv přidání ricinového oleje a kaseinu na hranovou pevnost, odolnost proti otěru a na dynamické sorpční vlastnosti směsi.

I. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

I.1 Literatura

ABANTO, Ginés A., Mustapha KARKRI, Gilles LEFEBVRE, Manfred HORN, Jose L. SOLIS a Mónica M. GÓMEZ. Thermal properties of adobe employed in Peruvian rural areas: Experimental results and numerical simulation of a traditional bio-composite material. *Case Studies in Construction Materials*. 2017, 6, 177-191. ISSN 22145095. Dostupné z: doi:10.1016/j.cscm.2017.02.001

ASHOUR, Taha, Hansjörg WIELAND, Heiko GEORG, Franz-Josef BOCKISCH a Wei WU. *The influence of natural reinforcement fibres on insulation values of earth plaster for straw bale buildings*. 2010, 31(10), 4676-4685. ISSN 02613069. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2010.05.026 (a)

ASHOUR, Taha a Wei WU. An experimental study on shrinkage of earth plaster with natural fibres for straw bale buildings. *International Journal of Sustainable Engineering*. 2010, 3(4), 299-304. ISSN 1939-7038. Dostupné z: doi:10.1080/19397038.2010.504379 (b)

ASHOUR, Taha, Heiko GEORG a Wei WU. An experimental investigation on equilibrium moisture content of earth plaster with natural reinforcement fibres for straw bale buildings. *Applied Thermal Engineering*. 2011, 31(2-3), 293-303. ISSN 13594311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2010.09.009

AUBERT, J.E. a M. GASC-BARBIER. Hardening of clayey soil blocks during freezing and thawing cycles. *Applied Clay Science*. 2012, 65-66, 1-5. ISSN 01691317. Dostupné z: doi:10.1016/j.clay.2012.04.014

BAMOGO, Halidou, Moussa OUEDRAOGO, Issiaka SANOU, Kouka Amed Jérémy OUEDRAOGO, Kalifala DAO, Jean-Emmanuel AUBERT a Younoussa MILLOGO. Improvement of water resistance and thermal comfort of earth renders by cow dung: an ancestral practice of Burkina Faso. *Journal of Cultural Heritage*. 2020, 46, 42-51. ISSN 12962074. Dostupné z: doi:10.1016/j.culher.2020.04.009

BARTÁK, Kamil. *Fasády a jejich rekonstrukce*. Praha: Grada, 1996. ISBN 80-716-9358-8.

BLASCHKE, Kim Kristin; SCHWICKERT, Susanne a KOB, Malte. Schallabsorptionseigenschaften von Lehmoberflächen. Online. *Bauphysik*.

- 2023, roč. 45, č. 6, s. 289-296. ISSN 0171-5445. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/bapi.202300018>. [cit. 2024-03-10].
- BOUHICHA, M., F. AOUISSI a S. KENAI. Performance of composite soil reinforced with barley straw. *Cement and Concrete Composites*. 2005, 27(5), 617-621. ISSN 09589465. Dostupné z: [doi:10.1016/j.cemconcomp.2004.09.013](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.013)
- DARLING, Erin K., Clement J. CROS, Pawel WARGOCKI, Jakub KOLARIK, Glenn C. MORRISON a Richard L. CORSI. Impacts of a clay plaster on indoor air quality assessed using chemical and sensory measurements. *Building and Environment*. 2012, 57, 370-376. ISSN 03601323. Dostupné z: [doi:10.1016/j.buildenv.2012.06.004](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.06.004)
- DELINIÈRE, R., J.E. AUBERT, F. ROJAT a M. GASC-BARBIER. Physical, mineralogical and mechanical characterization of ready-mixed clay plaster. *Building and Environment*. 2014, 80, 11-17. ISSN 03601323. Dostupné z: [doi:10.1016/j.buildenv.2014.05.012](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.05.012)
- DIVIŠ, Jakub. *Sorption properties of clay materials*. Praha, 2021. Disertační práce. Fakulta stavební, ČVUT v Praze. Vedoucí práce Prof. Ing. Petr Hájek, CSc., FEng.
- EIRES, R., A. CAMÕES a S. JALALI. Earth architecture: ancient and new methods for durability improvement. *Structures and Architecture: Concepts, Applications and Challenges*. London: Taylor & Francis Group, 2013, 2013, 962-970. ISBN: 978-0-415-66195-9.
- EIRES, Rute, Aires CAMÕES a Said JALALI. Ancient Materials and Techniques to Improve the Earthen Building Durability. *Key Engineering Materials*. 2014, 634, 357-366. ISSN 1662-9795. Dostupné z: [doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.634.357](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.634.357)
- EIRES, Rute, Aires CAMÕES a Said JALALI. Enhancing water resistance of earthen buildings with quicklime and oil. In: *Journal of Cleaner Production*. 2017, s. 3281-3292. ISSN 09596526. Dostupné z: [doi:10.1016/j.jclepro.2016.10.141](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.141)
- EMIROĞLU, Mehmet, Ahmet YALAMA a Yasemin ERDOĞDU. Performance of ready-mixed clay plasters produced with different clay/sand ratios. *Applied Clay Science*. 2015, 115, 221-229. ISSN 01691317. Dostupné z: [doi:10.1016/j.clay.2015.08.005](https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.08.005)

- EVARD, Arnaud. *Thermal inertia and moisture regulation of straw bale buildings with earth plasters*. PLEA 2013 - 29th Conference, Sustainable Architecture for a Renewable Future, Munich, Germany, 2013.
- FERNANDES, Jorge, Marco PEIXOTO, Ricardo MATEUS a Helena GERVÁSIO. Life cycle analysis of environmental impacts of earthen materials in the Portuguese context: Rammed earth and compressed earth blocks. *Journal of Cleaner Production*. 2019, 241. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2019.118286
- FRANK, Hamer a Hamer JANET. *The Potter's Dictionary of Materials and Techniques*. Fifth edition. London: A & C Black Publishers, 2004. ISBN 0-7136-6408-8.
- GARCÍA-VERA, Victoria E. a Marcos LANZÓN. Physical-chemical study, characterisation and use of image analysis to assess the durability of earthen plasters exposed to rain water and acid rain. In: *Construction and Building Materials*. 2018, s. 708-717. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.07.235
- GARCÍA-VERA, Victoria E., Antonio J. TENZA-ABRIL a Marcos LANZÓN. The effectiveness of ethyl silicate as consolidating and protective coating to extend the durability of earthen plasters. *Construction and Building Materials*. 2020, 236. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117445
- GHAVAMI, Khosrow, Romildo D. TOLEDO FILHO a Normando P. BARBOSA. Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres. *Cement and Concrete Composites*. 1999, 21(1), 39-48. ISSN 09589465. Dostupné z: doi:10.1016/S0958-9465(98)00033-X
- GOMES, Maria Idália, Paulina FARIA a Teresa Diaz GONÇALVES. Earth-based mortars for repair and protection of rammed earth walls. Stabilization with mineral binders and fibers. *Journal of Cleaner Production*. 2018, 172, 2401-2414. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2017.11.170
- GOODHEW, Steven a Richard GRIFFITHS. Sustainable earth walls to meet the building regulations. *Energy and Buildings*. 2005, 37(5), 451-459. ISSN 03787788. Dostupné z: doi:10.1016/j.enbuild.2004.08.005
- HALL, Matthew R. Assessing the environmental performance of stabilised rammed earth walls using a climatic simulation chamber. *Building and Environment*. 2007, 42(1), 139-145. ISSN 03601323. Dostupné z: doi:10.1016/j.buildenv.2005.08.017

- HAMARD, Erwan, Jean-Claude MOREL, Fernanda SALGADO, Alain MARCOM a Nicolas MEUNIER. A procedure to assess the suitability of plaster to protect vernacular earthen architecture. *Journal of Cultural Heritage*. 2013, 14(2), 109-115. ISSN 12962074. Dostupné z: doi:10.1016/j.culher.2012.04.005
- HAVLÍČEK, Vlastimil a Karel SOUČEK. *Stavby z nepálené hlíny*. Praha: Státní zemědělské nakladatelství, 1958.
- HEATHCOTE, K.A. Durability of earthwall buildings. *Construction and Building Materials*. 1995, 9(3), 185-189. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/0950-0618(95)00035-E
- HOŠEK, Jiří a Ludvík LOSOS. *Historické omítky: průzkumy, sanace, typologie*. Praha: Grada, 2007. Stavitel. ISBN 978-80-247-1395-3.
- HOUBEN, Hugo a Hubert GUILLAUD. *Earth Construction: A comprehensive guide*. Rugby: Practical Action Publishing, 1994. ISBN 978-1-85339-193-4.
- HUDEC, Mojmír, Blanka JOHANISOVÁ a Tomáš MANSBART. *Pasivní domy z přírodních materiálů*. Praha: Grada, 2013, 157 s. ISBN 978-80-247-4243-4.
- CHRISTOFOROU, Elias, Angeliki KYLILI, Paris A. FOKAIDES a Ioannis IOANNOU. Cradle to site Life Cycle Assessment (LCA) of adobe bricks. *Journal of Cleaner Production*. 2016, 112, 443-452. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2015.09.016
- CHYBÍK, Josef. *Přírodní stavební materiály*. Praha: Grada Publishing, 2009, 268 s. ISBN 978-80-247-2532-1.
- KOTLÍK, Petr. *Stavební materiály historických objektů: materiály, koroze, sanace*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 1999. ISBN 80-708-0347-9.
- KUTÍLEK, Miroslav. *Vlhkost pórovitých materiálů*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1984.
- KÜNZEL, Hartwig M. *Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components: One- and two-dimensional calculation using simple parameters*. Stuttgart, 1995. PhD Thesis. Fraunhofer Institute of Building Physics. Vedoucí práce Karl Gertis.
- LAGOUIN, M, A LABOREL-PRÉNERON, C MAGNIONT a J-E AUBERT. Development of a high clay content earth plaster. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019, 660(1). ISSN 1757-8981. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/660/1/012068

- LANZÓN, Marcos, Encarnación MARTÍNEZ, María MESTRE a Juan Antonio MADRID. Use of zinc stearate to produce highly-hydrophobic adobe materials with extended durability to water and acid-rain. *Construction and Building Materials*. 2017, 139, 114-122. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.02.055
- LAWRENCE, Mike, Andrew HEATH a Pete WALKER. Determining moisture levels in straw bale construction. *Construction and Building Materials*. 2009, 23(8), 2763-2768. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.03.011
- LEGUT, Dana. *Zakládání na objemově nestálých zeminách*. Brno, 2014. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Vedoucí práce Doc. Ing. Antonín Paseka, CSc.
- LEITEN, K, H SIRELPUU a M KIVISTE. Desalination using clay and lime sacrificial plasters with additives on field stone wall and fired clay bricks. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021, 2069(1). ISSN 1742-6588. Dostupné z: doi:10.1088/1742-6596/2069/1/012087
- LIMA, José a Paulina FARIA. Eco-Efficient Earthen Plasters: The Influence of the Addition of Natural Fibers. *Natural Fibres: Advances in Science and Technology Towards Industrial Applications*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2016, 2016-02-11, , 315-327. RILEM Bookseries. ISBN 978-94-017-7513-7. Dostupné z: doi:10.1007/978-94-017-7515-1_24
- LIMA, José, Paulina FARIA a António SANTOS SILVA. Earth Plasters: The Influence of Clay Mineralogy in the Plasters' Properties. *International Journal of Architectural Heritage*. 2020, 14(7), 948-963. ISSN 1558-3058. Dostupné z: doi:10.1080/15583058.2020.1727064
- LIUZZI, S., M.R. HALL, P. STEFANIZZI a S.P. CASEY. Hygrothermal behaviour and relative humidity buffering of unfired and hydrated lime-stabilised clay composites in a Mediterranean climate. *Building and Environment*. 2013, 61, 82-92. ISSN 03601323. Dostupné z: doi:10.1016/j.buildenv.2012.12.006
- LIUZZI, Stefania, Chiara RUBINO, Pietro STEFANIZZI, Andrea PETRELLA, Adriano BOGHETICH, Caterina CASAVOLA a Giovanni PAPPALETTERA. Hygrothermal properties of clayey plasters with olive fibers. In: *Construction and Building Materials*. 2018, s. 24-32. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.10.013

- MADDISON, Martin, Tõnu MAURING, Kalle KIRSIMÄE a Ülo MANDER. The humidity buffer capacity of clay–sand plaster filled with phytomass from treatment wetlands. *Building and Environment*. 2009, 44(9), 1864-1868. ISSN 03601323. Dostupné z: doi:10.1016/j.buildenv.2008.12.008
- MASKELL, Daniel, Andrew THOMSON, Pete WALKER a Manfred LEMKE. Determination of optimal plaster thickness for moisture buffering of indoor air. *Building and Environment*. 2018, 130, 143-150. ISSN 03601323. Dostupné z: doi:10.1016/j.buildenv.2017.11.045
- MARTÍNEZ-CAMACHO, Fernanda, Javier VAZQUEZ-NEGRETE, Enrique LIMA, Victor Hugo LARA a Pedro BOSCH. Texture of nopal treated adobe: restoring Nuestra Señora del Pilar mission. *Journal of Archaeological Science*. 2008, 35(5), 1125-1133. ISSN 03054403. Dostupné z: doi:10.1016/j.jas.2007.10.019
- MÁRTON, Jan. *Stavby ze slaměných balíků: slaměné izolace v nízkoenergetických a pasivních domech, návrh staveb šetrných k životnímu prostředí, hliněné omítky, ozeleněné střechy. 2., dopl. a aktualiz.* vyd. Liberec: J. Márton, 2014, 228 s. ISBN 978-80-260-5713-0.
- MATTONE, Roberto. Sisal fibre reinforced soil with cement or cactus pulp in bahareque technique. *Cement and Concrete Composites*. 2005, 27(5), 611-616. ISSN 09589465. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconcomp.2004.09.016
- MAUFFRÉ, T., E. KEITA, E. CONTRAIRES, F. MCGREGOR a A. FABBRI. Analysis of water droplet penetration in earth plasters using X-ray microtomography. *Construction and Building Materials*. 2021, 283. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.122651
- MCGREGOR, Fionn, Antonin FABBRI, João FERREIRA, Tania SIMÕES, Paulina FARIA a Jean-Claude MOREL. Procedure to determine the impact of the surface film resistance on the hygric properties of composite clay/fibre plasters. *Materials and Structures*. 2017, 50(4). ISSN 1359-5997. Dostupné z: doi:10.1617/s11527-017-1061-3
- MELIÀ, Paco, Gianluca RUGGIERI, Sergio SABBADINI a Giovanni DOTELLI. Environmental impacts of natural and conventional building materials: a case study on earth plasters. *Journal of Cleaner Production*. 2014, 80, 179-186. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2014.05.073
- MILLOGO, Younoussa, Jean-Emmanuel AUBERT, Ahmed Douani SÉRÉ, Antonin FABBRI a Jean-Claude MOREL. Earth blocks stabilized by cow-

- dung. *Materials and Structures*. 2016, 49(11), 4583-4594. ISSN 1359-5997. Dostupné z: doi:10.1617/s11527-016-0808-6
- MILLOGO, Younoussa, Jean-Claude MOREL, Jean-Emmanuel AUBERT a Khosrow GHAVAMI. Experimental analysis of Pressed Adobe Blocks reinforced with Hibiscus cannabinus fibers. *Construction and Building Materials*. 2014, 52, 71-78. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.10.094
- MINKE, Gernot. *Příručka hliněného stavitelství: materiály - technologie - architektura*. Bratislava: Pagoda, c2009, 287 s. ISBN 978-80-969698-2-1.
- MINKE, Gernot. Shrinkage, abrasion, erosion and sorption of clay plasters. In: *Informes de la Construcción*. 2011, s. 153-158. ISSN 0020-0883. e-ISSN: 1988-3234. Dostupné z: doi:10.3989/ic.10.020
- MOREL, J.C, A MESBAH, M OGGERO a P WALKER. Building houses with local materials: means to drastically reduce the environmental impact of construction. *Building and Environment*. 2001, 36(10), 1119-1126. ISSN 03601323. Dostupné z: doi:10.1016/S0360-1323(00)00054-8
- NOVOTNÝ, Martin. *Hliněné stavitelství na Moravě a evropské souvislosti: kritický katalog k výstavě*. Strážnice: Národní ústav lidové kultury, 2014. ISBN 978-80-87261-97-2.
- OBONYO, Esther, Joseph EXELBIRT a Malarvizhi BASKARAN. Durability of Compressed Earth Bricks: Assessing Erosion Resistance Using the Modified Spray Testing. *Sustainability*. 2010, 2(12), 3639-3649. ISSN 2071-1050. Dostupné z: doi:10.3390/su2123639
- OGUNYE, F.O. a H. BOUSSABAINÉ. Development of a rainfall test rig as an aid in soil block weathering assessment. *Construction and Building Materials*. 2002, 16(3), 173-180. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/S0950-0618(02)00010-7; **(a)**
- OGUNYE, F.O. a H. BOUSSABAINÉ. Diagnosis of assessment methods for weatherability of stabilised compressed soil blocks. *Construction and Building Materials*. 2002, 16(3), 163-172. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/S0950-0618(02)00004-1; **(b)**
- PACHECO-TORGAL, F. a Said JALALI. Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction. *Construction and Building Materials*. 2012, 29, 512-519. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.10.054

- PALUMBO, M., F. MCGREGOR, A. HEATH a P. WALKER. The influence of two crop by-products on the hygrothermal properties of earth plasters. *Building and Environment*. 2016, 105, 245-252. ISSN 03601323. Dostupné z: doi:10.1016/j.buildenv.2016.06.004
- PARRACHA, J.L., A.S. PEREIRA, R. VELEZ DA SILVA, V. SILVA a P. FARIA. Effect of innovative bioproducts on the performance of bioformulated earthen plasters. *Construction and Building Materials*. 2021, 277. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.122261
- PEDERGNANA, Matthieu a Soofia Tahira ELIAS-OZKAN. Impact of various sands and fibres on the physical and mechanical properties of earth mortars for plasters and renders. *Construction and Building Materials*. 2021, 308. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.125013
- PETRÁNEK, Jan, Jiří BŘEZINA, Eva BŘÍZOVÁ, Jan CHÁB, Jan LOUN a Přemysl ZELENKA. *Encyklopedie geologie*. Praha: Česká geologická služba, 2016. ISBN 978-80-7075-901-1.
- RANDAZZO, L., G. MONTANA, A. HEIN, A. CASTIGLIA, G. RODONÒ a D.I. DONATO. Moisture absorption, thermal conductivity and noise mitigation of clay based plasters: The influence of mineralogical and textural characteristics. *Applied Clay Science*. 2016, 132-133, 498-507. ISSN 01691317. Dostupné z: doi:10.1016/j.clay.2016.07.021
- RICHTER, Jan, Kamil STANĚK, Jan RŮŽIČKA a Filip HAVLÍK. Sorpční vlastnosti dusaných hliněných směsí. *Stavební obzor*. Praha: České vysoké učení technické Fakulta stavební, 2014, 2014(5-6), 105-109. ISSN 1805-2576.
- ROVNANÍKOVÁ, Pavla. *Omítky: chemické a technologické vlastnosti*. Praha: Společnost pro technologie ochrany památek - Stop, 2002. ISBN 80-866-5700-0.
- SANTOS, Tânia, Paulina FARIA a António Santos SILVA. In situ evaluation of the behaviour of earth-based mortar renders with low additions of limes. *Conservar Património*. 2017, 26, 11-21. ISSN 1646043X. Dostupné z: doi:10.14568/cp2016022
- SANTOS, Tânia, Paulina FARIA a Vítor SILVA. Can an earth plaster be efficient when applied on different masonries? *Journal of Building Engineering*. 2019, 23, 314-323. ISSN 23527102. Dostupné z: doi:10.1016/j.job.2019.02.011

- STAZI, Francesca, Andrea NACCI, Francesca TITTARELLI, Erio PASQUALINI a Placido MUNAFÒ. An experimental study on earth plasters for earthen building protection: The effects of different admixtures and surface treatments. In: *Journal of Cultural Heritage*. 2016, s. 27-41. ISSN 12962074. Dostupné z: doi:10.1016/j.culher.2015.07.009
- SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty*. 3. elektronické. Praha: Luboš Svoboda, 2013. ISBN 978-80-260-4972-2.
- ŠKABRADA, Jiří. *Konstrukce historických staveb*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-010-2071-1.
- THOMSON, A., D. MASKELL, P. WALKER, M. LEMKE, A. SHEA a M. LAWRENCE. Improving the hygrothermal properties of clay plasters. In: *15th International Conference on Non-conventional Materials and Technologies (NOCMAT 2015)*. Winnipeg, Canada, 2015.
- UZOEGBO, H.C. Dry-stack and compressed stabilized earth-block construction. *Nonconventional and Vernacular Construction Materials*. Elsevier, 2020, 2020, , 305-350. ISBN 9780081027042. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-102704-2.00012-3
- VANDEVOORDE, Delphine, Veerle CNUUDE, Jan DEWANCKELE, Loes BRABANT, Michael DE BOUW, Vera MEYNEN a Eddy VERHAEVEN. Validation of in situ Applicable Measuring Techniques for Analysis of the Water Adsorption by Stone. In: *Procedia Chemistry*. 2013, s. 317-327. ISBN 1876-6196. ISSN 18766196. Dostupné z: doi:10.1016/j.proche.2013.03.039
- VARES, Olgerd, Aime RUUS, Jane RAAMETS a Ernst TUNGEL. Determination of hygrothermal performance of clay-sand plaster: influence of covering on sorption and water vapour permeability. *Energy Procedia*. 2017, 132, 267-272. ISSN 18766102. Dostupné z: doi:10.1016/j.egypro.2017.09.719
- VENKATARAMA REDDY, B.V. a K.S. JAGADISH. Spray erosion studies on pressed soil blocks. *Building and Environment*. 1987, 22(2), 135-140. ISSN 03601323. Dostupné z: doi:10.1016/0360-1323(87)90033-3
- VENKATARAMA REDDY, B.V. a P. PRASANNA KUMAR. Embodied energy in cement stabilised rammed earth walls. *Energy and Buildings*. 2010, 42(3), 380-385. ISSN 03787788. Dostupné z: doi:10.1016/j.enbuild.2009.10.005
- VOTH, Berthold. *Boden, Baugrund und Baustoff: Bautechnische Eigenschaften und Kenngrößen*. Weisbaden, Berlin: Bauverlag, 1978. ISBN 3-7625-0940-9.

WALKER, Peter. *The Australian earth building handbook: HB 195*. Sydney: Standards Australia International, 2001. ISBN 0 7337 4000 6.

ŽABIČKOVÁ, Ivana. *Hliněné stavby*. Brno: ERA, 2002, 174 s. ISBN 80-865-1721-7.

I.2 Ostatní zdroje

BROTÁNEK, Aleš a Ekodům, o.s. Stavění ze slámy a jílu - staronová technologie. In: *Jíly pro památky v praxi*. Praha: Společnost pro technologie ochrany památek, 2001, s. 4-10.

CICEK, Burhan, Natalia Pires MARTINS, Coralie BRUMAUD, Guillaume HABERT a Michael PLÖTZE. A revisited vernacular stabilization technique for a durable earth mix. In: *LEHM 2020 – International Conference on Building with Earth*. Weimar: Dachverband Lehm e.V, 2020. Dostupné také z: <https://www.dachverband-lehm.de/lehm2020/online>

ČSN EN 1015-11. *Zkušební metody malt pro zdivo - Část 11: Stanovení pevnosti zatvrdlých malt v tahu za ohybu a v tlaku*. ČAS, 2020.

ČSN EN 1015-18. *Zkušební metody malt pro zdivo - Část 18: Stanovení koeficientu kapilární absorpce vody v zatvrdlé maltě*. ÚNMZ, 2003.

ČSN EN 1015-3. *Zkušební metody malt pro zdivo - Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím strásacího stolku)*. ÚNMZ, 2000.

ČSN EN 15026. *Hodnocení šíření vlhkosti stavebními dílci pomocí numerické simulace*. ÚNMZ, 2007.

ČSN EN ISO 12571. *Tepelně vlhkostní chování stavebních materiálů a výrobků – Stanovení hydrokopických sorpčních vlastností*. ČAS, 2022.

ČSN EN ISO 12572. *Tepelně vlhkostní chování stavebních materiálů a výrobků – Stanovení vlastností prostupu vodní páry – Misková metoda*. ÚNMZ, 2018.

ČSN EN ISO 13788. *Tepelně vlhkostní vlastnosti stavebních prvků a stavebních konstrukcí - Vnitřní povrchová teplota bránící povrchové kondenzaci uvnitř konstrukce*. ÚNMZ, 2002.

ČSN EN ISO 14040. *Environmentální management - Posuzování životního cyklu - Zásady a osnova*. ÚNMZ, 2006.

ČSN EN ISO 14044. *Environmentální management - Posuzování životního cyklu - Požadavky a směrnice*. ÚNMZ, 2006.

- ČSN EN ISO 15927-4. *Tepelně vlhkostní chování budov - Výpočet a uvádění klimatických dat - Část 4: Hodinová data pro posuzování roční energetické potřeby pro vytápění a chlazení*. ÚNMZ, 2011.
- DANIELEWICZ, Ireneusz, Cornelia FITZ, Wolfgang HOFBAUER, et al. *Grundlagen zur bauaufsichtlichen Anerkennung der Strohballenbauweise- Weiterentwicklung der lasttragenden Konstruktionsart und Optimierung der bauphysikalischen Performance* [online]. Sieben Linden: Fachverband Strohballenbau Deutschland e.V., 2008 [cit. 2022-11-02]. Dostupné z: www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-22430.pdf
- DE COOMAN, Ken. Down to earth: BC materials transforms urban excavated earth into building materials. In: LEHM 2020 – International Conference on Building with Earth. Weimar: Dachverband Lehm e.V, 2020. Dostupné také z: <https://www.dachverband-lehm.de/lehm2020/online>
- DIN 18942-1. *Lehmbaustoffe und Lehmbauprodukte: Teil 1: Begriffe*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2018.
- DIN 18942-100. *Lehmbaustoffe und Lehmbauprodukte: Teil 100: Konformitätsnachweis*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2018.
- DIN 18945. *Lehmsteine: Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2018.
- DIN 18946. *Lehmmauermörtel: Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2018.
- DIN 18947. *Lehmputzmörtel: Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2018.
- DIN 18948. *Lehmplatten: Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2018.
- DIN 4108-4. *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden: Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2007.
- DU, Yi, Coralie BRUMAUD a Guillaume HABERT. Effect of oak tannin and iron chloride on the rheological properties of clay pastes. In: LEHM 2020 – International Conference on Building with Earth. Weimar: Dachverband Lehm e.V, 2020. Dostupné také z: <https://www.dachverband-lehm.de/lehm2020/online>

- KLINGE, Andrea, Eike ROSWAG-KLINGE, Leon RADÉLJIC, Daniela BOJIC a Eve NEUMANN. Earthen building materials as an opportunity to reduce mineral construction and demolition waste (CDW). In: LEHM 2020 – International Conference on Building with Earth. Weimar: Dachverband Lehm e.V, 2020. Dostupné také z: <https://www.dachverband-lehm.de/lehm2020/online>
- KŘÍŽ, Jan. Analýza materiálů historických konstrukcí z nepálené hlíny a technologické souvislosti. In: *Jíly v tradičním stavitelství*. Praha: Společnost pro technologie ochrany památek, 2001, s. 38-50. **(a)**
- KŘÍŽ, Jan. Tepelně technické a vlhkostní souvislosti staveb z nepálené hlíny. In: *Jíly pro památky v praxi*. Praha: Společnost pro technologie ochrany památek, 2001, s. 11-23. **(b)**
- MADAJ, Miroslav Martin a Ivo SVOBODA. *Zednictví a hliněné omítky v podstávkových domech: příručka k projektu Kvalitní řemeslnická práce při obnově podstávkových domů*. Frýdlant: Frýdlantsko, z.s. a MAS Frýdlantsko, 2015. Dostupné také z: <https://adoc.pub/queue/kvalitni-emeslnicka-prace-pi-obnov-podstavkovych-dom-zednict.html>
- NZS 4297. *Engineering design of earth buildings*. Wellington: Standards New Zealand, 2020.
- NZS 4298. *Materials and construction for earth buildings*. Wellington: Standards New Zealand, 2020.
- NZS 4299. *Earth buildings not requiring specific engineering design*. Wellington: Standards New Zealand, 2020.
- PACHAMAMA, Raphael Vasconcelos, Marco Antônio Penido DE REZENDE a Paulina FARIA. Evaluating the physical and mechanical properties of earth plasters with cow dung – a vernacular solution for earth building in Brazil. In: LEHM 2020 – International Conference on Building with Earth. Weimar: Dachverband Lehm e.V, 2020. Dostupné také z: <https://www.dachverband-lehm.de/lehm2020/online>
- PAUL, Rosie a Sridevi CHANGALI. A study of the use of natural biopolymers in traditional earthen dwellings in Kerala, India. In: LEHM 2020 – International Conference on Building with Earth. Weimar: Dachverband Lehm e.V, 2020. Dostupné také z: <https://www.dachverband-lehm.de/lehm2020/online>
- ROCHER, Sylvain, Aljona YUFFA a Christof ZIEGERT. Earth plaster as a means of salt reduction in historical brick and natural stone masonry – Principles, mechanisms and experience. In: *LEHM 2020 – International*

Conference on Building with Earth. Weimar: Dachverband Lehm e.V, 2020.
Dostupné také z: <https://www.dachverband-lehm.de/lehm2020/online>

SDRUŽENÍ HLINĚNÉHO STAVITELSTVÍ, Z.S. *Výukový text certifikovaného kurzu hliněných omítek "Poznej hlínu": kurz U2 - aplikace hliněných omítek*. 2015.

SCHROEDER, Horst a Manfred LEMKE. The ecological life cycle assessment of earth building materials. In: LEHM 2020 – International Conference on Building with Earth. Weimar: Dachverband Lehm e.V, 2020. Dostupné také z: <https://www.dachverband-lehm.de/lehm2020/online>

Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2010/31/EU ze dne 19. května 2010 o energetické náročnosti budov (přepracované znění). In: . Štrasburk: Evropský parlament, Rada Evropské unie, 2010. Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=CELEX:32010L0031>

SYROVÁ, Zuzana. Historické konstrukce z nepálené hlíny v ČR. In: *Jíly v tradičním stavitelství*. Praha: Společnost pro technologie ochrany památek, 2001, s. 21-37.

ZIEGERT, Christof, Ulrich RÖHLEN a Horst SCHROEDER. The success story of earth building standards in Germany. In: LEHM 2020 – International Conference on Building with Earth. Weimar: Dachverband Lehm e.V, 2020. Dostupné také z: <https://www.dachverband-lehm.de/lehm2020/online>

I.3 WWW zdroje

BC Materials, 2021: *BC MATERIALS: FROM EARTH TO BUILDING MATERIALS* [online]. [cit. 2021-04-20]. Dostupné z: <https://bcmaterials.org/>

Cycle Terre, 2021: *Cycle Terre* [online]. [cit. 2021-04-20]. Dostupné z: <https://www.cycle-terre.eu/>

Envimat, 2021: *Envimat.cz - katalog fyzikálních a environmentálních profilů stavebních konstrukcí* [online]. [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <http://www.envimat.cz/>

Meteostanice, 2023: *Meteostanice WH 1080* [online]. [cit. 2023-02-21]. Dostupné z: www.conrad.cz

MŽP, 2021: *Ministerstvo životního prostředí: Stavební a demoliční odpady* [online]. [cit. 2021-04-20]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/stavebni_demolicni_odpady

Picas, 2023: ŽABIČKOVÁ, Ivana a Michal NAVRÁTIL. Hliněná fasáda: Hliněné omítky ve venkovním prostředí. *Www.picas.cz* [online]. [cit. 2023-02-22]. Dostupné z: <https://www.picas.cz/venkovni-hlinene-omitky>

WUFI, 2022: *WUFI Pro* [online]. 2010, 2013 [cit. 2022-11-02]. Dostupné z: http://wufi.cz/wufi_pro/

J. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

EU	Evropská unie
EP	Evropský parlament
FEB	Forschungslabor für Experimentelles Bauen (výzkumná laboratoř pro experimentální stavitelství)
LCA	Life-Cycle Assessment
SiO ₂	Oxid křemičitý
SHS	Sdružení hliněného stavitelství
a	Součinitel teplotní vodivosti
α_w	Činitel pohltivosti zvuku
ρ	Objemová hmotnost
λ	Součinitel tepelné vodivosti,
μ	Faktor difuzního odporu

K. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 – Počty článků zabývajících se výzkumem hliněných omítek v databázi ScienceDirect za posledních 20 let	10
Obr. 2 - Vzorčky různých druhů jílu nanesených za mokra na list papíru, stav po vyschnutí (archiv autora).....	16
Obr. 3 – Provedení hran hliněných omítek na ostěních a nárožích domu v areálu střediska ekologické výchovy Kaprálův mlýn (archiv autora).....	23
Obr. 4 – Detail provedení zaobleného ostění okna v RD autora v Brně-Kníničkách (archiv autora).....	23
Obr. 5 – Sorpční křivky vzorků materiálu o tloušťce 15 mm při teplotě 21°C a nárůstu vlhkosti vzduchu v místnosti z 50 % na 80 % v závislosti na čase (autor s využitím Minke, 2009).....	25
Obr. 6 – Hodnoty faktoru difuzního odporu (μ) hliněných materiálů: A - (Minke, 2009), B – (Eires, 2017), C - (Stazi, 2016)	27
Obr. 7 – Míra otěru stabilizovaných hliněných omítek, měření provedeno pomocí metody vyvinuté v laboratoři FEB na Univerzitě v Kasselu (autor s využitím Minke, 2011)	28
Obr. 8 – Grafické znázornění začátku dešťové eroze hydrofobizovaných hliněných omítek měřeného pomocí metody vyvinuté v laboratoři FEB (autor s využitím Minke, 2011).....	29
Obr. 9 – Graf srovnání hliněných, sádrových a vápenocementových omítek z hlediska dopadů na životní prostředí, data použita z databáze Envimat (autor s využitím Envimat, 2021).....	35
Obr. 10 – Graf srovnání vlivu technologie výroby průmyslově vyráběných hliněných omítek z hlediska dopadů na životní prostředí (autor s využitím Schroeder, 2020)	36
Obr. 11 – Průmyslově vyráběné hliněné omítky dostupné na českém trhu (autor)	39
Obr. 12 - Strojové omítání slaměného rodinného domu v Ludvíkově.....	43
Obr. 13 - Aplikace hliněných omítek na zkušební stěnu v rámci projektu Noc vědců 2019 na fakultě stavební VUT v Brně (archiv Karla Struhaly).....	43
Obr. 14 – Šedé tečky, které vznikly na povrchu vzorku se 4 % ricinového oleje po dlouhodobém vystavení povětrnostním vlivům – stav po 15 měsících (archiv autora).....	57
Obr. 15 – Bílý povlak, který vznikl při vysychání zkušebních trámečků s 8 % kaseinu (archiv autora).....	57

Obr. 16 – Plíseň, která vznikla po vystavení vzorků se 4 % kaseinu extrémním vlhkostním podmínkám v klimatické komoře (archiv autora)	57
Obr. 17 – Výroba zkušebních trámečků pro laboratorní měření v silikonových formách (archiv autora).....	59
Obr. 18 – Měření pevnosti v tahu za ohybu (archiv autora)	60
Obr. 19 – Měření pevnosti v tlaku (archiv autora)	60
Obr. 20 – Měření kapilární absorpce vody: vkládání zkušebních trámečků do vody (archiv autora).....	62
Obr. 21 – Upevnění filtračního papíru na spodní straně zkušebního trámečku pomocí vosku pro účely zkoušky kapilární absorpce vody (archiv autora)	62
Obr. 22 – Schéma (řez) modifikovaného zkušebního postupu dle doporučení laboratoře FEB (Minke, 2009) pro určení koeficientu kapilární absorpce vody	62
Obr. 23 – Výroba zkušebních vzorků pro měření odolnosti proti dešťové erozi zkouškou postřikem (archiv autora)	64
Obr. 24 - Schéma měřicí aparatury pro měření odolnosti proti dešťové erozi (zkouška postřikem).....	64
Obr. 25 – Měření odolnosti proti dešťové erozi – zkouška postřikem (archiv autora) ...	65
Obr. 26 – Výroba zkušebních vzorků pro měření difuze vodní páry: nalévání čerstvé směsi do forem	66
Obr. 27 – Měření difuze vodní páry: ukládání vzorků do klimatické komory (archiv autora)	66
Obr. 28 – Schéma zkušebního tělesa určeného pro měření difuze vodní páry	66
Obr. 29 – Měření hygroskopické sorpce v klimatické komoře (archiv autora)	67
Obr. 30 – Výroba panelů pro zkoušení odolnosti proti povětrnostním vlivům: výroba dřevěné konstrukce a aplikace rákosové rohože (archiv autora).....	69
Obr. 31 – Osazení zkušebních panelů s hliněnými omítkami na pozemek v Brně – Kníničkách pro měření odolnosti proti povětrnostním vlivům (archiv autora)	69
Obr. 32 –Skladba S1	70
Obr. 33 – Skladba S2	70
Obr. 34 – Slámohlinitý kompozit, který byl naočkován suspenzí spor hub a následně vystaven zátěžovým podmínkám v inkubační komoře (teplota 25°C, relativní vlhkost 95 %, 100 dní) (Danielewicz, 2008).....	71
Obr. 35 – Vzorek pšeničné slámy vystavený vlhkosti 98 % po dobu, než došlo k jeho nasycení – objemové zvětšení, počínající hniloba a vytvoření plísně na povrchu (Lawrence, 2009).....	71

Obr. 36 – Graf závislosti pevnosti v tlaku a tahu za ohybu na koncentraci ricinového oleje přidaného do omítkové směsi PICAS (medián, n = 10).....	75
Obr. 37 – Graf závislosti pevnosti v tlaku a tahu za ohybu na koncentraci ricinového oleje přidaného do omítkové směsi CEMIX (medián, n = 10).....	75
Obr. 38 – Graf závislosti pevnosti v tlaku a tahu za ohybu na koncentraci kaseinu přidaného do omítkové směsi PICAS (medián, n = 10).....	76
Obr. 39 – Graf závislosti pevnosti v tlaku a tahu za ohybu na koncentraci kaseinu přidaného do omítkové směsi CEMIX (medián, n = 10).....	77
Obr. 40 – Graf závislosti koeficientu kapilární absorpce vody (dle ČSN EN 1015-18) na koncentraci ricinového oleje přidaného do omítkové směsi PICAS a CEMIX (medián, n = 7).....	78
Obr. 41 – Graf závislosti koeficientu kapilární absorpce vody (dle ČSN EN 1015-18) na koncentraci kaseinu přidaného do omítkové směsi PICAS a CEMIX (medián, n = 7).....	79
Obr. 42 – Hmotnost vody absorbované na jednotku plochy v závislosti na čase pro vzorky PICAS a CEMIX s ricinovým olejem (medián, n = 7).....	80
Obr. 43 – Hmotnost vody absorbované na jednotku plochy v závislosti na čase pro vzorky PICAS a CEMIX s kaseinem (medián, n = 7).....	80
Obr. 44 – Čas do počátku dešťové eroze hliněných omítek PICAS a CEMIX obohacených 0 – 2% ricinového oleje nebo kaseinu po vystavení zkoušce postřikem (průměr, n = 3).....	82
Obr. 45 – Vzorky hliněné omítky PICAS referenční po vystavení zkoušce postřikem (archiv autora).....	83
Obr. 46 – Vzorky hliněné omítky CEMIX referenční po vystavení zkoušce postřikem (archiv autora).....	83
Obr. 47 - Vzorky hliněné omítky PICAS s 0,5 % ricinového oleje po vystavení zkoušce postřikem (archiv autora).....	84
Obr. 48 – Vzorky hliněné omítky CEMIX s 0,5 % ricinového oleje po vystavení zkoušce postřikem (archiv autora).....	84
Obr. 49 – Vzorky hliněné omítky PICAS s 1 % a se 2 % ricinového oleje po vystavení zkoušce postřikem (archiv autora).....	85
Obr. 50 – Vzorky hliněné omítky CEMIX s 1 % a se 2 % ricinového oleje po vystavení zkoušce postřikem (archiv autora).....	85
Obr. 51 – Vzorky hliněné omítky PICAS s 1 % kaseinu po vystavení zkoušce postřikem (archiv autora).....	86

Obr. 52 – Vzorčky hliněné omítky CEMIX s 1 % kaseinu po vystavení zkoušce postřikem (archiv autora).....	86
Obr. 53 – Vzorčky hliněné omítky PICAS se 2 % kaseinu po vystavení zkoušce postřikem (archiv autora)	86
Obr. 54 – Vzorčky hliněné omítky CEMIX se 2 % kaseinu po vystavení zkoušce postřikem (archiv autora)	87
Obr. 55 – Graf závislosti faktoru difuzního odporu na koncentraci ricinového oleje v hliněné omítce PICAS (vlevo) a CEMIX (vpravo) (medián, n = 5).....	88
Obr. 56 – Graf závislosti faktoru difuzního odporu na koncentraci kaseinu v hliněné omítce PICAS (vlevo) a CEMIX (vpravo) (medián, n = 5).....	88
Obr. 57 – Sorpční a desorpční křivky pro hliněné omítky PICAS s ricinovým olejem (medián, n = 6).....	89
Obr. 58 – Sorpční a desorpční křivky pro hliněné omítky CEMIX s ricinovým olejem (medián, n = 6).....	89
Obr. 59 – Sorpční a desorpční křivky pro hliněné omítky PICAS s kaseinem (medián, n = 6).....	90
Obr. 60 – Sorpční a desorpční křivky pro hliněné omítky CEMIX s kaseinem (medián, n = 6).....	90
Obr. 61 – Vzorčky hliněné omítky PICAS s ricinovým olejem po vystavení povětrnostním vlivům (archiv autora).....	92
Obr. 62 – Vzorčky hliněné omítky CEMIX s ricinovým olejem po vystavení povětrnostním vlivům (archiv autora)	93
Obr. 63 – Vzorčky hliněné omítky PICAS s kaseinem po vystavení povětrnostním vlivům (archiv autora).....	94
Obr. 64 – Vzorčky hliněné omítky CEMIX s kaseinem po vystavení povětrnostním vlivům (archiv autora).....	95
Obr. 65 – Zkušební trámečky hliněné omítky PICAS po vyjmutí z formy (archiv autora)	96
Obr. 66 – Zkušební trámečky hliněné omítky CEMIX po vyjmutí z formy (archiv autora)	97
Obr. 67 – Simulace průběhu teploty, relativní vlhkosti a množství vody ve skladbě S1 s hliněnými omítkami PICAS (nahore) a CEMIX (dole) se 2 % ricinového oleje v programu WUFI Pro 5.3 pro den 18.3.2022, 13:00.....	99
Obr. 68 – Simulace průběhu teploty, relativní vlhkosti a množství vody ve skladbě S2 s hliněnými omítkami PICAS (nahore) a CEMIX (dole) se 2 % ricinového oleje v programu WUFI Pro 5.3 pro den 18.3.2022, 13:00.....	100

Obr. 69 – Graf průběhu teploty a relativní vlhkosti v místě rozhraní vnější hrubé omítky a slaměného panelu pro všechny varianty skladeb s omítkou PICAS v období 1.1. až 31.12.2022	101
Obr. 70 – Graf průběhu teploty a relativní vlhkosti v místě rozhraní vnější hrubé omítky a slaměného panelu pro všechny varianty skladeb s omítkou PICAS v období, ve kterém je slaměný panel nejvíce ohrožen (12.3. až 3.4. a 14.10. až 5.11.2022)	102
Obr. 71 – Graf průběhu teploty a relativní vlhkosti v místě rozhraní vnější hrubé omítky a slaměného panelu pro všechny varianty skladeb s omítkou CEMIX v období 1.1. až 31.12.2022	103
Obr. 72 – Graf průběhu teploty a relativní vlhkosti v místě rozhraní vnější hrubé omítky a slaměného panelu pro všechny varianty skladeb s omítkou CEMIX v období, ve kterém je slaměný panel nejvíce ohrožen (13.3. až 30.4. a 13.10. až 6.11.2022)	104
Obr. 73 – Fotografie instalované meteostanice (archiv autora).....	131
Obr. 74 – Meteostanice WH 1080 (Meteostanice, 2023)	131
Obr. 75 – Graf závislosti koeficientu kapilární absorpce vody stanoveném metodou dle ČSN EN 1015-18 na objemové hmotnosti (medián, n = 7)	133
Obr. 76 - Hmotnost vody absorbované na jednotku plochy v závislosti na čase pro vzorky PICAS a CEMIX s ricinovým olejem (detail) (medián, n = 7).....	134
Obr. 77 - Hmotnost vody absorbované na jednotku plochy v závislosti na čase pro vzorky PICAS a CEMIX s kaseinem (detail) (medián, n = 7)	135
Obr. 78 – Graf množství vody ve slaměném panelu Ecococon pro skladby S1 a S2 s referenčními omítkami PICAS a CEMIX v průběhu modelovaného období 1.10.2019 až 31.12.2022	137

L. SEZNAM TABULEK

Tab. 1 – Vývoj prodeje hliněných omítek od roku 2014 u dvou výrobců (PICAS a CEMIX)	10
Tab. 2 - Struktura a srovnání vlastností nejčastěji se vyskytujících jílových minerálů (Autor s využitím Hošek, 2007; Minke, 2009; Houben, 1994).....	15
Tab. 3 – Třídy pevnosti pro hliněné omítky (Autor s využitím DIN 18947, 2018).....	21
Tab. 4 – Součinitele tepelné vodivosti pro hliněné stavební materiály (Autor s využitím DIN 4108-4, 2007, v Minke, 2009)	24
Tab. 5 – Metody stanovení odolnosti povrchu proti dešťové erozi (část a)	31
Tab. 6 – Metody stanovení odolnosti povrchu proti dešťové erozi (část b)	32
Tab. 7 – Známé tradiční přísady živočišného původu zlepšující odolnost proti povětrnostním vlivům	46
Tab. 8 – Známé tradiční přísady rostlinného původu zlepšující odolnost proti povětrnostním vlivům	47
Tab. 9 – Výzkumné práce zabývající se hodnocením hydrofobizačních přísad a nátěrů hliněných omítek.....	48
Tab. 10 – Objemové poměry ricinového oleje přidávané do hliněných omítek (v mokřém stavu)	56
Tab. 11 – Objemové poměry kaseinu přidávané do hliněných omítek (v suchém stavu)	56
Tab. 12 – Okrajové podmínky pro měření difuze vodní páry v klimatické komoře.....	66
Tab. 13 – Okrajové podmínky pro měření hygroskopické sorpce v klimatické komoře	67

M. PŘÍLOHY

M.1 Porovnání parametrů hliněných omítek určených z laboratorních měření a z technických listů od výrobců

Výrobce	Typ produktu	Stanovení hodnot	Objemová hmotnost zatvrdlé malty [kg·m ⁻³]	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	Pevnost v tlaku [MPa]	Faktor difuzního odporu
Picas	Hrubá omítka	Laboratorní měření	1821 (1789 - 1830)*	0,88 (0,83 - 1,02)*	2,85 (2,75 - 2,98)*	-
		Deklarované výrobce	1760	-	1,4	1,3
	Jemná omítka Econom	Laboratorní měření	1715 (1685 - 1735)*	0,93 (0,85 - 1,06)*	2,58 (2,29 - 2,78)*	-
		Deklarované výrobce	1734	-	0,8	3,3
Claygar	HH 04 (Hrubá omítka)	Laboratorní měření	1834 (1819 - 1842)*	0,82 (0,73 - 0,86)*	2,56 (2,39 - 2,78)*	-
		Deklarované výrobce	-	-	1,0	< 10
	HJ 02 (Jemná omítka)	Laboratorní měření	1567 (1541 - 1599)*	0,48 (0,44 - 0,56)*	1,62 (1,41 - 1,80)*	-
		Deklarované výrobce	-	-	1	< 10
MUF-STAV	Hlinomazka hrubá	Laboratorní měření	1831 (1825 - 1840)*	0,71 (0,57 - 0,83)*	2,28 (1,77 - 2,45)*	-
		Deklarované výrobce	-	-	-	-
	Hlinomazka jemná	Laboratorní měření	1857 (1840 - 1878)*	0,99 (0,85 - 1,06)*	3,29 (2,25 - 3,56)*	-
		Deklarované výrobce	-	-	-	-
Maxit	BIA Lehmgrundputz (hrubá omítka)	Laboratorní měření	1880 (1866 - 1912)*	0,44 (0,42 - 0,45)*	1,71 (1,51 - 1,78)*	-
		Deklarované výrobce	< 1300	-	> 1,5	< 8
	BIA Lehmfeinputz (jemná omítka)	Laboratorní měření	1834 (1826 - 1858)*	0,4 (0,32 - 0,46)*	1,4 (1,28 - 1,54)*	-
		Deklarované výrobce	< 1300	-	> 1,5	< 8

* před závorkou je uvedena hodnota mediánu naměřených dat, v závorce je uveden rozsah naměřených hodnot (n = 6)

Výrobce	Typ produktu	Stanovení hodnot	Objemová hmotnost zatvrdlé malty [kg·m ⁻³]	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	Pevnost v tlaku [MPa]	Faktor difuzního odporu
Baunit	Bayosan Viton hliněná omítka hrubá VL 14 G	Laboratorní měření	1821 (1789 - 1831)*	0,13 (0,11 - 0,15)*	1,06 (0,95 - 1,09)*	-
		Deklarované výrobce	-	-	1,0	< 10
	Bayosan Viton hliněná omítka jemná VL 14 C	Laboratorní měření	1787 (1772 - 1797)*	0,18 (0,18 - 0,20)*	1,25 (1,23 - 1,39)*	-
		Deklarované výrobce	-	-	≥ 1,0	cca 10
Cemix	Hliněná omítka hrubá 482	Laboratorní měření	1674 (1650 - 1691)*	0,09 (0,09 - 0,10)*	0,66 (0,60 - 0,71)*	-
		Deklarované výrobce	1600 až 1800	-	0,4 až 2,5	< 8
	Hliněná omítka jemná 433	Laboratorní měření	1638 (1453 - 1721)	0,44 (0,43 - 0,45)*	0,7 (0,44 - 1,13)*	-
		Deklarované výrobce	1600 až 1800	-	0,4 až 2,5	< 8
Hliněný dům	Hliněná směs - HRUBÁ	Laboratorní měření	1809 (1805 - 1824)*	0,81 (0,74 - 0,88)*	2,77 (2,61 - 2,97)*	-
		Deklarované výrobce	1770	0,8	1,7	-
	Hliněná směs - ORGANIKA (hrubá omítka)	Laboratorní měření	1820 (1797 - 1831)*	0,93 (0,87 - 1,01)*	3,02 (2,98 - 3,19)*	-
		Deklarované výrobce	1720	0,7	1,3	-
Hliněná směs - JEMNÁ	Laboratorní měření	1701 (1685 - 1712)*	0,85 (0,68 - 0,94)*	2,52 (1,96 - 2,74)*	-	
	Deklarované výrobce	1770	0,5	1,2	-	

* před závorkou je uvedena hodnota mediánu naměřených dat, v závorce je uveden rozsah naměřených hodnot (n = 6)

M.2 Měřicí technika klimatických parametrů v Brně - Kníničkách



Obr. 73 – Fotografie instalované
meteostanice (archiv autora)

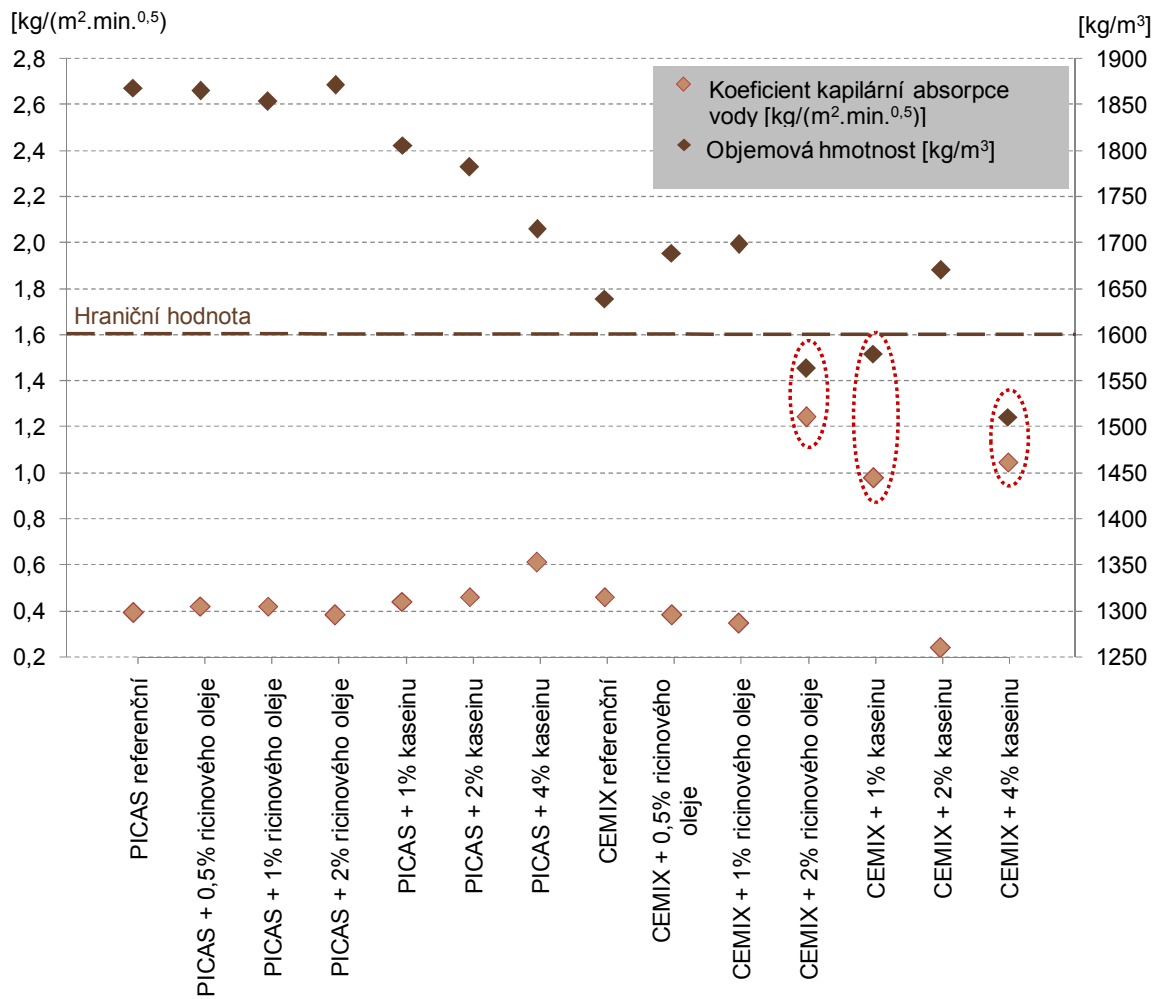


Obr. 74 – Meteostanice WH 1080 (Meteostanice,
2023)

M.3 Přehledová tabulka vzorků a prováděných zkoušek

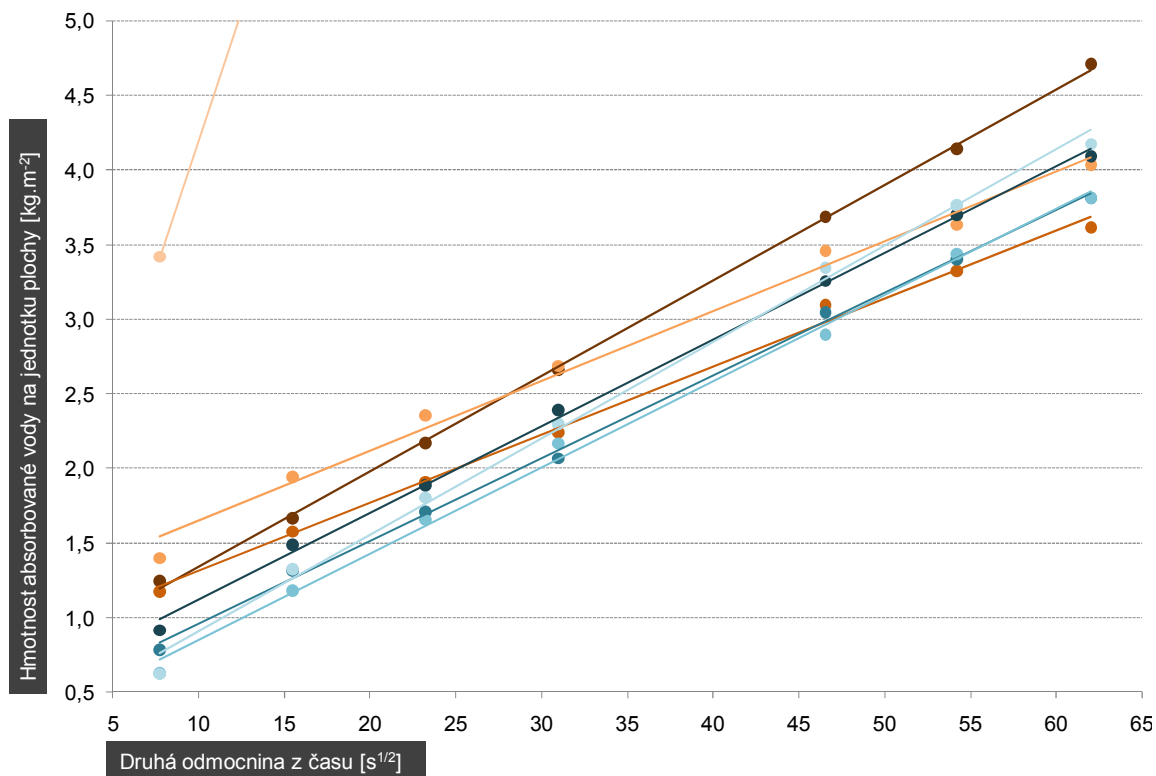
Typ omítky	Typ a množství hydrofobizačního činidla		Prováděné zkoušky							
			<i>in situ</i>	laboratorní						
				objemová hmotnost	pevnost v tahu za ohybu	pevnost v tlaku	kapilární absorpce (vztlínavost)	odolnost proti dešťové erozi	difuze vodní páry	hygroskopická sorpce
PICAS	referenční		X	X	X	X	X	X	X	X
	ricinový olej	0,5%		X	X	X	X	X	X	X
		1%	X	X	X	X	X	X	X	X
		2%	X	X	X	X	X	X	X	X
		4%	X							
	kasein	1%		X	X	X	X	X	X	X
		2%	X	X	X	X	X	X	X	X
		4%	X	X	X	X	X			X
		8%	X							
	CEMIX	referenční		X	X	X	X	X	X	X
ricinový olej		0,5%		X	X	X	X	X	X	X
		1%	X	X	X	X	X	X	X	X
		2%	X	X	X	X	X	X	X	X
		4%	X							
kasein		1%		X	X	X	X	X	X	X
		2%	X	X	X	X	X	X	X	X
		4%	X	X	X	X	X			X
		8%	X							

M.4 Doplnkové grafy k měření kapilární absorpce vody



Obr. 75 – Graf závislosti koeficientu kapilární absorpce vody stanoveném metodou dle ČSN EN 1015-18 na objemové hmotnosti (medián, n = 7)

Z grafu je patrné, že čím nižší mají vzorky objemovou hmotnost, tím více se k sobě světle a tmavě hnědé body přibližují. Červeně jsou zvýrazněny koeficienty kapilární absorpce vody silně vybočující z průměru a s nimi související nízké objemové hmotnosti vzorků.



LEGENDA:

- CEMIX referenční
- CEMIX + 0,5% ricinového oleje
- CEMIX + 1% ricinového oleje
- CEMIX + 2% ricinového oleje
- PICAS referenční
- PICAS + 0,5% ricinového oleje
- PICAS + 1% ricinového oleje
- PICAS + 2% ricinového oleje

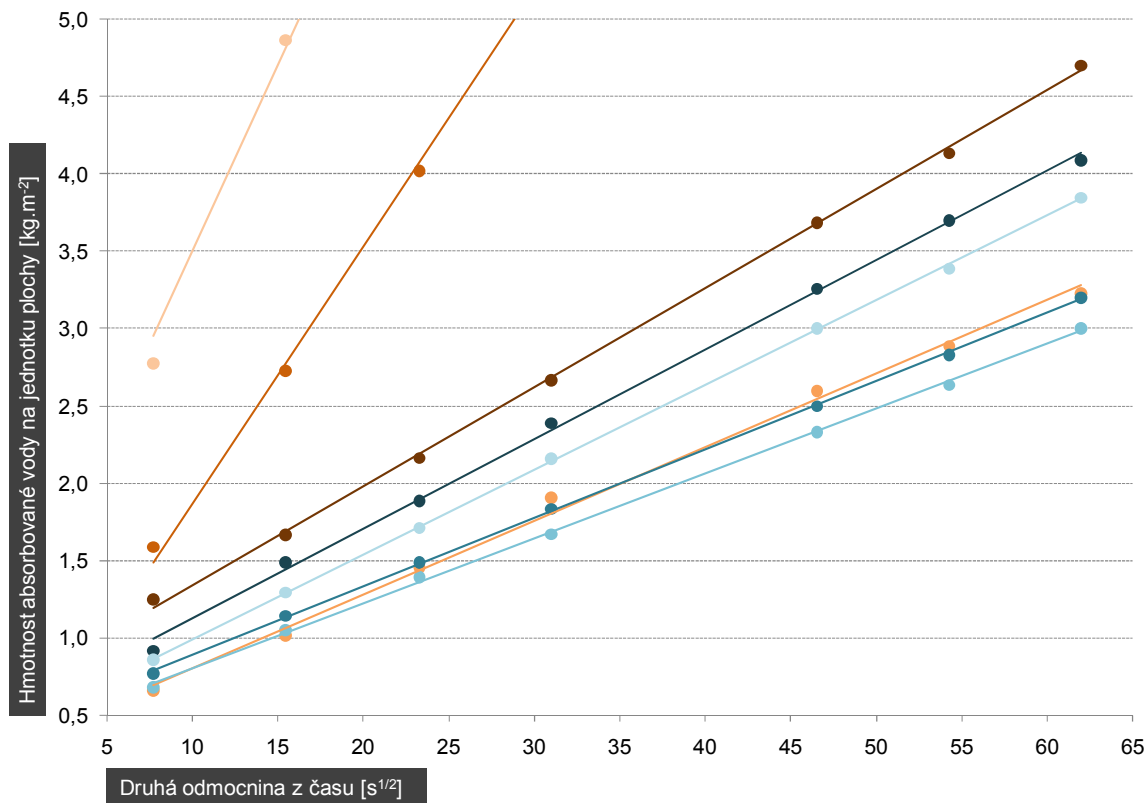
Rovnice regrese a hodnota spolehlivosti:

- $y = 0,064x + 0,697; R^2 = 0,999$
- $y = 0,045x + 0,855; R^2 = 0,996$
- $y = 0,046x + 1,182; R^2 = 0,990$
- $y = 0,346x + 0,720; R^2 = 1$
- $y = 0,058x + 0,541; R^2 = 0,998$
- $y = 0,055x + 0,400; R^2 = 0,998$
- $y = 0,057x + 0,270; R^2 = 0,996$
- $y = 0,064x + 0,258; R^2 = 0,996$

Koeficient kapilární absorpce:

- 0,064 kg.m⁻².s^{-1/2}
- 0,045 kg.m⁻².s^{-1/2}
- 0,046 kg.m⁻².s^{-1/2}
- 0,346 kg.m⁻².s^{-1/2}
- 0,058 kg.m⁻².s^{-1/2}
- 0,055 kg.m⁻².s^{-1/2}
- 0,057 kg.m⁻².s^{-1/2}
- 0,064 kg.m⁻².s^{-1/2}

Obr. 76 - Hmotnost vody absorbované na jednotku plochy v závislosti na čase pro vzorky PICAS a CEMIX s ricinovým olejem (detail) (medián, n = 7)



LEGENDA:

- CEMIX referenční
- CEMIX + 1% kaseinu
- CEMIX + 2% kaseinu
- CEMIX + 4% kaseinu
- PICAS referenční
- PICAS + 1% kaseinu
- PICAS + 2% kaseinu
- PICAS + 4% kaseinu

Rovnice regrese a hodnota spolehlivosti:

- $y = 0,064x + 0,697; R^2 = 0,999$
- $y = 0,166x + 0,198; R^2 = 0,999$
- $y = 0,047x + 0,325; R^2 = 0,996$
- $y = 0,240x + 1,087; R^2 = 0,999$
- $y = 0,058x + 0,541; R^2 = 0,998$
- $y = 0,044x + 0,447; R^2 = 0,999$
- $y = 0,042x + 0,379; R^2 = 0,999$
- $y = 0,054x + 0,440; R^2 = 0,999$

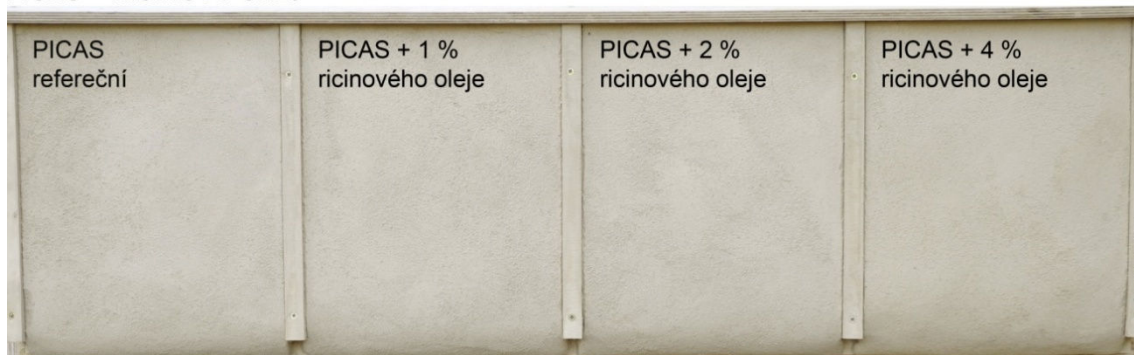
Koeficient kapilární absorpce:

- 0,064 $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}$
- 0,166 $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}$
- 0,047 $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}$
- 0,240 $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}$
- 0,058 $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}$
- 0,044 $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}$
- 0,042 $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}$
- 0,054 $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}$

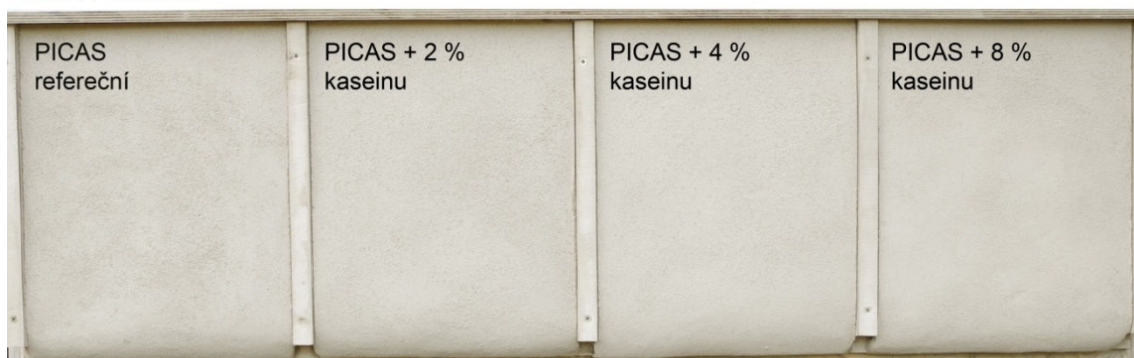
Obr. 77 - Hmotnost vody absorbované na jednotku plochy v závislosti na čase pro vzorky PICAS a CEMIX s kaseinem (detail) (medián, n = 7)

M.5 Fotografie vzorků hliněných omítek bezprostředně po instalaci panelů na pozemek

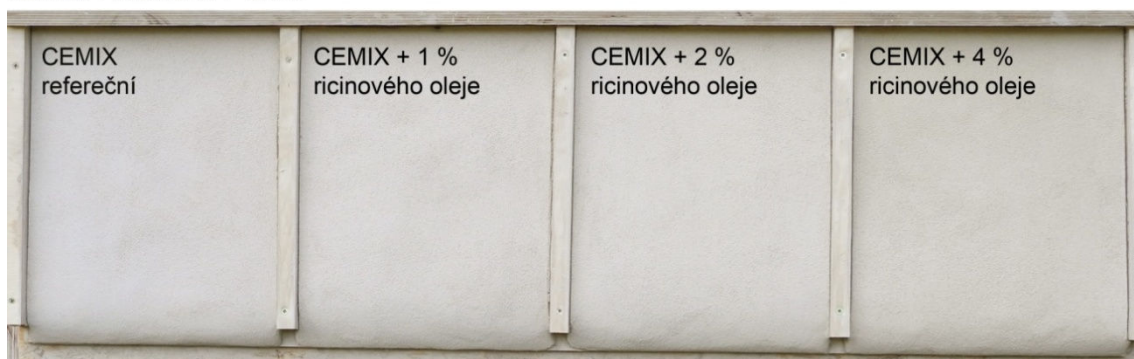
PICAS + RICINOVÝ OLEJ



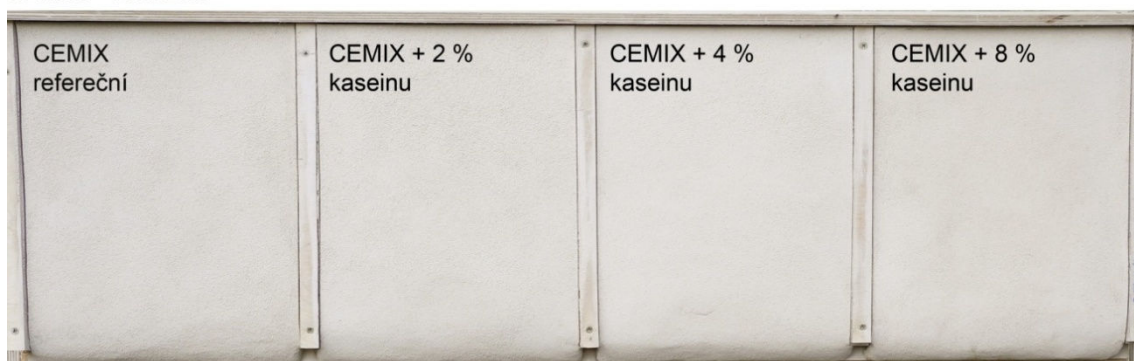
PICAS + KASEIN



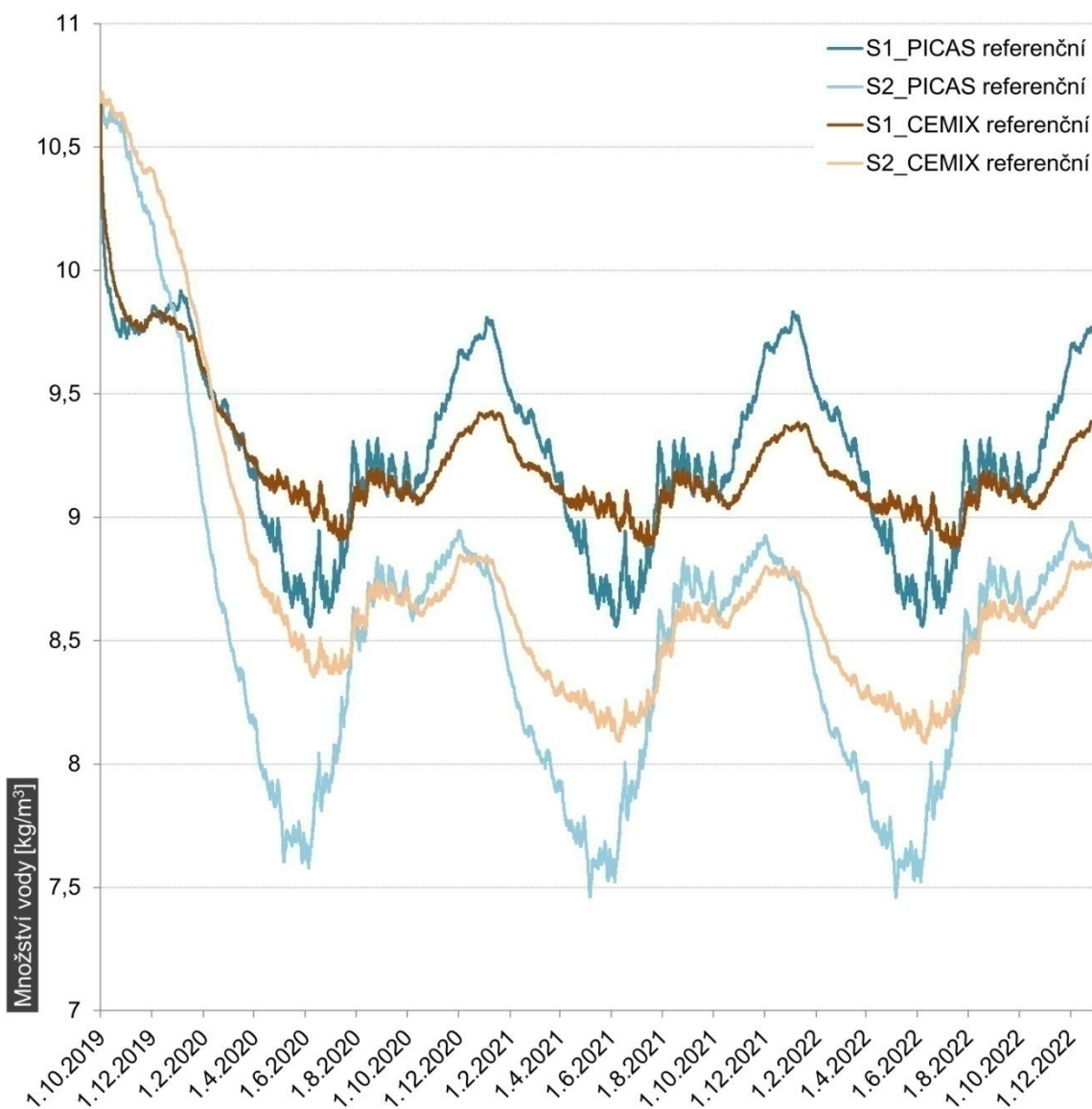
CEMIX + RICINOVÝ OLEJ



CEMIX + KASEIN



M.6 Doplnkový graf k numerické simulaci



Obr. 78 – Graf množství vody ve slaměném panelu Ecococon pro skladby S1 a S2 s referenčními omítkami PICAS a CEMIX v průběhu modelovaného období 1.10.2019 až 31.12.2022