

# České vysoké učení technické v Praze

Fakulta stavební

Katedra materiálového inženýrství a chemie



Diplomová práce

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně, pouze za odborného vedení vedoucí prof. Ing. Mileny Pavlíkové, Ph.D.

Dále prohlašuji, že veškeré podklady, ze kterých jsem čerpala, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

.....

podpis

Chtěla bych poděkovat vedoucí mé diplomové práce prof. Ing. Mileně Pavlíkové, Ph.D. za odborné vedení, zapůjčení literatury a veškeré užitečné rady a připomínky. Dále děkuji katedře materiálového inženýrství a chemie za možnost využití přístrojů a zařízení pro provádění zkoušek a jejím pracovníkům za spolupráci na některých pracích, zejména pak Ing. Jaroslavu Pokornému a Ing. Martině Záleské za technickou pomoc a cenné rady při realizaci experimentálních měření, Ing. Janu Fořtovi, Ph.D. za výpomoc při měření dynamického modulu pružnosti a panu Pavlu Košatovi za realizaci pevnostních zkoušek. Dále děkuji Ing. Ondřeji Bretovi za četné připomínky k práci a korekturu textu.

Tato práce byla řešená v rámci projektu GAČR č. 15-10591S.

Vliv vnitřní a vnější hydrofobizace na  
vlastnosti modifikovaných vápenných omítek

The influence of inner and outer  
hydrophobisation on properties of modified  
lime-based plasters

## **Anotace:**

Vnější povrchové vrstvy hrají důležitou úlohu v ochraně stavebních konstrukcí vůči působícímu vnějšmu prostředí a mají vliv na prodloužení jejich životnosti. Čistě vápenné omítky se vyznačují výbornou plasticitou a zpracovatelností, avšak sníženou odolností, z tohoto důvodu byla do záměsi přidána pucolánově aktivní křemelina. Značná část historických objektů je zatížena působením vlhkosti a solí, proto byl hlavním sledovaným parametrem transport vody. Vápenné omítky, pro něž je typická schopnost snadno a rychle transportovat kapalnou vlhkost, byly za účelem zvýšení jejich životnosti hydrofobizovány různými typy činidel. Dále byly omítky vystaveny zrychlené karbonataci, aby bylo možné sledovat změny jejich porézního systému, které jsou podstatné pro jejich praktické využití.

**Klíčová slova:** *vápenná omítka, hydrofobizace, smáčecí úhel, karbonatace, křemelina, lněná fermež, stearan, oleát, Sikkaton, Radcon*

## **Abstract:**

Exterior surface layers play very important function in protection of building constructions against influence of environment and to prolong their service life. The pure lime plasters exhibit perfect plasticity and workability but short durability, therefore the pozzolana active diatomaceous earth was added to the lime plaster mixture. Because most of the historical buildings suffer from moisture and salt action, water transport properties of plasters are of the particular importance. Since the lime plasters are known to have high values of liquid water transport parameters, an application of water repellent admixtures seems to be a logical solution for achievement of the increase in their service life. Finally, the accelerated carbonation test was done to get information on changes in material porous space and related parameters with respect to its practical use.

**Keywords:** *lime plaster, hydrophobization, contact angle, carbonation, diatomaceous earth, boiled linseed oil, stearate, oleate, Sikkaton, Radcon*

# Obsah

Seznam použitých symbolů .....	3
<b>1 Úvod.....</b>	<b>5</b>
<b>2 Cíl práce .....</b>	<b>7</b>
<b>3 Vápenné omítky .....</b>	<b>8</b>
3.1 Druhy omítek.....	8
3.2 Výroba vápenných omítek .....	10
3.2.1 Výchozí surovina.....	10
3.2.2 Pálení vápna .....	12
3.2.3 Hašení vápna .....	13
3.2.4 Tuhnutí a tvrdnutí vápna .....	14
3.3 Zásady provádění vápenných omítek .....	15
3.4 Druhy vápna a způsoby jeho použití .....	16
<b>4 Degradace omítek vlivem nadměrné vlhkosti.....</b>	<b>18</b>
4.1 Příčiny degradace .....	18
4.2 Ochrana proti degradaci .....	20
4.2.1 Smáčecí úhel .....	20
4.2.1.1 Metody měření smáčecího úhlu .....	29
4.2.2 Hydrofobizační látky .....	34
4.2.3 Látky utěšňující strukturu.....	42
<b>5 Typy omítek použité v experimentální části práce.....</b>	<b>47</b>
5.1 Složení směsí.....	47
5.2 Použité materiály.....	48
5.2.1 Vápno Čertovy schody .....	48
5.2.2 Filtrační křemelina Borovany.....	50
5.2.3 Křemičitý písek .....	53
5.2.4 Záměsová voda.....	54
5.2.5 Radcon.....	55
5.2.6 Sikkaton.....	56
5.2.7 Lněná fermež.....	57
5.2.8 Stearan vápenatý a oleát sodný .....	58
<b>6 Příprava vzorků.....</b>	<b>60</b>
6.1 Výroba.....	60
6.2 Ošetřování .....	62
6.3 Nátěr .....	63
6.4 Karbonatace.....	64

<b>7</b>	<b>Základní materiálové parametry .....</b>	<b>67</b>
7.1	Objemová hmotnost .....	67
7.2	Hustota matrice .....	68
7.3	Pórovitost .....	70
7.3.1	Celková pórovitost .....	70
7.3.2	Otevřená pórovitost .....	70
7.3.3	Distribuce pórů .....	72
7.4	Výsledky a diskuse .....	73
<b>8</b>	<b>Mechanické vlastnosti .....</b>	<b>79</b>
8.1	Pevnost v tahu za ohybu .....	79
8.2	Pevnost v tlaku .....	81
8.3	Dynamický modul pružnosti .....	83
8.4	Výsledky a diskuse .....	84
<b>9</b>	<b>Transport kapalné vlhkosti .....</b>	<b>89</b>
9.1	Absorpce .....	89
9.2	Svislá nasákavost .....	92
9.3	Výsledky a diskuse .....	96
<b>10</b>	<b>Transport plynné vlhkosti .....</b>	<b>104</b>
10.1	Difúze vodní páry .....	104
10.2	Výsledky a diskuse .....	108
<b>11</b>	<b>Tepelně-technické vlastnosti .....</b>	<b>113</b>
11.1	Parametry měřené přístrojem Isomet .....	113
11.2	Výsledky a diskuse .....	115
<b>12</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>119</b>
	<b>Literatura .....</b>	<b>122</b>
	<b>Seznam použitých norem .....</b>	<b>126</b>
	<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>127</b>
	<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>131</b>

## Seznam použitých symbolů

$a$	[m <sup>2</sup> .s]	součinitel teplotní vodivosti
$a$	[m]	šířka tlačné destičky
$A$	[kg/m <sup>2</sup> .s <sup>1/2</sup> ]	absorpční koeficient pro vodu
$b$	[m]	šířka vzorku
$b$	[m]	rozměr tělesa na šířku dle umístění v nástavci
$c$	[J/kg.K]	měrná tepelná kapacita
$c.\rho$	[J/m <sup>3</sup> .K]	měrná objemová tepelná kapacita
$d$	[m]	tloušťka vzorku
$D$	[m <sup>2</sup> /s]	součinitel difúze vodní páry
$D_a$	[m <sup>2</sup> /s]	součinitel difúze vodní páry ve vzduchu
$\delta$	[s]	součinitel difúzní vodivosti
$\Delta m$	[kg]	rozdíl hmotností vzorku
$\Delta t$	[s]	doba mezi n-tým a k-tým měřením
$\Delta p$	[Pa]	rozdíl parciálních tlaků vodní páry
$E$	[%]	hmotnostní nasákavost
$E_d$	[Pa]	dynamický modul pružnosti
$f_b$	[MPa]	pevnost v tlaku
$f_{bm}$	[MPa]	pevnost v tahu za ohybu
$F$	[N]	maximální zatěžovací síla
$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	tíhové zrychlení
$\gamma$	[J/m <sup>2</sup> ]	mezifázová energie
$\gamma$	[N/m]	povrchové napětí, mezifázové napětí
$\gamma_{lg}$	[N/m]	mezifázové napětí na rozhraní kapalina/plyn
$\gamma_{sg}$	[N/m]	mezifázové napětí na rozhraní pevná látka/plyn
$\gamma_{sl}$	[N/m]	mezifázové napětí na rozhraní pevná látka/kapalina
$\gamma_{sg}$	[N/m]	mezifázové napětí pevné látky s adsorbovaným plynem
$\gamma_{s0}$	[N/m]	mezifázové napětí původní čisté látky
$h$	[m]	výška vzorku
$h$	[m]	rozměr tělesa na výšku dle umístění v nástavci
$h$	[m]	výška, do které vystoupá kapalina v kapiláře
$l$	[m]	délka vzorku



$l$	[m]	vzdálenost podpor
$\lambda$	[W/m.K]	součinitel tepelné vodivosti
$m$	[kg]	hmotnost vzorku
$m_a$	[kg]	Archimédova hmotnost vzorku
$m_d$	[kg]	hmotnost suchého vzorku
$m_{sat}$	[kg]	hmotnost plně nasyceného vzorku
$m_w$	[kg]	hmotnost vzorku nasyceného vodou
$M$	[kg/mol]	molární hmotnost vody
$\mu$	[-]	faktor difúzního odporu
$p_{atm}$	[Pa]	atmosferický tlak
$p_m$	[Pa]	tlak v nádobce se vzorkem
$p_r$	[Pa]	tlak v referenční komoře
$P$	[N/m <sup>2</sup> ]	tlak, pod nímž vniká rtuť do pórů
$\pi$	[N/m]	povrchový tlak
$r$	[m]	poloměr pórů
$R$	[J/mol.K]	univerzální plynová konstanta
$R$	[m]	poloměr kapiláry
$\rho_b$	[kg/m <sup>3</sup> ]	objemová hmotnost materiálu
$\rho_d$	[kg/m <sup>3</sup> ]	objemová hmotnost vysušeného materiálu
$\rho_{He}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	hustota matrice materiálu zjištěná héliovou pykometrií
$\rho_l$	[kg/m <sup>3</sup> ]	objemová hmotnost kapaliny
$\rho_w$	[kg/m <sup>3</sup> ]	objemová hmotnost vody
$S$	[m <sup>2</sup> ]	plocha vzorku
$\sigma$	[N/m]	mezifázové napětí
$t$	[s]	čas, potřebný k průchodu ultrazvukové vlny materiálem
$T$	[K]	teplota v klimatizační komoře
$\theta$	[°]	smáčecí úhel
$\theta_A$	[°]	postupující smáčecí úhel
$\theta_R$	[°]	ustupující smáčecí úhel
$V$	[m <sup>3</sup> ]	objem vzorku
$V_c$	[m <sup>3</sup> ]	objem nádoby se vzorkem
$V_r$	[m <sup>3</sup> ]	objem referenční komory
$w_{sat}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	obsah nasycené vlhkosti

# 1 Úvod

Malty a omítky na bázi vzdušných či hydraulických pojiv náleží mezi jedny z nejstarších a nejpoužívanějších uměle vyráběných stavebních materiálů. Nejstarší známé použití vápenných omítek se datuje kolem roku 4000 př. n. l. ve starém Egyptě [1]. Běžně se používalo již ve starověkém Římě, kde kvalita jeho zpracování dosahovala vysoké úrovně. Zmínky o něm jsou i v rozsáhlých spisech římského stavitele Marcuse Vitruvia, autora Deseti knih o architektuře. [2, 3]

Pálení vápna na našem území od dob středověku dokládají mnohé nálezy milířů a trychtýřových pecí, například ve Starém Městě u Uherského Hradiště. V hojnější míře se u nás vápenné omítky začaly uplatňovat od 9. století. Nejstarší vápenku v Čechách vlastnil kolem roku 1000 n. l. Břevnovský klášter. [2, 3]

Vápenné omítky byly aplikovány jako jednovrstvé nebo dvouvrstvé systémy, na stavby zděné z hrubě opracovaného lomového kamene se používaly též omítky roztírané. Barokní architektura, známá svými složitými kompozicemi náročnými na provádění, vyžadovala kvalitnější vápna s výraznějšími hydraulickými vlastnostmi. Pro tyto účely bylo používáno hydraulické Staroměstské vápno vyráběné z podolských a branických vápenců. [4]

Získané teoretické i praktické poznatky při přípravě a aplikaci vzdušných i hydraulických pojiv poprvé shrnul ve své práci Bernard Forest de Bélidor v polovině 18. století. V roce 1780 vydal Dr. Bryan Higgins knihu „Experimenty a pozorování zlepšení složení a aplikace vápenných tmelů a příprava vápna“, čímž se zasloužil o popularitu malt na vodní bázi. Mimo jiné poprvé použil dva druhy písku a kostní popel jako prevenci vzniku trhlin a ke zvýšení plasticity a pevnosti malty a byl mu udělen patent na vodní tmel. [5]

Koncem 18. a počátkem 19. století se čím dál více dostávalo do popředí hydraulické pojivo zvané románský cement a dále také portlandský cement. Po druhé světové válce začaly být vápenné omítky nahrazovány cementovými a vápenocementovými omítkami. Vápenné omítky však nevymizely, jelikož se stále vyskytovaly na většině venkovských staveb a dodnes převažují jako povrchová úprava objektů v historických částech měst. [4]

Právě při rekonstrukci historických objektů je kladen značný důraz na funkčnost a estetický vzhled povrchových vrstev. Na obnovu staveb kulturního dědictví jsou požadovány materiály, které se co nejvíce svým složením, vzhledem i chováním přibližují omítce původní.

Proto jsou místo hydraulických omítek na bázi cementu doporučovány spíše klasické vápenné omítky modifikované pucolánově aktivními přísadami. [4]

Jelikož má vzdušné vápno nepříliš dobré mechanické vlastnosti a nízkou odolnost vůči účinkům zvýšené vlhkosti, objevovala se již v historii snaha o jeho vylepšení. Již před tisíci lety byly v Itálii přidávány do vápna minerální příměsi, jako vulkanické popílky, pemzy či spongilit. Jednalo se o pucolánově aktivní látky schopné reagovat s hydroxidem vápenatým za běžných teplot a přítomnosti vody. Vzniklé produkty měly pojivové vlastnosti a byly relativně stálé ve vodě [3]. Rozsáhlý průzkum omítek historických budov vedl ke zjištění, že i na našem území se používaly různorodé minerální příměsi, např. vápenná moučka, kostní popel, drcený či mletý keramický střep, jemně drcené sklo, či různé druhy strusek [4]. Takto modifikované omítky vykazovaly vyšší životnost a odolnost vůči vlhkosti a agresivnímu prostředí [6]. [2, 3, 4, 7]

Omítky jsou konstrukční vrstvou, která je kromě estetické funkce aplikována především za účelem ochrany nosného materiálu konstrukce či výplňového zdiva. Především vnější omítky jsou silně namáhány povětrnostními vlivy, jako je vlhkost, teplota či různé agresivní látky obsažené ve vodě i v ovzduší. Většina degračních procesů, tedy jevů, které zhoršují technické i vizuální vlastnosti omítek a mohou vést až k jejich úplné destrukci, je podmíněna, nebo alespoň významně urychlena, právě zvýšeným obsahem vlhkosti. Zvýšený obsah vlhkosti v konstrukci podmiňuje chemické a biologické napadení stavebních materiálů, což přímo ovlivňuje vlastnosti a životnost stavební konstrukce. [7, 8]

Z tohoto důvodu jsou prováděna opatření zabraňující vodě v průniku do materiálu. Vedle různých mechanických úprav, jako jsou izolační pásy nebo dodatečně zarážené plechy, jsou používány látky působící na chemickém principu, např. hydrofobizační činidla. Účinek hydrofobizačních látek spočívá ve změně povrchového napětí systému pevná látka/voda, což se projeví zvýšením smáčecího úhlu kapaliny na hydrofobizovaném povrchu pevné látky. Čím větší je její smáčecí úhel, tím obtížněji kapalina proniká do kapilárního systému porézních stavebních materiálů. [9]

## 2 Cíl práce

Cílem práce bylo porovnat vliv různých druhů hydrofobizačních látek na vlastnosti vápenných omítek.

Z látek, které jsou na trhu dostupné, byly vybrány komerčně vyráběné hydrofobizační produkty Sikkaton a Radcon, dále stearan vápenatý, oleát sodný a přírodní lněná fermež. Záměrem bylo porovnat působení těchto látek, aplikovaných jednak do záměsi, jednak jako povrchový nátěr, na vlastnosti vápenných omítek. Kromě základních materiálových vlastností se práce zaměřuje na sledování transportních parametrů kapalné a plynné vlhkosti, které jsou klíčovými charakteristikami při posuzování účinku aplikovaných hydrofobizačních látek. V průběhu zrání omítek dochází ke změnám v jejich chemickém i strukturním složení, proto bylo důležité sledované parametry experimentálně stanovit také pro zkarbonatované omítky, což bylo umožněno díky zrychlené karbonataci v CO<sub>2</sub> komoře.

Dalším z cílů práce bylo modifikovat vápennou omítku pucolánově aktivní přísadou za účelem zvýšení její odolnosti a trvanlivosti, k čemuž byla vybrána filtrační křemelina z Borovan.

### 3 Vápenné omítky

Omítky jsou jednovrstvé či vícevrstvé povrchové úpravy stěn a stropů. Vedle jejich estetické a mechanické funkce (ochrana nosné konstrukce) je podstatný i jejich architektonický význam, jakožto stavebního prvku dokumentujícího dostupné materiály a technologie dané doby. Omítky vypovídají o kreativité a řemeslné zručnosti stavitelů a architektů různých období a oblastí. [7]

Omítky jsou vyrobeny z pojiva, plniva a speciálních přísad, které mají za úkol zlepšovat jejich vlastnosti. [7]

#### 3.1 Druhy omítek

Vzhled a způsob využití jednotlivých druhů omítek je určen především druhem a kvalitou pojiva. Fyzikální vlastnosti pojivových složek a jejich dávkování určují konzistenci a zpracovatelnost čerstvé malty i pevnost a trvanlivost vyzrálé omítky. [7]

Z technologického hlediska se pojiva dělí na tři druhy:

- Vzdušná – tato pojiva tvrdnou na vzduchu za běžných podmínek; vytvářejí stálé a trvanlivé produkty, které se ale mohou mírně rozpouštět ve vodě; patří mezi ně vzdušné vápno, sádra a jíl.
- Hydraulická – tato pojiva jsou schopná tvrdnout i pod vodou; vytvářejí produkty ve vodě zcela nerozpustné; patří mezi ně hydraulické vápno a cement.
- Organická – patří mezi ně především silikátové a silikonové disperze.

V současnosti vyráběné omítky sestávají často z kombinace různých druhů pojiv. Prakticky všechny průmyslově vyráběné omítky obsahují určitý podíl zušlechťujících organických přísad. Podrobné rozdělení typů omítek je v Tab. 1. [7]

Nejčastějším plnivem omítek je křemičitý písek, případně písek z pískovců či jemně mletý dolomitický vápenec. V minulosti byl používán především písek kopaný, který ale obsahoval vysoký podíl jílu. Dále jsou používána speciální plniva, jako různé tepelně-izolační materiály, nebo suroviny vylepšující estetické vlastnosti (barvu, lesk, hladkost povrchu), jako například mramorová moučka. [7]

Mezi sledované vlastnosti plniva patří pevnost a nasákavost zrn, chemické složení a především křivka zrnitosti. Rozdělení velikosti zrn ovlivňuje pevnost, rozpustnost a trvanlivost výsledných omítek a strukturu jejich povrchu. [7]

Příspěvky jsou látky upravující vlastnosti čerstvé malty nebo vytvrdlé omítky. Patří mezi ně plastifikátory usnadňující zpracovatelnost, zpomalovače či urychlovače tuhnutí, adheziva zlepšující přilnavost malty k podkladu, zpevňovače omítek, různé typy barviv a pigmentů a hydrofobizátory zvyšující vodoodpudivost omítek. [7]

Tab. 1: Typy omítek [7]

Typ pojiva	Typ omítky	Druh pojiva	Oblast použití
minerální	Vápenná	Vápno, hydraulické vápno	Vnitřní omítky, oblast restaurování
	Vápenocementová	Vápno, cement (cca 2:1)	Běžné omítky, některé speciální (tepelně izolační, akustické)
	Cementová	Cement	
	Sádrová (vápenosádrová)	Sádra (eventuelně i vápno)	Vnitřní a protipožární omítky
	Hliněná	Jíl	Tenkvrstvé omítky, vysprávky
organické	Silikonová	Silikonová disperze	Vnitřní omítky, zdravé a ekologické omítky
	Akrylátová	Akrylátová disperze	
	Silikátová	Vodní sklo	

Dělení omítek dle způsobu použití:

- ◆ Sanační – většinou jsou aplikované za účelem snížení vlhkosti materiálu nosné konstrukce; patří mezi ně i různé těsnící a hydrofobizované omítky nebo obětované omítky, jež mají za úkol odvést z podkladu vodu a v ní rozpuštěné soli, následně jsou z objektu odstraněny;

- ◆ Tepelně-izolační – obsahují různá lehká plniva; součinitel tepelné vodivosti by měly mít nižší než 0,1 W/m.K;
- ◆ Akustické – mají vyšší pórovitost, díky níž pohlcují hluk;
- ◆ Protipožární – většinou jsou na bázi sádry;
- ◆ Ostatní.

Dělení omítek dle způsobu výroby:

- Omítky vyráběné na staveništi;
- Omítky vyráběné průmyslově.

Dělení omítek dle způsobu nanášení na podklad:

- Omítky nanášené ručně;
- Omítky nanášené strojně.

## 3.2 Výroba vápenných omítek

Jak bylo zmíněno výše, existuje vápno vzdušné, schopné tuhnout a tvrdnout pouze na vzduchu, a vápno hydraulické, které může tuhnout a tvrdnout i pod vodou. Hydraulické vlastnosti jsou podmíněny chemickou reakcí oxidu křemičitého, oxidu hlinitého a obvykle i železa s vápnem za vzniku minerálů, které následně při reakci s vodou tvoří odolné a pevné hydraulické produkty. [10]

V této práci bylo zvoleno vzdušné pojivo, u kterého je zrání materiálu podmíněno pouze karbonatačním procesem.

Proces výroby vápna je komplexní činnost, která sestává z několika kroků, od získání vytěžené horniny až po výrobu konečného produktu.

### 3.2.1 Výchozí surovina

Hlavní surovinou pro výrobu vzdušného vápna je vápenec, sedimentární hornina tvořená minimálně z 90 % uhličitánem vápenatým ( $\text{CaCO}_3$ ). Ten se ve vápenci vyskytuje ve formě minerálů kalcitu a aragonitu, které se od sebe liší krystalickou soustavou. Dále vápenec obsahuje různé příměsi, jako je dolomit, křemen, různé jílové minerály či úlomky vápenných

schránek a zkamenělin. Vápenec vzniká jednak jako usazená hornina organogenní (usazené skořápky a kostry dírkovců), chemogenní (travertiny) či dentritický vápenec (příplavený). [10]



*Obr. 1: Různé druhy vápence. Vlevo: žlutá hornina z Polska, uprostřed: tmavá, téměř černá hornina z Brazílie (nejčistší), vpravo: vápenec s vysokým obsahem korálů a mušlí z Dánska [10]*

Na výrobu vápna se používá také dolomitický vápenec, který je tvořený v různém poměru uhličitánem vápenatým ( $\text{CaCO}_3$ ) a uhličitánem hořečnatým ( $\text{MgCO}_3$ ). Vápno z něj vyrobené se nazývá dolomitické a má šedou barvu. Dolomitické vápno by mělo obsahovat minimálně 7 % oxidu hořečnatého. [11, 12]

Vápenec je těžen v povrchových lomech zpravidla metodou odstřelu, viz Obr. 2. Dále je zpracováván v drtičích na menší kusy, obvykle okolo 20 mm, a posílán do kalcinačních pecí. [10]



*Obr. 2: Těžba vápence v lomu [10]*



### 3.2.2 Pálení vápna

Kalcinace, nebo též dekarbonatace, je proces, při kterém dochází za velmi vysokých teplot k přeměně uhličitanu vápenatého na oxid vápenatý. Probíhá ve velkých průmyslových zařízeních, především rotačních a vertikálních pecích. [10, 11]

Rotační pec je dlouhý nakloněný válec o délce asi sto metrů, viz Obr. 3. Rotace a náklon válce pece posouvají vsázku horniny shora dolů, přičemž hornina zabírá asi jen 10 % průřezové plochy válce a zbývající prostor zaujímá průtok plynu. Jak vsázka uvnitř pece klesá, zvyšuje se postupně její teplota. Rotační pece produkují vápno s vysokou reaktivitou a zajišťují úplnou dekarbonataci s velice nízkou hodnotou zbytkového CO<sub>2</sub>. [10]

Jak název napovídá, vertikální pece mají tvar vysokého válce, viz Obr. 3. Vápenec se v nich obvykle míchá s pevným palivem. Vzduch ochlazující vápno se nasává ve spodní části pece a slouží též jako spalovací vzduch pro palivo. V tomto typu pecí lze vyrábět vápno s velice nízkou reaktivitou, dokonce i přepálený dolomit. [10]



Obr. 3: Vlevo: rotační pece, vpravo: vertikální pece [10]

Dekarbonatace uhličitanu vápenatého začíná probíhat již od 600 °C, zpravidla se provádí při teplotě 900 – 1100 °C aby celý proces probíhal dostatečně rychle. K dekarbonataci dolomitu postačí o něco nižší teplota. Rozklad vápence je endotermní reakce, tedy reakce spotřebovávající teplo, kterou lze vyjádřit rovnicí:



Takto připravené vápno se nazývá pálené, distribuováno je též pod označením nehašené. [11, 13]

Vápna pálená při teplotě nad 1100 °C se nazývají tvrdě pálená vápna. Jsou hutnější a méně porézní, jelikož vysoká teplota výpalu vede ke slinování. Mají menší měrný povrch a jejich reakce s vodou je pomalejší. Toto vápno se hodí pro výrobu autoklávovaného pórobetonu. Při

výraznějším překročení správné teploty výpalu vzniká mrtvě pálené vápno, které pak reaguje s vodou jen obtížně. [11, 12, 13]

Vápna, která jsou pálená při teplotách blízkých 1000 °C, se nazývají měkce pálená. Reagují s vodou rychle, mají vysokou porozitu zrn a velký měrný povrch. Pro přípravu omítkových malt jsou vhodnější než tvrdě pálená vápna. [11, 12, 13]

Reaktivita je jednou ze zásadních parametrů určujících kvalitu vápna. Stanovuje se jako čas potřebný k proběhnutí 80 % hydratace nebo také jako čas potřebný k dosažení určité teploty. [11]

### 3.2.3 Hašení vápna

Pro běžné stavební práce se používá vápno hašené, které se získává reakcí páleného vápna s vodou.



Tomuto procesu se ve stavební praxi říká hašení vápna. Jedná se o silně exotermickou reakci, při které dochází k rozpadu původních zrn oxidu na řádově menší hydroxidová zrna. Vzniká tak plastická kaše tvořená hydroxidem vápenatým, mající charakter hydrogelu – tedy propojené sítě nanočástic, do které je navázaná tekutina. Kvalita hašeného vápna je charakterizována vydatností, neboli množstvím kaše, vzniklé z 1 kg páleného vápna (což by mělo být minimálně 2,6 litru) a jeho plasticitou, která má významný vliv na technologické vlastnosti malt. Tvrdě pálená vápna mají menší vydatnost a horší plasticitu. Vápno s vyšší vydatností se lépe váže a vytváří soudržnější maltu. [11, 13, 14]

Způsoby hašení vápna jsou dva, mokrý a suchý. Teoretické množství vody na hydrataci 100 kg vápna je 32,14 l. [11, 13]

Při mokrému způsobu se vápno hasí za výrazného nadbytku vody, na 100 kg se jí použije 240 – 320 l. Vápno se nejprve skrání malým množstvím vody. Poté, co začne vápno s vodou reagovat, což se projeví vývinem tepla a praskáním, přidávají se další podíly vody za mírného míchání. Vzniklá vápenná kaše je suspenze hydroxidu vápenatého ve vodě obsahující 30 – 55 % pevné fáze. Objemová hmotnost vápenné kaše bývá 1200 – 1350 kg.m<sup>-3</sup>. Nejlepší produkt se získává při hašení takovou rychlostí, aby teplota reakční směsi byla těsně pod bodem varu vody. Vyšší teplota a nedostatečné míchání způsobují shlukování částic a uzavření povrchu, což má za následek, že části zrn páleného vápna s vodou nezreagují. U tvrdě pálených vápen je nebezpečí, že použitím velkého množství vody nedojde

k dostatečnému vzrůstu teploty a potřebnému rozdužení částic páleného vápna. V obou případech zůstává v kaši určitý podíl nedohašeného oxidu vápenatého. Výsledkem je, že k hydrataci dochází až v maltě, v době kdy už je vytvořena pevná struktura omítky. Vzhledem k tomu, že hydroxid vápenatý má značně větší objem než oxid vápenatý, vznikají v omítce vnitřní tlaky. Ty vedou ke vzniku trhlin a puchýřů a mohou způsobit takzvané odstřelování omítky i odtrhnutí celé vrstvy od podkladu. [11, 13]

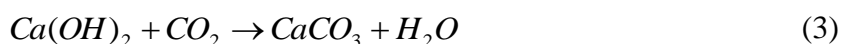
Kvalitu vápna ve formě vápenné kaše lze zlepšit takzvaným odležením v odležovací jámě po dobu alespoň jednoho týdne. V historii se na významné stavby nechávalo vápno uležet zakopané v zemi i několik let. Během této doby dochází k rozdužování nevyhašených částic. Voda se sorbuje na povrch nově vzniklých zrn hydroxidu vápenatého, čímž vápenná kaše nabývá na objemu a zlepšuje se tak její plasticita. Vápennou kaši je nutno chránit před zmrznutím. Malty vyrobené z vápna, které prošlo zmrazením, vykazují nižší pevnosti. [7, 11, 13]

Modernější a dnes již zcela převažující způsob je suché hašení. Použije se na něj jen přibližně dvojnásobek teoretického množství vody, přičemž přebytečná voda odchází ve formě páry. Výsledným produktem je práškovitý vápenný hydrát, z něhož se vápenná kaše vyrobí v okamžiku potřeby přidáním vhodného množství vody. [11]

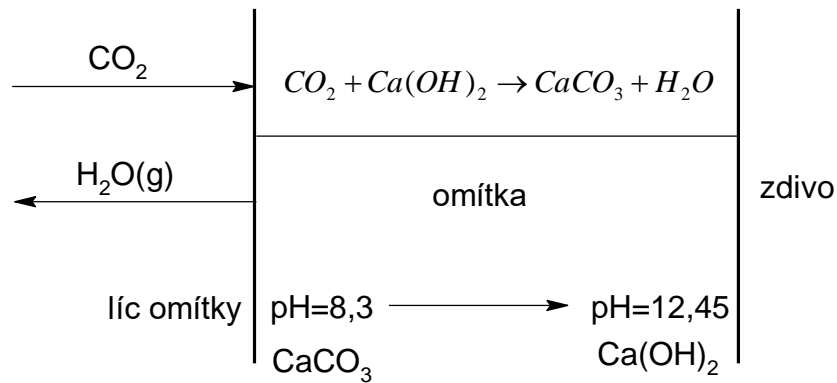
### 3.2.4 Tuhnutí a tvrdnutí vápna

Tuhnutí vápenné malty probíhá jako sesychání koloidního gelu vyvolané odpařováním přítomné vody. To znamená, že malta ze vzdušného vápna není schopná tuhnout pod vodou. Vlivem odpařování vody dochází k shlukování mikroskopických částic hydroxidu vápenatého a jejich následnému srůstu. Rekrystalizační a růstové procesy se podílejí také na tvrdnutí malty. Vytvrdnutý hydroxid vápenatý má nízkou rozpustnost, při běžné teplotě přibližně 1,6 g v 1 l vody. Hodnota pH nasyceného roztoku je 12,45. [11, 13]

Hydroxid vápenatý reaguje s oxidem uhličitým ze vzduchu za vzniku uhličitanu vápenatého, který má mnohem vyšší pevnost. Tento proces se nazývá karbonatace, nebo také uhličitanové tvrdnutí.



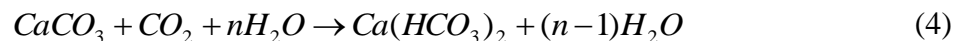
Uhličitan vápenatý má znatelně nižší pH než hydroxid vápenatý, jeho hodnota je 8,3. Toho se s výhodou využívá při zjišťování hloubky karbonatace.



Obr. 4: Průběh karbonatace vápenné omítky [13]

Karbonatace vyžaduje přítomnost alespoň malého množství vody. Při vlhkosti vzduchu pod 30 % se proces karbonatace výrazně zpomaluje [14]. Nicméně blíží-li se vlhkost vzduchu 100 %, zaplní se póry materiálu vodou, což karbonataci prakticky zastavuje, jelikož difúzní rychlost  $\text{CO}_2$  ve vodě je mnohonásobně nižší než ve vzduchu. [11, 13, 14]

Ani vytvrzená vápenná malta není zcela odolná vodě. Za zvýšené vlhkosti reaguje uhličitán vápenatý se vzdušným oxidem uhličitým za vzniku rozpustného hydrogenuhličitanu.



### 3.3 Zásady provádění vápenných omítek

Při nanášení vápenné kaše na nosnou konstrukci je potřeba dodržovat určité technologické postupy a zohlednit požadavky na klimatické podmínky.

Nově provedená vrstva omítky nesmí vyschnout příliš rychle, což může způsobit ostrý sluneční žár, nebo naopak silný vítr. Pokud omítka vyschne příliš rychle, zprahne, a nedojde u ní ke karbonataci, jelikož k té je zapotřebí určité množství vody. Výsledný produkt má pak nízkou pevnost a rozpadá se. [15, 16]

Na druhou stranu ani vysoká vlhkost vzduchu, například za deště, není vhodná. V omítce nemůže dojít k vysychání vody ani následné karbonataci, jelikož oxid uhličitý se k hydroxidu vápenatému přes vodu nedostane. [15, 16]

Fatální důsledky může mít zmrznutí vápenné kaše, jelikož při něm dochází ke značné ztrátě pojivových vlastností. Nízká teplota zpomaluje proces vysychání i chemické reakce. Nedoporučuje se proto provádět omítky později než v říjnu, jelikož ty pak nestihnou do zimy vytvrdnout a popraskají. [15, 16]

Zatížení nosné konstrukce zvýšenou vlhkostí a přítomností ve vodě rozpustných solí ohrožuje jak čerstvou vápennou kaši, tak vytvrdlou omítku. Před jejím provedením je nejprve potřeba odstranit příčinu poruchy a vlhkost z konstrukce odvést. [15]

Podklad má být před nanášením malty navlhčen. Kromě smytí prachu a nepřídržných částic má vlhčení za důsledek naplnění kapilár nosné konstrukce vodou. Díky tomu pak materiál předčasně neodsaje záměsovou vodu z vápenné kaše. Pokud by k tomu došlo, vápno by popraskalo a ztratilo by přídržnost. Vlhčení podkladu se v minulosti označovalo jako zednické hřebíky. [15]

Je žádoucí ošetřovat čerstvě nanesenou omítku postříkem vodou, nebo ještě lépe vápennou vodou. Prodlouží se tak doba, při níž může docházet ke karbonataci. Ošetřované malty mají vyšší pevnosti a lépe odolávají mrazu. Vlhčení je vhodné provádět až po prvním vyschnutí malty, řádově několik dní po nanesení omítky. [15, 16]

### **3.4 Druhy vápna a způsoby jeho použití**

Vápno se ve stavebnictví používá na výrobu malt pro zdění a omítání. Stále patří k nejrozšířenějším stavebním pojivům a to i přes to, že podíl malt připravovaných z vápenného hydrátu přímo na stavbě výrazně klesl. Převážná většina průmyslově vyráběných produktů zůstává na bázi vápna. Velké množství se ho spotřebovává také při výrobě vápenopískových cihel a autoklávovaného pórobetonu. [11]

Vápenné mléko se stále používá k nátěrům fasád, tak zvanému bílení, což je často jediná možnost úpravy omítek památkově chráněných objektů. Výhodou bílení je také desinfekční účinek vápenného nátěru způsobený jeho silnou alkalitou. Kromě toho se vápno používá v hutnictví, potravinářství, v chemickém průmyslu, při likvidaci kyselých odpadů a v dalších aplikacích. Dolomitické vápno se používá kromě stavebnictví také na leštění kovů (velmi jemně mleté vídeňské vápno). [11, 13]

Formy hydroxidu vápenatého používané ve stavebnictví:

- vápenná voda: čirý roztok hydroxidu vápenatého;
- vápenné mléko: suspenze hydroxidu vápenatého s obsahem sušiny do 10 % (nátěry);
- vápenná kaše: suspenze hydroxidu vápenatého s obsahem sušiny okolo 50 % (zdící a omítkové malty);
- vápenný hydrát: práškový hydroxid vápenatý (zdící a omítkové malty).

Tab. 2 uvádí běžně používané druhy vzdušného vápna.

*Tab. 2: Druhy vzdušného vápna [5]*

<b>Druh vápna</b>	<b>Označení</b>	<b>Obsah CaO + MgO</b>	<b>Obsah MgO</b>
<b>Bílé vápno 90</b>	CL90	≥ 90 %	≤ 5 %
<b>Bílé vápno 80</b>	CL80	≥ 80 %	≤ 5 %
<b>Bílé vápno 70</b>	CL70	≥ 70 %	≤ 5 %
<b>Dolomitické vápno 85</b>	DL85	≥ 85 %	≥ 30 %
<b>Dolomitické vápno 80</b>	DL80	≥ 80 %	≥ 5 %
<b>Nehašené vápno</b>	Q		
<b>Hašené vápno bílé</b>	S		
<b>Polohašené vápno dolomitické</b>	S1		
<b>Plně hašené vápno dolomitické</b>	S2		

## 4 Degradace omítek vlivem nadměrné vlhkosti

Degradací je myšleno všestranné zhoršování vlastností materiálu, které může vést až k jeho úplné destrukci. Projevy degradace omítek mohou být v lepším případě pouze vizuální, v horším případě vedou ke zhoršení technických parametrů, jako jsou tepelně izolační vlastnosti, soudržnost nebo přídržnost k podkladu. Většina degradačních procesů je u omítek podmíněna, nebo alespoň urychlena, zvýšenou přítomností vlhkosti.

### 4.1 Příčiny degradace

Vlhkost se může dostat do omítky mnoha způsoby. Pochopitelně více ohrožené jsou vnější omítky, které musí vzdorovat povětrnostním podmínkám. Nejčastějším zdrojem krátkodobé vlhkosti je déšť, a to nejen ve formě vody stékající po fasádě, ale i ve formě odstříkující vody odrážející se od země. Nebezpečná je zemní vlhkost, která buď prosakuje z boku do stěny špatně odizolovaného suterénu, nebo proniká do konstrukce z podzákladí. Tato vlhkost kvůli kapilární elevaci vzlíná do nadzemních částí stavby a dostává se i do omítek. Voda se snadno a ve velké míře dostává do konstrukce v místě jejích poruch, například zatékáním do děravé střechy, nebo v případě havárií rozvodů. U objektů se zvýšenou vlhkostí vzduchu, jako jsou krytá koupaliště, kuchyně či některé výroby, difunduje ve vzduchu nasycená vodní pára do stěn a stropů. V těch může navíc zkondenzovat na kapalnou vlhkost, k čemuž dochází zpravidla při vnějším líci konstrukce, kde je teplota nižší než uvnitř. Opomenuta nesmí zůstat vlhkost technologická, jejímž zdrojem jsou stavební úpravy – aplikace nové omítky nebo její sanace. [8]

Přítomnost vody v materiálu zhoršuje celou řadu jeho vlastností – snižuje pevnosti, zvyšuje tepelnou vodivost materiálu a tím výrazně snižuje jeho tepelně-izolační vlastnosti. Jsou-li póry zaplněny vodou, zpomaluje se proces difúze i proces karbonatace. [8]

Voda je původcem degradace mechanické, chemické i biologické. Dojde-li ke zmrznutí vody v pórech, zvětší se její objem přibližně o 9 %, což vyvolá vnitřní tlak ve struktuře materiálu. Je-li tento tlak větší než jeho pevnost, v materiálu vzniknou mikrotrhliny, které dále přispívají ke snižování jeho pevnosti. [8]

Voda transportuje mnoho chemických látek, které jsou v ní rozpuštěné. Nebezpečí představují především různé ve vodě rozpustné soli. Nejčastěji se jedná o chloridy, jejichž zdrojem jsou posypové soli, nebo některé technologické procesy (úprava vody) a dusičnany,

kteře se vyskytují především v okolí hospodářských objektů, jejich zdrojem jsou hnojiva nebo také močovina. Dále se ve stavebních materiálech objevují uhličitany a sírany, které se do konstrukce dostávají z mineralizované spodní vody nebo znečištěné atmosféry. [8, 17]

Tyto soli se vyskytují v porézním systému ve formě roztoků. V případě, že dojde ke snížení obsahu vody v materiálu, vysychání, nastane rekrystalizace těchto látek. To je doprovázeno vznikem nových, objemných sloučenin, které vyvíjejí na strukturu látky tlak o velikosti až několik desítek MPa [17]. Podaří-li se solím vykristalizovat až na povrch konstrukce (zpravidla na povrch omítky), vytvoří se na ní nevzhledné výkvěty, připomínající bílé mapy. [8, 17, 18]

Dalším problémem může být schopnost některých solí vázat na sebe molekuly vody a vytvářet tak hydráty. Ty mají větší objem než původní sloučeniny, což opět vede k tlakům na stěny pórů. Nejvíce nebezpečný je síran vápenatý, jehož hydratační tlak dosahuje až 160 MPa. [17]

Roztoky solí navíc váží v materiálu hygroskopickou vlhkost. Každý roztok soli má určitou rovnovážnou vlhkost – tedy relativní vlhkost vzduchu, při níž je v rovnováze a voda se z něj neuvolňuje, ani se do něj nepřijímá. Rovnovážné vlhkosti těchto látek bývají velmi vysoké, až 97 %. Důsledkem toho jsou póry z části naplněny vodou a z části vzduchem silně nasyceným vodní parou. [8, 17, 18]

Nebezpečí představují kyselá deště, které jsou zdrojem sloučenin síry. Zvýšená vlhkost v materiálu umožňuje reakci uhličitanu vápenatého (který je především u vápenných malt nositelem pevnosti) na síran vápenatý, který je ve vodě rozpustný. Důsledkem toho je chemická koroze materiálu, při níž dochází k vymývání pojivové složky a následné ztrátě soudržnosti. Síran vápenatý navíc snižuje pH a může vytvářet objemné hydráty. [8]

Obdobný účinek mají oxidy dusíku přítomné v ovzduší. Difundují-li do materiálu, reagují v něm s vodou za vzniku dusitých a dusičných kyselin. Ty následně rozpouštějí uhličitán vápenatý a vytvářejí dusičnan vápenatý, který nemá pojivové vlastnosti a je velmi dobře rozpustný ve vodě. [19]

Dále kapalná vlhkost ve stavební konstrukci zvyšuje výskyt biologických činitelů – plísní, hub, lišejníků, řas i vyšších rostlin. Ty dále přispívají k její degradaci, ať už tím, že mění pH materiálu, zvyšují jeho vlhkost, rozkládají jeho pojivové složky, či na něj vyvíjejí tlak svými kořínky. Především plísně dále způsobují zatuchlý zápach v objektu a mají negativní dopad na lidské zdraví. [9, 17]



## 4.2 Ochrana proti degradaci

Vzhledem k výše popsaným negativním účinkům zvýšeného obsahu vlhkosti v omítkách je zde všeobecná snaha zamezit vodě v průniku do jejich porézního systému. Toho lze docílit pomocí různých prostředků, které vytvářejí krystalické či gelové sloučeniny na bázi křemičitých látek, jež utěsňují strukturu materiálu. Další možností je aplikace hydrofóbních látek, které zvyšují smáčecí úhel omítek a snižují tak schopnost kapaliny pronikat do kapilár.

### 4.2.1 Smáčecí úhel

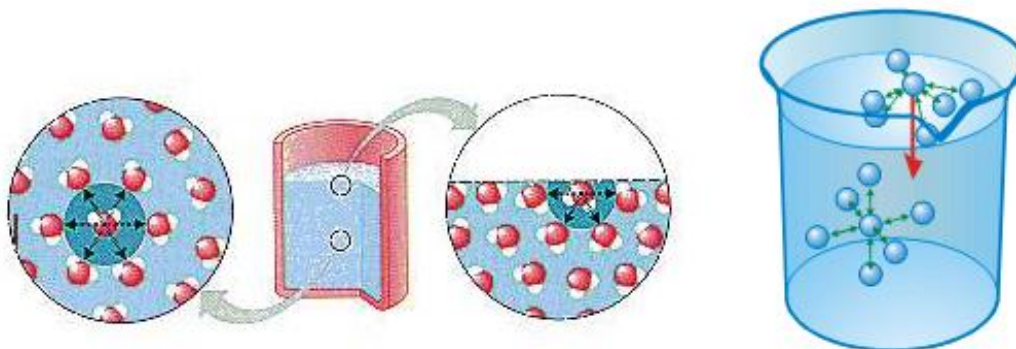
K pochopení toho, co je to smáčecí úhel, a jak lze jeho velikost ovlivnit, je potřeba znát některé základní pojmy týkající se vlastností a chování kapalin ve fázovém rozhraní.

Část termodynamické soustavy, která je na makroskopické úrovni homogenní, nebo se její vlastnosti v prostoru spojitě mění, je označována jako fáze. Oblast, ve které se vlastnosti systému (např. chemické složení nebo skupenství) mění skokově, se nazývá fázové rozhraní. Fáze se dělí na dvě části – objemovou část a povrchovou vrstvu. Povrchová vrstva sestává minimálně z jedné, zpravidla však z několika vrstviček molekul, které hraničí s fází další. Vykazuje některé vlastnosti rozdílné od objemové části, například u roztoků má povrchová vrstva po ustálení jinou koncentraci, především však má povrchová vrstva odlišnou energii. [20, 21]

Mezi částicemi látky, atomy a molekulami, existují odpudivé a přitažlivé síly. Jednak jsou to chemické vazby (kovalentní, iontová, kovová), jednak daleko slabší elektrostatické síly, tzv. slabé vazebné interakce. Pod ty spadají vodíkové můstky, které se projevují hlavně u polárních sloučenin, a Van der Waalovy síly. Tyto síly mají vliv na některé vlastnosti látek, jako jsou bod tání a varu, nebo právě povrchové napětí. [21]

Na částice v objemové fázi působí výše zmíněné síly ze všech stran, na částice v povrchové vrstvě pouze ze strany přilehající dovnitř látky (síly ze strany plynné fáze jsou zanedbatelné), viz Obr. 5. Je nutné zdůraznit, že tyto síly jsou jak přitažlivé, tak odpudivé, a jsou ve vzájemné rovnováze. Kdyby se jednalo pouze o přitažlivé síly, částice z povrchové vrstvy by byly neustále vtahovány do objemové fáze. Důsledkem této asymetrie je, že energie částic v povrchové vrstvě je dvojnásobně větší než energie částic v objemové fázi. Ve snaze snížit tuto energii se pak látka snaží zaujmout takový tvar, jaký má k danému objemu co nejmenší plochu povrchu. Ve vakuu by to pro každou tekutinu znamenalo tvar koule,

v reálných podmínkách je výsledný tvar ovlivněn dalšími silami, např. gravitací. Povrchovou vrstvu si lze zjednodušeně představit jako tenkou elastickou membránu, která drží látku „pohromadě“. Čím vyšší je modul pružnosti membrány (tedy čím vyšší je povrchové napětí), tím je látka semknutější (tím víc se tvar kapky blíží kouli). [20, 22]



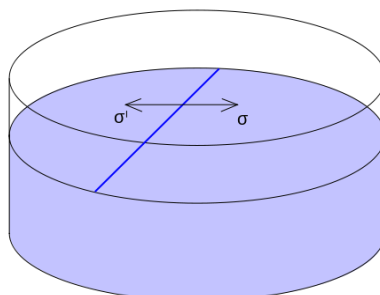
Obr. 5: Částice v objemové fázi a v povrchové vrstvě [23]

Energie povrchové vrstvy je v literatuře označována několika různými pojmy, ve své podstatě se však jedná o ty samé veličiny se shodnou jednotkou i velikostí.

Mezifázová energie  $\gamma$  [ $\text{J}/\text{m}^2$ ], označována také volná mezifázová energie, je práce potřebná k vratnému a izotermnímu vzniku jednotkové plochy fázového rozhraní. Ten je spojený s převodem molekul z objemové fáze do fázového rozhraní. [20, 21]

Mezifázové napětí  $\sigma$  [ $\text{N}/\text{m}$ ] je tečná síla, působící ve směru fázového rozhraní na úsečku jednotkové délky, viz Obr. 6. Někdy bývá také označováno  $\gamma$ . Jednotka  $\text{N}/\text{m}$  je ekvivalentní  $\text{J}/\text{m}^2$ , v tabulkách se pro tuto veličinu častěji používají jednotky tisíckrát menší,  $\text{mN}/\text{m}$ . [20, 21]

Pro rozhraní kapalně a plynné fáze se mnohem častěji než mezifázové napětí používá termín povrchové napětí  $\gamma$  [ $\text{N}/\text{m}$ ]. [20, 21]



Obr. 6: Grafické znázornění mezifázového napětí [22]

Vliv povrchového napětí na vlastnosti kapky roste se zvětšujícím se poměrem počtu částic v povrchové vrstvě ku počtu částic v objemové fázi. Jinými slovy, čím menší je kapka, tím více převládá účinek povrchového napětí nad ostatními silami působícími na kapku. [20]

Velikost povrchového napětí je pro různé kapaliny velmi rozdílná. Zatímco pro zkapalněné helium je 0,354 mN/m, pro roztavené železo dosahuje hodnoty 1880 mN/m. Povrchové napětí vody je při běžné teplotě okolo 72 mN/m, pro rtuť má hodnotu 476 mN/m. S rostoucí teplotou povrchové napětí klesá až ke kritické teplotě, při níž je nulové. Pro jednotlivé látky jsou hodnoty kritických teplot známé, jsou odvozeny i různé extrapoláční rovnice závislosti povrchového napětí na teplotě. [20, 24]

Důsledky povrchového napětí můžeme pozorovat v každodenním životě. Kapky rosy v trávě nebo na pavučinách zaujímají kulovitý tvar, stejně tak rozlitá rtuť se pospojuje do drobných kuliček, viz Obr. 7.



*Obr. 7: Vlevo: kapky vody [25]; vpravo: kapky rtuti [26]*

Díky povrchovému napětí vody si drobný hmyz dokáže sednout na hladinu, aniž by se potopil. Napětí ve fázovém rozhraní využívají také některé vodní rostliny, které mají na povrchu listů přírodní hydrofobní látky. Známý je pokus, kdy je na hladinu vody ve sklenici položena mince či kancelářská sponka, která se nepotopí, přestože má vyšší objemovou hmotnost než voda. Avšak je-li do vody přidáný saponát, povrchové napětí se sníží a sponka klesne ke dnu. Dalším příkladem je vrstva vodního proudu vzlínající nad hladinu, viz Obr. 8.



Obr. 8: Vlevo: kancelářská sponka na hladině [22]; vpravo: vzlínající proud [22]

Povrchové napětí kapaliny určuje, jaký tvar zaujme kapka na povrchu tuhého tělesa v daném prostředí. V praxi je tento tvar obvykle definován pomocí smáčecího úhlu.

Smáčecí úhel  $\theta$  [°], zvaný též kontaktní úhel, je jednou z mála přímo měřitelných vlastností fázového rozhraní. Je definován jako úhel, který svírá tečna k povrchu kapky vedená v bodě styku kapky s povrchem tělesa. Jeho velikost je dána především vlastnostmi zúčastněných látek, konkrétně hodnotami jejich mezifázových napětí, v menší míře je ovlivněna stavem prostředí – teplotou a tlakem. [20, 21, 24].

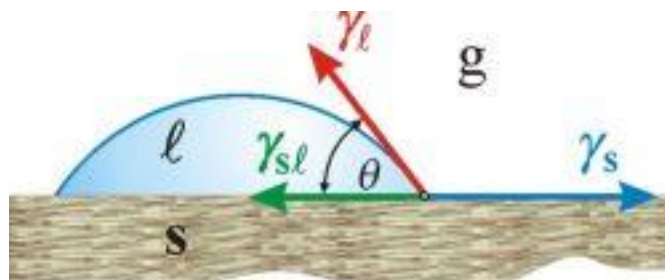
Vztah mezi úhlem smáčení a jednotlivými mezifázovými napětími vyjadřuje Youngova rovnice:

$$\gamma_{lg} \cdot \cos\theta = \gamma_{sg} - \gamma_{sl} \quad (5)$$

kde je  $\gamma_{lg}$  mezifázové napětí na rozhraní kapalina/plyn v N/m

$\gamma_{sg}$  mezifázové napětí na rozhraní pevná látka/plyn v N/m

$\gamma_{sl}$  mezifázové napětí na rozhraní pevná látka/kapalina v N/m



Obr. 9: Grafické znázornění smáčecího úhlu [21]

Z Youngovy rovnice je patrné, že mohou nastat čtyři případy:

1) Dokonalé smáčení, nazývané též rozestírání. V tomto případě platí

$$\gamma_{sg} \geq \gamma_{ls} + \gamma_{lg}$$



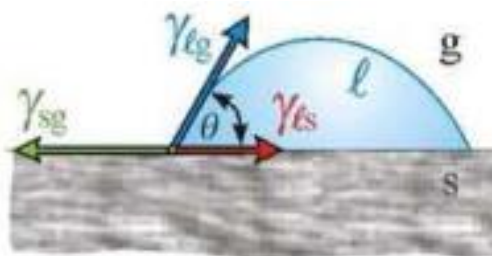
Obr. 10: Dokonalé smáčení [20]

Mezifázová energie na rozhraní pevná látka/plyn je vyšší než součet mezifázových energií na rozhraní pevná látka/kapalina a kapalina/plyn. V důsledku snahy o snížení volné energie systému se kapalina souvisle rozestře v tenké vrstvičce po povrchu pevné látky. Rozhraní pevná látka/plyn tak zanikne, je nahrazeno dvěma novými rozhraními pevná látka/kapalina a kapalina/plyn. Smáčecí úhel  $\theta=0^\circ$ . [20, 21]

2) Dobré smáčení, které nastává za podmínek

$$\gamma_{sg} < \gamma_{ls} + \gamma_{lg}$$

$$\gamma_{sg} > \gamma_{ls}$$



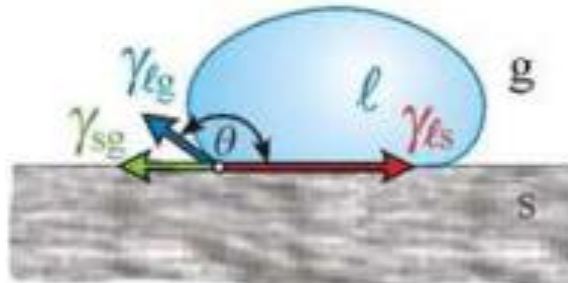
Obr. 11: Dobré smáčení [20]

V tomto případě kapalina zaujme na povrchu tvar kapky. Smáčecí úhel  $0^\circ < \theta < 90^\circ$  je ostrý, takže kapka bude nízká, přilnutá k povrchu. [20, 21]

3) Špatné smáčení, pro které platí

$$\gamma_{sg} < \gamma_{ls} + \gamma_{lg}$$

$$\gamma_{sg} < \gamma_{ls}$$

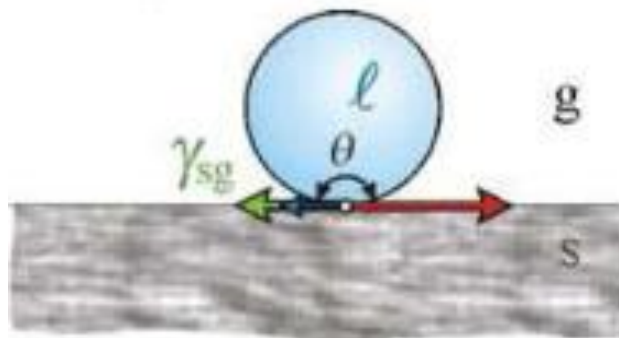


Obr. 12: Špatné smáčení [20]

Smáčecí úhel  $90^\circ < \theta < 180^\circ$  je tupý, kapka bude výrazně vypouklá nad povrch pevné látky. [20, 21]

4) Dokonalé nesmáčení, které nastává když

$$\gamma_{sg} = \gamma_{ls} - \gamma_{lg}$$



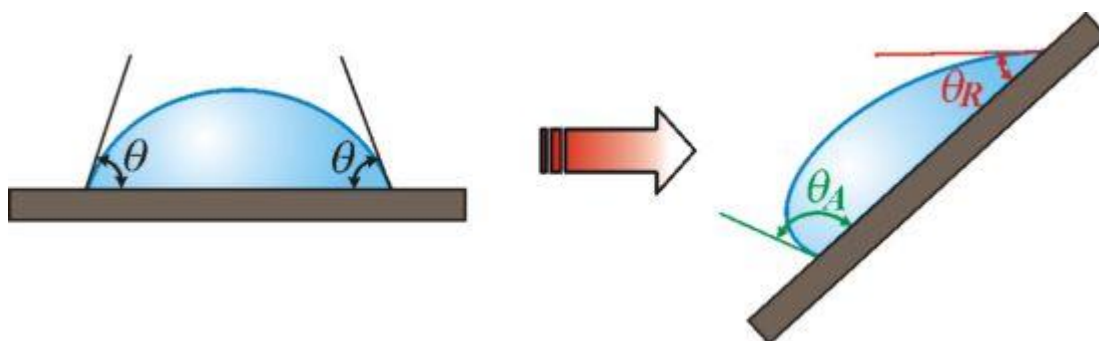
Obr. 13: Dokonalé nesmáčení [20]

V tomto případě je smáčecí úhel  $\theta = 180^\circ$ . Mezifázové napětí na rozhraní pevná látka/plyn je rovno rozdílu napětí na rozhraní pevná látka/kapalina a kapalina/plyn. Je tedy energeticky výhodné, pokud je ploška styku kapaliny s pevnou látkou co nejmenší, tedy 1 bod. Kapka proto bude mít tvar koule. [20, 21]

Velikost smáčecího úhlu může být dále ovlivněna několika faktory.

Jedním z nich je hystereze. Smáčecí úhel může být měřen buď ve statickém, klidovém stavu, nebo za vzájemného pohybu kapaliny a pevného podkladu. V tom případě rozeznáváme smáčecí úhel postupující  $\theta_A$  (při spodním okraji stékající kapky) a smáčecí úhel ustupující  $\theta_R$  (při horním okraji stékající kapky), viz Obr. 14. Z obrázku je patrné, že postupující úhel je větší než ustupující úhel, rozdíl jejich velikostí  $H$  se nazývá hystereze. [20, 21]

Hystereze může dosahovat hodnoty až  $50^\circ$ , obecně platí, že se zlepšujícím se smáčením pevné látky kapalinou její velikost klesá. Zajímavé je, že smáčecí úhel naměřený ve statickém stavu obvykle není aritmetickým průměrem  $\theta_A$  a  $\theta_R$ , jeho hodnota se značně blíží  $\theta_A$ . Příčinou hystereze je nehomogenita, drsnost povrchu a přítomnost nečistot. [20, 21, 24]



Obr. 14: Hystereze smáčecího úhlu [21]

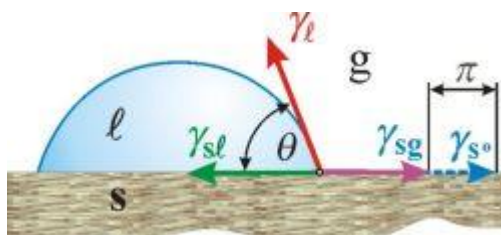
Plynné látky, které se adsorbují na povrchu pevné látky (může se jednat o plynnou fázi přisedící kapky či o jinou plynnou látku) snižují její povrchové napětí. Tento rozdíl se nazývá povrchový tlak  $\pi$ , viz Obr. 15. Popisuje ho vztah:

$$\pi = \gamma_{s0} - \gamma_{sg} \quad (6)$$

kde je  $\gamma_{sg}$  mezifázové napětí pevné látky s adsorbovaným plynem v N/m

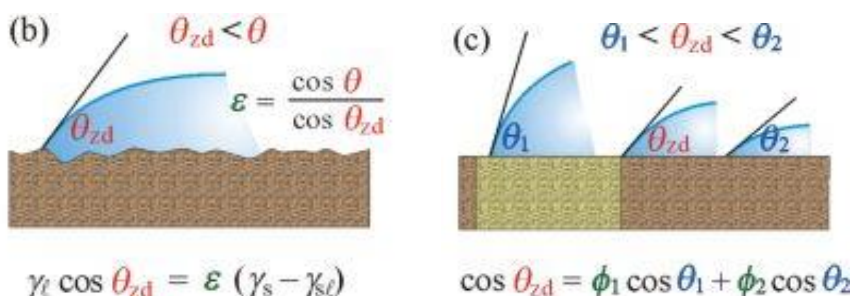
$\gamma_{s0}$  mezifázové napětí původní čisté látky v N/m

Vliv adsorpce plynu se projevuje především u látek s vysokou povrchovou energií. [20, 21, 24]



Obr. 15: Vliv adsorpce plynu [21]

Naměřená velikost smáčecího úhlu je značně ovlivněná drsností povrchu a jeho nehomogenitou. Je nutno si uvědomit, že stoprocentně rovinného a stejnorodého povrchu není v praxi možné dosáhnout, a to ani v podmínkách laboratoře. Je proto potřeba případné nedostatky povrchu vhodně zohlednit ve výpočtu reálného smáčecího úhlu. [20, 21]



Obr. 16: Vlevo: vliv nerovnosti povrchu [21], vpravo: vliv nehomogenity materiálu složeného ze dvou chemicky odlišných fází [21]

Vliv nerovnosti povrchu se zobrazí jako empiricky stanovený koeficient drsnosti  $\epsilon$ . Nehomogenita materiálu se zohlední pomocí váženého průměru smáčecích úhlů čistých složek. [21]

V neposlední řadě nesmí být opomenuta případná reakce pevné látky a kapaliny. Jedná se o chemické reakce, bobtnání pevné látky, či její rozpouštění. [21]

Další podstatný jev, který je závislý na povrchovém napětí, a který má především v odvětví stavebních materiálů dalekosáhlé důsledky, je kapilární vztlakovost.

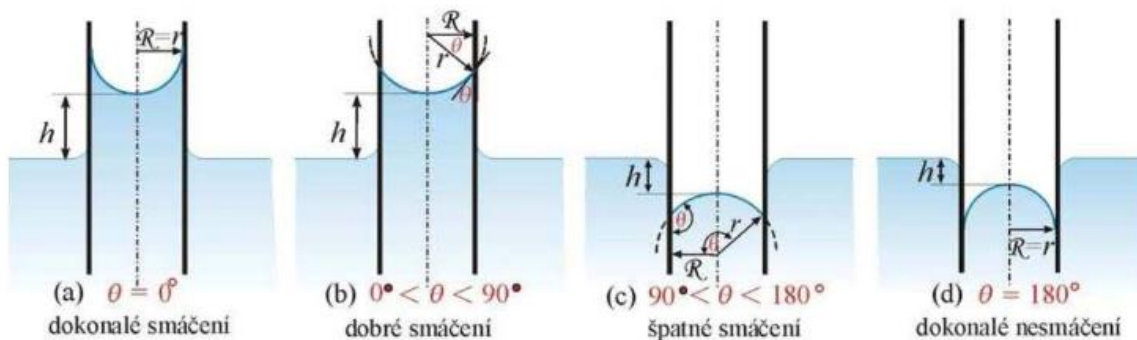


Výška do které hladina kapaliny v kapiláře vystoupá je dána vztahem:

$$\gamma_{sl} \cdot 2\pi R h - \gamma_{sg} \cdot 2\pi R h + \pi R^2 h^2 \rho_l g = 0 \quad (7)$$

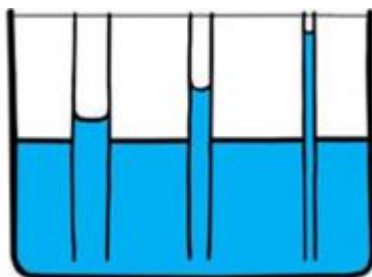
- kde je  $R$  poloměr kapiláry v m  
 $h$  výška, do které vystoupá kapalina v kapiláře v m  
 $\gamma_{sg}, \gamma_{sl}$  mezifázová napětí v N/m  
 $\rho_l$  objemová hmotnost kapaliny v kg/m<sup>3</sup>

Ze vztahu vyplývá, že pro kapaliny, které dobře smáčí daný povrch, převládají síly povrchového napětí nad silou gravitace a výška  $h$  dosahuje kladných hodnot, kapalina tedy stoupá nad úroveň hladiny. Naopak u špatně smáčejících kapalin bude výška  $h$  záporná, hladina v kapiláře se ustaluje pod úrovní hladiny okolní kapaliny, viz Obr. 17. [20, 21]



Obr. 17: Vliv povrchového napětí na chování kapalin v kapilárách [20]

Čím je kapilára užší (poloměr  $R$  menší), tím menší význam má gravitace a tím výraznější je vliv povrchového napětí, tedy tím výše hladina dobře smáčející kapaliny v kapiláře vystoupá, viz Obr. 18.



Obr. 18: Vliv průměru kapiláry [27]

Znalost principu povrchového napětí a možností jeho regulace má všestranné využití. Běžně se v domácnosti používají různá mýdla a saponáty ke snížení povrchového napětí vody, což umožňuje odstranění různých mastných nečistot (tedy špatně smáčivých látek). Na principu snížení povrchového napětí fungují rozličné penetrační nátěry, nutné jako podklad např. pod samonivelační stěrky. Ty pak vykazují téměř dokonalé smáčení takto upraveného podkladu a rovnoměrně se po něm rozlijí. Penetrace se používá rovněž pod mnohé druhy nátěrů a laků. Často využívaná je metoda zjištění porozity materiálů – rtuťová porozimetrie. Jelikož rtuť běžné povrchy špatně smáčí, je potřeba dodat vnější tlak k tomu, aby se tato kapalina do pórů dostala. Z naměřené hodnoty tlaku a známých hodnot povrchových napětí se pak vypočítá velikost průměru kapilár. Využívají se ale i chemické látky, které naopak povrchové napětí zvyšují – jsou to hydrofobní přísady a nátěry, které mají za úkol zamezit průniku kapalné vody do materiálu. Aplikují se např. na omítky za účelem snížení navlhání a následného transportu solí, což má, spolu s objemovými změnami vody vlivem mrazu, podstatný vliv na jejich životnost. Dále se používají na různé tepelně izolační materiály, u kterých zvýšený obsah kapalné vlhkosti značně zvyšuje vodivost tepla a tedy zhoršuje jejich izolační vlastnosti.

#### **4.2.1.1 Metody měření smáčecího úhlu**

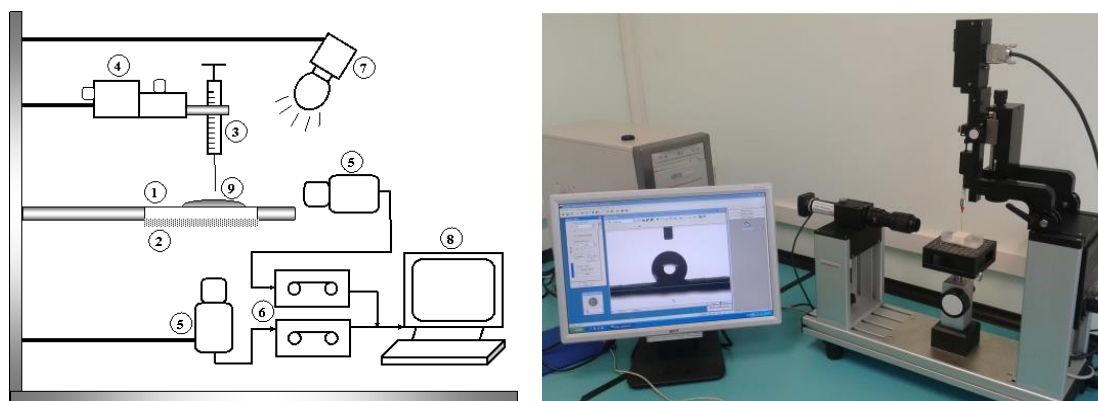
K měření smáčecího úhlu kapalin na povrchu pevné látky se používá mnoho metod. Tyto metody se dělí na statické, kdy měření probíhá v ustáleném stavu a naměřené hodnoty jsou v čase konstantní, a dynamické, při kterých se poloha kapaliny a pevné látky v čase mění. Při použití dynamické metody je třeba zohlednit hysterezi smáčení. [20, 21, 24]

Metody měření smáčecího úhlu mohou být přímé, pokud se měří úhel mezi povrchem pevné látky a povrchem kapky, a nepřímé, pokud se měří jiná fyzikální vlastnost a hodnota smáčecího úhlu je následně vypočítána ze známých vztahů. [20, 21, 24]

##### ***4.2.1.1.1. Metody přímé statické***

Nejčastěji využívanou metodou, která je poměrně přesná a rychlá, je měření úhlu na přisedlé kapce. Kapka je aplikována pomocí mikropipety na zkoumaný vzorek (postačí několik centimetrů čtverečních) a umístěna do komory měřicího přístroje. V ní je ozářena paprskem světla a pomocí CCD kamery či jiného optického zařízení je nasnímána do počítače. Na obrazovce se ukáže zvětšený profil kapky, přístroj sám vypočítá hodnotu

smáčecího úhlu z tečny povrchu kapky vedené z místa kontaktu kapaliny a pevné látky, viz Obr. 19. Přístroje pracují většinou s přesností na  $1^\circ$ . Přesnost měření není v tomto případě limitována vlastnostmi měřícího zařízení, ale možností zajistit dostatečně rovinný a homogenní vzorek. Větší nepřesnosti pak vznikají u úhlů menších než  $10^\circ$  nebo větších než  $160^\circ$  z důvodu komplikované lokace bodu kontaktu. [20, 24, 28]



*Obr. 19: Vlevo: schéma přístroje [29]; vpravo: příklad optického přístroje pro přímé měření smáčecího úhlu [30]*

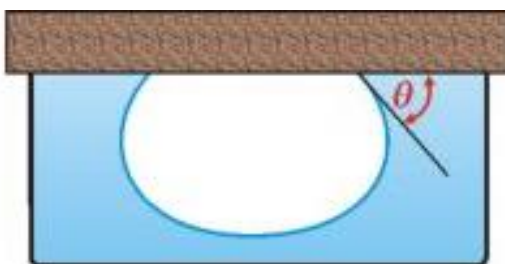
Výhodou této přímé metody je získání hodnot bez nutnosti znalostí dalších charakteristik (povrchového napětí kapaliny a pevné látky).

Tento typ přístrojů pro měření kontaktního úhlu vyrábí několik firem, především zahraničních (např. Krüss, BiolinScientific–Attension), vlastní modifikaci, zvanou SeeSystem (Surface Energy Evaluation System) vyvinuli na Přírodovědné fakultě MU. [24, 28]



*Obr. 20: Přístroj firmy BiolinScientific–Attension [31]*

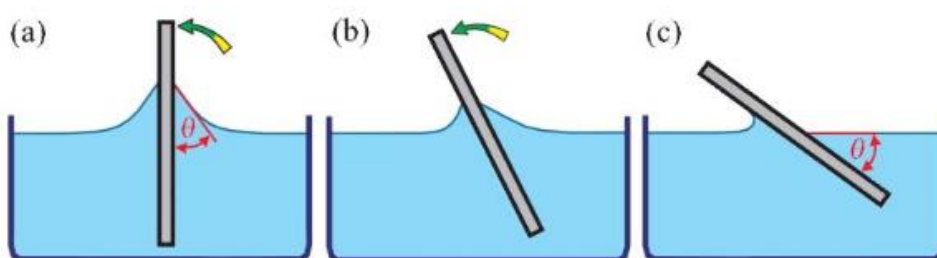
Obdobně funguje metoda přilínající bubliny, viz Obr. 21.



Obr. 21: Metoda přilínající bubliny [21]

#### 4.2.1.1.2. Metody přímé dynamické

Mezi tyto metody spadá především měření úhlu smáčení na naklánějící se destičce. Destička ze zkoumaného materiálu je ponořena do kapaliny a následně pomalu nakláněna až do té doby, kdy je na odlehle straně povrch hladiny rovný až do styku s destičkou, viz Obr. 22. Jedná se o vůbec nejstarší používanou metodu měření kontaktního úhlu. Výhodou je její snadná proveditelnost a ekonomická nenáročnost, nevýhodou je možnost použití jen pro malé úhly (cca do  $10^\circ$ , při vyšších úhlech hrozí velké nepřesnosti). Vzhledem k tomu, že se jedná o dynamickou metodu, je nutné zohlednit hysterezi. [21, 24]



Obr. 22: Metoda měření úhlu smáčení na naklánějící se destičce [24]

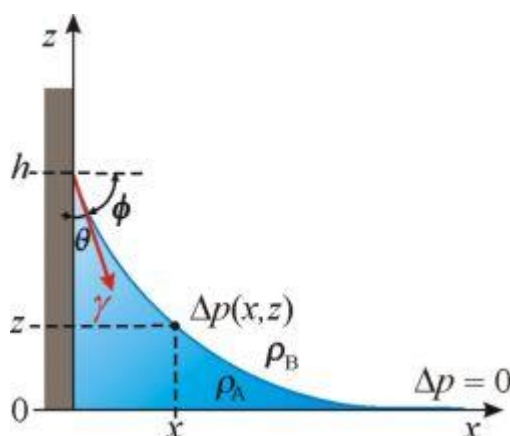
#### 4.2.1.1.3. Metody nepřímé statické

Do této kategorie patří metoda využívající kapilární elevaci na přilehlé destičce. Měřena je výška, do které vystoupá meniskus na povrchu svislé destičky, viz Obr. 23. Pro výpočet smáčecího úhlu je nutno znát povrchové napětí použité kapaliny. [21, 24]

Vztah pro jeho výpočet je odvozen z Youngovy rovnice:

$$\sin \theta = 1 - \frac{\Delta \rho \cdot g h^2}{2\gamma} \quad (8)$$

- kde je  $\theta$  smáčecí úhel ve  $^\circ$   
 $\Delta \rho$  rozdíl hustoty kapalné a okolní plynné fáze v  $\text{kg/m}^3$   
 $g$  tíhové zrychlení v  $\text{m/s}^2$   
 $h$  výška menisku v m  
 $\gamma$  povrchové napětí kapaliny v  $\text{N/m}$



Obr. 23: Meniskus kapaliny vztlínající na povrch svislé destičky [21]

#### 4.2.1.1.4. Metody nepřímé dynamické

Základem metody vyvažování Wilhelmyho destičky je měření síly potřebné k vyvážení rovné svislé destičky vnořené do kapaliny. Destička ze zkoumaného materiálu je nejprve zavěšena na váhy a vyvážena do nulové polohy. Poté je ponořena do kapaliny, ze které je následně vytahována, současně je měřena síla, která je k tomu potřeba, viz Obr. 24. [21, 24]

Smáčecí úhel je vypočítán ze vztahu:

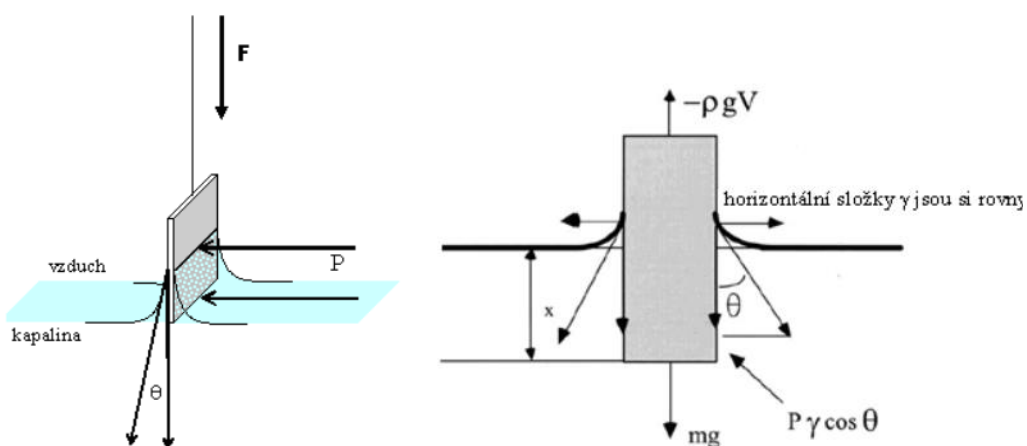
$$F = m \cdot g + P\gamma \cdot \cos \theta - \rho g V \quad (9)$$

- kde je  $F$  síla vytahující destičku v N  
 $m$  hmotnost destičky v kg  
 $g$  tíhové zrychlení v  $\text{m/s}^2$   
 $P$  obvod ponořené části destičky v m  
 $\gamma$  povrchové napětí kapaliny v  $\text{N/m}$   
 $\theta$  smáčecí úhel ve  $^\circ$

$\rho$  hustota kapaliny v  $\text{kg/m}^3$

$V$  objem ponořené části destičky, respektive objem vytlačené kapaliny v  $\text{m}^3$

Stejně jako u předešlých metod, i u této jsou přísné nároky na homogenitu, rovinnost, nenasákavost a čistotu materiálu. Jelikož se u této metody měří síla, hrozí zde navíc zkreslení výsledků v případě, že se na povrchu destičky adsorbují plynné látky (vodní pára). Protože se jedná o dynamickou metodu, musí se zohlednit hystereze. Nejlepším postupem je změřit jak postupující úhel (klesající destička), tak ustupující úhel (stoupající destička) a výsledky interpolovat. [21, 24]



Obr. 24: Schéma metody vyvažování Wilhelmyho destičky [24]

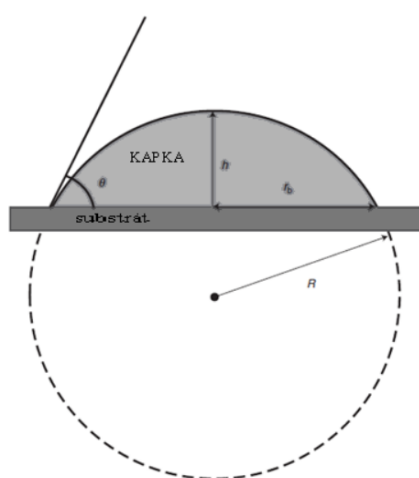


Obr. 25: Metoda vyvažování Wilhelmyho destičky – detail přístroje firmy Krüss [32]

Další nepřímou metodou je analýza profilu kapky. Ta vypočítává kontaktní úhel nepřímo z měření jejích rozměrů. Aby se mohl uskutečnit výpočet, měla by být kapka tak malá, aby její

odchylka od kulovitého tvaru byla zanedbatelná, tedy aby tvar kapky, především její výška, nebyl zkreslený vlivem gravitace. [21, 24]

Jsou-li známy alespoň dva rozměry kapky, výška a průměr, nebo průměr a objem, vypočítá se kontaktní úhel dle známých geometrických rovnic, viz Obr. 26. Podobně jako u jiných metod, i zde plynou odchylky od skutečného stavu především z nehomogenity materiálu, potažmo jí způsobené nepravidelné geometrie kapky. Metoda se dá používat jako statická, i jako dynamická – pro materiály reagující s kapalinou (nasákávání, bobtnání, rozpouštění) není tvar kapky v čase konstantní. Je tedy nasnímáno rychle za sebou mnoho snímků monitorujících kapku a následně je vyhodnocen její vývoj. [21, 24]



Obr. 26: Předpokládaná geometrie kapky [24]

Nepřesnosti způsobené nepravidelností kapky na drsném materiálu jsou eliminovány metodou analýzy profilu axisymetrické kapky. Profil kapky je snímán kamerou, je vytvořen jeho digitální obraz a počítačem je vypočítán střední průměr kapky. Dále je potřeba znát objem kapky, povrchové napětí kapaliny a rozdíl hustot kapaliny a okolní plynné (případně kapalně) fáze. Z těchto údajů je následně pomocí empirického vzorce vypočítána přibližná hodnota smáčecího úhlu. [21, 24]

#### 4.2.2 Hydrofobizační látky

Jedním z nejúčinnějších způsobů, jak zabránit vodě aby se dostala do materiálu, je hydrofobizace. Hydrofobní látky, nebo též česky vodoodpudivé látky, mají takovou energii povrchové vrstvy, že na nich kapka vody zaujme vysoký smáčecí úhel, viz Obr. 27. Jak bylo

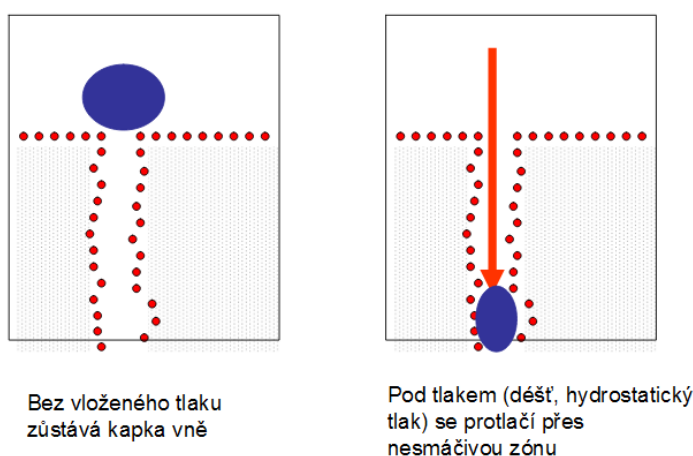
zmíněno v předešlé kapitole, čím větší je smáčecí úhel kapaliny na povrchu pevné látky, tím obtížněji se kapalina dostává do jejích pórů a kapilár.

Hydrofóbní látky se rozprostírají po povrchu stavebních materiálů a vytvářejí na nich tenkou, většinou jen několikamolekulovou souvislou vrstvu. Tímto vlastně mění rozhraní stavební materiál/voda na dvě nová rozhraní, stavební materiál/hydrofobizace a hydrofobizace/voda, čímž snižují povrchové napětí celého systému. [33]



Obr. 27: Smáčecí úhel kapaliny na nehydrofobizovaném materiálu a na hydrofobizovaném materiálu [9]

Je však třeba zdůraznit, že hydrofobizací nedochází k utěsnění pórů. Pokud je voda do kapilár hnána pod tlakem (například podzemní tlaková voda), snížená smáčivost materiálu ji nezastaví, viz Obr. 28. [34]



Obr. 28: Vliv vnějšího tlaku na průchod vlhkosti kapilárou [34]

Hydrofobizace má tedy za úkol znatelně snížit průnik kapalné vlhkosti do materiálu, avšak, a to je důležité, neměla by zabráňovat transportu plynné vlhkosti. Jinými slovy, neměla by výrazně zvyšovat faktor difúzního odporu. [9, 35]

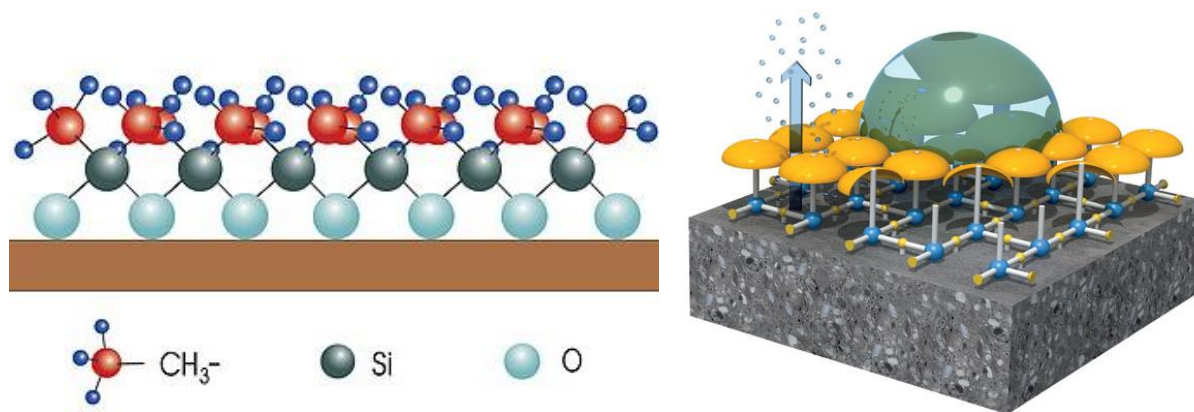


Hydrofobizace může být aplikována dvěma způsoby. Vnější ošetření je provedeno formou nátěrů či nástřiků, případně u malých prvků (střešní tašky, obkladové dlaždice) namáčením v dané látce. Vnější hydrofobizace bývá většinou prováděna jako dodatečné opatření proti průniku vlhkosti při sanaci objektu, ale může být samozřejmě aplikována i na nové stavební prvky. V tomto případě je třeba dbát na to, aby byl povrch dostatečně vyzrálý. U betonu a omítek je to minimálně 28 dní, nicméně se doporučuje nanášet tyto látky až ve stáří jednoho roku, poté, co materiál prošel cyklem všech ročních období. Vnitřní hydrofobizační látky jsou přidávány během výroby do záměsi, dají se tedy aplikovat pouze u nově vyrobených omítek či betonu. Tento způsob ochrany je daleko účinnější, jelikož brání průniku vody ze všech stran, nikoli pouze z povrchu. Odolává tak vztlínající vlhkosti i vodě, která se do konstrukce dostane v důsledku jejích poruch či havárií rozvodů. Na pomezí těchto dvou způsobů použití je injektáž vodoodpudivých látek dovnitř materiálu, kde vytvoří podpovrchovou pro vodu neprostupnou bariéru. [35, 36]

Pokud jsou hydrofobizační látky nanášeny formou nátěru, měly by vytvořit na povrchu ošetřovaného materiálu tenkou, okem neviditelnou vrstvičku (tloušťka v řádech  $\mu\text{m}$ ). Tato vrstvička by měla pokrýt také povrch kapilár, sledovaným parametrem je tedy i hloubka penetrace. Vzhledem ke své velmi malé tloušťce nátěr nezmenšuje průměr kapilár. [9, 35]

Snaha o ochranu povrchů staveb proti vlhkosti se objevovala již ve starověkém Římě. V historii používané vodoodpudivé látky měly charakter různých přírodních olejů a vosků. Nejčastěji používaný byl lněný olej, případně jeho tepelně upravená modifikace lněná fermež. Některé současné výzkumy se zabývají vlivem lněného oleje na vlastnosti modifikovaných vápenných malt, olej je však v tomto případě přidáván do záměsi již při výrobě. [2, 37]

V současnosti používané hydrofobní látky jsou zpravidla nepolární sloučeniny (voda je polární) obsahující dlouhý uhlovodíkový řetězec [9]. Často se jedná o různé modifikované vosky, oleje nebo syntetické polymery. Nejčastěji zastoupenou skupinou jsou silikony, organokřemičité látky na pomezí anorganické a organické chemie. Jejich hlavní část je tvořena polysiloxanovým řetězcem, tedy střídajícími se atomy křemíku a kyslíku, na který jsou navázány uhlovodíkové řetězce. Vodoodpudivý efekt těchto látek spočívá v navázání polysiloxanové části na silikátový stavební materiál, přičemž jsou uhlovodíkové řetězce nasměrovány od povrchu a odpuzují vodu, viz Obr. 29. S rostoucím počtem uhlovodíkových řetězců polymery pomaleji ztrácí vodoodpudivost vlivem UV záření, s jejich rostoucí délkou se zvyšuje odolnost polymerů vůči alkalickému prostředí. Čím méně je materiál porézni, tím musí mít aktivní látka menší molekuly, aby byla schopna do něj proniknout [9, 35, 38, 39, 40].



Obr. 29: Vlevo: schéma silikonové látky navázané na silikátový materiál [9], vpravo: princip hydrofobizačního efektu silikonových látek [39]

Mezi druhy silikonů nejčastěji používané pro hydrofobizaci stavebních materiálů patří silany, silanoláty a siloxany. [9, 34, 35]

Roztoky siloxanových pryskyřic v organickém rozpouštědle jsou bezbarvé, většinou jednosložkové látky. Hydrofobizační efekt u nich nastupuje ihned po odpaření rozpouštědla, které ovšem představuje riziko požární, ekologické i zdravotní. Výhodou je, že je lze pomocí ředidla z materiálu odstranit. Nedají se aplikovat na vlhké povrchy, ale mohou být nanášeny na již dříve hydrofobizované plochy. Jen mírně pronikají do materiálu. [35]

Siloxanové pryskyřice ve vodní emulzi jsou vodou ředitelné prostředky, obsahující kromě vody také menší množství organického rozpouštědla. Bývají mléčně zbarvené, jsou většinou jednosložkové. Hydrofobizační efekt těchto látek nastává ihned po odpaření rozpouštědla a vody. Lze je natírat na vlhké povrchy, ale nedají se použít na povrchy již dříve hydrofobizované. Nutné je přidat do směsi smáčedlo pro vytvoření emulze, což mírně zpomaluje účinky hydrofobizace. Smáčedlo se časem odplaví srážkovou vodou. [35]

Nízkomolekulární polymery, zvané také oligomery, tvoří v organickém rozpouštědle dvousložkový systém. Je potřeba přidat katalyzátor, který umožní následné zesíťování a vytvoření žádoucího účinného polymeru. Jejich výhodou je, že menší molekuly proniknou lépe a hlouběji do materiálu. [35]

Nízkomolekulární polymery mohou být použity i jako jednosložkové, po aplikaci reagují se vzdušnou vlhkostí či vlhkostí nutnou k ošetřování a následně zesíťují. Menší molekuly jsou schopny proniknout hluboko do materiálu, kde se navážou na povrch křemenných zrn. V důsledku toho se dají z materiálu jen těžko odstranit. Jedinou možností je mechanická abraze. [35]

Silany (nebo též estery kyseliny křemičité) v organickém rozpouštědle jsou bezbarvé jednosložkové systémy. Reagují s vlhkostí ze vzduchu nebo z ošetřování a vytvářejí v materiálu gel kyseliny křemičité. Tyto látky kromě hydrofobizace také zvyšují pevnost materiálu. Nevýhodou je, že jsou prakticky neodstranitelné a vzhledem k časově náročné tvorbě siloxanové vrstvy mají pomalejší nástup účinků. [9, 35]

Methylsilanoláty sodné a draselné rovněž reagují s vlhkostí ze vzduchu nebo z ošetřování a s oxidem uhličitým vyskytujícím se ve vzduchu. V hydrofobizovaném materiálu vytvářejí kromě gelu kyseliny křemičité i hydroxidy sodné, respektive draselné. Ty se následně vyluhují na povrch a vytvářejí výkvěty, které jsou dále smývány srážkovou vodou. Kvůli tvorbě výkvětů se tyto látky výrazně nedoporučují používat na ošetřování památkově chráněných objektů. Z materiálu jsou rovněž neodstranitelné. Používají se ale poměrně často, jelikož jsou podstatně levnější než výše zmíněné prostředky. [9, 35]

Dalšími hydrofobizačními prostředky, které už ale nepatří mezi silikony, jsou roztoky nebo emulze vosků. U nich však hrozí nežádoucí lepivost povrchu a uzavření pórů. [35]

Pod označením hydrofobizační prostředek se vyrábí řada dalších přípravků, mohou to být roztoky a emulze akrylátových, styrenových nebo polyvinylacetátových pryskyřic, vosků, olejů či mýdel. Mechanismus ochrany této skupiny látek před vlhkostí však spočívá ve vytvoření nejen pro vodu, ale i pro páru nepropustného filmu. Tyto přípravky by tedy správně neměly být označovány jako hydrofobizace. [9]

<p><b>Historické hydrofobizátory</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- lněná fermež</li> <li>- makový olej</li> <li>- ...</li> </ul>	<p><b>Silanoláty</b></p> $\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\   \\ \text{OH} - \text{Si} - \text{OH} \\   \\ \text{O} \cdot \text{K}^+ \end{array}$	<p><b>Silany</b></p> $\begin{array}{c} \text{R} \\   \\ \text{OEt} - \text{Si} - \text{OEt} \\   \\ \text{OEt} \end{array}$	<p><b>Siloxany</b></p> $\begin{array}{c} \text{R}_1 \quad \text{R}_2 \\   \quad   \\ \text{OEt} - \text{Si} - \text{O} - \text{Si} - \text{OEt} \\   \quad   \\ \text{OEt} \quad \text{OEt} \end{array}$
	<p>Speciální použití</p>	<p>Pro hutné materiály, např. beton</p>	<p>Porézní materiály cihla, pískovec, penetrace</p>

Obr. 30: Druhy hydrofobních látek nejčastěji používaných pro stavební materiály [34]

Další skupinou hydrofobizátorů jsou oleochemikálie. Jedná se o soli odvozené od nasycených a nenasycených mastných kyselin, bývají též nazývány kovová mýdla. Tyto látky se používají jako vnitřní hydrofobizační prostředky, jejich efekt je dobře patrný již při nízkém dávkování. Patří mezi ně následující dva druhy látek. [35, 41]

Mýdla alkalických zemin jsou účinné hydrofobizátory s okamžitým působením. Jejich nevýhodou je obtížné smáčení čerstvé malty a skutečnost, že jejich účinky nebývají stálé. Patří mezi ně zejména soli odvozené od kyseliny stearové, označované stearany nebo stearáty. Používají se především stearany hliníku, zinku, vápníku a hořčíku. [41]

Mýdla alkalických kovů bývají někdy také označována jako reaktivní mýdla. Jejich účinek není okamžitý, v materiálu musí nejprve zreagovat s volným oxidem vápenatým na výše zmíněné soli alkalických zemin. Tyto látky mají silné disperzní vlastnosti a dobrou smáčivost. Jejich účinek je stálý. Nejčastěji se používají soli odvozené od kyseliny olejové, především oleát sodný. [41]

Nejlepších účinků je dosaženo kombinací těchto dvou skupin látek.



*Obr. 31: Různé formy hydrofobních látek [34]*

Hydrofobizační nátěry jsou často výrobky dodávané ve formě aktivní látky v rozpouštědle. Obsah aktivní látky v prostředku bývá 5 – 10 %. Tato rozpouštědla musí být zdravotně nezávadná a po jejich odpaření by ošetřený povrch neměl zůstat lepivý, lesklý ani zabarvený. [9, 35, 42]

Použitá hydrofobizační látka by měla mít stálé vlastnosti při zatížení povětrnostními podmínkami, nemělo by docházet k jejímu rozpouštění či vymývání, žloutnutí vlivem UV záření, měla by být odolná alkalickému prostředí. [9, 35]

Pokud jsou hydrofobizační prostředky aplikovány jako sanační opatření, je potřeba aby byl ošetřovaný povrch očištěný, odmaštěný a zbavený výkvětů. Pokud jsou nanášeny na nový, neporušený podklad, je nutné zajistit, že bude dostatečně vyžralý. [35]

Vhodná teplota pro provádění nátěru je 10 – 25°C. Příliš nízká teplota může způsobit, že reakce neproběhnou dostatečně rychle a stupeň zesíťování bude příliš nízký. Příliš vysoká teplota nebo vítr umožní rychlé odpařování rozpouštědla, které vede k nedostatečné penetraci účinné látky do materiálu. [35]

Potřebná je také ochrana před slunečním zářením a deštěm, který by prostředek vymýval. Povrch by měl být suchý, pokud druh aktivní látky nevyžaduje ke své reakci vlhkost. [35]

Důležitá je dostatečná hloubka penetrace z důvodu degradace nátěru UV zářením na povrchu materiálu. Pod povrchem je hydrofobizace chráněná. [35]

Je potřeba se vyvarovat ošetření materiálu obsahujícího vodou rozpustné soli, či konstrukcí, do kterých se voda se solemi může dostat jinudy, než povrchem (vzlínavost). V důsledku odpařování vody pak dochází ke krystalizaci solí, které se ovšem přes vrstvu hydrofobizace nemohou dostat na povrch. To vyvoluje vysoké tlaky na tuto vrstvu, které mají za následek její odtržení. Jelikož nejsou přítomny výkvěty, je tato porucha rozpoznatelná až ve chvíli, kdy k odtržení dojde. Obdobný účinek má i nežádoucí snížení difúzní propustnosti.

Nežádoucí jevy mohou nastat i v souvislosti s vizuální stránkou. U některých hydrofobizačních prostředků může dojít k vytvoření lesklého filmu na povrchu málo porézních materiálů (hlavně u kamene), viz Obr. 32. Některé látky je možno omýt rozpouštědlem, zesíťované oligomery jsou odstranitelné pouze obrusem. [35, 40]

Pokud voda nestéká rovnoměrně po povrchu, ale v pramíncích, vytváří se na povrchu konstrukce nevzhledné šmouhy. Ty však lze odstranit pravidelným omýváním. [35]

V neposlední řadě může být po dešti patrný barevný rozdíl ošetřených a neošetřených ploch, jelikož některé materiály po navlhnutí tmavnou. Pokud jsou hydrofobizované, tak k tomuto jevu nedojde. [35]



Obr. 32: Účinek hydrofobizace [43]

U provedené hydrofobizace se hodnotí především míra snížení nasákavosti vodou, případně i míra snížení nasákavosti solnými roztoky. Je ověřováno, zda nedošlo k nežádoucímu snížení difúzní propustnosti. Měřena je velikost smáčecího úhlu, který by měl být vyšší než  $70^\circ$  (u běžných stavebních materiálů je smáčecí úhel menší než  $10^\circ$ ). Kontrolována je hloubka penetrace. Ta může být zjištěna například namočením vzorku barevnou tekutinou a následným ověřením, kde až se tekutina vsakuje. Další metodou je neutronografie, při které prochází proud neutronů vzorkem nasyceným vodou, přičemž dochází ke změně rychlosti proudění v nehydrofobizované části. Ověřována je také životnost daného opatření. Ošetřený povrch je kontrolován vizuálně, zjišťována je změna barvy, lesku a lepivost. [9, 35]



Obr. 33: Kapka na materiálu ošetřeném hydrofobizací [9]

Jeden z prvních výzkumů hydrofobizačních látek u nás prováděl v osmdesátých letech Stavební ústav. Zkoumanou látkou byl metyltriethoxysilan, odpadní látka výrobce Syntézia Kolín, který byl dále naředěn organickým rozpouštědlem a vodou. Přípravek byl aplikován na

střešní tašky metodou namáčení. Výsledkem bylo výrazné snížení nasákavosti materiálu, ale bohužel také snížení difúzní propustnosti. Navíc se podařilo penetrovat přípravek jen do hloubky 1 mm. Ošetřené střešní tašky byly podrobeny zkoušce zmrazování. Zprvu vykazovaly vyšší odolnost než neošetřené výrobky. Časem se však snížila jejich voděodolnost, a jelikož se vlhkost nemohla dostat z materiálu ve formě vodní páry, došlo k předčasnému odtržení ošetřené vrstvy. [36]

Složení přípravku a metodika výroby byly dále vyvíjeny a počátkem devadesátých let byla u nás na trh uvedena jedna z prvních hydrofobizačních látek. Přípravek na bázi roztoků metylsilanolátu a metylsilikonové pryskyřice byl distribuován pod názvem Lukofob. Tento modifikovaný přípravek již nebránil difúzi a pronikal do materiálu až do hloubky 5 mm. [44]

Je nutné si uvědomit, že jakákoli stavební úprava, tedy i hydrofobizace, by měla být aplikována s rozvahou. Ne vždy je striktní zamezení přístupu vlhkosti do materiálu vhodným řešením. U hydrofobizovaných omítek hrozí riziko předčasného odtrhnutí povrchové vrstvy v důsledku již zmíněného snížení difúzní propustnosti nebo změny jejich mechanických parametrů – zvýšení pevnosti a modulu pružnosti povrchové vrstvy, která po zatížení konstrukce odprýskne. [36]

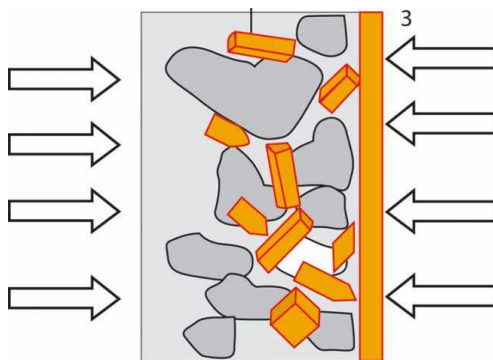
Hydrofobizace se příliš nedoporučuje u památkově chráněných objektů, jelikož ošetřené omítky poté nejsou materiálově kompatibilní s původními [16]. Kvůli zvýšení vodoodpudivosti některých povrchů pak mohou být o to více atakovány vodou omítky původní, neošetřené, což urychluje jejich destrukci. Hydrofobizované vápenné omítky se již nedají dále provlhčovat (nemůže tedy pokračovat proces karbonatace), obtížně se na ně nanášejí opravné vrstvy a znemožněn je také tradiční způsob jejich zpevnování vápennou vodou. Z těchto důvodů je pro památkově chráněné omítky daleko vhodnější ošetření látkami utěšňujícími strukturu. [16]

### **4.2.3 Látky utěšňující strukturu**

Další možností jak zabránit vodě v průniku do materiálu je utěsnění jeho porézní struktury. Přípravky k tomu používané bývají na bázi cementu nebo jiných silikátových látek (například křemičitan lithný), doplněny jsou o katalyzátory, někdy hydrofobizátory, a další složky ovlivňující výsledné produkty. V pórech reagují s hydroxidem vápenatým či C-S-H gely a

vytvářejí různé typy krystalických látek, případně nové C-S-H gely. Přesné složení i výsledné utěšňující látky jsou přísně chráněným tajemstvím každého výrobce. [45, 46, 47, 48]

Aplikované přípravky nastartují v porézní struktuře materiálu takzvaný dodatečný krystalizační proces, v některých pramenech nazývaný též katalytická reakce. Většina výrobců sice udává, že výsledné produkty jsou krystalického charakteru, vznikají však mohou i látky amorfnní. Tyto látky postupem času zaplní objem většiny kapilárně aktivních pórů (tedy pórů o průměru  $10^{-7} - 10^{-4}$  m), viz Obr. 34. V důsledku toho je snížena schopnost kapalné vlhkosti pronikat do kapilár. Jelikož vodní pára má molekuly menší, nemělo by dojít k výraznějšímu snížení faktoru difúzního odporu. Utěsněním struktury také většinou dochází k alespoň mírnému zvýšení pevnosti materiálu v tlaku. [45, 46, 47, 49]



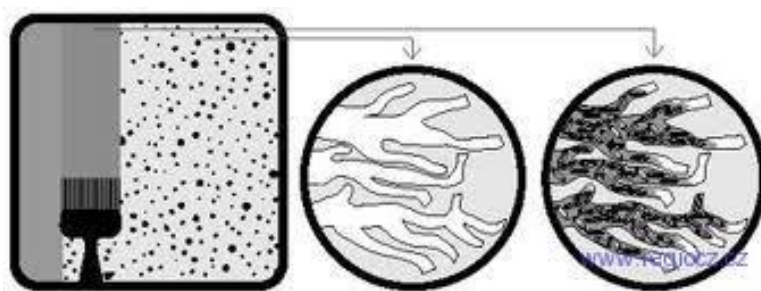
Obr. 34: Utěsnění porézního systému [47]

Stejně jako u hydrofobizace, i utěšňující látky mohou být aplikovány jako dodatečný vnější nátěr či nástřik, nebo jako vnitřní přísada přidaná do záměsi. Je nutné zdůraznit, že i v případě nátěru vznikají novotvary pod povrchem, přímo ve struktuře materiálu. Aplikace těchto látek je tedy neodstranitelná, ať už záměrně, nebo vlivem degračních procesů. [45, 47]

V případě vnějšího ošetření je potřeba nejprve sanovanou konstrukci zbavit nepřídržných částí, prachu, nečistot a výkvětů. Její povrch by měl být zdrsňen, například ocelovým kartáčem, aby došlo k otevření pórů v povrchové vrstvě a přípravek tak do ní mohl snáze pronikat. Nezbytnou podmínkou pro vznik utěšňujících látek je přítomnost vody v kapilárních pórech po určitou minimální dobu nezbytnou k tomu, aby reakce proběhla v požadovaném rozsahu. Proto je výhodné použít systém v podmínkách, kde je konstrukce neustále zatížena vodou. Platí, že čím více voda prosakuje, tím více se póry zaplňují krystaly, viz Obr. 35. S výhodou se proto tyto nátěry využívají pro sanaci starších konstrukcí, které vykazují neustálé známky plošného průsaku. Pokud konstrukce není zatížena zvýšenou vlhkostí, je potřeba ji před aplikací namočit. V průběhu prvních několika dní musí být nátěr ošetřován



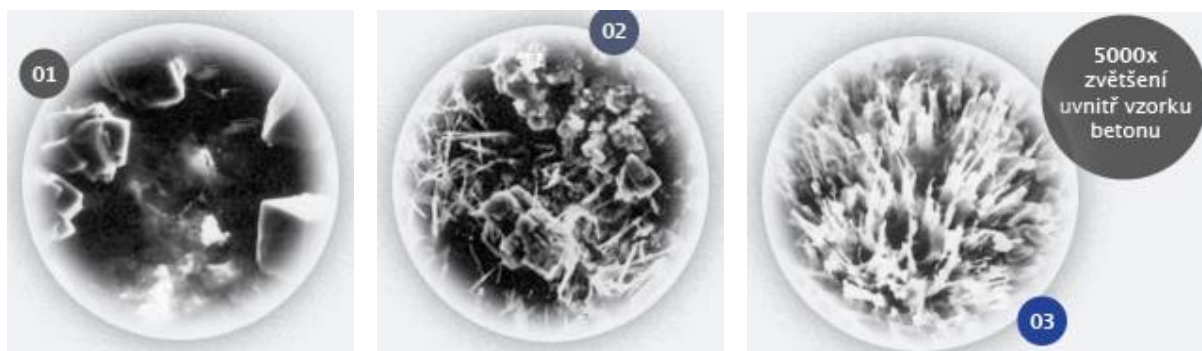
opakovaným vlhčením. Výrobci většinou uvádí minimální dobu ošetřování 2 – 4 dny, pro dosažení optimálních výsledků je vhodné nenechat materiál vyschnout po dobu až tří týdnů. Zároveň je potřeba chránit ošetřený povrch před intenzivním deštěm a proudící vodou, aby nedošlo k vymývání přípravku. Pokud by bylo vlhčení zanedbáno, nebo dokonce opomenuto, mělo by to katastrofální vliv na vodotěsné vlastnosti sanované konstrukce. Póry by byly jen částečně zúženy, což by mohlo mít za následek zcela opačný efekt – užšími póry by voda vlivem kapilární elevace vzlínala do větší výšky. Je-li ošetřování nátěru řádně provedeno, lze již po několika dnech konstrukci vystavit účinkům tlakové vody. [45, 47, 50]



*Obr. 35: Přípravek pronikající do pórů, tvorba utěšňujících látek [50]*

Další možnost aplikace utěšňujícího přípravku je formou příměsi do čerstvé směsi. Přípravek se nejprve rozmíchá v záměsové vodě a poté se spolu s vodou smíchá s pojivem a plnivem. Dodržení tohoto technologického postupu zaručí, že bude příměs v materiálu rovnoměrně rozptýlena. Po uložení směsi je podstatné, stejně jako u aplikace nátěrem, nezanedbat proces ošetřování. Utěšňující látky jsou vytvořeny tak, aby proces dodatečné krystalizace nastal se zpožděním až ve chvíli, kdy je již vytvořena základní struktura materiálu. Vzhledem k tomu, že k utěsnění dochází v celém objemu konstrukce, jsou výsledné vodonepropustné vlastnosti lepší než u povrchové aplikace formou nátěru či nástřiku. [45, 47]

Patrně nejznámějším výrobcem krystalizačních příměsí je firma Xypex. Její vnitřní utěšňující přísady fungují na principu tvorby malých, podlouhlých krystalků, které vyrůstají z oblastí částic  $\text{Ca(OH)}_2$  a prorůstají C-S-H gelem, viz Obr. 36. [51]



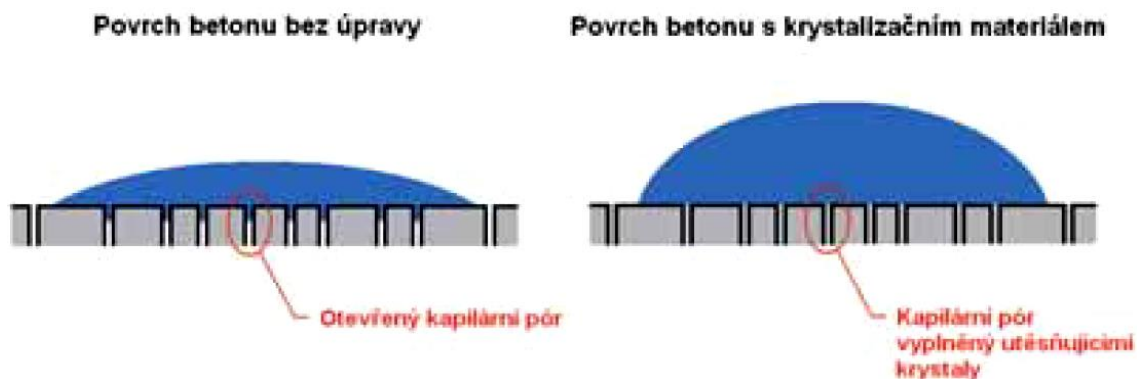
*Obr. 36: Vlevo: neošetřený beton, patrné jsou velké krystaly částic  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , uprostřed: krystalické formace XYPEXu vyrůstající z oblastí částic  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  a prorůstající C-S-H gelem, vpravo: bohaté krystalické formace XYPEXu rozvinuté z C-S-H gelu po 26 dnech od provedení nátěru [51]*

Účinek utěšňujících látek se prokáže mírou snížení průniku kapalné vlhkosti. Na ošetřeném materiálu jsou prováděny zejména zkoušky týkající se nasákavosti, kapilární vztlínivosti, hloubky průsaku tlakovou vodou, difúze vodní páry, objemového zastoupení pórů a pevností v tlaku a v tahu za ohybu. [47]

Dále může být zjišťována hloubka penetrace nátěru, respektive hloubka, do které jsou utěšňující krystaly schopné prorůst. Tento parametr je většinou zjišťován nepřímou některou z následujících metod. Princip použití mikroskopické analýzy je založen na vizuálním porovnávání mikrostruktur v různých hloubkách pod povrchem materiálu, na který byl aplikován nátěr. Zejména u betonu je však velmi obtížné rozpoznat rozdíl mezi krystalickými útvary vytvořenými během hydratace cementu a krystalickými formacemi vytvořenými dodatečnou krystalizací po aplikaci nátěru. Elektronová difrakční analýza dokáže zjišťovat změny v množství obsažených chemických prvků v různých hloubkách ošetřeného materiálu. Jedná se o méně rozšířenou metodu detekce změn zatím používanou pouze v zahraničí. Analýza za použití radaru je schopna určit rozsah oblastí betonu zatížených zvýšenou vlhkostí. Takto je možno porovnat stav sanované konstrukce před provedením nátěru a po něm. [49]

Alternativou k těmto metodám je měření rozdílné hodnoty kontaktního úhlu kapaliny na povrchu zkoumaného materiálu. Použití této metody je založeno na hypotéze, že materiál s aplikovaným utěšňujícím nátěrem má mnohem více uzavřený pórový systém než materiál bez úpravy. Výsledkem by tedy měla být vyšší hodnota kontaktního úhlu kapaliny na nátěrem ošetřeném povrchu, neboť uzavřený pórový systém znesnadňuje vsakování kapaliny oproti běžnému materiálu s otevřenými póry, viz Obr. 37. Cílem zkoušky není zjištění absolutních

hodnot kontaktního úhlu v jednotlivých bodech měření, ale sledování změny těchto hodnot v závislosti na hloubce. Výhodou této metody je skutečnost, že na rozdíl od prvkové analýzy, mikroskopie i radarových snímků je tato metoda založena na přímém měření fyzikálních vlastností materiálu. [49]



Obr. 37: Kontaktní úhel kapky na povrchu neošetřeného a ošetřeného materiálu [49]

Ve stavební praxi bývají přípravky utěšňující strukturu označovány výrobci jako krystalická bariéra proti vodě, krystalická nebo také tekutá hydroizolace, a někdy i nesprávně jako hydrofobizace.

## 5 Typy omítek použité v experimentální části práce

### 5.1 Složení směsí

V praktické části práce byly zjišťovány vlastnosti devíti různých receptur vápenných omítek. Každá z těchto receptur byla zkoumána v nevyzrálém stavu a ve stavu vyzrálém, kterého se dosáhlo zrychlenou karbonatací v CO<sub>2</sub> komoře (tyto omítky mají na konci označení „+K“). V praktické části práce jsou tedy prezentovány výsledky osmnácti různých skupin vápenných omítek.

Tyto skupiny se dají dále rozdělit na dva druhy – čistě vápenné omítky (označené „VO“) a vápenné omítky s přídavkem křemeliny (označené „VOK“). Čistě vápenné omítky byly vyrobeny pouze z vápna, vody a písku a přidáné hydrofobizační přísady (případně bez ní – směs referenční). Použité suroviny byly dávkovány v hmotnostním poměru 1 : 1 : 3 (vápno : voda : písek). U vápenných omítek s přídavkem křemeliny bylo 15 % hmotnosti vápna nahrazeno stejným množstvím filtrační křemeliny. Výsledné složení tedy bylo vápno, křemelina, voda, písek (v poměru 0,85 : 0,15 : 1 : 3) a přidáná hydrofobizační přísada (případně bez ní – směs referenční).

Hydrofobizační látky byly použity jak vnější, tak vnitřní. Vnější hydrofobizace byla aplikována formou nátěru na vyzrálé vzorky (v označení skupiny uvedeno „N“). K tomuto účelu byly použity přísady na bázi utěšňujících látek Sikkaton (omítky značené „SIK“) a Radcon (omítky značené „RAD“) a přírodní lněná fermež (omítky značené „FER“). Vnitřní hydrofobizační látky byly přidány během výroby vzorků do záměsi (v označení skupiny uvedeno „V“). Použita byla přísada Sikkaton (omítky značené „SIK“) a směs stearanu vápenatého a oleátu sodného (omítky značené „ST/OL“).

Pro přehlednost jsou receptury uvedeny v Tab. 3, hmotnosti jednotlivých složek jsou vztaženy ke 100 g pojiva.

Tab. 3: Receptury omítek

Označení	Vápno	Křemelina	Voda	Písek	Vnitřní přísada	Nátěr	Karbo-natace
<b>VO-R</b>	100g	-	100g	3x100g	-	-	Ne
<b>VO-R+K</b>	100g	-	100g	3x100g	-	-	Ano
<b>VO-SIK-N</b>	100g	-	100g	3x100g	-	Sikkaton	Ne
<b>VO-SIK-N+K</b>	100g	-	100g	3x100g	-	Sikkaton	Ano
<b>VO-RAD-N</b>	100g	-	100g	3x100g	-	Radcon	Ne
<b>VO-RAD-N+K</b>	100g	-	100g	3x100g	-	Radcon	Ano
<b>VOK-R</b>	85g	15g	100g	3x100g	-	-	Ne
<b>VOK-R+K</b>	85g	15g	100g	3x100g	-	-	Ano
<b>VOK-SIK-N</b>	85g	15g	100g	3x100g	-	Sikkaton	Ne
<b>VOK-SIK-N+K</b>	85g	15g	100g	3x100g	-	Sikkaton	Ano
<b>VOK-RAD-N</b>	85g	15g	100g	3x100g	-	Radcon	Ne
<b>VOK-RAD-N+K</b>	85g	15g	100g	3x100g	-	Radcon	Ano
<b>VO-SIK-V 1,0</b>	100g	-	100g	3x100g	Sikkaton 1g	-	Ne
<b>VO-SIK-V 1,0+K</b>	100g	-	100g	3x100g	Sikkaton 1g	-	Ano
<b>VOK-FER-N</b>	85g	15g	100g	3x100g	-	fermež	Ne
<b>VOK-FER-N+K</b>	85g	15g	100g	3x100g	-	fermež	Ano
<b>VOK-ST/OL-V</b>	85g	15g	100g	3x100g	Stearan 1g + oleát 2g	-	Ne
<b>VOK-ST/OL-V+K</b>	85g	15g	100g	3x100g	Stearan 1g + oleát 2g	-	Ano

## 5.2 Použité materiály

### 5.2.1 Vápno Čertovy schody

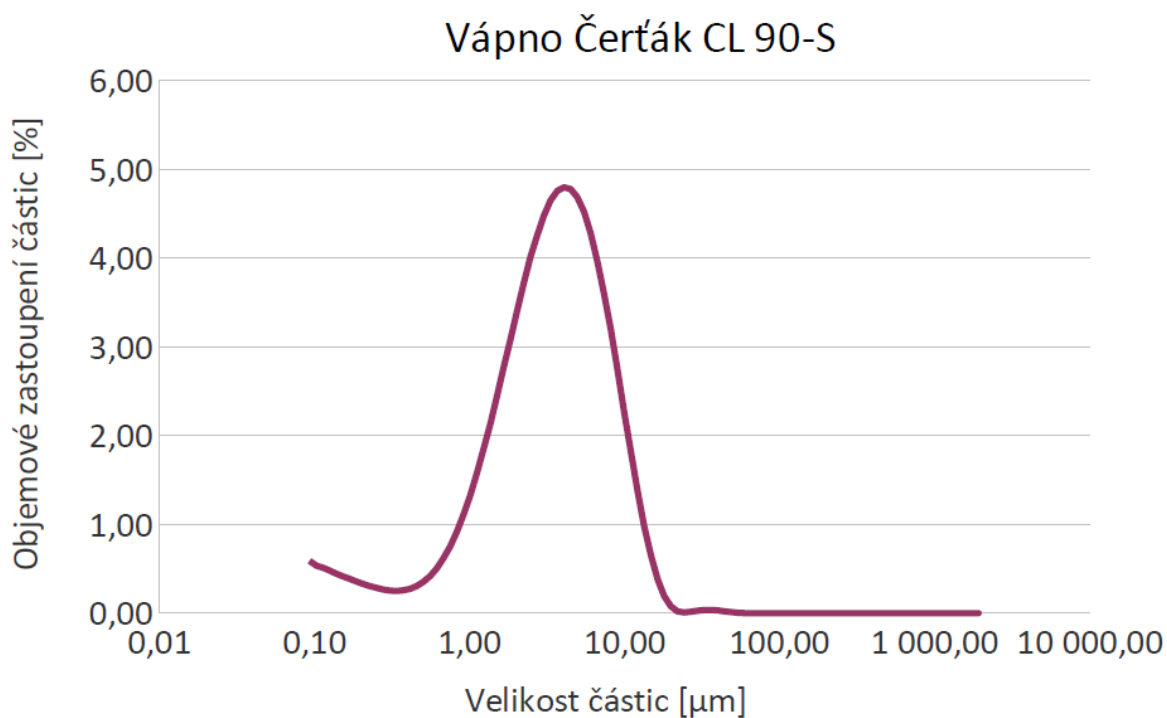
Vápenka Čertovy schody je největším výrobcem vápenných a vápencových výrobků v České republice. Vápenec, který těží v ložiscích Koněprusy a Suchomasty, patří k nejkvalitnějším a chemicky nejčistším v naší zemi. Mezi mnohé produkty této firmy, která je od roku 1992 součástí skupiny Lhoist, patří hašené bílé vápno Čerťák®. Tento výrobek je

na trhu ve třech modifikacích: pro stavebnictví, pro zahradnictví a pro dezinfikování hospodářských budov. [52]

V experimentální části práce bylo použito Stavební hašené bílé vápno CL 90-S. V Tab. 4 jsou uvedeny specifikace deklarované výrobcem. Na Obr. 38 je graf informující o procentuálním zastoupení velikostí částic (naměřeno v laboratoři K123).

Tab. 4: Vlastnosti vápna [52]

Obsah CaO + MgO	$\geq 90 \%$
Obsah MgO	$\leq 5 \%$
Obsah CO <sub>2</sub>	$\leq 4 \%$
Obsah SO <sub>3</sub>	$\leq 2 \%$
Obsah volného vápna	$\geq 80 \%$
Jemnost, zbytek hmotnosti 0,2 mm	$\leq 2 \%$
Jemnost, zbytek hmotnosti 0,09 mm	$\leq 7 \%$
Obsah volné vody	$\leq 2 \%$
Objemová stálost (referenční metoda)	$\leq 2 \%$
Obsah vzduchu	$\leq 12 \%$



Obr. 38: Graf objemového zastoupení velikosti částic pro vápno Čerták CL 90-S



Obr. 39: Vápno Čerták CL 90-S

### 5.2.2 Filtrační křemelina Borovany

Křemelina je přírodní produkt, konkrétně usazená nezpevněná hornina nebo zemina, která ještě bývá najemno namleta. Její zpevněná forma se nazývá diatomit. Křemelina je z většiny tvořena křemičitými schránkami jednobuněčných řas rozsivek (schránky bývají též označovány jako diatomy), dále obsahuje jílové minerály, především kaolinit a illit. Schránky rozsivek, které mají jemnou pórovitou strukturu, jsou tvořené amorfním oxidem křemičitým. Nejčistší forma křemeliny tak může obsahovat až 97 %  $\text{SiO}_2$ . Řasy rozsivky se vyskytují ve vodním prostředí, a to jak ve slané vodě, tak ve sladké. Po odumření řas klesají diatomy na dno, kde z nich působením dalších vlivů vzniká křemelina (též označovaná jako rozsivková zemina). Tato usazená hornina je z většiny těžena v nalezištích jezerního původu, naleziště, která bývala dnem oceánů, jsou méně častá, ale surovina z nich je čistší a kvalitnější. [53]

Křemelina je využívána pro svůj vysoký obsah  $\text{SiO}_2$ , poměrně vysokou pórovitost a s ní související absorpční vlastnosti, nízkou objemovou hmotnost, dobré tepelně izolační vlastnosti a poměrně vysokou jemnost. Je využívána k filtraci v potravinářském i chemickém průmyslu (především filtrace piva a vína), jako potravinový doplněk (je zdrojem křemíku, pročišťuje trávicí systém), nachází uplatnění jako sorbent i jako plnivo v potravinářském průmyslu, kosmetice a farmaceutice. Je používána jako insekticid, jelikož její jemné částičky, pro člověka nezávadné, jsou pro hmyš smrtící. Ve stavebnictví se uplatní její tepelně izolační

vlastnosti při výrobě izolačních desek a v neposlední řadě je využívána její pucolánová aktivita. [53, 54]

Pucolánově aktivní materiály jsou definovány jako křemičité nebo hlinitokřemičité látky, které samy o sobě nemají žádnou vazebnou schopnost. Za běžných teplot jsou schopny reagovat s hydroxidem vápenatým a vodou za vzniku sloučenin, které tuhnou, tvrdnou a jsou stálé na vzduchu i pod vodou. Přidávají se jak do vápenných omítek, tak do cementového pojiva betonu, kde reagují s volným  $\text{Ca(OH)}_2$ . [55]

Z chemického hlediska jsou pucolány materiály, které obsahují amorfní oxid křemičitý a reaktivní křemičitany, hlinitany a hlinitokřemičitany. Ty reagují s oxidem vápenatým a vodou za vzniku hydratovaných křemičitanů vápenatých. Tyto sloučeniny jsou odolnější vůči působení kyselého prostředí než produkt karbonatace vápna ( $\text{CaCO}_3$ ) ve vápenných omítkách a vedou ke zlepšení mechanických vlastností, odolnosti a trvanlivosti omítek. V betonu postupem času vedou tyto sloučeniny ke vzniku C-S-H gelů. [55, 56]

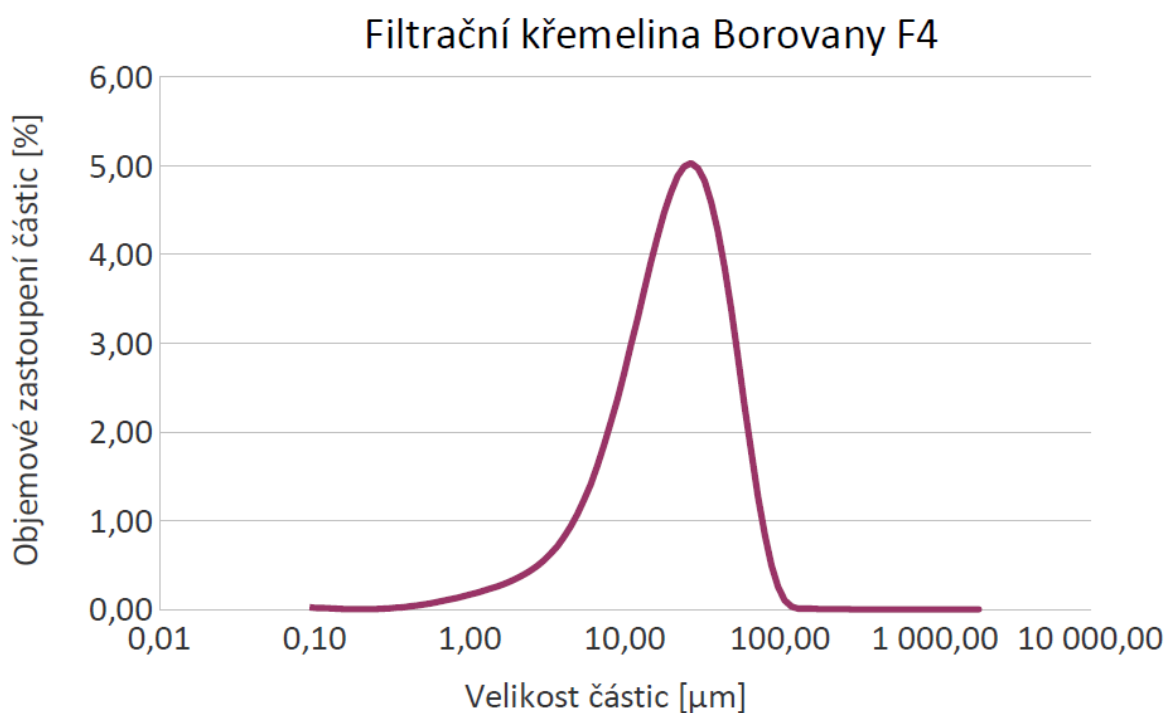
V experimentální části práce byla použita filtrační křemelina F4 z provozu Borovany od firmy LB MINERALS, s.r.o., která je součástí skupiny LASSELSBERGER. Společnost LB MINERALS, s.r.o., sídlící v Horní Bříze, v současné době spravuje v rámci České republiky 41 dobývacích prostorů (především na Plzeňsku a Třeboňsku, ale i na Moravě), díky čemuž nabízí široký sortiment surovin. Zabývá se především těžbou, úpravou a zpracováním kaolinů, jílu, živců, kameniva a písků, věnuje se však i produkci dalších surovin, jako jsou filtrační křemelina, stelivo a štuková omítka. [57]

V Tab. 5 jsou uvedeny specifikace deklarované výrobcem. Na Obr. 40 je graf informující o procentuálním zastoupení velikostí částic (naměřeno v laboratoři K123).



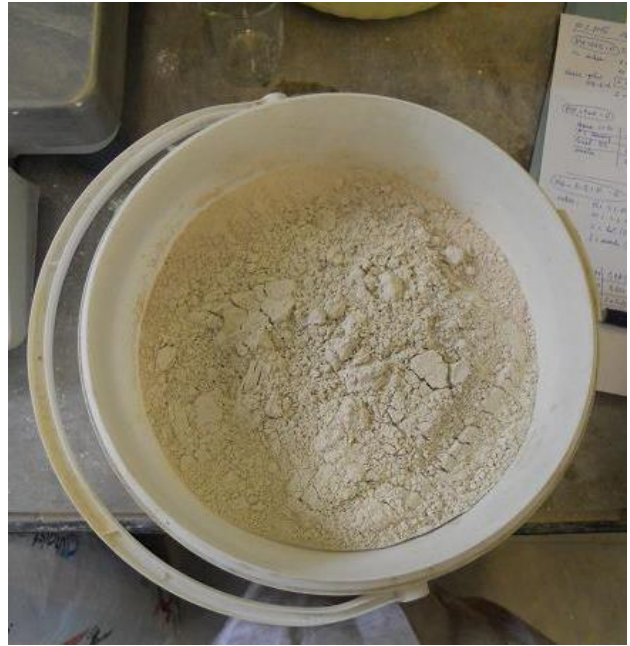
Tab. 5: Vlastnosti křemeliny [57]

Sypná hmotnost	max. 250 kg/m <sup>3</sup>
Hustota za mokra	max. 650 kg/m <sup>3</sup>
Technologická vlhkost	max. 6 %
Zbytek na síť 0,250 mm	max. 0 %
Zbytek na síť 0,045 mm	max. 1 %
Filtrační rychlost	10 – 30 l/min.m <sup>2</sup>
Permeabilita (Darcy)	0,012 – 0,030
pH vodního výluhu	6 – 7
Obsah SiO <sub>2</sub>	min. 78 %
Obsah Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	max. 13 %
Obsah Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	max. 1,5 %
Ztráta žháním	max. 7 %
Barva	Světle šedá



Obr. 40: Graf objemového zastoupení velikosti částic pro filtrační křemelinu F4

Borovany

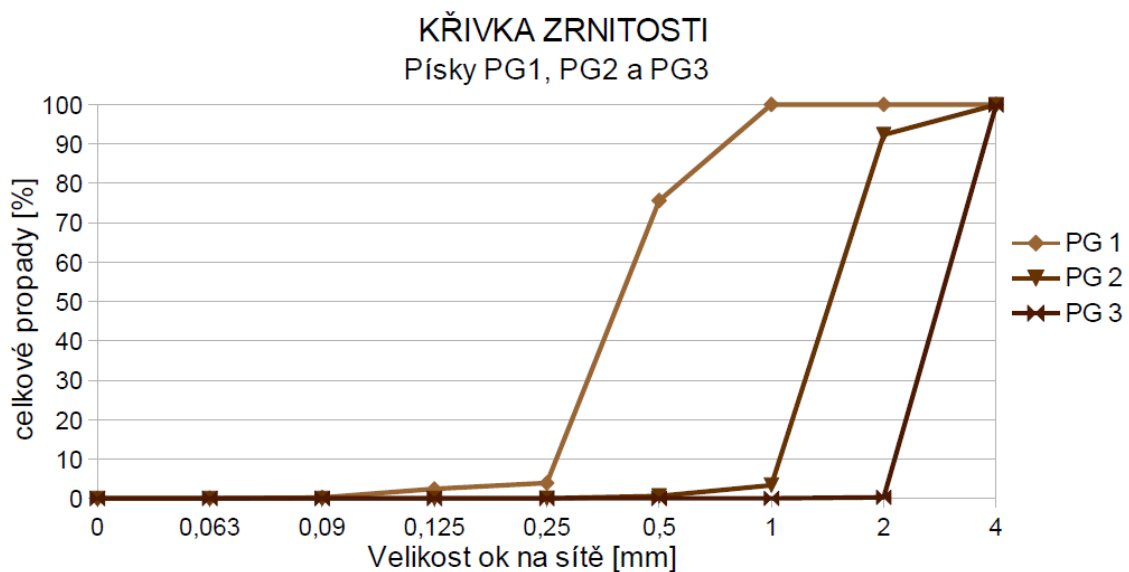


Obr. 41: Filtrační křemelina F4 Borovany

### 5.2.3 Křemičitý písek

Jako plnivo byl použit křemičitý písek tří různých zrnitostí: písek označený PG 1 s frakcí 0,25/1 mm, PG 2 s frakcí 1/2 mm a PG 3 s frakcí 2/4 mm. Tyto tři zrnitostní skupiny písků byly smíchány v poměru 1 : 1 : 1.

Na Obr. 42 jsou uvedeny křivky zrnitosti jednotlivých písků, na Obr. 43 křivka zrnitosti jejich směsi.



Obr. 42: Křivka zrnitosti písků PG 1, PG 2 a PG 3



Obr. 43: Křivka zrnitosti směsi písků PG 1, PG 2 a PG 3 v poměru 1 : 1 : 1



Obr. 44: Vlevo nahoře: písek PG 3, vpravo nahoře: písek PG 2, dole: písek PG 1

#### 5.2.4 Záměšová voda

Při výrobě vzorků byla použita pitná voda z vodovodního řadu.

### 5.2.5 Radcon

Jedním z nátěrů, použitých v experimentální části práce za účelem zabránění pronikání vlhkosti do materiálu, je Radcon Formula #7<sup>®</sup> dodávaný společností Realsan s.r.o.

Jedná se o biochemicky modifikovaný silikát, vyvinutý pro ochranu betonu. Přípravek je aplikován na vyzrálý materiál, jehož povrch je po dobu několika následujících dní vlhčen. Díky vodě dochází k pronikání Radconu do materiálu, kde začne vytvářet podpovrchovou bariéru. Za přítomnosti vody přípravek v betonu reaguje s volným  $\text{Ca(OH)}_2$  a vytváří celou řadu sloučenin nazývaných C-S-H gely (kalcium – silikát – hydrát), které jsou v betonu nositeli pevnosti. Tyto gely pak vyplňují trhliny a póry a tím utěsňují strukturu materiálu. Postupem času C-S-H gely reagují se vzdušným  $\text{CO}_2$  za vzniku  $\text{CaCO}_3$ , jenž dále utěsňuje materiál, a takzvaných ochuzených C-S-H gelů. Po nějaké době dochází k přesunu iontů vápníku z míst s jeho vyšší koncentrací do oblasti s nižší koncentrací, tedy k ochuzeným C-S-H gelům, které pak v přítomnosti vody opět vytvářejí obohacené C-S-H gely. Tento cyklus se může, za přítomnosti dostatečného množství vody, iontů vápníku a oxidu uhličitého, opakovat donekonečna. [58]

Dle specifikace výrobce je produkt schopný vyplňovat trhliny až do šířky 2 mm. Další výhodou je, že póry vyplněné do jisté míry pružnými C-S-H gely umožňují pohyb betonu, čímž snižují riziko vzniku dalších trhlin. [58]

Jelikož přípravek Radcon reaguje v betonu s volným  $\text{Ca(OH)}_2$ , byl použit v této práci za účelem ověření, zda bude podobně reagovat i ve vápenné omítce, která je tvořena právě hydroxidem vápenatým.



Obr. 45: Přípravek Radcon Formula #7

## 5.2.6 Sikkaton

Dalším z použitých látek byl přípravek Sikkaton-A rovněž dodávaný firmou Realsan s.r.o. Jedná se o vodotěsnící přísadu do omítek a potěrů, přidávanou za účelem zvýšení odolnosti proti účinkům nadměrné vlhkosti, prosakující a tlakové vody. Přípravek reaguje s ošetřovaným materiálem za vzniku krystalických látek utěsňujících jeho strukturu. Současně však může, jak uvádí výrobce, snižovat pevnosti materiálu až o 6,5 %. [59]

Sikkaton-A se primárně přidává přímo do záměsi během výroby omítky. V této práci byl použit dvěma způsoby – jednak jako vnitřní přísada a dále formou nátěru na již hotové vzorky.

Produkt se dodává ve formě suspenze ve 25 litrových barelech. Jelikož se účinné látky usazují na dně, je potřeba přípravek před aplikací řádně protřepat. V případě použití Sikkatonu do záměsi bylo nutno vypočítat hmotnost účinné látky, která tvoří přibližně jednu třetinu hmotnosti přípravku a následně snížit množství záměsové vody o hmotnost kapaliny v Sikkatonu. [59]

V případě vnitřní přísady byly vyrobeny dvě sady zkušebních vzorků s rozdílným dávkováním Sikkatonu. První receptura obsahovala účinnou látku Sikkatonu v množství 0,5 % hmotnosti pojiva, ve druhé byla účinná látka Sikkatonu v množství 1 % hmotnosti pojiva. Na těchto pilotních vzorcích byly testovány mechanické vlastnosti a naměřen absorpční koeficient pro vodu. S přihlédnutím k získaným hodnotám byla pro další měření vybrána receptura s obsahem účinné látky Sikkatonu v množství 1 % hmotnosti pojiva.



Obr. 46: Přípravek Sikkaton-A

### 5.2.7 Lněná fermež

Lněná fermež je zastudena lisovaný lněný olej, který byl tepelně upraven. V minulosti se vyráběla až 24 hodinovým vařením přírodního lněného oleje při 180 °C. Během varu došlo k oxidaci nenasycených mastných kyselin a odpaření některých látek, což vedlo k výraznému urychlení vysychání nátěru. Přírodní lněná fermež tak vysychala přibližně 3 dny, naproti tomu lněný olej až 28 dní. V současnosti se do obou produktů přidávají aditiva a sušiva, především soli těžkých kovů, které dobu vysychání zkracují na několik hodin. [60, 61]

Během vysychání fermeže dochází k polymeraci nátěru a tvorbě ochranného filmu. Bohužel probíhá také jeho oxidace (u fermeže o něco výraznější než u oleje), což vede k mírnému tmavnutí povrchu. U chemicky modifikovaných výrobků je tmavnutí ještě výraznější. [60, 61]

V minulosti byla lněná fermež nejsnáze dostupným a nejpoužívanějším prostředkem k natírání a napouštění dřeva, aplikovala se také jako ochranný nátěr cihel a omítek. Nátěr se používal pro své pozitivní účinky na odolnost a trvanlivost materiálu, zvýšení pevnosti a snížení nasákavosti. [60]

V experimentální části práce byla použita lněná fermež firmy Painteco. Tento výrobce jako jeden z mála nabízí čistě přírodní produkty bez chemických přísad, fermež doporučuje pro nátěry jak dřeva, tak i cihel, vápenných omítek a betonu. [62]

Tento produkt byl použit za účelem porovnání v současnosti vyráběných nátěrů s přírodními látkami, které se používaly k zamezení průniku vody v historii.



*Obr. 47: Vlevo: Lněná fermež od výrobce Painteco, vpravo: vzorky ošetřené lněnou fermeží*

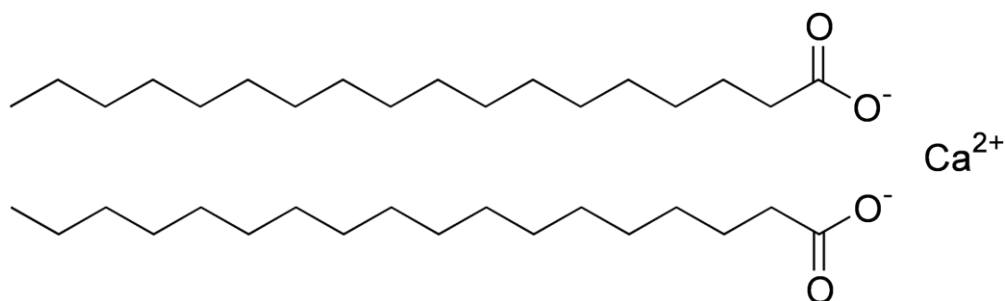
Jelikož fermež mírně tmavne, bylo možné na rozlomených vzorcích identifikovat hloubku penetrace nátěru, která činila 2 – 3 mm.

## 5.2.8 Stearan vápenatý a oleát sodný

Jako další z látek pro vnitřní hydrofobizaci byla použita směs stearanu a oleátu. Oba produkty byly dodány firmou Excel Mix pod názvy Ligastar CA 800 (stearan) a Ligaphob N 90 (oleát).

Stearan a oleát patří mezi soli mastných kyselin. Jsou tvořeny delším uhlíkatým řetězcem a iontem vápníku, respektive sodíku.

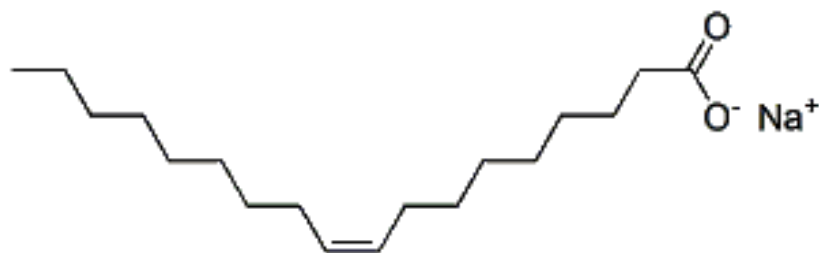
Stearan vápenatý je zářivě bílý prášek, má nízkou objemovou hmotnost (přibližně 1080 kg/m<sup>3</sup>) a velký měrný povrch. Z chemického hlediska se jedná o sůl nasycené mastné kyseliny. [63]



Obr. 48: Vzorec stearanu vápenatého

Stearan v materiálu reaguje s vodou za vzniku gelu, který utěsňuje strukturu a zabraňuje pronikání vlhkosti. Produkty z něj vzniklé jsou ale poměrně snadno rozpustné ve studené vodě a podléhají stárnutí. Hydrofobizační efekt stearanu se proto po nějaké době vytrácí. Na jeho reaktivitu má významný vliv velikost částic, pro dosažení optimálního efektu by měly být co nejmenší. Velkou jemnost má stearan vyrobený srážením. [63]

Oleát sodný je prášek bílé až žlutobílé barvy. Objemovou hmotnost má mírně vyšší než stearan. Měrný povrch nemá na jeho reaktivitu takový vliv jako je tomu u stearanu, takže jeho částice bývají větší. Z chemického hlediska se jedná o sůl nenasycené mastné kyseliny. [63]



Obr. 49: Vzorec oleátu sodného

Oleát nevytváří gel, ale reaguje se složkami materiálu, především s vápníkem, přičemž vznikají sloučeniny zvané kovová mýdla, mající hydrofóbní vlastnosti. Ta nejsou rozpustná ve studené vodě ani dále nereagují s ostatními surovinami a jejich účinek je trvalý. Na druhou stranu nějakou dobu trvá, než se v materiálu vytvoří, a proto je hydrofobizační efekt oleátu zpožděný. [63]

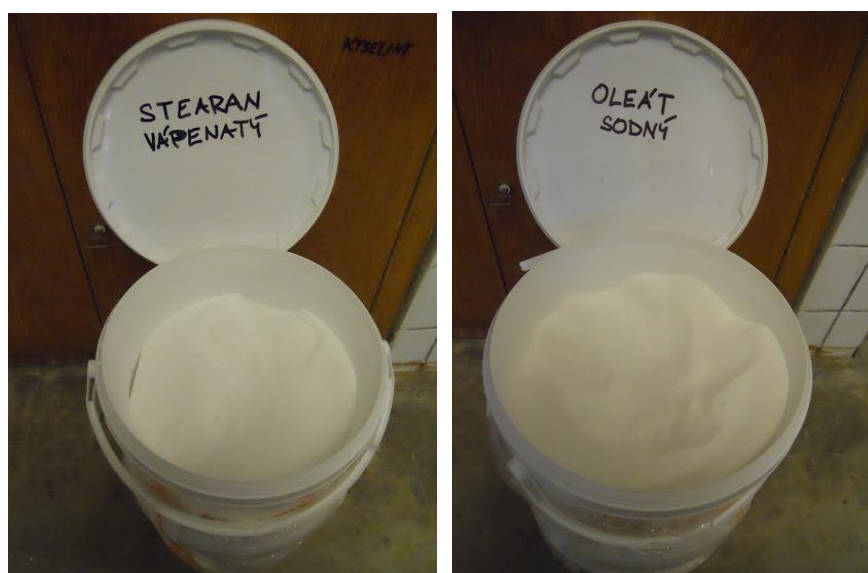
U obou sloučenin jsou patrné disperzní vlastnosti a slabý provzdušňující efekt. Oleát má navíc mírné plastifikační účinky, což umožňuje snížení vodního součinitele.

Vzhledem k výše popsaným vlastnostem se jeví jako ideální kombinace těchto dvou látek. Stearan dodá počáteční hydrofobizační efekt, který ale časem slábne, mezitím nastoupí účinek oleátu. [63]

V dříve realizovaných výzkumech byly stearan a oleát dávkovány v množství 0,05 % a 0,5 % z celkové hmotnosti, přičemž u prvně zmíněného dávkování se hydrofobizační účinek téměř neprojevil [64].

V dalším výzkumu bylo prokázáno významné snižování nasákavosti až do obsahu stearanu a oleátu 0,3 % z celkové hmotnosti. Při dalším zvyšování obsahu účinných látek se již nasákavost neměnila. [63]

S přihlédnutím k těmto výsledkům bylo zvoleno dávkování 3 % z hmotnosti pojiva. Přísady byly dávkovány, dle doporučení dodavatele, v poměru 1 : 2 (stearan : oleát), na 100 g pojiva byl tedy přidán 1 g stearanu a 2 g oleátu.



Obr. 50: Vlevo: stearan vápenatý, vpravo: oleát sodný



## 6 Příprava vzorků

Do přípravy vzorků je zahrnuta jejich výroba, následné ošetřování, aplikace hydrofobizačního nátěru na vyzrálý materiál a jeho zrychlená karbonatace. Celý tento proces trval přibližně dva měsíce. Následně mohlo být na vzorcích započato měření.

### 6.1 Výroba

Výrobě samotných vzorků, na kterých bylo provedeno měření popsané v experimentální části práce, předcházelo namíchání několika zkušebních záměsí. Cílem zkušebních záměsí bylo definovat vhodné složení a pracovní postup.

Co se týče složení směsi, bylo potřeba najít takový vodní součinitel (poměr hmotnosti vody ku hmotnosti pojiva), při kterém by byl rozliv přibližně 160x160 mm. Rozliv byl určen podle normy ČSN EN 1015-3 (Stanovení konzistence čerstvé malty s použitím setřásacího stolku).

Na zkoušku byl použit normový setřásací stolek a kužel, jenž se naplnil maltou. Kužel byl před zkouškou očištěn a vymazán olejem. Poté byl ve dvou krocích naplněn maltou, která byla zhutněna dusadlem. Následně byl kužel sejmут a bylo provedeno 15 rázů setřásacím stolkem frekvencí 1 ráz za 1 sekundu. Poté byly ve dvou směrech změřeny rozměry rozteklého kužele.

Takto byly odzkoušeny záměsí s vodním součinitelem:

- $w = 0,75$
- $w = 0,875$
- $w = 1,0$
- $w = 1,125$
- $w = 1,375$

Během výroby zkušebních záměsí bylo zjištěno, že velký vliv na konzistenci malty má kromě složení i postup míchání. Byly odzkoušeny tyto postupy:

- smíchání pojiva, vody a plniva naráz
- smíchání pojiva a vody, po určité době míchání přidáno plnivo
- smíchání pojiva a plniva, postupné přidávání vody ve třech krocích

Z různých kombinací výše uvedených postupů a složení se ukázaly jako ideální vodní součinitel  $w = 1,0$  a následující výrobní postup:

- 1) smíchat pojivo a případnou sypkou vnitřní hydrofobizaci (stearan a oleát),
- 2) smíchat záměsovou vodu s případnou tekutou hydrofobizací (Sikkaton),
- 3) umístit směs do normové míchačky, přidat záměsovou vodu a zapnout míchačku na I. stupeň rychlosti,
- 4) po 30 s od začátku míchání začít s plynulým přisypáváním plniva,
- 5) po 60 s od začátku míchání přepnout míchačku na II. stupeň rychlosti,
- 6) po 70 s od začátku míchání dokončit přidávání plniva,
- 7) po 90 s od začátku míchání vypnout míchačku a směs ručně promíchat špachtlí, především u dna, kde mohlo zůstat nesmísené pojivo,
- 8) po 180 s od začátku míchání umístit míchací mísu zpět do míchačky a tu zapnout na II. stupeň rychlosti,
- 9) po 240 s od začátku míchání vypnout míchačku.



*Obr. 51: Vlevo: normová míchačka, vpravo: směs po ručním zamíchání*

Takto připravená směs byla plněna do předem připravených, olejem vymazaných forem, viz Obr. 52. Maltou naplněné formy byly následně zhutněny na normové vibrační desce. V případě trámečků velikosti 40x40x160 mm bylo plnění a vibrování provedeno ve dvou krocích, aby byla směs dostatečně zhutněná a bez vzduchových bublin. Ostatní typy vzorků byly značně nižší, a proto u nich mohlo být plnění a vibrování provedeno v jednom kroce.

Následně byly formy zakryty igelitovou fólií, aby se zabránilo příliš rychlému odpaření záměsové vody. Takto byly ponechány několik dní v laboratorním prostředí, dokud nedošlo k dostatečnému vytvrdnutí materiálu, potřebnému k odbednění forem.



*Obr. 52: Plnění malty do forem*

## **6.2 Ošetřování**

Po odbednění byly vzorky uloženy v klimatizované laboratoři při teplotě  $23 \pm 2$  °C a relativní vlhkosti 25 – 30 %. Vzorky byly pravidelně ze všech stran vlhčeny vodou pomocí rozprašovače po dobu dvou týdnů, aby se omezilo jejich popraskání, viz Obr. 53.



*Obr. 53: Ošetřování vzorků*

Po dobu dalších dvou týdnů byly vzorky uloženy v laboratorních podmínkách, kvůli dostatečnému vyžrání materiálu. Vzorky byly mezi sebou rozmístěny s dostatečně velkými rozestupy, aby k nim byl zajištěn přístup vzduchu, umožňující jejich vysychání, viz Obr. 54.



*Obr. 54: Uložení vzorků*

### 6.3 Nátěr

Ve stáří vzorků čtyři týdny, tedy v době, kdy je materiál považovaný za vyžralý, byly omítky s vnější hydrofobizací opatřeny nátěrem.

Přípravek Radcon byl aplikován v jedné, dostatečně silné vrstvě. Všechny vzorky byly nejprve natřeny z jedné strany, po zaschnutí nátěru byly pootočený a natřeny z další strany, a

tak dále. Po dobu následujících dvou týdnů byly vzorky opět vlhčeny vodou, aby mohl přípravek v materiálu správně zreagovat.

Přípravek Sikkaton byl před aplikací v barelu důsledně protřepán z důvodu homogenizace na dně usazených účinných látek s kapalinou. Poté byl přelit do menší nádoby a štětcem natírán na vzorky. Během natírání byl přípravek pravidelně promícháván, aby se na vzorky dostaly účinné látky pokud možno v konstantním množství. Stejně jako u předešlého přípravku byly stěny vzorků natírány postupně, tak aby se nátěr stihl vsáknout a nestékal ze vzorků dolů. Následně byl materiál rovněž po dobu dvou týdnů ošetřován vodou.

Omítka s lněnou fermeží byla ošetřena dvěma nátěry, mezi kterými byl ponechán dvoudenní rozestup, aby první nátěr stihl zaschnout. Stejně jako u předchozích skupin omítek byla i fermež na stěny vzorků nanášena postupně. Po aplikaci byl nátěr ponechán cca 20 minut v laboratorních podmínkách, následně byl přebytečný olej, který se nestihl vsáknout, otřen papírovou utěrkou.



*Obr. 55: Aplikace nátěru lněné fermeže*

## **6.4 Karbonatace**

Poté, co vzorky dostatečně vyschly, byla provedena jejich zrychlená karbonatace v CO<sub>2</sub> komoře, viz Obr. 56. Karbonatace je u vápenných omítek přirozený a žádoucí proces, během kterého vápno reaguje s oxidem uhličitým obsaženým ve vzduchu za vzniku odolnějšího produktu, uhličitánu vápenatého.

Teplota v komoře byla nastavena na 25 °C. Na dno komory byla umístěna nádoba s roztokem manganistanu draselného, který pomáhal zajistit v komoře vlhkost  $75 \pm 5$  %. Tato poměrně vysoká vlhkost je nezbytná pro dostatečně rychlý průběh chemické reakce, karbonatace. Vlhkost vzduchu však nesmí přesáhnout určitou hranici, pokud by se blížila 100 %, způsobila by zaplnění pórů vodou a oxid uhličitý by se do nich dostával jen velmi pomalu.

V návaznosti na předchozí zkušenosti byl přívod oxidu uhličitého nastaven tak, aby byla v komoře udržována koncentrace  $\text{CO}_2$  4 %. Bohužel, při tomto režimu došlo v komoře k velmi výraznému zvýšení teploty na 40 °C během 30 minut, neboť karbonatace je exotermická reakce. Komora byla vyvětrána a po snížení teploty na 25 °C byl nastaven přívod tak, aby se v komoře udržovala koncentrace  $\text{CO}_2$  2,5 %. Nicméně i při této koncentraci došlo k nežádoucímu nárůstu teploty.

Následně byla nastavena koncentrace 1,5 %  $\text{CO}_2$ . Při tomto režimu se teplota zvyšovala až přibližně ke 32 °C, poté její nárůst ustal. Po hodině testování došlo k poklesu teploty na 29 °C.

Pro další průběh karbonatačních testů tedy byla zvolena koncentrace  $\text{CO}_2$  1,5 %.



Obr. 56: Vlevo: karbonatační komora, vpravo: vzorky uložené v karbonatační komoře

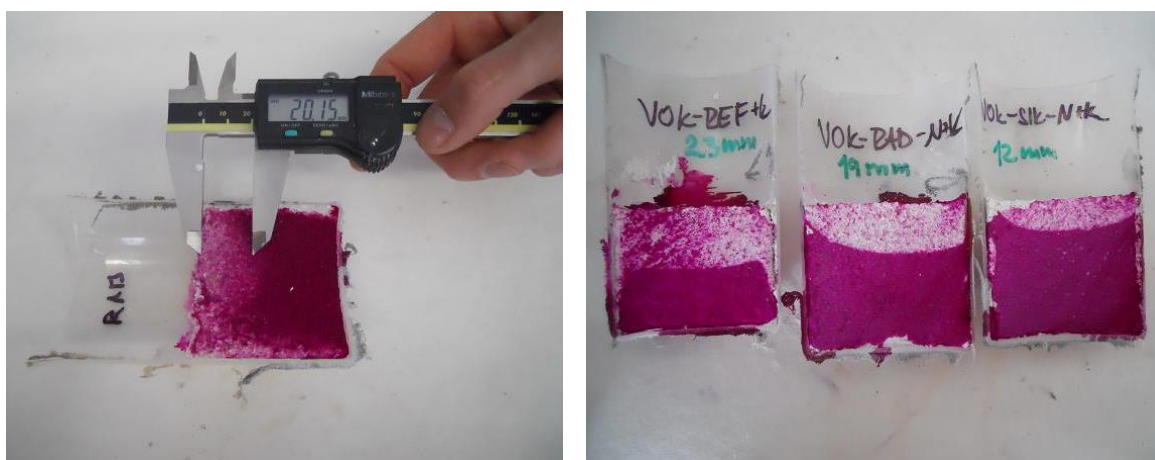
Spolu se vzorky, které byly následně zkoušeny v experimentální části práce, byly do komory umístěny váženky, rovněž naplněné vápennou maltou a ošetřené příslušnými hydrofobizacemi. V průběhu karbonatačních testů byly váženky postupně vyjímány z komory a byly na nich provedeny zkoušky roztokem fenolftaleinu, viz Obr. 57 a Obr. 58.

Fenolftalein je látka patřící mezi acidobazické indikátory. Nachází-li se v prostředí s pH nižším než 9,5, je bezbarvý, pokud je v prostředí s pH vyšším než 9,5, má ostře fialovou barvu. Jelikož je pH hydroxidu vápenatého 12,45, fenolftalein na něm zfialoví. Naopak na uhličitanu vápenatém, který je produktem karbonatace vápna, zůstane fenolftalein čirý, jelikož jeho pH je 8,3. [65]

Váženky byly nasvislo rozříznuty a pokapány roztokem fenolftaleinu. Následně byla digitálním posuvným měřítkem zjištěna hloubka zkarbonatované části. U vzorků ošetřených nátěry byl prokázán průběh karbonatace o něco pomalejší. Poté, co byla na váženkách zjištěna větší hloubka karbonatace než 20 mm, byl proces u příslušné skupiny omítek ukončen (20 mm bylo stanoveno z důvodu zajištění karbonatace nejmohutnějších vzorků, trámečků o rozměrech 40x40x160 mm).



Obr. 57: Vlevo: řezání váženky, vpravo: aplikace roztoku fenolftaleinu



Obr. 58: Vlevo: měření hloubky karbonatace, vpravo: porovnání hloubky karbonatace u referenční omítky a omítky ošetřené nátěrem

## 7 Základní materiálové parametry

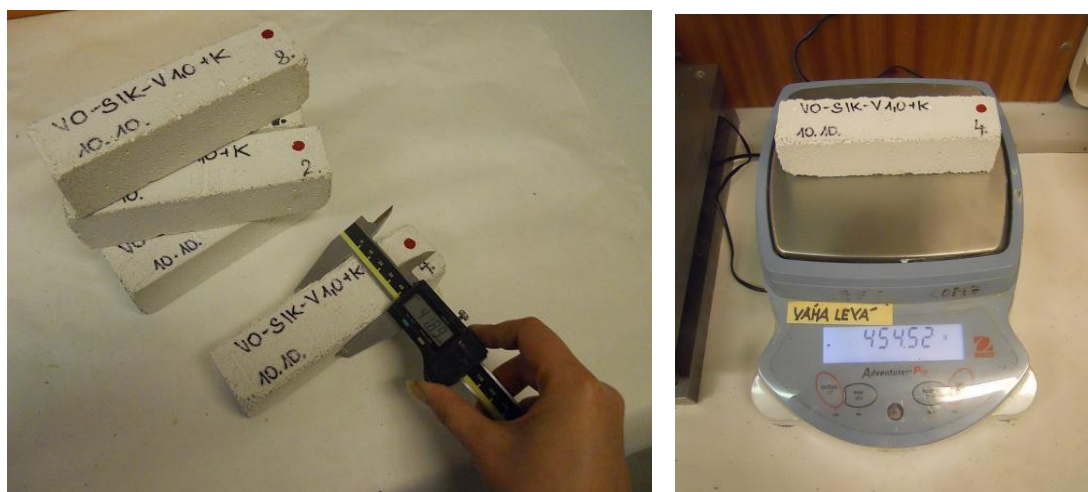
Mezi základní materiálové parametry se řadí, mimo jiné, objemová hmotnost, hustota matrice a pórovitost. Tyto charakteristiky přímo ovlivňují další vlastnosti materiálu, jako jsou například pevnostní či tepelné, a především znalost velikosti a objemového zastoupení pórů pomáhají vysvětlit průběh transportních procesů.

Měření následujících parametrů probíhalo za konstantních podmínek v klimatizované laboratoři při teplotě  $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  a relativní vlhkosti 25 – 30 %.

### 7.1 Objemová hmotnost

Objemová hmotnost byla měřena gravimetrickou metodou na trámečcích o rozměrech 40x40x160 mm dle normy ČSN EN 1015-10 (Stanovení objemové hmotnosti malt). Měření vždy proběhlo po asi dvou měsících od výroby vzorků, tedy v době, kdy už byl materiál dostatečně vyzrálý. Před měřením byly vzorky celou dobu uskladněny v klimatizované laboratoři (teplota  $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ , relativní vlhkost 25 – 30 %).

Přesné rozměry každého vzorku byly změřeny digitálním posuvným měřítkem s přesností na 0,01 mm. Změřena byla vždy tři různá místa, výsledná hodnota je jejich aritmetickým průměrem. Dále byly vzorky zváženy na digitálních vahách Ohaus AdventurerPro s přesností na 0,01 g, viz Obr. 59.



Obr. 59: Vlevo: měření rozměrů vzorku digitálním posuvným měřítkem, vpravo: vážení vzorku na digitálních vahách



Následně byla vypočítána objemová hmotnost  $\rho_b$  dle vztahu:

$$\rho_b = \frac{m}{b \cdot h \cdot l} \quad [\text{kg/m}^3] \quad (10)$$

kde je  $m$  hmotnost vzorku v g  
 $b$  šířka vzorku v mm  
 $h$  výška vzorku v mm  
 $l$  délka vzorku v mm.

Výsledky jsou prezentovány v Tab. 6.

## 7.2 Hustota matrice

Na vybraných skupinách omítek byla měřena hustota matrice pomocí héliové pyknometrie na přístroji Pycnomatic ATC. Pyknometrická metoda je založená na použití nádoby o známém objemu a kapalné či plynné látky o známé hustotě. Nejprve je látkou naplněna prázdná nádoba, následně nádoba se vzorkem, a z rozdílu hmotností se vypočítá objem materiálu bez pórů (ty byly vyplněny tekutinou). Ze známého objemu matrice vzorku a jeho hmotnosti se pak vypočítá hustota. Na stejném principu funguje héliová pyknometrie. Srovnávací tekutinou je v tomto případě hélium, které je vhodné zejména proto, že má velmi malé atomy, jež dokáží proniknout i do extrémně malých pórů.

K tomuto měření byly použity úlomky trámčů, které zbyly po provedení pevnostních zkoušek. Úlomky byly nejprve vysušeny v sušárně při teplotě 105 °C do konstantní hmotnosti. Následně byly zváženy na digitálních vahách Ohaus Discovery s přesností na 0,00001 g a vloženy do měřicí nádoby pyknometru, viz Obr. 60.



Obr. 60: Vlevo: vážení vzorku na digitálních vahách, vpravo: vzorek připravený v měřicí nádobce pyknometru

Poté bylo přístrojem pod známým tlakem vpuštěno hélium, nejprve do referenční komory o známém objemu. Následně bylo hélium přečerpáno do nádoby se vzorkem, čímž došlo ke změně objemu helia a tedy i ke změně tlaku, který byl průběžně měřen až do svého ustálení. Z naměřených tlaků a ze známých objemů byl programem vypočítán objem vloženého vzorku  $V$ , dle rovnice:

$$V = V_c + V_r \cdot \frac{p_m - p_r}{p_m - p_{atm}} \quad [\text{m}^3] \quad (11)$$

kde je  $V_c$  objem nádoby se vzorkem v  $\text{m}^3$

$V_r$  objem referenční komory v  $\text{m}^3$

$p_m$  tlak v nádobce se vzorkem v Pa

$p_r$  tlak v referenční komoře v Pa

$p_{atm}$  atmosferický tlak v Pa.

Z vypočítaného objemu a zadané hmotnosti vzorku byla dále vypočítána hustota matrice materiálu  $\rho_{He}$  dle vztahu:

$$\rho_{He} = \frac{m}{V} \quad [\text{kg}/\text{m}^3] \quad (12)$$

kde je  $m$  hmotnost vzorku v kg

$V$  objem vzorku bez pórů v  $\text{m}^3$ .

Výsledky jsou shrnuty v Tab. 7.

## 7.3 Pórovitost

Jedním ze základních parametrů materiálu je jeho pórovitost. Podstatný je nejen celkový objem, ale i distribuce velikosti pórů. Dalším významným faktem ovlivňujícím zejména transport kapalně a plynně vlhkosti je, zda jsou póry uzavřené či otevřené – tedy zda tvoří vzájemně propojenou strukturu ústící až k povrchu tělesa.

### 7.3.1 Celková pórovitost

Celková pórovitost byla vypočítána z hustoty matrice  $\psi_{He}$  dle vztahu:

$$\psi_{He} = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_{He}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (13)$$

kde je  $\rho_d$  objemová hmotnost vysušeného materiálu v  $\text{kg/m}^3$   
 $\rho_{He}$  hustota matrice materiálu v  $\text{kg/m}^3$ .

Jelikož hélium má velmi malé atomy (řádově menší, než jsou molekuly vody), je schopno proniknout i do velmi malých pórů, které zůstávají pro vodu uzavřené. Veličina  $\psi_{He}$  tedy udává objem všech pórů v materiálu, včetně těch nejmenších, pro vodu neprostupných.

Výsledky jsou patrné z Tab. 7.

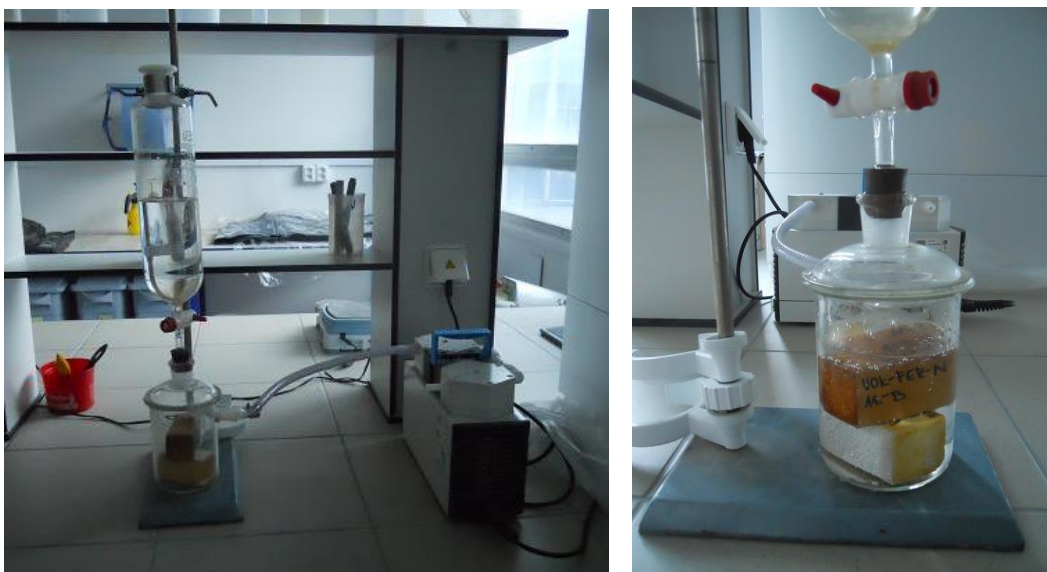
### 7.3.2 Otevřená pórovitost

Oproti předchozímu, pórovitost získaná pomocí Archimédovy hmotnosti počítá pouze s póry dostatečně velkými na to, aby jimi mohly proniknout molekuly vody, a jejichž síť je propojena s povrchem – jedná se tedy o otevřenou pórovitost.

Měření bylo provedeno na vzorcích velikosti přibližně 40x40x75 mm (trámečky rozříznuté napůl). Vzorky byly nejprve vysušeny do konstantní hmotnosti a zváženy na digitálních vahách Ohaus AdventurerPro s přesností na 0,01 g.

Poté bylo potřeba vzorky plně nasytit vodou, k čemuž byla použita aparatura na evakuaci. Vzorky byly umístěny do skleněné nádoby napojené na vývěvu, která z nádoby odčerpala vzduch. Následně byla nádoba pod vakuem naplněna vodou. Díky takto vytvořenému podtlaku dokázala voda pronikat do porézní struktury materiálu mnohem rychleji a efektivněji než by tomu bylo při atmosferickém tlaku. Po několika hodinách byly vzorky z nádoby

vyjmuty a zváženy. Opakovaným vážením bylo potvrzeno, že hmotnost vzorků již nepřibývá a tedy že bylo dosaženo plné saturace materiálu.



*Obr. 61: Vlevo: aparatura na evakuaci, vpravo: vzorky umístěné v nádobce, ze které byl vývěvou odsátý vzduch*

Na vodou nasycených vzorcích byla změřena Archimédova hmotnost, tedy hmotnost tělesa plně ponořeného do kapaliny. Těleso je při tom kapalinou nadlehčováno silou rovnou tíze kapaliny o objemu tělesa. Do tohoto objemu se ovšem nezapočítávají vodou naplněné póry (tíha vody o určitém objemu nadlehčená tíhou vody o tom samém objemu má výslednici nulovou).

Měření probíhalo na digitálních vahách Ohaus AdventurerPro s přesností na 0,01 g, které byly umístěny nad větší skleněnou nádobu naplněnou vodou. K vahám byla pomocí drátku připevněna destička, na kterou se umísťovaly vzorky tak, aby byly vždy ponořeny do vody celým svým objemem, viz Obr. 62. Po ustálení hodnoty čtení na vahách byla zaznamenána Archimédova hmotnost vzorku  $m_a$ .



Obr. 62: Měření Archimédovy hmotnosti

Z naměřených hmotností byl vypočítán objem vzorků (včetně pórů)  $V$  a otevřená pórovitost  $\psi_o$ , vyjadřující poměr objemu otevřených pórů ve vzorku a celkového objemu vzorku, dle následujících rovnic:

$$V = \frac{m_w - m_a}{\rho_w} \quad [\text{m}^3] \quad (14)$$

$$\psi_o = \frac{m_w - m_d}{V \cdot \rho_w} \cdot 100 \quad [\%] \quad (15)$$

kde je  $m_d$  hmotnost suchého vzorku v kg  
 $m_w$  hmotnost vzorku nasyceného vodou v kg  
 $m_a$  Archimédova hmotnost vzorku v kg  
 $\rho_w$  objemová hmotnost vody v  $\text{kg/m}^3$   
 $V$  objem vzorku v  $\text{m}^3$ .

Vypočítané výsledky jsou shrnuty v Tab. 7.

### 7.3.3 Distribuce pórů

Zastoupení jednotlivých velikostí pórů bylo zjištěno metodou rtuťové porozimetrie. Ta funguje na principu vtlačování rtuti do porézní struktury materiálu. Čím vyšší tlak je použit, tím menší póry jsou rtutí zaplněny. Rtuť je použita z toho důvodu, že je její smáčecí úhel větší než  $90^\circ$  a tím pádem nesmáčí běžné stavební materiály. Důsledkem toho může pronikat do pórů materiálu jen vlivem vnějšího tlaku.

Měření bylo provedeno na úlomcích trámčů, které zbyly po provedení pevnostních zkoušek. Materiál byl před zkouškou vysušen do konstantní hmotnosti. Z časových důvodů bylo měření provedeno pouze u referenčních omítek a omítek opatřených utěšňujícími nátěry. Vybírány na něj byly vždy ty části vzorků, které tvořily jejich povrch, aby se mohl vliv nátěrů ve výsledcích maximálně projevit.

Vzorky byly umístěny do nádoby, která byla poté vevakuována. Následně byl vzorek uveden do kontaktu s rtutí. Postupným zvyšováním tlaku byla rtuť vháněna do stále menších pórů vzorku, přičemž byl zaznamenáván její úbytek z původní nádoby. Z dílčích závislostí objemu zbylé rtuti na vnějším tlaku byla přístrojem stanovena kumulativní křivka distribuce pórů. Ta pro určitou velikost poloměru pórů udává objem pórů, které jsou tomuto poloměru rovny či jsou větší.

Nejmenší poloměr pórů  $r$ , zaplněných rtutí při určitém tlaku, byl přístrojem vypočítán pomocí vzorce:

$$r = \frac{-2\gamma \cdot \cos\Theta}{P} \quad [\text{m}] \quad (16)$$

kde je  $\gamma$  povrchové napětí rtuti v N/m

$\Theta$  úhel smáčení stěn pórů rtutí ve °

$P$  tlak, pod nímž vniká rtuť do pórů, v N/m<sup>2</sup>.

Naměřené hodnoty jsou graficky vyjádřeny na Obr. 66.

## 7.4 Výsledky a diskuse

Tab. 6 uvádí průměrné hodnoty objemové hmotnosti jednotlivých skupin omítek a jejich maximální kladné a záporné odchylky.

Objemová hmotnost byla stanovena vždy na minimálně osmi vzorcích z každé skupiny. Chyba měření maximálně 1 %.

Tab. 7 obsahuje údaje o otevřené pórovitosti a hodnoty hustoty matrice a pórovitosti získané z hustoty matrice u vybraných skupin.

Vzhledem k velké časové náročnosti experimentu (doba potřebná k saturaci) a k vysoké homogenitě materiálu proběhlo měření otevřené pórovitosti vždy na dvou až třech vzorcích z každé skupiny. Chyba měření je maximálně 5 %.

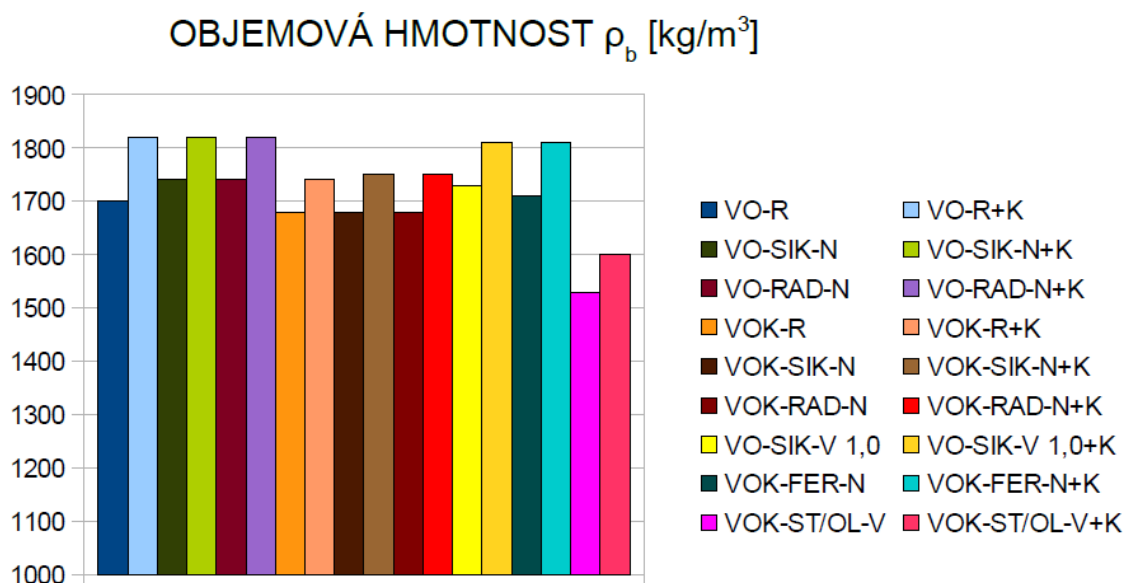
Hustota matrice materiálu byla měřena pouze u referenčních omítek a omítek s vnitřní hydrofobizací, u omítek opatřených nátěrem je šance na změnu hustoty matrice jen ve velmi

tenké povrchové vrstvě, měření by tedy bylo u těchto skupin bezpředmětné. Vzhledem vysoké přesnosti měření byla zjišťována vždy na dvou vzorcích z dané skupiny. Chyba měření je maximálně 0,1 %.

Pro lepší možnost porovnání jsou výsledky prezentované také formou souhrnných grafů.

*Tab. 6: Objemová hmotnost*

Skupina	Objemová hmotnost $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]		
	Průměr	Odchylka	
		+	-
<b>VO-R</b>	1700	20	30
<b>VO-R+K</b>	1820	20	20
<b>VO-SIK-N</b>	1740	10	10
<b>VO-SIK-N+K</b>	1820	50	30
<b>VO-RAD-N</b>	1740	20	30
<b>VO-RAD-N+K</b>	1820	30	10
<b>VOK-R</b>	1680	30	50
<b>VOK-R+K</b>	1740	10	10
<b>VOK-SIK-N</b>	1680	30	20
<b>VOK-SIK-N+K</b>	1750	20	10
<b>VOK-RAD-N</b>	1680	20	20
<b>VOK-RAD-N+K</b>	1750	30	40
<b>VO-SIK-V 1,0</b>	1730	20	30
<b>VO-SIK-V 1,0+K</b>	1810	10	20
<b>VOK-FER-N</b>	1710	30	40
<b>VOK-FER-N+K</b>	1810	40	20
<b>VOK-ST/OL-V</b>	1530	20	20
<b>VOK-ST/OL-V+K</b>	1600	10	20



*Obr. 63: Grafické znázornění objemové hmotnosti*

Skupiny čistě vápenné omítky (VO) vykazují oproti skupinám vápenné omítky s přidavkem křemeliny (VOK) objemovou hmotnost přibližně o 3 % vyšší u nezkarbonatovaných vzorků, respektive o 4 % vyšší u vzorků zkarbonatovaných.

U skupiny VO se objemová hmotnost vlivem karbonatace zvýšila průměrně o 6 %, u skupiny VOK jen o 4 %.

U vzorků opatřených nátěrem utěšňujících látek (Sikkaton a Radcon) se, dle očekávání, objemová hmotnost prakticky nezměnila. O málo se zvýšila v případě vzorků skupiny VO-SIK-V 1,0 a VO-SIK-V 1,0+K, u nichž byla krystalizační látka přidána do záměsi a také u skupin VOK-FER-N a VOK-FER-N+K, jejichž povrch byl natřen dvojitou vrstvou lněné fermeže.

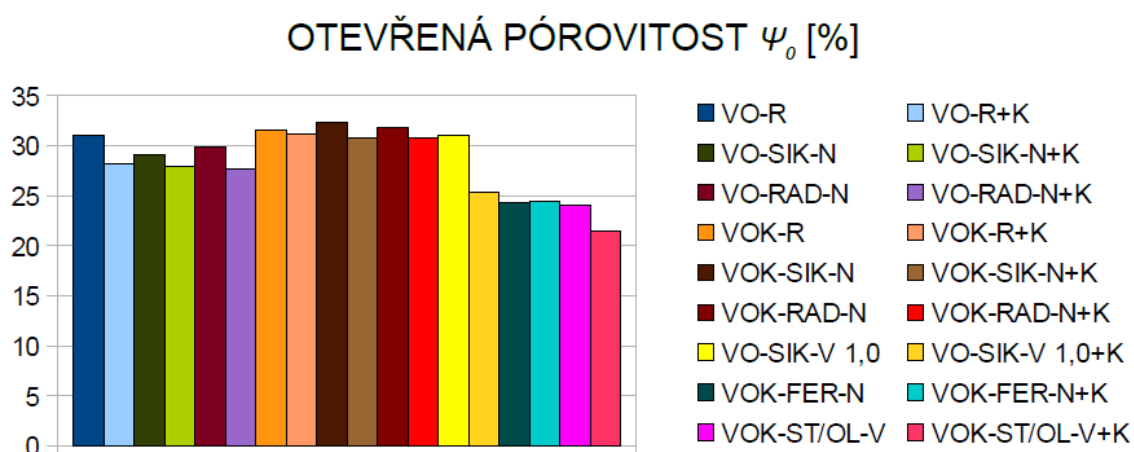
Skupiny VOK-ST/OL-V a VOK-ST/OL-V+K vykazují hodnoty o 9 % nižší než referenční vápenná omítka s přidavkem křemeliny. Z měření vyplývá, že přidavek směsi stearanu a oleátu způsobuje mírné provdušnění záměsi.

V tabulce jsou uvedeny také maximální odchylky měření. Skutečnost, že jejich hodnoty jsou velmi malé, svědčí o tom, že se jedná o velmi homogenní materiál.



Tab. 7: Základní materiálové charakteristiky

Skupina	Otevřená pórovitost $\psi_o$ [%]	Hustota matrice materiálu $\rho_{He}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Pórovitost z hustoty matrice
VO-R	31,00	2570	34,00
VO-R+K	28,10	2650	31,50
VO-SIK-N	29,10	-	-
VO-SIK-N+K	28,00	-	-
VO-RAD-N	29,80	-	-
VO-RAD-N+K	27,60	-	-
VOK-R	31,60	2570	34,80
VOK-R+K	31,10	2630	34,20
VOK-SIK-N	32,30	-	-
VOK-SIK-N+K	30,80	-	-
VOK-RAD-N	31,80	-	-
VOK-RAD-N+K	30,80	-	-
VO-SIK-V 1,0	31,00	2590	33,60
VO-SIK-V 1,0+K	25,40	2620	31,40
VOK-FER-N	24,30	-	-
VOK-FER-N+K	24,50	-	-
VOK-ST/OL-V	24,10	2480	38,90
VOK-ST/OL-V+K	21,40	2570	38,00



Obr. 64: Grafické znázornění otevřené pórovitosti

Otevřená pórovitost se u referenčních omítek a omítek s utěšňujícími nátěry pohybuje okolo 30 %, u vápenných omítek s přidavkem křemeliny je v průměru o 2 – 3 % vyšší než u čistě vápenných omítek.

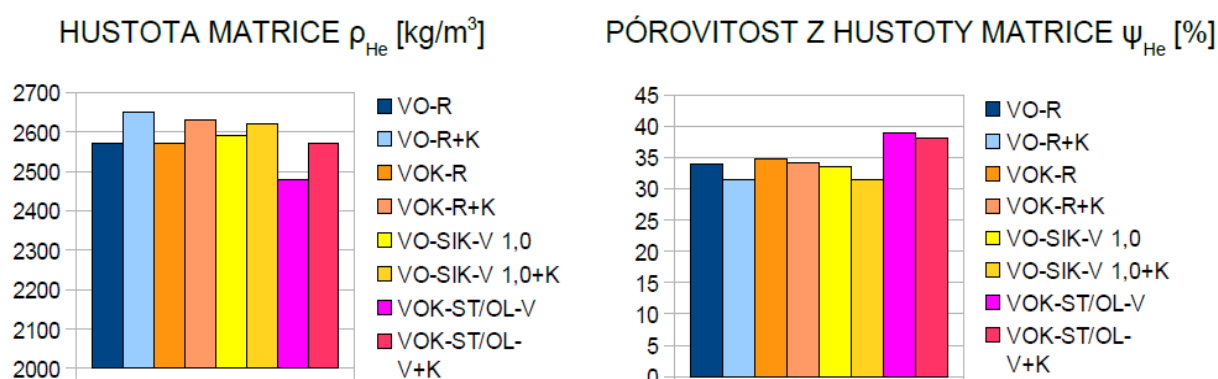
Tento experiment ukazuje, že ačkoli je rychlost nasákavosti u skupin omítek s utěšňujícími nátěry pomalejší než u referenčních omítek (viz kapitola 12.3.), na maximální nasákavosti se jejich účinek v podstatě neprojeví.

Karbonatace porozitu mírně snižuje, výrazněji u skupiny omítek VO (v průměru o 2 %), porozita skupiny omítek VOK je před karbonatací prakticky shodná s porozitou vyzrálého materiálu.

Otevřená pórovitost omítky s látkou Sikkaton přidanou do záměsi (VO-SIK-V 1,0) je v nevyzrálém stavu srovnatelná s omítkou referenční, 31 %. Po karbonataci se krystalizační látka projevila snížením pórovitosti na 25 %.

Nátěr lněné fermeže zjevně způsobil, že některé póry zůstaly pro vodu uzavřeny. Otevřená pórovitost se u tohoto materiálu snížila na 24 %. Karbonatace na ní již vliv nemá.

Rovněž u omítky s přidavkem stearanu a oleátu došlo k výraznému snížení otevřené pórovitosti, u nevyzrálého materiálu na 24 %, u vyzrálého dokonce na 21 %. Přídavek stearanu a oleátu tedy dokázal snížit tento parametr u vyzrálé omítky o třetinu oproti referenční hodnotě. Snížení otevřené pórovitosti je výraznější tím spíše, že celková porozita je u tohoto materiálu viditelně vyšší než u referenčního.

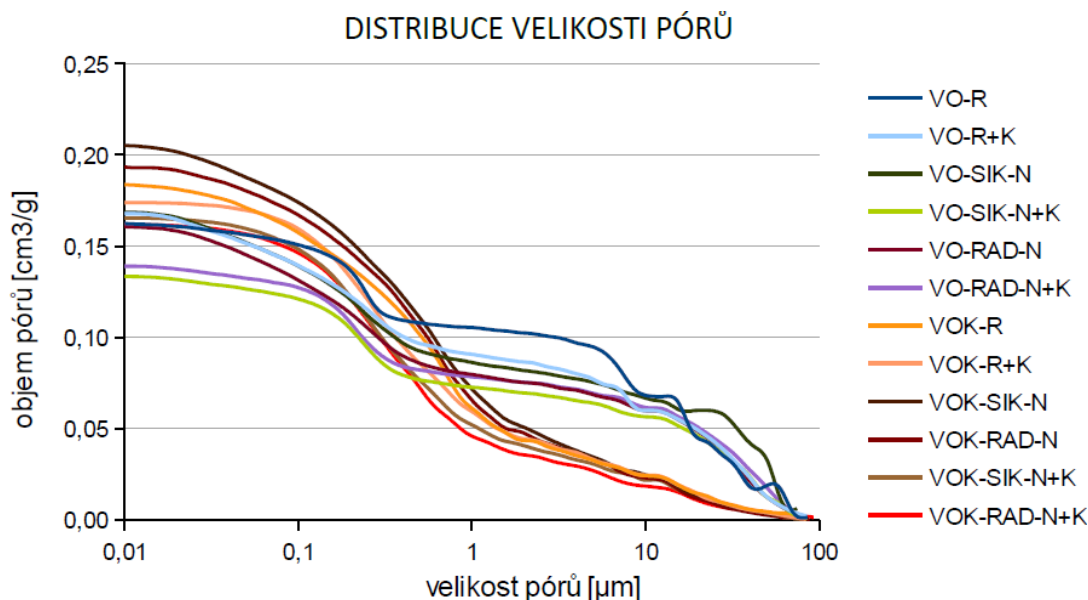


Obr. 65: Vlevo: grafické znázornění hustoty matrice, vpravo: grafické znázornění pórovitosti z hustoty matrice

Tab. 7 uvádí shodnou hodnotu pro hustotu matrice omítek VO-R a VOK-R. Pro jejich zkarbonatované verze jsou hodnoty o 3 % respektive 2 % vyšší. Krystalizační příměs Sikkaton se projevila nepatrným zvýšením hustoty matrice nevyzrálé omítky. Oproti tomu

omítka s příměsí stearanu a oleátu má hustotu o 3 % nižší, po karbonataci dosahuje stejných hodnot, jako nezkarbonatované omítky referenční.

Dále si lze povšimnout, že otevřená pórovitost vždy dosahuje nižších hodnot než pórovitost vypočítaná z hustoty matrice – je to dáno tím, že druhá zmiňovaná zahrnuje i velmi malé póry, do kterých nedokáže proniknout voda.



Obr. 66: Grafické znázornění výsledků získaných rtuťovou porozimetrií

Z grafu je na první pohled patrný rozdíl mezi čistě vápennými omítkami (VO) a vápennými omítkami s přidavkem křemelinou (VOK). Vlivem nahrazení části vápna křemelinou došlo k výraznému snížení obsahu pórů velikosti 1 - 100 μm. Naopak obsah pórů menších než 1 μm se výrazně zvýšil, takže celkový objem pórů v materiálu je u VOK vyšší než u VO.

Karbonatace porozitu, dle očekávání, snižuje.

Jelikož byla tato zkouška provedena u referenčních omítek a omítek opatřených utěšňujícími nátěry, byly na ni vybírány vždy ty části vzorků, které tvořily jejich povrch. Tak se mohl vliv nátěrů ve výsledcích maximálně projevit.

V grafu je možno vidět, že u nevyzrálých materiálů se efekt utěšňujících nátěrů příliš neprojevil, u VOK byl dokonce naměřen mírně vyšší objem pórů. Vlivem karbonatace došlo ke vzniku látek utěšňujících strukturu materiálu, čímž se zmenšila velikost pórů. V grafu se tato skutečnost projevila především úbytkem pórů menších než 0,1 μm.

Nejnižší objem pórů tak v rámci skupin VO i VOK vykazují vyzrálé omítky opatřené nátěry Sikkaton a Radcon.

## 8 Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti, především pevnosti, patří mezi základní parametry každého materiálu. Přestože omítky nejsou nosným prvkem stavební konstrukce, jsou u nich kladeny požadavky i na tyto vlastnosti. Povrchové vrstvy jsou namáhány i jinak, než tíhou konstrukce – napětím, které vzniká v důsledku rozdílné teplotní nebo vlhkostní roztažnosti omítky a nosného materiálu, a především tlakem způsobeným krystalizací ve vodě rozpustných solí, ke kterému dojde ve chvíli, kdy vlhká omítky začne vysychat.

V následujících kapitolách je popsáno měření pevnosti materiálu v tlaku, pevnosti v tahu za ohybu a dynamického modulu pružnosti.

### 8.1 Pevnost v tahu za ohybu

Zkouška pevnosti v tahu za ohybu proběhla na trámečcích o rozměrech 40x40x160 mm dle normy ČSN EN 1015-11 (Stanovení pevnosti zatvrdlých malt v tahu za ohybu a v tlaku). Na zkoušku byly vybrány trámce s co nejpravidelnějšími rozměry a bez viditelných vad a trhlin. Stáří vzorků bylo vždy v rozmezí 60 – 70 dní (hodnoty jsou tedy v rámci jednotlivých skupin porovnatelné), kdy materiál byl již dostatečně vyzrálý. Měření bylo provedeno na mechanickém zkušebním zařízení FP 100 firmy Heckert (rok výroby 1981), viz Obr. 67.



Obr. 67: Zkušební zařízení FP 100 firmy Heckert

Na zkoušku byl použit nástavec firmy ELE International pro tah za ohybu, viz Obr. 68. Zkoušený vzorek byl umístěn mezi tři válečkové podpory – dvě se nacházely pod ním, jedna nad ním, centrálně mezi spodními. Vzdálenost spodních podpor byla 100 mm. Těleso bylo do nástavce umístěno vždy tak, aby podstavy, které byly během výroby ve formě na dně a navrchu (na kontaktu se vzduchem), byly svisle. Jak již bylo zmíněno, plnění do forem a vibrování proběhlo u trámců ve dvou krocích. Je tedy možné, že by mohlo dojít k vytvoření dvou jen částečně soudržných vrstev. Bylo-li by těleso umístěno do nástavce stejným způsobem, jako bylo ve formě, mohlo by během zatěžování dojít k porušení mezi těmito vrstvami dříve, než k porušení samotného materiálu.

Do horní podpory byla přístrojem vnesena zatěžovací síla, čímž byl vyvozen trojbodý ohyb, a tudíž tahové napětí při spodním povrchu tělesa. Velikost zatěžovací síly byla plynule zvyšována až do chvíle, kdy trámeček v polovině praskl. Hodnota této maximální síly byla odečtena a zaznamenána. Poloviny trámečků pak byly použity na zkoušku pevnosti v tlaku.



Obr. 68: Vlevo: umístění tělesa v nástavci firmy ELE International pro zkoušku v tahu za ohybu, vpravo: rozlomené trámečky po zkoušce pevnosti v tahu za ohybu

Výpočet pevnosti v tahu za ohybu  $f_{bm}$  byl proveden dle vztahu:

$$f_{bm} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad [\text{MPa}] \quad (17)$$

kde je  $F$  maximální zatěžovací síla v N  
 $l$  vzdálenost spodních podpor v mm, tedy 100 mm

- b* rozměr tělesa na šířku v mm dle umístění v nástavci, tedy výška dle umístění ve formě
- h* rozměr tělesa na výšku v mm dle umístění v nástavci, tedy šířka dle umístění ve formě

Výsledky jsou patrné z Tab. 8.

## 8.2 Pevnost v tlaku

Zkouška pevnosti v tlaku byla provedena na polovinách trámečků zbylých po zkoušce pevnosti v tahu za ohybu v souladu s normou ČSN EN 1015-11 (Stanovení pevnosti zatvrdlých malt v tahu za ohybu a v tlaku). Měření bylo provedeno rovněž na mechanickém zkušebním zařízení FP 100 firmy Heckert, použit byl nástavec firmy ELE International pro zkoušku v tlaku.

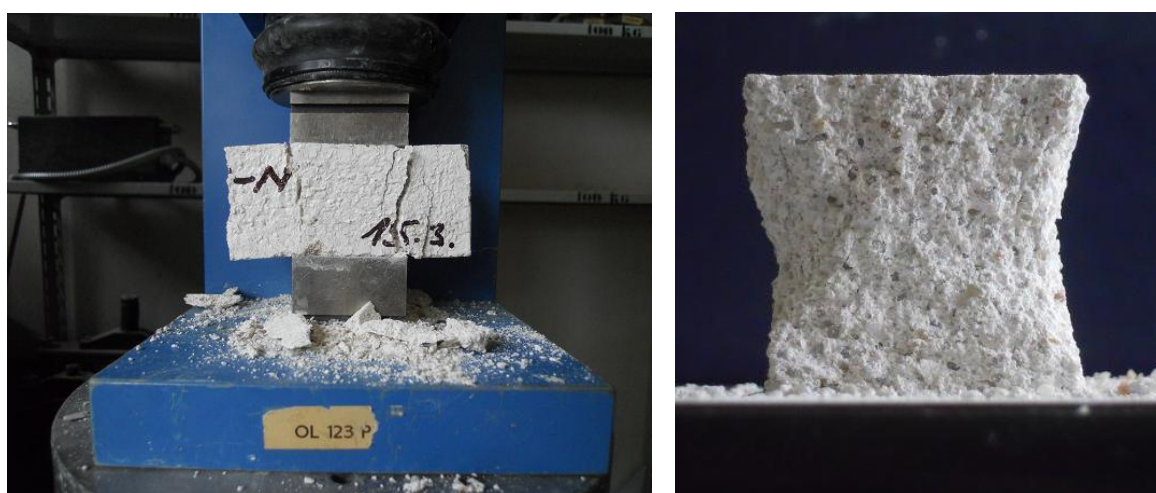
Poloviny trámečků byly umístěny mezi dvě tlačné destičky o šířce 40 mm, stejným způsobem jako u předešlé zkoušky, tedy tak, aby vrchní a spodní podstava byly svisle, viz Obr. 69.



*Obr. 69: Vlevo: umístění nástavce do zkušebního zařízení, vpravo: těleso v nástavci firmy ELE International pro zkoušku v tlaku*

Do aparatury bylo vneseno postupně se zvyšující zatížení. Ve chvíli, kdy byla únosnost materiálu překročena a došlo k jeho drcení, se proces automaticky zastavil a byla zaznamenána maximální dosažená hodnota zatížení. Porušení materiálu se projevilo také odpadnutím částí trámečku, které přesahovaly přes tlačnou destičku a tudíž nebyly zatížené. Po očištění nepřidrženého materiálu byl na vzorku patrný tvar „přesýpacích hodin“ (dvou jehlanů proti sobě), jež značil, že došlo ke správnému způsobu porušení vzorku a zkouška je tedy platná, viz Obr. 70.

Úlomky zbylé po této destruktivní zkoušce byly uzavřeny do těsných PE obalů a uschovány pro pozdější měření hustoty matrice.



Obr. 70: Vlevo: odtržení nezatížených částí trámečku, vpravo: vzorek po zkoušce pevnosti v tlaku – patrný tvar „přesýpacích hodin“

Ze získaných hodnot a známých rozměrů byla vypočítána pevnost v tlaku  $f_b$  dle vztahu:

$$f_b = \frac{F}{a \cdot b} \quad [\text{MPa}] \quad (18)$$

- kde je  $F$  maximální zatěžovací síla v N  
 $a$  šířka tlačné destičky v mm, tedy 40 mm  
 $b$  rozměr tělesa na šířku v mm dle umístění v nástavci, tedy výška dle umístění ve formě

Výsledky jsou shrnuty v Tab. 8.

### 8.3 Dynamický modul pružnosti

Měření dynamického modulu pružnosti proběhlo rovněž na trámečcích o rozměrech 40x40x160 mm. Na tuto nedestruktivní zkoušku byla vybrána tělesa s co nejhladšími hranami (drsnot povrchu by mohla ovlivnit přesnost měření) a bez viditelných vad a trhlin. Měření bylo provedeno vždy v přibližném stáří vzorků dva měsíce, dle normy ČSN EN 12504-4 (Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu a stanovení dynamického modulu pružnosti u betonu a u malt).

Zkouška byla provedena ultrazvukovým impulsovým přístrojem Starmans DiO 562 NLF. Přístroj se skládá ze stanice s grafickým displejem, z něhož se odečítají naměřené hodnoty, budiče a snímače ultrazvukových vln, viz Obr. 71.



*Obr. 71: Vlevo: aparatura pro měření dynamického modulu pružnosti, vpravo: průchod vlnění z budiče skrz vzorek do snímače*

Princip této metody spočívá v tom, že jsou budičem vysílány do materiálu opakované elektrické impulsy, které v něm na principu piezoelektrické přeměny elektrické energie na mechanickou vytvoří svazky mechanického tlumeného kmitání. Tyto mechanické impulsy jsou po proběhnutí materiálem o známé tloušťce zaznamenány snímačem, současně je změřena doba průchodu.

Před měřením byl na povrch budiče a snímače nanesen vysoce vodivý gel, jaký se používá například při sonografii. Poté byly budič a snímač postupně přiloženy k povrchu připravených těles (vždy na délku trámečku), materiálem proběhly opakované ultrazvukové vlny a po elektronickém zpracování se na displeji odečetla doba průchodu vlnění materiálem.



Následně byl vypočítán dynamický modul pružnosti  $E_d$ , na základě naměřených hodnot a známých rozměrů a hmotností jednotlivých vzorků, dle následující rovnice:

$$E_d = \frac{m \cdot l}{h \cdot b \cdot t^2} \quad [\text{Pa}] \quad (19)$$

kde je  $m$  hmotnost vzorku v kg  
 $l$  délka vzorku v mm  
 $h$  výška vzorku v mm  
 $b$  šířka vzorku v mm  
 $t$  čas potřebný k průchodu ultrazvukové vlny materiálem v s.

Výsledky jsou prezentovány v Tab. 9.

## 8.4 Výsledky a diskuse

Tab. 8 uvádí naměřené hodnoty pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku. Pevnost v tahu za ohybu byla zkoušena na třech trámečcích z každé skupiny. Na polovinách trámečků, zbylých po této zkoušce, byla naměřena pevnost v tlaku, a to vždy na pěti kusech (jeden půltrámeček byl ponechán pro další zkoušky). Uvedené výsledky jsou aritmetickým průměrem naměřených hodnot.

Tab. 9 obsahuje výsledky měření dynamického modulu pružnosti. Tento parametr byl zjišťován na třech vzorcích z každé skupiny omítek, v tabulce jsou uvedeny průměrné hodnoty pro každou skupinu.

Chyba měření je maximálně 2 %.

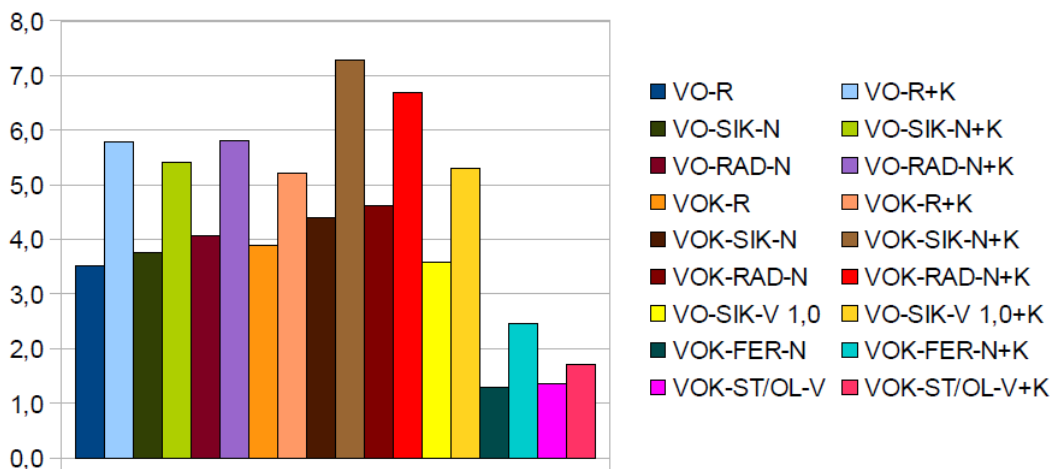
Tab. 8: Mechanické vlastnosti – pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku

Skupina	Pevnost v tahu za ohybu $f_{btm}$ [MPa]			Pevnost v tlaku $f_b$ [MPa]		
	Průměr	Odchylka		Průměr	Odchylka	
		+	-		+	-
<b>VO-R</b>	0,90	0,10	0,10	1,5	0,1	0,1
<b>VO-R+K</b>	1,70	0,10	0,10	4,0	0,3	0,2
<b>VO-SIK-N</b>	1,10	0,10	0,20	1,7	0,2	0,1
<b>VO-SIK-N+K</b>	1,80	0,20	0,20	3,9	0,2	0,2
<b>VO-RAD-N</b>	1,20	0,10	0,10	1,8	0,1	0,1
<b>VO-RAD-N+K</b>	1,70	0,10	0,10	3,9	0,2	0,3
<b>VOK-R</b>	0,90	0,10	0,10	1,7	0,2	0,1
<b>VOK-R+K</b>	1,20	0,10	0,10	2,6	0,2	0,1
<b>VOK-SIK-N</b>	1,00	0,10	0,10	1,9	0,2	0,1
<b>VOK-SIK-N+K</b>	1,30	0,10	0,10	3,9	0,3	0,2
<b>VOK-RAD-N</b>	0,80	0,10	0,10	1,9	0,1	0,1
<b>VOK-RAD-N+K</b>	1,00	0,10	0,00	3,2	0,3	0,3
<b>VO-SIK-V 1,0</b>	0,60	0,10	0,20	1,6	0,2	0,2
<b>VO-SIK-V 1,0+K</b>	1,80	0,10	0,10	4,0	0,4	0,4
<b>VOK-FER-N</b>	1,30	0,20	0,10	2,0	0,4	0,3
<b>VOK-FER-N+K</b>	1,50	0,10	0,30	2,7	0,2	0,2
<b>VOK-ST/OL-V</b>	0,30	0,00	0,10	1,5	0,1	0,1
<b>VOK-ST/OL-V+K</b>	0,50	0,00	0,00	1,4	0,1	0,1

Tab. 9: Mechanické vlastnosti – dynamický modul pružnosti

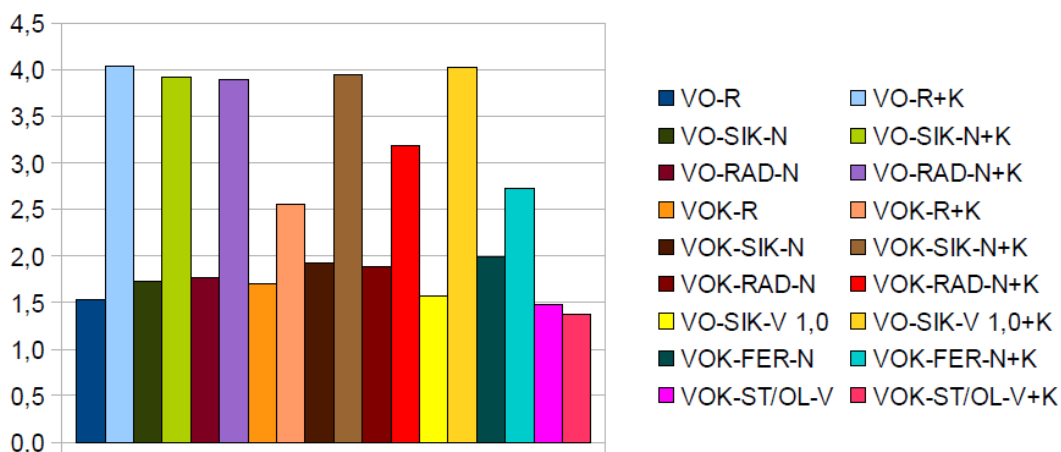
Skupina	Modul pružnosti $E_d$ [GPa]		
	Průměr	Odchylka	
		+	-
<b>VO-R</b>	3,5	0,03	0,02
<b>VO-R+K</b>	5,8	0,06	0,06
<b>VO-SIK-N</b>	3,8	0,14	0,12
<b>VO-SIK-N+K</b>	5,4	0,06	0,12
<b>VO-RAD-N</b>	4,1	0,03	0,02
<b>VO-RAD-N+K</b>	5,8	0,07	0,08
<b>VOK-R</b>	3,9	0,08	0,07
<b>VOK-R+K</b>	5,2	0,06	0,08
<b>VOK-SIK-N</b>	4,4	0,12	0,18
<b>VOK-SIK-N+K</b>	7,3	0,05	0,03
<b>VOK-RAD-N</b>	4,6	0,06	0,08
<b>VOK-RAD-N+K</b>	6,7	0,15	0,15
<b>VO-SIK-V 1,0</b>	3,6	0,12	0,15
<b>VO-SIK-V 1,0+K</b>	5,3	0,14	0,23
<b>VOK-FER-N</b>	1,3	0,03	0,06
<b>VOK-FER-N+K</b>	2,5	0,07	0,08
<b>VOK-ST/OL-V</b>	1,4	0,10	0,06
<b>VOK-ST/OL-V+K</b>	1,7	0,05	0,05

### DYNAMICKÝ MODUL PRUŽNOSTI $E_{dyn}$ [GPa]



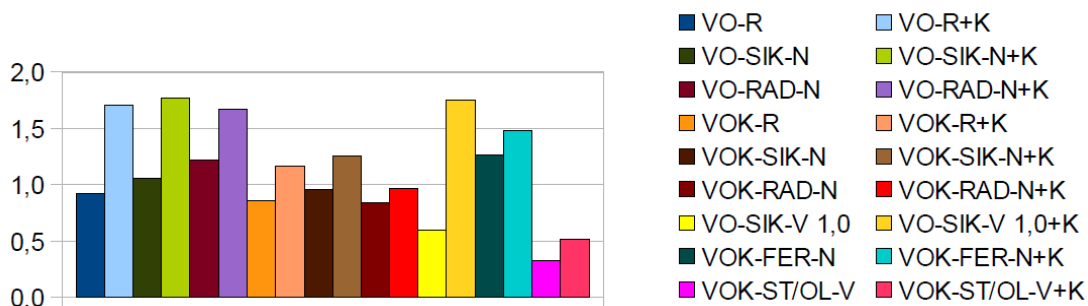
Obr. 72: Grafické znázornění dynamického modulu pružnosti

### PEVNOST V TLAKU $f_b$ [MPa]



Obr. 73: Grafické znázornění pevnosti v tlaku

### PEVNOST V TAHU ZA OHYBU $f_{btm}$ [MPa]



Obr. 74: Grafické znázornění pevnosti v tahu

Na první pohled jsou patrné velké rozdíly mezi vzorky nezkarbonatovanými a vzorky, u kterých karbonatace proběhla. Příčinou těchto rozdílů je reakce hydroxidu vápenatého s oxidem uhličitým za vzniku uhličitanu vápenatého, který vykazuje výrazně vyšší pevnost. Tyto vzorky prezentují finální mechanické vlastnosti vyzrálých omítek. Nejvýraznější jsou rozdíly u pevnosti v tlaku, zkarbonatovaný materiál dosahuje hodnot až o 160 % vyšších než materiál nezkarbonatovaný.

Dále si lze povšimnout, že pro vápennou omítku s křemelinou, konkrétně skupiny referenční VOK-R a VOK-R+K, s nátěrem lněné fermeže VOK-FER-N a VOK-FER-N+K a s přídavkem stearanu a oleátu VOK-ST/OL-V a VOK-ST/OL-V+K nejsou rozdíly mezi zkarbonatovaným a nezkarbonatovaným materiálem tak velké, jako u skupin VO, pevnosti se karbonatací zvýšily maximálně o 60 %. U materiálu VOK-ST/OL-V se dokonce pevnost v tlaku karbonatací mírně snížila.

Naproti tomu skupiny VOK-SIK-N a VOK-RAD-N, opatřené nátěrem Sikkaton respektive Radcon, zvýšily vlivem karbonatace svoji pevnost v tlaku i modul pružnosti v podobné míře, jako skupiny VO. Tento nárůst je patrný především u omítky VOK-SIK-N+K, ošetřené nátěrem na bázi krystalizačních látek Sikkaton, jejíž modul pružnosti dosáhl nejvyšší hodnoty ze všech měřených skupin.

Nevyzrálé vzorky vápenné omítky s přídavkem křemeliny (VOK) vykazují o 10 – 15 % vyšší hodnoty modulu pružnosti i pevnosti v tlaku než vzorky čistě vápenné omítky (VO). Po karbonataci je již situace jiná – již zmíněné vzorky ošetřené utěšňujícími nátěry dosahují u VOK obdobných hodnot, jako u VO (pro modul pružnosti dokonce vyšších), avšak ostatní zkarbonatované skupiny VOK hodnot vyzrálých VO nedosáhnou.

Naměřené výsledky pro pevnost v tahu za ohybu jsou u omítek skupiny VOK vždy nižší než u příslušných materiálů skupiny VO.

Dále je patrné, že materiál označený VOK-ST/OL-V a VOK-ST/OL-V+K dosahuje u všech mechanických parametrů jen přibližně padesátiprocentních hodnot oproti omítkám referenčním. Tato skutečnost koresponduje se znatelně nižší objemovou hmotností daného materiálu. Výjimkou je pevnost v tlaku nezkarbonatovaného materiálu, která je s pevností referenční omítky srovnatelná – tato skutečnost by mohla zaručit, že nenastanou problémy se zpracovatelností omítky, respektive že omítky během prvních měsíců po aplikaci nepopraská.

## 9 Transport kapalné vlhkosti

Parametry, které souvisejí s transportními procesy, patří k jedněm z nejdůležitějších vlastností stavebních materiálů. Nadměrný obsah vlhkosti může materiál v konstrukci značně negativně ovlivnit, proto je zde všeobecná snaha zabránit pronikání vody do konstrukce a v případě, že se již nadměrná vlhkost v konstrukci vyskytuje, umožnit její rychlé odvedení.

Právě z těchto důvodů se provádí hydrofobizace stavebních materiálů – hydrofobizační látka má za cíl zabránit průniku kapalné vlhkosti, zároveň je však na ní kladen požadavek nesnížit difúzní odpor materiálu, aby případná již přítomná vlhkost mohla z konstrukce odcházet ve formě vodní páry.

### 9.1 Absorpce

Parametry spojené se sorpčním experimentem popisují transport kapalné vlhkosti v porézním systému materiálu.

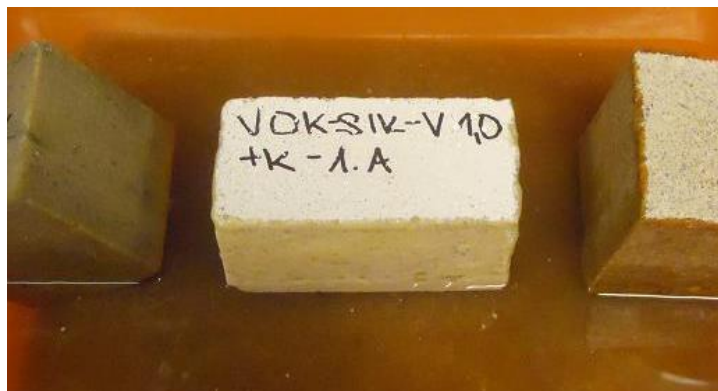
Měření bylo provedeno na vzorcích velikosti přibližně 40x40x75 mm (trámečky rozříznuté napůl). Postupováno bylo v souladu s normou ČSN 72 2448, respektive s interním zkušebním postupem IZP 123-17/2006 (Stanovení vlhkosti a nasákavosti malt).

Aby bylo zajištěno šíření vody v materiálu jedním směrem, bylo potřeba čtyři ze stěn vzorku zaizolovat. To bylo provedeno pomocí dvousložkového epoxidového lepidla. Epoxid byl na vzorky aplikován ve třech vrstvách, mezi jednotlivými nátěry bylo nutno ponechat několikadenní odstup, aby mohl předešlý nátěr zaschnout. Volná byla ponechána vždy ta strana, která se ve formě nacházela „na vzduchu“ (a strana k ní protilehlá), tedy ta, jejíž struktura povrchu nejlépe odpovídá líci omítky. Tato strana vzorku byla během sorpčního experimentu namáčena do vody.

Následně byly zjištěny rozměry vzorků pomocí digitálního posuvného měřítka s přesností na 0,01 mm, byl vypočítán jejich objem a plocha stěny, která byla určena k namáčení. Byla zjištěna hmotnost vzorků na digitálních vahách Ohaus AdventurerPro s přesností na 0,01 g.

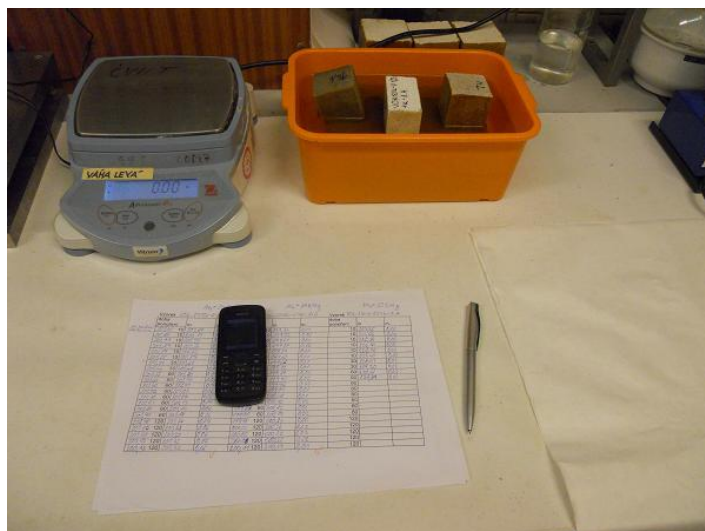
Poté proběhl samotný sorpční experiment. Měření bylo provedeno v klimatizované laboratoři při teplotě  $23 \pm 2$  °C a relativní vlhkosti 25 – 30 %. Do větší nádoby byla umístěna

houba a nádoba byla po výšku houby naplněna vodou. Jednotlivé vzorky byly pokládány na houbu tak, že byly přibližně 2 mm ponořeny do vody, viz Obr. 75.



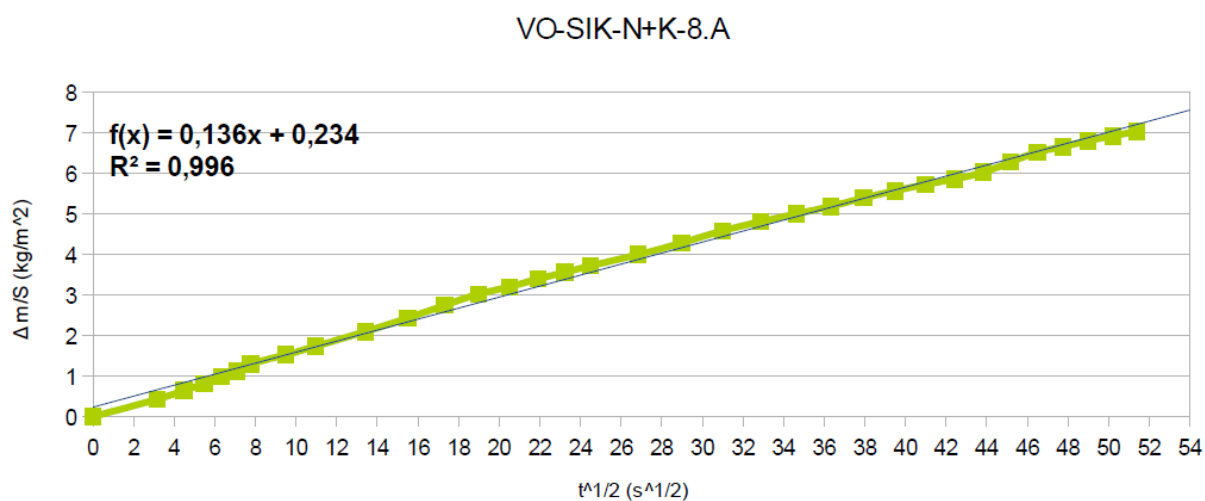
*Obr. 75: Vzorek umístěný na houbu, ponořený přibližně 2 mm do vody*

Po uplynutí určitého časového intervalu byl vzorek z vody vyjmut a zvážen na digitálních vahách Ohaus AdventurerPro s přesností na 0,01 g, hmotnost byla zaznamenána do připravené tabulky. Poté byl vzorek z váhy sejmout a vložen zpět do vody, zároveň byla zaznamenána hmotnost vody, jež zůstala na váze; ta byla následně odečtena od hmotnosti namočeného vzorku. Následovalo další ponoření do vody a vážení, viz Obr. 76. Doba ponoření se postupně zvyšovala, první minutu byly vzorky namáčeny po dobu 10 s, následovaly intervaly trvající 30 s, 60 s a 120 s. U některých skupin vzorků (VOK-ST/OL-V a VOK-ST/OL-V+K, VOK-FER-N a VOK-FER-N+K) se po namočení vytvořil na jejich povrchu souvislý vodní film, který se ovšem nevsákl dovnitř materiálu, ani neulpěl na povrchu vah. Tyto vzorky proto byly vždy před zvážením rychle otřeny savým hadříkem, aby hmotnost vodního filmu nezkreslovala měření.



Obr. 76: Měření absorpčních vlastností

V tabulkovém procesoru byl vytvořen graf závislosti poměru hmotnostních přírůstků ku velikosti namáčené plochy na druhé odmocnině z doby namáčení. Pomocí lineární regrese byl určen absorpční koeficient pro vodu  $A$  [ $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$ ]. To znamená, že byl graf proložen přímkou a absorpční koeficient pro vodu  $A$  byl vypočítán ze směrnice přímky. S rostoucím absorpčním koeficientem roste množství vody, jež bylo pohlceno danou plochou materiálu za daný čas.



Obr. 77: Příklad grafu, který je vyobrazením hodnot naměřených při sorpčním experimentu, patrná je též přímka vložena metodou lineární regrese

Vzorky byly následně plně nasyceny vodou pomocí vakuové nasákavosti, viz kapitola 10.3.2.



Následně byl vypočítán obsah nasycené vlhkosti  $w_{sat}$ , což je hmotnost vody v nasyceném vzorku ku jeho objemu, dle následujícího vztahu:

$$w_{sat} = \frac{m_{sat} - m_d}{V} \quad [\text{kg/m}^3] \quad (20)$$

kde je  $m_{sat}$  hmotnost plně nasyceného vzorku v kg

$m_d$  hmotnost suchého vzorku v kg

$V$  objem vzorku  $\text{m}^3$ .

Dále byla zjištěna hmotnostní nasákavost  $E$  [%], vyjadřující poměr hmotnosti vody v plně nasyceném vzorku ku hmotnosti vysušeného vzorku. Hmotnostní nasákavost může u materiálů, které jsou lehčí než voda, značně přesáhnout hodnotu 100 %. Její velikost byla vypočítána dle následující rovnice:

$$E = \frac{m_{sat} - m_d}{m_d} \quad [\%] \quad (21)$$

kde je  $m_{sat}$  hmotnost plně nasyceného vzorku v kg

$m_d$  hmotnost suchého vzorku v kg.

Výsledky jsou patrné z Tab. 10.

## 9.2 Svislá nasákavost

Výsledkem tohoto experimentu je stanovení výšky, do které vystoupá vlhkost v materiálu metodou kapilární vztlínivosti, v závislosti na čase.

Měření bylo provedeno na trámčích velikosti přibližně 20x40x290 mm. Postupováno bylo v souladu s normou ČSN EN 1015-18 (Stanovení koeficientu kapilární absorpce vody v zatvrdlé maltě).

Aby bylo zajištěno šíření vody v materiálu v jednom směru, bylo potřeba čtyři ze stěn vzorku zaizolovat pomocí dvousložkového epoxidového lepidla. Volné byly ponechány nejmenší strany s rozměry 20x40 mm.

Následně byla na vzorky lihovým popisovačem narýsována stupnice, každý vzorek byl takto rozdělen na 14 dvoucentimetrových dílků, viz Obr. 78.

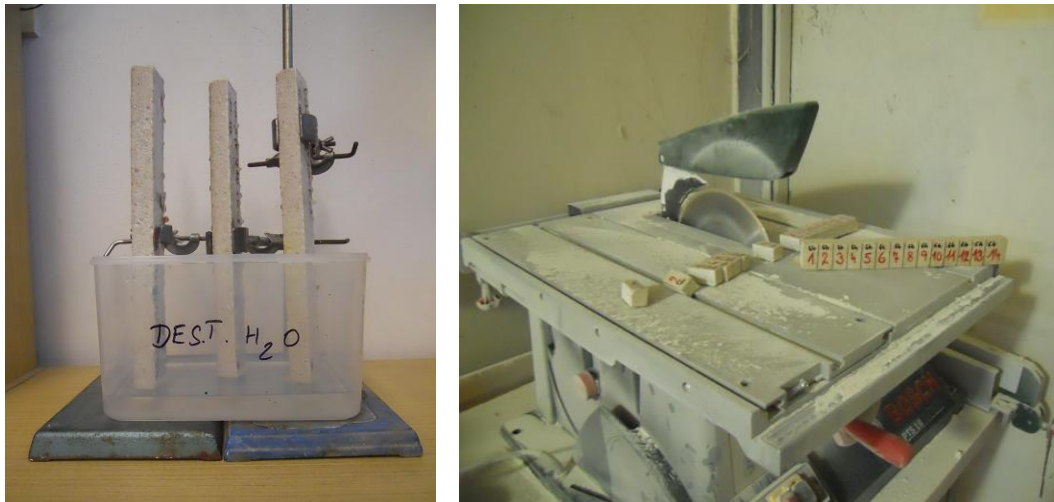


Obr. 78: Vlevo: zaizolování vzorku epoxidovým lepidlem, vpravo: vzorky s narýsovanou stupnicí

Nejprve bylo provedeno měření na několika pilotních vzorcích pro různé skupiny omítek. Cílem bylo zjistit, jaká je přibližná rychlost vztlínání v jednotlivých materiálech a pro každou skupinu stanovit tři různé časové intervaly, ve kterých vlhkost vystoupá přibližně do poloviny vzorku. Na základě těchto pilotních měření a výsledků sorpčního experimentu byly stanoveny jednotlivé intervaly takto:

- 1 hod, 2 hod a 3 hod pro skupiny VO-R, VO-R+K, VO-SIK-N, VO-SIK-N+K, VO-RAD-N a VO-RAD-N+K
- 2 hod, 4 hod a 6 hod pro skupiny VOK-R, VOK-R+K, VOK-SIK-N, VOK-SIK-N+K, VOK-RAD-N, VOK-RAD-N+K, VO-SIK-V 1,0 a VO-SIK-V 1,0+K
- 20 hod, 26 hod a 30 hod pro skupiny VOK-ST/OL-V a VOK-ST/OL-V+K

Následně proběhl samotný experiment. Vzorky byly nasvislo umístěny nad nádobu s vodou tak, aby nezaizolovaná strana byla ponořena pod hladinu přibližně 5 mm, viz Obr. 79. Po uplynutí předem stanoveného časového intervalu byly vzorky vyjmuty a rozřezány na dvoucentimetrové dílky, dle předrýsované stupnice. Během přenosu k řezačce a zpět byly vzorky umístěny v nepropustných PE obalech, aby nedošlo k jejich vysoušení. Poté byly dílky zváženy na digitálních vahách Ohaus Pioneer s přesností na 0,001 g, naměřené hodnoty byly zapsány do připravené tabulky.



Obr. 79: Vlevo: vzorky nainstalované v nádobě s vodou, vpravo: řezání vzorků na dílky

Následně byly rozřezané vzorky vysušeny po dobu několika dní v sušárně při teplotě 105 °C do konstantní hmotnosti a poté opět zváženy na digitálních vahách Ohaus Pioneer.



Obr. 80: Vlevo: vážení dílků, vpravo: vzorky v sušárně

Z naměřených hmotností a již dříve určených objemových hmotností jednotlivých omítek byla vypočítána objemová vlhkost  $w_v$  jednotlivých dílků vzorku dle vzorce:

$$w_v = \frac{m_w - m_d}{m_d} \cdot \frac{\rho}{\rho_w} \quad [\text{m}^3/\text{m}^3] \quad (22)$$

- kde je  $m_w$  hmotnost mokrého vzorku v kg  
 $m_d$  hmotnost suchého vzorku v kg  
 $\rho$  objemová hmotnost omítky v  $\text{kg}/\text{m}^3$   
 $\rho_w$  objemová hmotnost vody v  $\text{kg}/\text{m}^3$ .

Dále byla každému dílku přiřazena souřadnice  $X/\sqrt{t}$

kde je  $X$  výšková souřadnice středu dílku ve vzorku v m

$t$  časový interval, po který byl vzorek umístěný ve vodě, v s.

Následně bylo všech 42 dílků (14 dílků ze 3 vzorků) z každé skupiny vzestupně seřazeno dle souřadnice  $X/\sqrt{t}$  a hodnoty byly vyneseny do grafu závislosti objemové hmotnosti  $w_v$  na souřadnici  $X/\sqrt{t}$ .

Pro každou skupinu má výsledná křivka stejný průběh zakřivení, avšak jiné „měřítko“. Body grafu nejvíce vlevo reprezentují ty dílky vzorku, které byly namočené do vody a dílky s nimi sousedící, tedy materiál, u kterého došlo k vysokému stupni nasycení vodou. Jak křivka pokračuje směrem doprava, dostává se k okamžiku zlomu, kdy hodnoty objemové vlhkosti prudce klesají – tato oblast udává výšku (v poměru k době namáčení), do které vlhkost kapilární vztlínavostí vystoupala. V pravé části grafu již objemová vlhkost dosahuje velmi nízkých hodnot, které značí, že do této výšky již voda nepronikla. Hodnoty nejsou zcela nulové, jelikož měření proběhlo na vzorcích, které byly ponechány v prostředí laboratoře (relativní vlhkost vzduchu 25 – 30 %), hodnoty v pravé části grafu tedy reprezentují přirozenou vlhkost materiálu. Vzorky nebyly před měřením vysušeny z toho důvodu, že zcela vysušený materiál do sebe ihned začne pohlcovat vzdušnou vlhkost, což by mohlo zkreslit výsledky měření (nejvýše umístěné dílky by měly vlhkost přirozenou, zatímco vlhkost nižších dílků, do kterých by vlhkost ze vzduchu nestihla proniknout, by se blížila nulové).

Naměřené výsledky jsou patrné z grafu na Obr. 86.



Obr. 81: Nařezané dílky zbylé po měření svislé nasákavosti u vzorků skupiny VO

### 9.3 Výsledky a diskuse

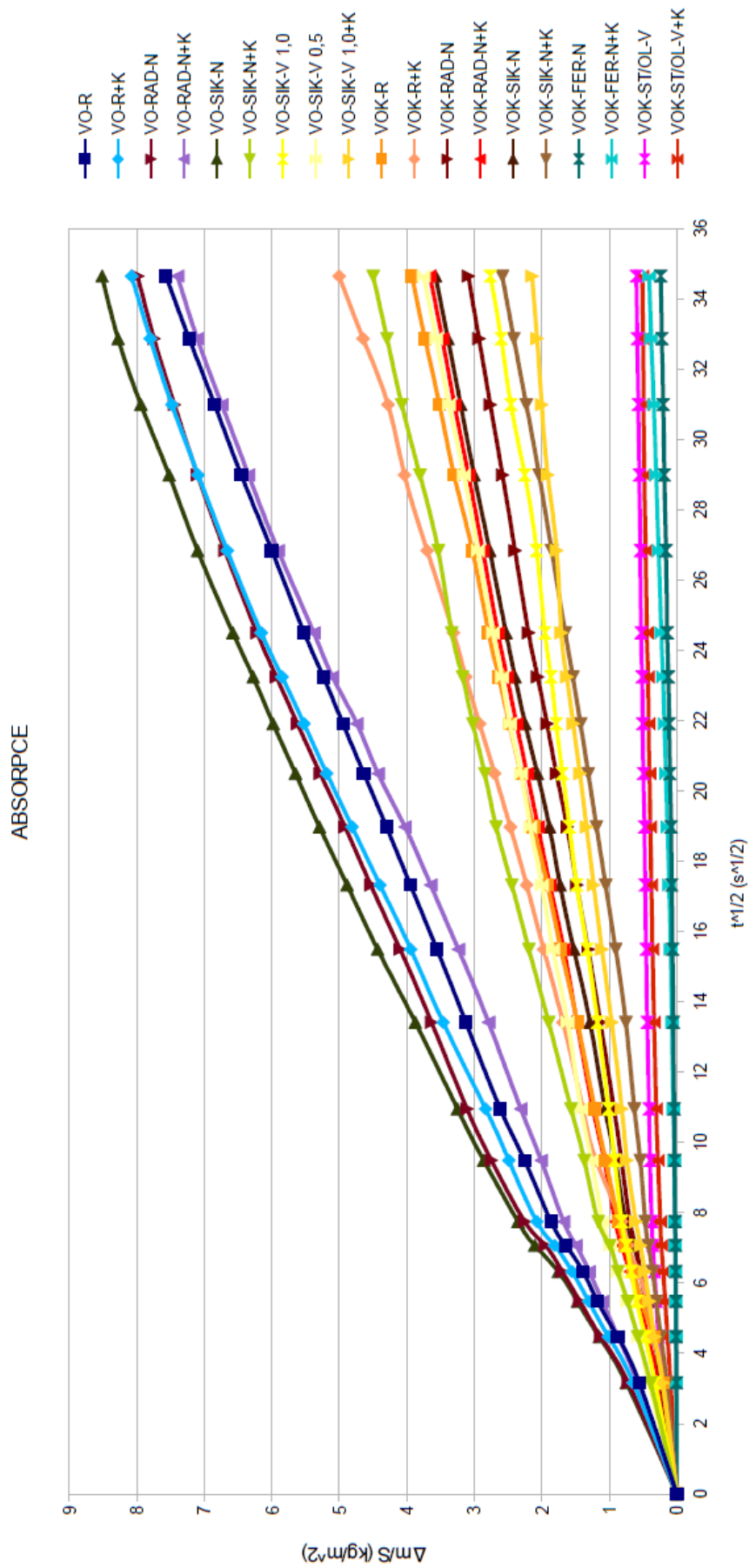
Tab. 10 zobrazuje parametry spojené s transportem kapalné vlhkosti.

Vzhledem k vysokému počtu receptur omítek a časové náročnosti měření byly absorpční experiment i následná saturace provedeny vždy na dvou vzorcích z každé skupiny, prezentované výsledky a grafy jsou průměrnými hodnotami těchto měření.

Chyba měření byla vypočítána na max. 10 %.

Tab. 10: Parametry spojené s transportem kapalné vlhkosti

Skupina	Absorpční koeficient pro vodu A [kg/m <sup>2</sup> .s <sup>1/2</sup> ]	Obsah nasycené vlhkosti w <sub>sat</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	Hmotnostní nasákavost E [%]
<b>VO-R</b>	0,2210	298,0	17,60
<b>VO-R+K</b>	0,2380	273,0	15,10
<b>VO-SIK-N</b>	0,2510	277,0	16,00
<b>VO-SIK-N+K</b>	0,1320	273,0	15,10
<b>VO-RAD-N</b>	0,2350	289,0	16,70
<b>VO-RAD-N+K</b>	0,2190	269,0	14,80
<b>VOK-R</b>	0,1200	306,0	18,30
<b>VOK-R+K</b>	0,1590	304,0	17,60
<b>VOK-SIK-N</b>	0,1100	313,0	18,80
<b>VOK-SIK-N+K</b>	0,0660	302,0	17,40
<b>VOK-RAD-N</b>	0,0930	311,0	18,60
<b>VOK-RAD-N+K</b>	0,1090	305,0	17,50
<b>VO-SIK-V 1,0</b>	0,0740	296,0	17,20
<b>VO-SIK-V 1,0+K</b>	0,0550	245,0	13,70
<b>VOK-FER-N</b>	0,0070	236,0	13,90
<b>VOK-FER-N+K</b>	0,0130	247,0	13,70
<b>VOK-ST/OL-V</b>	0,0130	236,0	15,50
<b>VOK-ST/OL-V+K</b>	0,0140	206,0	13,00



Obr. 82: Grafické znázornění sorpčního experimentu

Z výsledků je patrný velký rozdíl mezi skupinami VO a VOK – čistě vápenná omítka absorbuje vlhkost v průměru dvakrát rychleji než vápenná omítka s přídavkem křemeliny.

Účinek utěšňujících nátěrů se, bohužel, u čistě vápenných omítek ne vždy projevil, výrazně snížená rychlost průniku vody byla zaznamenána pouze u skupiny VO-SIK-N+K.

U vápenné omítky s přídavkem křemeliny se utěšňující nátěry projeví dle očekávání a snížily rychlost průniku vlhkosti, o něco málo výrazněji nátěr Sikkaton oproti Radconu.

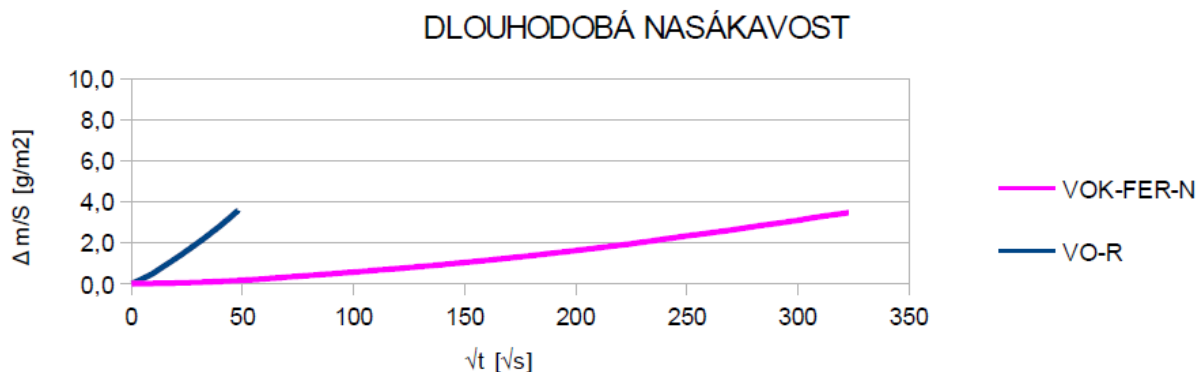
Vliv karbonatace je u konkrétních skupin odlišný. Zatímco zkarbonatované referenční vzorky pohloují vlhkost mírně rychleji než vzorky bez karbonatace, u skupin ošetřených utěšňujícími nátěry karbonatace absorpci zpomaluje.

Za povšimnutí stojí skupiny omítek, u kterých byla do záměsi přidána krystalizační látka Sikkaton. Absorpční vlastnosti byly testovány na dvou odlišných dávkováních – do záměsi omítky VO-SIK-V 1,0 bylo přidáno množství Sikkatonu o váze 1 % hmotnosti pojiva, analogicky do záměsi omítky VO-SIK-V 0,5 bylo přidáno množství Sikkatonu odpovídající 0,5 % hmotnosti pojiva. Experiment prokázal, že omítka VO-SIK-V 1,0 absorbuje vodu znatelně pomaleji (u některých produktů zabraňujících průniku vody se efekt zpomalení absorpce prakticky zastavuje u určité dávky aktivní látky a další navyšování jejich obsahu v záměsi již tedy nemá smysl). Po vyhodnocení výsledků tohoto experimentu byla pro všechna další měření vybrána skupina VO-SIK-V 1,0. Dále si lze povšimnout, že tato skupina odolává průniku vlhkosti dokonce lépe než vápenné omítky s přídavkem křemeliny opatřené utěšňujícími nátěry.

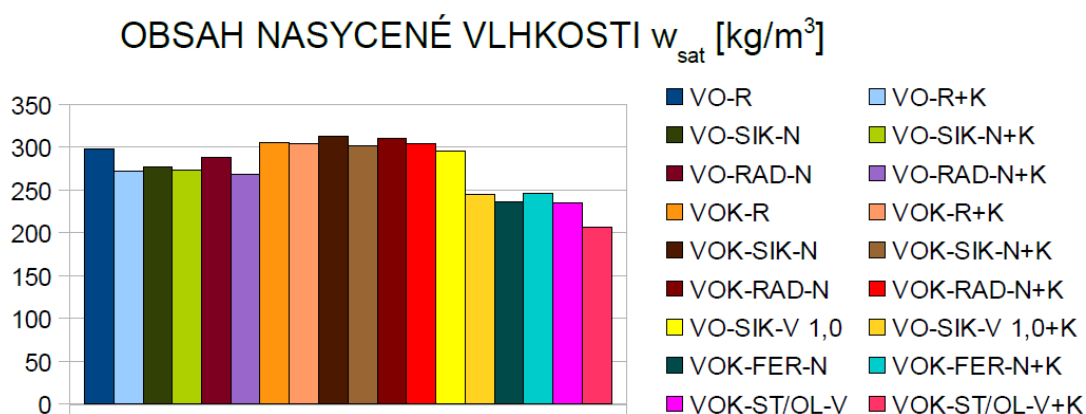
Opravdu výrazně je nasákavost snížena u omítky natřené lněnou fermeží (VOK-FER-N a VOK-FER-N+K) a omítky s přídavkem směsi stearanu a oleátu (VOK-ST/OL-V a VOK-ST/OL-V+K) – všechny skupiny vykazují hodnoty přibližně desetkrát nižší než referenční vápenná omítka s přídavkem křemeliny, vlivem karbonatace účinek nátěru lněné fermeže mírně klesá.

Pro vybrané vzorky byla zjišťována také dlouhodobá nasákavost. Měření probíhalo nepřetržitě několik hodin, bylo provedeno na digitálních vahách napojených na počítač, který v několikaveršinných intervalech zaznamenával hmotnost vzorku. Na grafu na Obr. 83 je znázorněna závislost hmotnostních přírůstků ku ploše vzorku na druhé odmocnině z času pro omítku VOK-FER-N. Můžeme vidět, že graf má po celou dobu měření plynulý lineární průběh a že ani po 29 hodinách, kdy byla podstava vzorku ponořena do vody, nedošlo ke zpomalení průniku vody do materiálu, tedy že ještě nedošlo k jeho plnému nasycení.

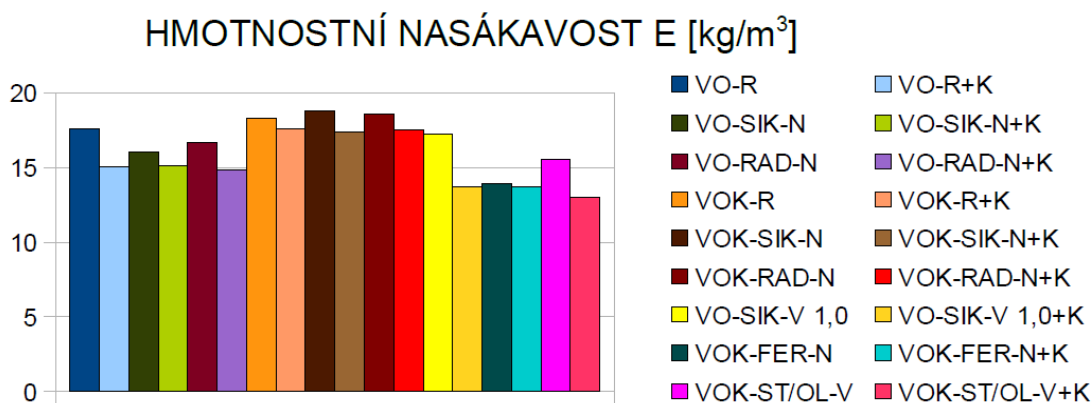
Dále je v grafu zaznamenáno přibližně tříčtvrtěhodinové měření omítky VO-R. Z grafu je patrné, že tento materiál pohlcuje vodu výrazně rychleji – za 45 minut do něj proniklo srovnatelné množství vody jako do materiálu VOK-FER-N za 29 hodin.



Obr. 83: Grafické znázornění dlouhodobé nasákavosti materiálů VO-FER-N a VO-R



Obr. 84: Grafické znázornění obsahu nasycené vlhkosti

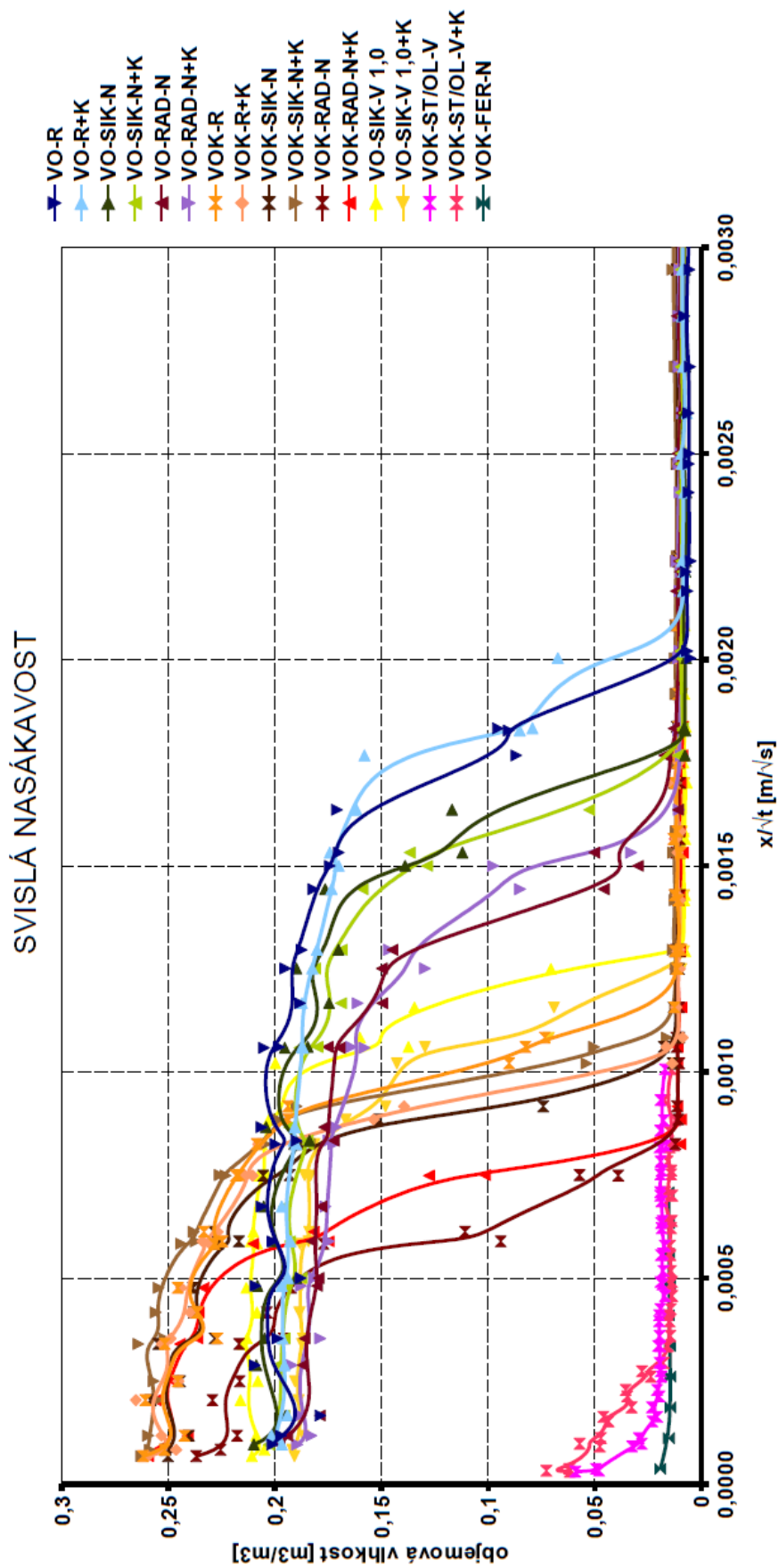


Obr. 85: Grafické znázornění hmotnostní nasákavosti



Výsledky naměřené pro obsah nasycené vlhkosti korespondují s hodnotami otevřené pórovitosti. Karbonatace tento parametr příliš nemění, u čistě vápenných omítek je vidět mírný pokles hodnot přibližně o 7 %, u vápenné omítky s přídavkem křemeliny zůstávají hodnoty prakticky stejné. Nevýrazněji karbonatace snižuje obsah nasycené vlhkosti u skupiny s vnitřním přídavkem Sikkatonu, o 17 %.

Jelikož hmotnostní nasákavost zohledňuje i objemovou hmotnost materiálu, jsou u tohoto parametru rozdíly mezi jednotlivými skupinami výraznější než u obsahu nasycené vlhkosti. Viditelný je pokles hodnot u materiálů, které prošly karbonatací – u skupiny VO v průměru o 12 %, u skupiny VOK o 6 %. Naproti tomu u omítek ošetřených lněnou fermeží se hmotnostní nasákavost vlivem karbonatace nezměnila. Vyzrálé čistě vápenné omítky mají přibližně o 15 % nižší hmotnostní nasákavost než vyzrálé vápenné omítky s přídavkem křemeliny.



Obr. 86: Grafické znázornění svislé nasákavosti

Také u svislé nasákavosti je patrný rozdíl mezi skupinami VO a VOK – zlom křivek VOK se nachází více vlevo, což značí, že voda materiálem vzlíná téměř dvakrát pomaleji. Pro srovnání: po 2 hodinách namáčení vzorku omítky VO-R dosáhla voda výšky osmého dílku, u omítky VOK-R jen pátého dílku za stejnou dobu.

Dále je vidět, že utěšňující nátěry zpomalují průnik vody do materiálu, nátěr Radcon účinněji než Sikkaton. U vápenné omítky s křemelinou se u zkarbonatovaných vzorků dokonce nátěr Sikkaton téměř neprojevil.

Rozdíly mezi naměřenými hodnotami zkarbonatovaných materiálů a materiálů bez karbonatace jsou zpravidla zanedbatelné.

Dále stojí za povšimnutí, že objemová vlhkost dílků v levé části grafu (dílky namočené a dílky s nimi sousedící) dosahuje pro skupinu VOK vyšších hodnot než u skupiny VO. To poukazuje na skutečnost, že nejenže voda proniká do omítek VOK pomaleji, ale navíc se více hromadí ve spodní části vzorku (respektive konstrukce). Koresponduje s tím i to, že u omítky VO-R byl po 2 hodinách měření obsah vlhkosti v celém vzorku přibližně 23 g, přičemž vlhkost dosáhla osmého dílku. U omítky VOK-R byl po 4 hodinách měření obsah vlhkosti v celém vzorku přibližně 24 g, přičemž vlhkost dosáhla dílku sedmého.

Pozitivně se projevila látka Sikkaton přidaná do záměsi (skupina VO-SIK-V 1,0). Průnik vlhkosti je u této skupiny výrazně pomalejší než u vápenné omítky ošetřené nátěrem stejné látky. Patrný je také vliv karbonatace, vlhkost dosáhne u skupiny VO-SIK-V 1,0+K menší výšky za stejný časový úsek než u VO-SIK-V 1,0, dokonce se blíží výsledku referenční vápenné omítky s přídatkem křemeliny. Dále si lze povšimnout, že vodou nasycené dílky mají u zkarbonatované verze nižší objemovou vlhkost než u nevyzrálého materiálu. Je zřejmé, že vlivem karbonatace dojde k utěsnění struktury krystalizační látkou Sikkaton a do materiálu pak pronikne méně vlhkosti.

Diametrálně odlišné jsou křivky u skupin VOK-ST/OL-V a VOK-ST/OL-V+K. Jak již prokázal sorpční experiment, voda proniká do tohoto materiálu opravdu velmi pomalu. Ani po 30 hodinách pronikání vody nedošlo k výraznějšímu nasycení výše jak třetího dílku u VOK-ST/OL-V, respektive pátého dílku u VOK-ST/OL-V+K. Je však třeba upozornit na to, že objemová vlhkost „suchých“ dílků (1,9 %, respektive 1,4 %) je u tohoto materiálu vyšší než u ostatních omítek (v rozmezí 0,7 – 1,1 %). Z toho lze usuzovat, že voda, která se do vzorku dostala, se po jeho délce rozložila mírně rovnoměrněji než u ostatních materiálů.

Pro skupinu omítek ošetřených nátěrem lněné fermeže nebylo toto měření provedeno v plném rozsahu. V grafu je vidět křivka pilotního vzorku, který byl, vzhledem k výsledkům sorpčního experimentu (VOK-FER-N pohlcuje vodu podobně pomalu jako VOK-ST/OL-V)

ponechán ve vodě 20 hodin. Tento materiál má pro vodu těžko překonatelnou bariéru nátěru fermeže, avšak uvnitř vzorku je omítka shodná s referenční. Minimální množství vody, které za dobu namáčení do vzorku proniklo, se po 20-ti hodinách rovnoměrně rozložilo po celém jeho objemu a na křivce proto není patrný žádný „zlom“. Další měření svislé nasákavosti této skupiny by proto bylo bezpředmětné.

## 10 Transport plynné vlhkosti

Rychlost transportu plynné vlhkosti je dalším z klíčových parametrů stavebních materiálů. U většiny konstrukcí převládá snaha zachovat difúzní odpor co nejnižší, aby z nich mohla nežádoucí vlhkost odcházet ve formě vodní páry. Nevhodné využití difúzních parametrů by mohlo mít za následek hromadění par v konstrukci a při snížení teploty také jejich kondenzaci. Vysoká difúzní propustnost je vyžadována především u různých sanačních omítek, jejichž úkolem je rychle odvést nežádoucí nadměrnou vlhkost z objektů.

V některých aplikacích může být naopak vyžadována nízká difúzní propustnost, která zabrání průniku par do konstrukce. Týká se to prostorů s extrémní vlhkostí vzduchu, jako jsou bazénové haly či některé výrobní provozy.

### 10.1 Difúze vodní páry

Difúze vodní páry je proces, při kterém pronikají molekuly páry do porézní struktury materiálu. Hnací silou tohoto procesu jsou rozdílné parciální tlaky vodní páry dvou prostředí, jež daný materiál odděluje. Parciální tlak vodní páry si lze představit jako tlak, jímž by pára působila na stěny nádoby, kdyby byla v nádobě sama. Tato veličina je závislá na teplotě vzduchu a na míře jeho nasycení vodní párou, tzv. relativní vlhkosti. Přirozeností prostředí je tyto rozdílné tlaky vyrovnat, k čemuž dochází prostřednictvím transportu molekul páry skrz materiál z místa s vyšším parciálním tlakem do místa s nižším parciálním tlakem.

Parametry spojené s difúzí vodní páry byly měřeny na vzorcích tvaru nízkého válce, s podstavou o průměru přibližně 110 mm a výškou zhruba 25 mm. Měření probíhalo pomocí miskové metody dle ČSN EN 1015-19 (Stanovení propustnosti vodních par zatvrdlými maltami pro vnitřní a vnější omítky). Princip této metody spočívá v tom, že se měřený vzorek umístí do speciální misky, která je naplněná látkou zajišťující určitou relativní vlhkost vzduchu. Vzorek je v misce zaizolován pomocí technické plastelíny a umístěn do klimatizační komory, která zajišťuje prostředí s ustálenou teplotou a vlhkostí vzduchu. Rozdílné vlhkosti vzduchu nad vzorkem a pod vzorkem znamenají také rozdílné parciální tlaky vodní páry z obou stran vzorku a v důsledku této difference dochází k transportu páry skrz vzorek. Miska se vzorkem je v určitých časových intervalech vážena, rozdíly hmotnosti mezi jednotlivými váženími jsou zaznamenávány. Po dostatečně dlouhé době, kdy změny hmotnosti postupují

lineárně, je proces ukončen. Z naměřených hmotnostních rozdílů a známých parametrů vzorku a prostředí jsou vypočítány veličiny určující difúzní vlastnosti materiálu, součinitel difúzní vodivosti  $\delta$  [s], součinitel difúze vodní páry  $D$  [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] a faktor difúzního odporu  $\mu$  [-].

Jelikož je nutné, aby během experimentu vodní pára procházela skrz vzorek pouze v jednom směru, byly boční stěny všech vzorků zaizolovány pomocí epoxidového lepidla.

Před samotným měřením byly zjištěny rozměry jednotlivých vzorků pomocí digitálního posuvného měřítka s přesností na 0,01 mm a byla vypočítána velikost jejich plochy. Vzorky byly zváženy na digitálních vahách Ohaus AdventurerPro s přesností na 0,01 g.

Zjišťování parametrů spojených s difúzí vodní páry miskovou metodou mělo dvě fáze. V první, zvané dry cup, byla miska naplněna cca 1 cm pod okraj aktivovaným vysušeným silikagelem, který zajišťoval vlhkost vzduchu v misce 2 %, viz Obr. 87.

Vzorky byly umístěny do misek, mezery mezi vzorkem a stěnou misky byly utěsněny technickou plastelínou. Takto upravené vzorky byly zváženy na digitálních vahách Ohaus AdventurerPro s přesností na 0,01 g a umístěny do klimatizační komory, nastavené na teplotu 21 °C a relativní vlhkost 50 %, viz Obr. 88.



Obr. 87: Vlevo: miska naplněná silikagelem, vpravo: utěsňování vzorku v misce

Vzorky byly ponechány v klimatizační komoře po dobu přibližně 24 hod, aby v nich došlo k ustálení vlhkosti. Následně byly vzorky váženy v pravidelných intervalech dvou hodin. Vzhledem k tomu, že při shodné teplotě byla vlhkost vzduchu v misce výrazně nižší než vlhkost vzduchu v prostředí klimatizační komory, došlo k difúzi vodní páry směrem do misky, což se projevilo hmotnostními přírůstky. Poté, co po několika měřeních za sebou bylo zjištěno žádoucí lineární postupování hmotnostních přírůstků, byl pokus ukončen.



*Obr. 88: Vlevo: vzorky v klimatizační komoře, vpravo: vážení vzorku*

Vzorky byly vyjmuty z misek a očištěny od plastelíny. Poté byly po dobu minimálně čtyř dní ponechány v klimatizační komoře (při teplotě 21 °C a relativní vlhkosti 50 %), aby se jejich vlhkost ustálila, viz Obr. 89.



*Obr. 89: Vzorky ponechané v klimatizační komoře kvůli ustálení vlhkosti*

Ve druhé fázi, zvané wet cup, byl namísto silikagelu použit nasycený roztok soli  $K_2SO_4$  (síranu draselného), jenž zajišťoval v misce po dobu měření vlhkost 97 %. Tento roztok byl nalit přibližně do jedné třetiny výšky misky, viz Obr. 90. Bylo bezpodmínečně nutné, aby měhem měření nedošlo neopatrnou manipulací k vyšpláchnutí roztoku na vzorek a tím jeho namočení – kapalná vlhkost by se skrz vzorek transportovala mnohokrát rychleji než pára a celé měření by tak bylo znehodnoceno.

Jelikož byla vlhkost v misce znatelně vyšší než v prostoru klimatizační komory, difundovala pára skrz vzorek ven a docházelo tak k úbytkům hmotnosti. Poté, co tyto rozdíly opakovaně dosáhly lineárního charakteru, byl proces ukončen.



Obr. 90: Vlevo: baňky se solným roztokem, vpravo: miska naplněná roztokem



Obr. 91: Vzorky připravené k měření

Následně byl z naměřených hmotnostních rozdílů a známých parametrů vzorků a prostředí vypočítán součinitel difúzní vodivosti  $\delta$ , který vyjadřuje schopnost materiálu difúzí propouštět vodní páru. Je závislý na teplotě, vlhkosti, množství, velikosti a otevřenosti či uzavřenosti pórů daného materiálu a na jejich vzájemné propojenosti. Výpočet byl proveden dle vztahu:

$$\delta = \frac{\Delta m \cdot d}{S \cdot \Delta t \cdot \Delta p} \quad [\text{s}] \quad (23)$$

kde je  $\Delta m$  rozdíl hmotností vzorku mezi n-tým a k-tým měřením (obě měření spadají do lineární fáze) v kg

$d$  tloušťka vzorku v m



- $S$  plocha vzorku v  $m^2$   
 $\Delta t$  doba mezi n-tým a k-tým měřením v s  
 $\Delta p$  rozdíl parciálních tlaků vodní páry ve vzduchu nad a pod vzorkem v Pa.

Dále byl vypočítán součinitel difúze vodní páry  $D$  dle rovnice:

$$D = \frac{\delta \cdot R \cdot T}{M} \quad [m^2/s] \quad (24)$$

- kde je  $\delta$  součinitel difúzní vodivosti v s  
 $R$  univerzální plynová konstanta v J/mol.K  
 $T$  teplota v klimatizační komoře v K  
 $M$  molární hmotnost vody v kg/mol.

Určen byl také faktor difúzního odporu  $\mu$ , který vyjadřuje schopnost materiálů propouštět vodní páru. Udává, kolikrát vyšší difúzní odpor klade daná látka v porovnání s vrstvou vzduchu stejné tloušťky a teploty. Velikost faktoru difúzního odporu  $\mu$  tedy vždy musí být větší než 1. Výpočet byl proceden dle rovnice:

$$\mu = \frac{D_a}{D} \quad [-] \quad (25)$$

- kde je  $D_a$  součinitel difúze vodní páry ve vzduchu v  $m^2/s$   
 $D$  součinitel difúze vodní páry v měřeném materiálu v  $m^2/s$ .

Výsledky jsou uvedeny v Tab. 11.

## 10.2 Výsledky a diskuse

Tab. 11 uvádí naměřené hodnoty faktoru difúzního odporu  $\mu$  [-], průměrné hodnoty pro jednotlivé skupiny a jejich odchylky, které jsou zpravidla velmi malé, což svědčí o vysoké homogenitě materiálu. V zájmu přehlednosti práce hodnoty součinitele difúzní vodivosti  $\delta$  [s] a součinitele difúze vodní páry  $D$  [ $m^2/s$ ] nejsou uváděny, poměry mezi těmito parametry jsou shodné jako u faktoru difúzního odporu  $\mu$  [-].

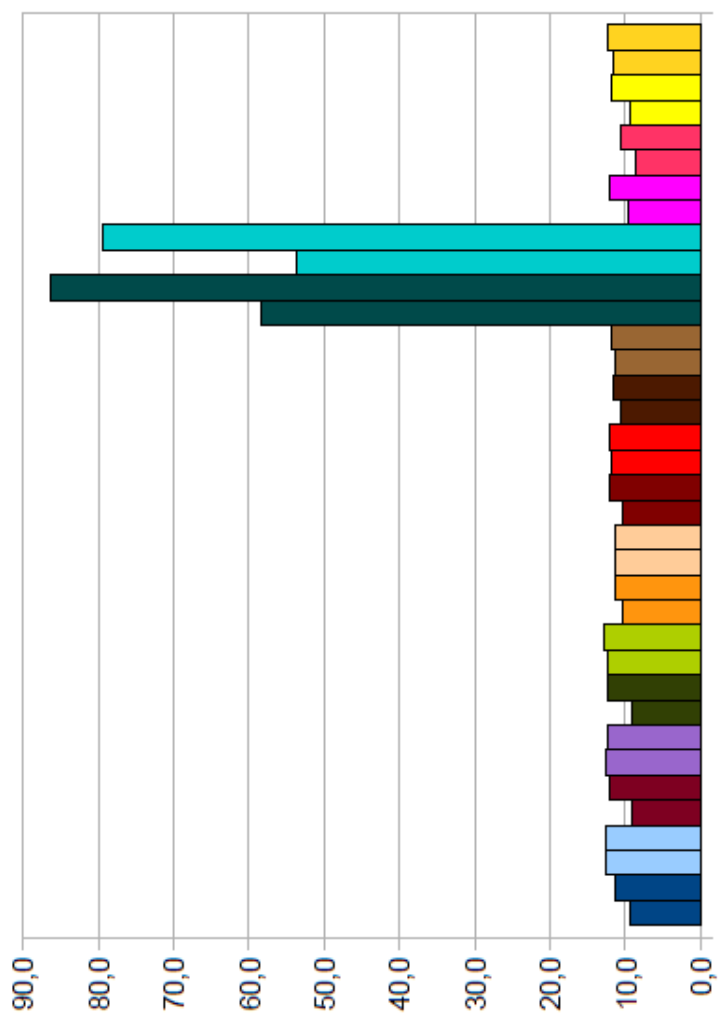
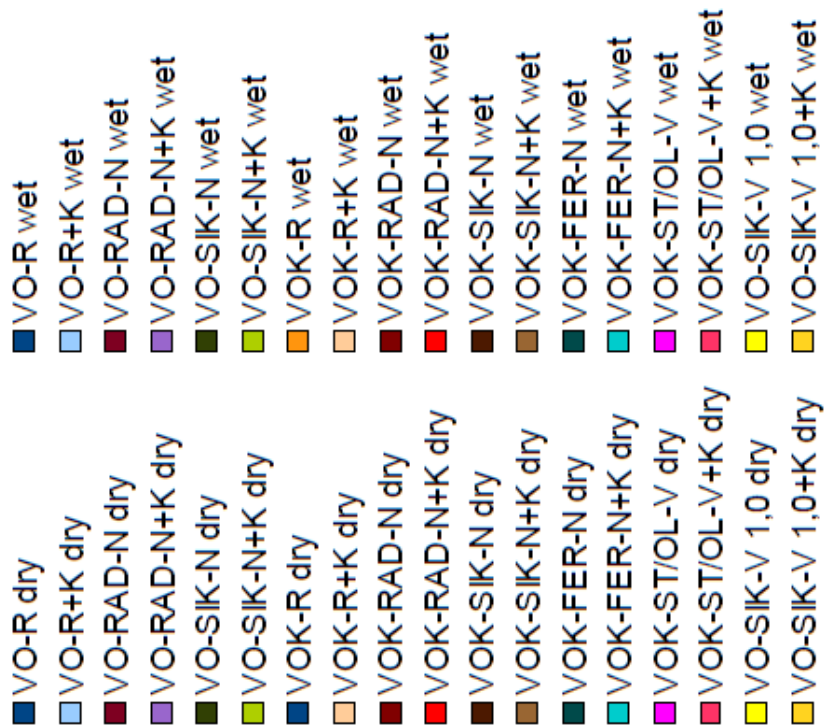
Měření bylo provedeno pro každou skupinu vždy na třech vzorcích.

Chyba měření se odhaduje až na 15 %, zapříčiněna je především výkyvy teploty a vlhkosti vzduchu v klimatizační komoře v průběhu měření.

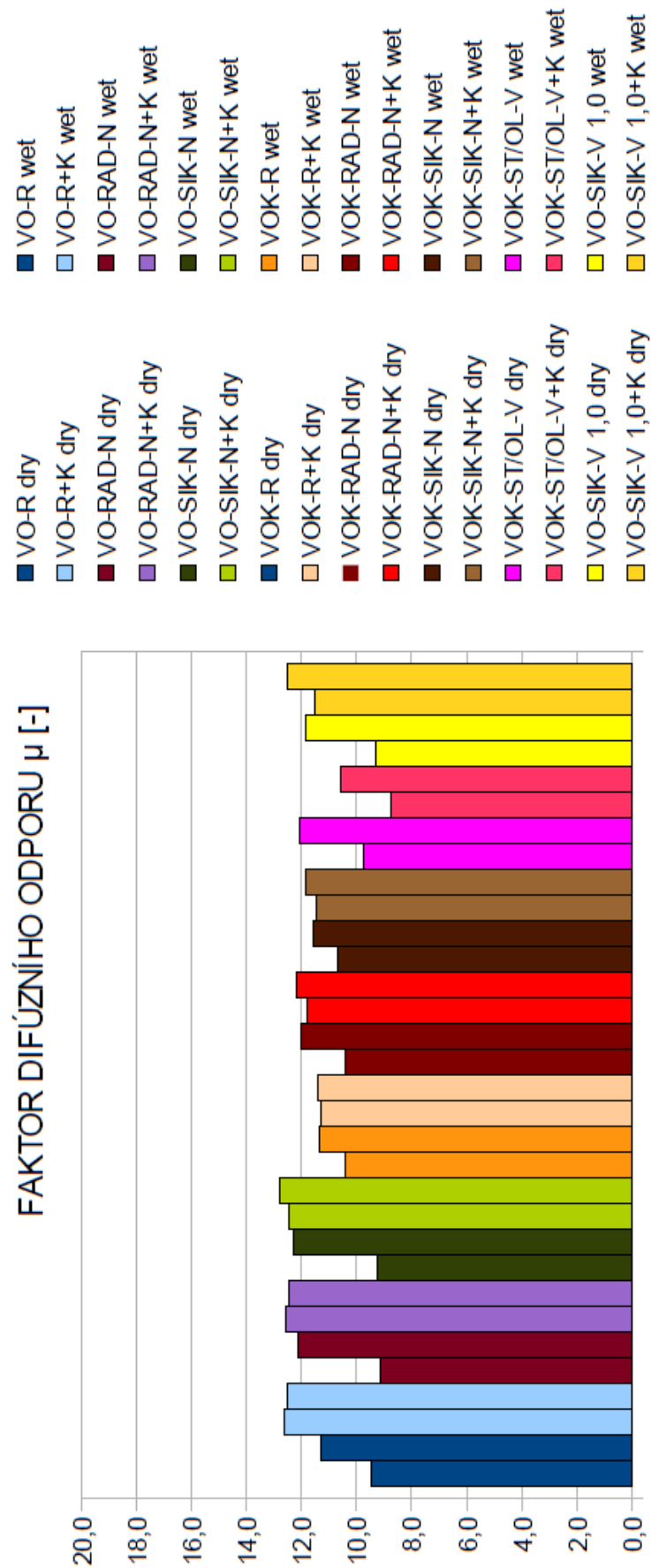
Tab. 11: Difúzní vlastnosti

Skupina	Faktor difúzního odporu $\mu$ [-]					
	DRY CUP			WET CUP		
	Průměr	Odchylka		Průměr	Odchylka	
		+	-		+	-
<b>VO-R</b>	9,40	0,20	0,10	11,30	0,30	0,40
<b>VO-R+K</b>	12,60	0,40	0,50	12,50	1,20	1,00
<b>VO-SIK-N</b>	9,30	0,40	0,20	12,30	0,30	0,30
<b>VO-SIK-N+K</b>	12,50	0,50	0,40	12,80	0,20	0,20
<b>VO-RAD-N</b>	9,10	0,70	0,70	12,10	0,20	0,10
<b>VO-RAD-N+K</b>	12,50	0,20	0,20	12,50	0,60	0,90
<b>VOK-R</b>	10,40	0,20	0,20	11,40	0,50	0,40
<b>VOK-R+K</b>	11,30	0,20	0,50	11,40	0,30	0,40
<b>VOK-SIK-N</b>	10,70	0,20	0,30	11,60	0,60	1,00
<b>VOK-SIK-N+K</b>	11,50	0,10	0,10	11,90	0,30	0,20
<b>VOK-RAD-N</b>	10,40	0,20	0,20	12,00	0,20	0,40
<b>VOK-RAD-N+K</b>	11,80	0,30	0,30	12,20	0,70	0,50
<b>VO-SIK-V 1,0</b>	9,30	0,00	0,10	11,80	0,20	0,30
<b>VO-SIK-V 1,0+K</b>	11,50	0,50	0,40	12,50	0,30	0,20
<b>VOK-FER-N</b>	58,30	3,00	4,50	86,20	4,50	6,10
<b>VOK-FER-N+K</b>	53,80	6,00	4,80	79,50	3,50	2,20
<b>VOK-ST/OL-V</b>	9,70	0,00	0,00	12,00	0,10	0,20
<b>VOK-ST/OL-V+K</b>	8,70	0,10	0,10	10,60	0,30	0,20

# FAKTOR DIFÚZNÍHO ODPORU $\mu$ [-]



Obr. 92: Grafické znázornění faktoru difúzního odporu



Obr. 93: Grafické znázornění faktoru difúzního odporu pro vybrané materiály

Z grafu na Obr. 92 je na první pohled patrné, že faktor difúzního odporu vzorků ošetřených lněnou fermeží několikanásobně převyšuje ostatní hodnoty. Skupiny označené VOK-FER-N a VOK-FER-N+K budou tedy vodní páru propouštět výrazně pomaleji než ostatní materiály.

Z grafu je také vidět, že u vzorků ošetřených fermeží dosahuje faktor difúzního odporu u nevyzrálého materiálu vyšších hodnot než u materiálu zkarbonatovaného (tedy opačně než u ostatních skupin). Je to způsobeno mírnou degradací nátěru vlivem karbonatace. Ta se ostatně projevila i na výsledcích sorpčního experimentu.

Následuje graf na Obr. 93, z něhož byla skupina s nátěrem fermeže vyloučena. Z grafu je možno vyčíst, že hodnoty faktoru difúzního odporu všech ostatních skupin spadají mezi 9 – 13 [-]. Tato skutečnost vyhovuje požadavku na hydrofobní látky neomezovat prostup vodních par, jenž byl zmíněn v teoretické části práce.

Dále je patrné, že u nezkarbonatovaných vzorků hodnoty získané metodou wet cup vždy převyšují hodnoty z metody dry cup. To je způsobeno tím, že při vlhkosti vzduchu v misce 97 % byla část porézního systému materiálu zaplněna vodou, což zabránilo průchodu páry.

Naproti tomu u materiálů, u nichž došlo ke karbonataci, jsou výsledky z obou metod téměř shodné. Tyto hodnoty lze považovat za konečné parametry vyzrálých omítek, jichž bude materiál dosahovat po většinu své životnosti.

Porovnáme-li mezi sebou skupiny VO (vápenná omítka) a VOK (vápenná omítka s přídavkem křemeliny), zjistíme, že parametry druhé jmenované dosahují nižších rozdílů mezi metodu wet cup a dry cup (respektive že dry cup mají vyšší než VO a wet cup nižší).

Difúzní vlastnosti vápenných omítek s křemelinou se vlivem karbonatace materiálu již příliš nemění.

Za povšimnutí stojí skupiny VOK-ST/OL-V a VOK-ST/OL-V+K – jejich faktor difúzního odporu získaný metodou dry cup dosahuje nižších hodnot, než je tomu u referenčních vzorků. Tato skutečnost koresponduje se znatelně nižší objemovou hmotností daného materiálu, přídavek směsi stearanu a oleátu způsobuje mírné provdušnění záměsi.

## 11 Tepelně-technické vlastnosti

Omítka je jednou z vrstev obvodového pláště stavby a jako taková přispívá k ochraně vnitřního prostředí před vnějšími vlivy – teplotou, vlhkostí, hlukem apod. Vnější omítka navíc chrání i samotnou nosnou konstrukci. Vzhledem ke své tloušťce samozřejmě nemají omítky v tepelné ochraně budov rozhodující funkci, nicméně u stěn bez vnějšího zateplovacího systému mohou snížit riziko jejich promrznutí.

Stejně jako u jiných materiálů, i zde je pro tepelné vlastnosti klíčová vlhkost. Níže uvedené parametry byly měřeny na vysušených vzorcích. Takto získané hodnoty jsou potřebné k porovnání vlastností například s jinými druhy omítek, nicméně pro materiál zabudovaný v konstrukci, zejména v zimním období, je nulová vlhkost nedosažitelná. Jelikož vyšší obsah vody v omítce výrazně zhoršuje její tepelně-izolační vlastnosti, je žádoucí vlhkost snižovat. Hydrofobizace omítek proto napomáhá k udržení jejich lepších tepelně-technických vlastností i v prostředí se zvýšenou vlhkostí.

### 11.1 Parametry měřené přístrojem Isomet

U jednotlivých částí konstrukce či stavebních prvků se zjišťuje tepelná vodivost, což je schopnost tělesa vést teplo. Představuje rychlost, s jakou se teplo šíří z jedné, teplejší části konstrukce do druhé, chladnější. Konkrétní materiály jsou charakterizované pomocí součinitele tepelné vodivosti  $\lambda$  [W/m.K], který je definovaný jako množství tepla, které musí za jednotku času projít tělesem, aby na jednotkovou délku byl jednotkový teplotní spád (což znamená jednotkový rozdíl teplot na opačných koncích tělesa), přičemž se předpokládá, že se teplo šíří v jednom směru. Součinitel tepelné vodivosti je závislý na struktuře látky, její pórovitosti, vlhkosti, objemové hmotnosti a na tlaku, teplotě a vlhkosti prostředí.

Další zjišťovanou charakteristikou materiálu je součinitel teplotní vodivosti  $a$  [m<sup>2</sup>/s], který popisuje schopnost stejnorodého materiálu vyrovnávat rozdílné teploty při neustálém vedení tepla. Podle hodnoty součinitele teplotní vodivosti lze usuzovat na rychlost změny teploty v určitém místě materiálu v důsledku změny jeho povrchové teploty. Čím je hodnota teplotní vodivosti materiálu vyšší, tím je teplota v určitém místě materiálu výrazněji závislá na změně jeho povrchové teploty.

Množství tepla, které je potřeba na ohřátí jednotlivých materiálů o určitém objemu, je pro každý materiál jiné. Tato skutečnost je reprezentována měrnou tepelnou kapacitou  $c$  [J/kg.K], respektive měrnou objemovou tepelnou kapacitou  $c \cdot \rho$  [J/m<sup>3</sup>.K]. Ta udává, jaké množství tepelné energie je třeba dodat při stálém tlaku do vzorku materiálu o definované vlhkosti a jednotkovém objemu, aby se jeho teplota zvýšila o 1K. Měrná objemová tepelná kapacita je závislá na teplotě, přičemž s rostoucí teplotou se zvyšuje.

Mezi jednotlivými veličinami platí vztah:

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (26)$$

kde je  $a$  součinitel teplotní vodivosti v m<sup>2</sup>/s,  
 $\lambda$  součinitel tepelné vodivosti v W/m.K,  
 $c \cdot \rho$  měrná objemová tepelná kapacita v J/m<sup>3</sup>.K.

Výše uvedené parametry byly měřeny na vzorcích tvaru nízkého válce, dříve použitých na zjišťování difúzních vlastností (průměrná výška vzorků 25 mm byla shledána jako dostatečná pro toto měření). Jmenované vlastnosti byly získány nedestruktivní metodou pomocí přístroje ISOMET 2114 Applied Precision, viz Obr. 94. Měření proběhlo dle metodického zkušebního postupu K 123/8 (Stanovení součinitele tepelné vodivosti materiálů přístrojem Isomet).



Obr. 94: Měření tepelně-technických vlastností přístrojem Isomet

Isomet je přenosný, elektrinou napájený přístroj, řízený mikroprocesorem, ke kterému se připojuje sonda, plošná pro měření pevných látek nebo jehlová pro měření sypkých materiálů. Měření probíhá nestacionární metodou. Rezistor sondy vytváří elektrickým výkonem impulsy tepelného toku a vysílá je do materiálu. Sonda, která je tepelně vodivě spojená s měřeným materiálem, na tyto impulsy teplotně reaguje a její odezvy jsou snímány polovodičovým

snímačem. Naměřené hodnoty jsou výsledkem analýzy průběhu časové závislosti této teplotní odezvy.

Měření jednoho prvku probíhalo cca 20 – 30 min. Během měření byly vzorky se sondou uzavřeny do těsných PE obalů, aby nedošlo k jeho znehodnocení vnějšími vlivy, například náhlým prouděním vzduchu, viz Obr. 95.



Obr. 95: Vzorek uzavřený v PE obalu po dobu měření

Následně byla naměřená měrná objemová tepelná kapacita  $c \cdot \rho$  [ $\text{J}/\text{m}^3 \cdot \text{K}$ ] přepočítána na měrnou tepelnou kapacitu  $c$  [ $\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$ ] dle vztahu:

$$c = \frac{c \cdot \rho}{\rho_b} \quad [\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}] \quad (27)$$

kde je  $c$  měrná tepelná kapacita v  $\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$ ,  
 $c \cdot \rho$  měrná objemová tepelná kapacita v  $\text{J}/\text{m}^3 \cdot \text{K}$ ,  
 $\rho_b$  objemová hmotnost v  $\text{kg}/\text{m}^3$ .

Výsledky jsou shrnuty v Tab. 12.

## 11.2 Výsledky a diskuse

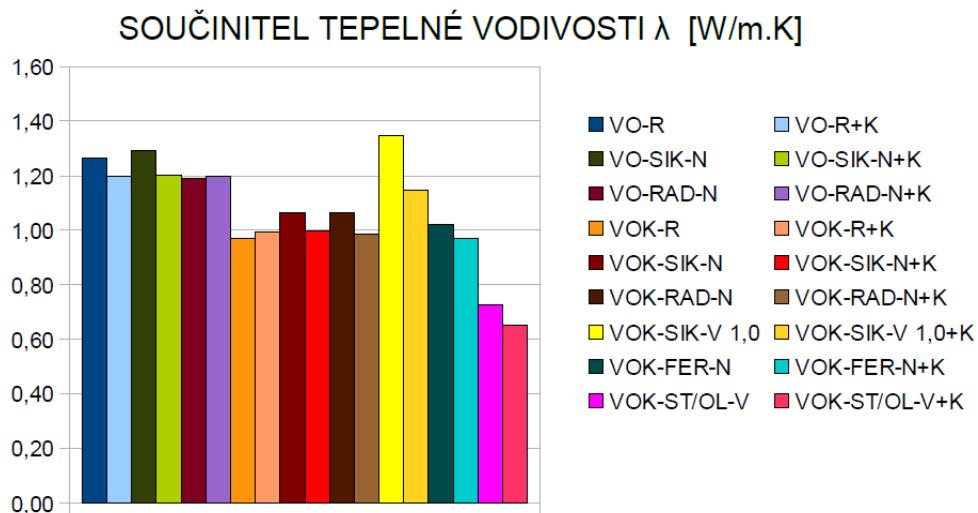
Tab. 12 uvádí termofyzikální vlastnosti zkoumaných vápenných omítek, prezentované hodnoty jsou následně zpracovány graficky.

Měření bylo provedeno vždy na dvou vzorcích z každé skupiny, uvedené výsledky jsou jejich aritmetickým průměrem. Chyba měření je maximálně 1 %.

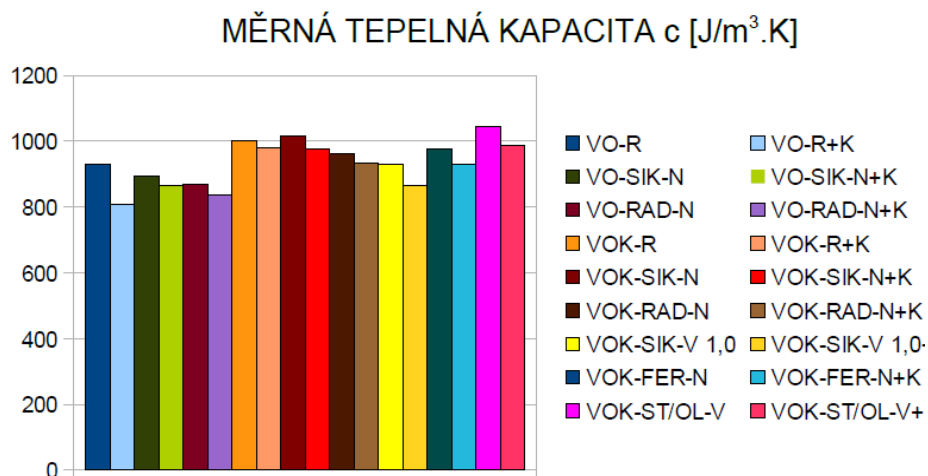


Tab. 12: Tepelně-technické vlastnosti

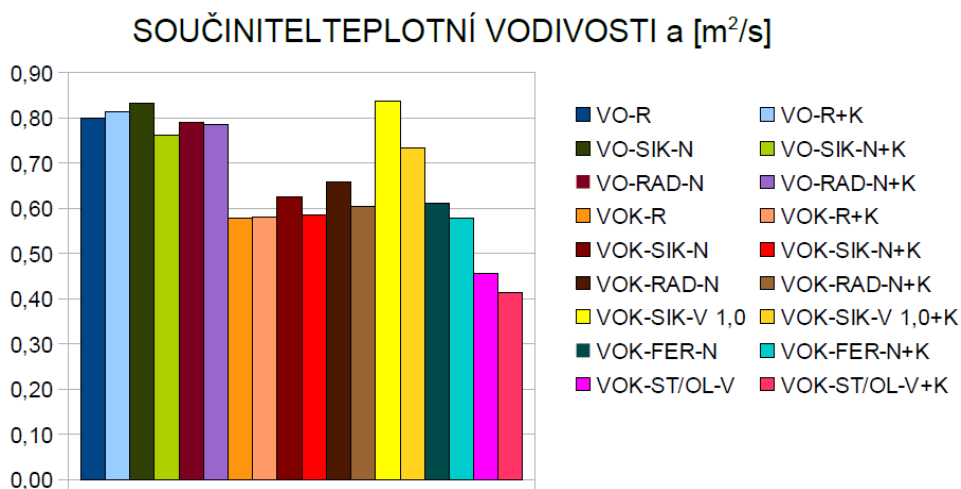
<b>Skupina</b>	<b>Součinitel tepelné vodivosti <math>\lambda</math> [W/m.K]</b>	<b>Měrná tepelná kapacita <math>c</math> [J/kg.K]</b>	<b>Součinitel teplotní vodivosti <math>a</math> [m<sup>2</sup>/s] *10<sup>-6</sup></b>
<b>VO-R</b>	1,260	930	0,800
<b>VO-R+K</b>	1,200	810	0,810
<b>VO-SIK-N</b>	1,290	890	0,830
<b>VO-SIK-N+K</b>	1,200	870	0,760
<b>VO-RAD-N</b>	1,190	870	0,790
<b>VO-RAD-N+K</b>	1,200	840	0,790
<b>VOK-R</b>	0,970	1000	0,580
<b>VOK-R+K</b>	0,990	980	0,580
<b>VOK-SIK-N</b>	1,060	1010	0,620
<b>VOK-SIK-N+K</b>	1,000	980	0,580
<b>VOK-RAD-N</b>	1,060	960	0,660
<b>VOK-RAD-N+K</b>	0,990	930	0,600
<b>VO-SIK-V 1,0</b>	1,350	930	0,840
<b>VO-SIK-V 1,0+K</b>	1,150	870	0,730
<b>VOK-FER-N</b>	1,020	980	0,610
<b>VOK-FER-N+K</b>	0,970	930	0,580
<b>VOK-ST/OL-V</b>	0,730	1040	0,460
<b>VOK-ST/OL-V+K</b>	0,650	990	0,410



Obr. 96: Grafické znázornění součinitele tepelné vodivosti



Obr. 97: Grafické znázornění měrné tepelné kapacity



Obr. 98: Grafické znázornění součinitele teplotní vodivosti

Hodnoty součinitele tepelné vodivosti se u skupiny VO (vápenná omítka) pohybují okolo 1,2 W/m.K, u skupiny VOK (vápenná omítka s křemelinou) okolo 1,0 W/m.K, druhá skupina má tedy přibližně o 17 % lepší tepelně-izolační vlastnosti. Zkarbonatované verze jednotlivých skupin mají zpravidla součinitel tepelné vodivosti mírně nižší. Znatelně nižších hodnot (okolo 0,7 W/m.K) dosahují skupiny VOK-ST/OL-V a VOK-ST/OL-V+K s přídavkem směsi stearanu a oleátu. Lepší tepelně-izolační vlastnosti korespondují s již zmíněnou nižší objemovou hmotností a tedy i vyšší pórovitostí daných skupin.

Rozdíly v měrné tepelné kapacitě nejsou mezi jednotlivými typy omítek nijak velké, skupina VO spadá do rozmezí hodnot 810 – 930 J/kg.K, skupina VOK 930 – 1000 J/kg.K, zdatelněji tuto hodnotu převyšuje jen VOK-ST/OL-V (1040 J/kg.K).

Obdobně u součinitele teplotní vodivosti dosahuje skupina VOK (okolo 0,6 m<sup>2</sup>/s) přibližně o 25 % nižších hodnot než skupina VO (okolo 0,8 m<sup>2</sup>/s). Nejpomaleji se teplo šíří omítkou VOK-ST/OL-V+K, jejíž součinitel teplotní vodivosti je pouze 0,41 m<sup>2</sup>/s.

## 12 Závěr

Nadměrná vlhkost výrazně urychluje degradaci omítek a je tedy žádoucí provádět opatření, která vedou ke snížení jejího obsahu v prvcích stavební konstrukce. Jednou z neúčinnějších metod zabráňujících průniku vody do materiálu je jeho hydrofobizace. Je však třeba upozornit na skutečnost, že se názory odborníků na vhodnost použití hydrofobizace různí a že striktní omezení vlhkosti v porézním systému může mít i negativní dopady, jako je zpomalení vytvrzování vápenných omítek. Navíc účinky jednotlivých látek, jejichž úkolem je zamezit vodě v pronikání do materiálu, mohou být značně odlišné. Z tohoto důvodu bylo provedeno měření vlivu hydrofobizačních látek na většinu materiálových charakteristik, které je potřeba znát pro správné využití vápenných omítek ve stavební praxi.

V experimentální části práce byly zkoumány vlastnosti čistě vápenných omítek a omítek, u nichž byla část vápenného pojiva nahrazena křemelinou. Modifikací omítky **křemelinou** došlo k mírnému zvýšení jak celkové, tak i otevřené pórovitosti materiálu, a tedy i k mírnému snížení jeho objemové hmotnosti. Rtůvová porozimetrie prokázala, že se zvýšil obsah pórů o velikosti 0,01 – 1  $\mu\text{m}$ , zároveň se však snížil obsah pórů o velikosti 1 – 100  $\mu\text{m}$ , které jsou kapilárně aktivní. Tato skutečnost objasňuje žádoucí zpomalení pronikání vody do materiálu. Absorpční koeficient pro vodu se u vápenných omítek s přidavkem křemeliny snížil na polovinu hodnoty naměřené pro čistě vápenné omítky a také vzlínání u nich probíhalo přibližně dvakrát pomaleji. Naproti tomu nedošlo k ovlivnění difúzní propustnosti, jelikož molekuly vodní páry jsou menší, než molekuly vody. Křemelina způsobila mírné zlepšení mechanických parametrů nevyzrálých omítek, avšak pro zkarbonatovaný materiál byly naměřeny znatelně nižší hodnoty těchto parametrů než u čistě vápenných omítek – pevnosti se snížily až o třetinu. Díky zvýšení pórovitosti materiálu mají vápenné omítky s křemelinou o pětinu lepší tepelně-izolační vlastnosti. Dále je třeba poznamenat, že u čistě vápenných omítek dochází k poměrně viditelné změně vlastností vlivem karbonatace, zvyšují se pevnosti, snižuje se pórovitost a s ní se mění i ostatní parametry. Naproti tomu vlastnosti vápenných omítek s přidavkem křemeliny se vlivem karbonatace již zásadně nemění.

Vliv utěšňujících **nátěrů Sikkaton a Radcon** se mohl projevit pouze na tenké povrchové vrstvě vzorků. Objemová hmotnost a celková i otevřená pórovitost těchto vzorků tedy nebyly výrazně změněny. Výsledky rtůvové porozimetrie, která byla provedena právě na povrchové

části prokázaly, že došlo ke snížení celkové pórovitosti této oblasti, a to především u vyztužených čistě vápenných omítek. Utěšňující nátěry výrazně zlepšily mechanické parametry vápenných omítek s přídavkem křemeliny, respektive vykompenzovaly jejich snížení způsobené právě křemelinou. Pevnost v tlaku a dynamický modul pružnosti vápenných omítek s přídavkem křemeliny ošetřených utěšňujícími nátěry dosahují srovnatelných hodnot, jako u čistě vápenných omítek. Nátěr Sikkaton navíc zvyšuje i pevnost v tahu. U čistě vápenných omítek se snížila rychlost absorpce vody pouze u zkarbonatovaných vzorků ošetřených nátěrem Sikkaton, u vzorků ošetřených Radconem se její snížení neprokázalo. Naproti tomu u vápenných omítek s přídavkem křemeliny došlo ke snížení rychlosti absorpce u obou nátěrů, u Sikkatonu až o třetinu. Utěšňující nátěry zpomalují také vztlínání vody omítkou. V tomto ohledu se účinněji projevil Radcon, který snížil rychlost vztlínání o polovinu u vápenných omítek s přídavkem křemeliny. U parametrů spojených s difúzí vodní páry ani u tepelně-technických vlastností se, dle očekávání, vliv nátěrů neprojevil. Obecně lze konstatovat, že utěšňující nátěry Sikkaton a Radcon vylepšují vlastnosti především u vápenných omítek s přídavkem křemeliny, zejména jejich nasákavost a pevnosti.

Produkt **Sikkaton** byl použit také jako **vnitřní přísada** přímo do záměsi čistě vápenné omítky. Takto ošetřené vzorky vykazují nižší otevřenou pórovitost, u vyztuženého materiálu o celou desetinu oproti referenční omítce. Zjevně tedy došlo k úbytku kapilárně aktivních pórů, přičemž se ale výrazně nezměnila celková pórovitost. V důsledku toho došlo ke snížení rychlosti absorpce přibližně na třetinu. Rovněž byla zpomalena vztlínavost, a to natolik, že se její rychlost přiblížila vápenným omítkám s přídavkem křemeliny. Mechanické vlastnosti, faktor difúzního odporu ani tepelně-technické vlastnosti se u tohoto materiálu oproti referenční omítce výrazně nezměnily. Pro další výzkum by bylo zajímavé ověřit účinky vnitřní aplikace Sikkatonu na vápenné omítky s přídavkem křemeliny.

Vzhledem k tomu, že utěšňující látky nezabraňují průniku vody tak intenzivně jako třeba dále zkoumaná směs stearanu a oleátu, je žádoucí aplikovat je na vhlkostí méně namáhané konstrukce. S přihlédnutím k jejich výše popsaným vlastnostem se jeví jako vhodné jejich použití na omítky památkově chráněných objektů, jelikož u nich nehrozí přílišné zpomalení karbonatace ani kompatibility ošetřeného a původního materiálu.

Obdobně jako u utěšňujících látek, i nátěr **Iněné fermeže** mohl ovlivnit pouze povrchovou vrstvu vzorků, která v tomto případě dosahovala 2 – 3 mm. Objemová hmotnost ani celková pórovitost tedy nebyly výrazně změněny. Oproti tomu otevřená pórovitost se snížila o celou jednu čtvrtinu. Dynamický modul pružnosti se snížil o polovinu, což bylo způsobeno zpomalením průchodu ultrazvukové vlny sice tenkou, ale velmi pružnou vrstvou fermeže.

Pozitivně se projevil vliv nátěru na pevnost v tahu, která se zvýšila o třetinu. Opravdu zásadně byla snížena rychlost absorpce vody, a to na pouhou jednu dvacetinu rychlosti zjištěné u referenčních vzorků. Ukázalo se, že vlivem karbonatace nátěr mírně degraduje, nicméně absorpční koeficient pro vodu je u zkarbonatovaných vzorků ošetřených fermeží stále o řád nižší, než u referenční omítky. Je však třeba upozornit na skutečnost, že nátěr fermeže chrání omítku pouze před vlhkostí z jejího povrchu, nemůže však zastavit vodu vztlínající ze spodní části konstrukce. U tepelně-technických vlastností se vliv nátěru neprojevil. Experimentální měření difúzních vlastností bohužel prokázalo, že fermež zásadně snižuje možnost průchodu vodní páry materiálem – faktor difúzního odporu se zvýšil v průměru na sedminásobek. Tato vlastnost tedy zásadně nespĺňuje obecné požadavky kladené na hydrofobizace. Nicméně to neznamena, že by omítky ošetřené fermeží nenašly své uplatnění. Lze je s výhodou využít ve speciálních aplikacích, jako jsou vnitřní omítky prostor zatížených extrémní vlhkostí – například bazénové haly či některé výrobní provozovny.

Směs **stearanu a oleátu** přidaná do záměsi způsobila její mírné provzdušnění, v důsledku čehož se snížila objemová hmotnost a zvýšila celková pórovitost materiálu. Oproti tomu otevřená pórovitost klesla o celou třetinu, protože se změnou povrchového napětí znemožnil průnik vody do kapilár. Rovněž se diametrálně zpomalila absorpce vody, absorpční koeficient klesl na pouhou desetinu hodnoty referenční omítky. Zcela zásadně bylo u tohoto materiálu zabráněno vztlínání vlhkosti. Jelikož hydrofobizace působí v celém objemu, tak ani po desítkách hodin vlhkost ve vzorku nevystoupala do výšky větší jak 10 cm. Prokázalo se, že příměs stearanu a oleátu nemění difúzní vlastnosti. Zjištěné parametry tedy dokonale odpovídají požadavkům kladeným na hydrofobizace. Díky vyšší pórovitosti má tato omítka o čtvrtinu lepší tepelně-izolační vlastnosti než referenční omítka. Hydrofobizační přísada bohužel znatelně zhoršuje mechanické vlastnosti – pevnost v tlaku snižuje o třetinu, dynamický modul pružnosti o polovinu. Bylo by tedy vhodné dále modifikovat omítku s přídavkem stearanu a oleátu další přísadou, která by zvýšila její pevnost. Tento materiál lze doporučit pro aplikace nových omítek do prostředí silně zatíženého zvýšenou vlhkostí, a to jak povrchovou, tak vztlínající.

## Literatura

- [1] CROCI, Giorgio. *The conservation and structural restoration of architectural heritage*. Boston: Computational, Mechanics Publications, 1998. International series on advances in architecture, v. 1., p. 68 – 70. ISBN 1853124826
- [2] HOŠEK, Jiří a Ludvík LOSOS. *Historické omítky: průzkumy, sanace, typologie*. Praha: Grada, 2007. Stavitel. ISBN 978-80-247-1395-3.
- [3] PERNICOVÁ, Radka, Milena PAVLÍKOVÁ a Robert ČERNÝ. *Vliv metakaolinu na vlastnosti vápenných omítek*. In: Juniorstav, Fyzikální a chemické vlastnosti stavebních hmot. 2008. Dostupné také z: [https://www.researchgate.net/publication/237659320\\_EFFECT\\_OF\\_METAKAOLINE\\_ON\\_LIME\\_PLASTERS\\_PROPERTIES](https://www.researchgate.net/publication/237659320_EFFECT_OF_METAKAOLINE_ON_LIME_PLASTERS_PROPERTIES)
- [4] ROVNANÍKOVÁ, Pavla: Pucolány ve vápenných maltách. In: *Sanace a rekonstrukce staveb*. 2003.
- [5] COLLEPARDI, M.: *A Historical Review of Development of Chemical and Mineral Admixtures for Use in Stucco Plaster and Terrazzo Floor*. [online]. [vid. 15.12.2016]. Dostupné z: <http://www.encosrl.it/enco%20srl%20ITA/servizi/pdf/restauro/21.pdf>
- [6] PERNICOVÁ, Radka: *Materiálové a fyzikální parametry inovovaných vápenných omítek vhodných pro použití na rekonstrukce historických budov*. Dizertační práce. Praha: ČVUT v Praze, katedra materiálového inženýrství a chemie, 2012.
- [7] BLAHA, Martin. *Omítky – druhy, provádění, opravy*. Praha: Grada, 2004. Profi & hobby. ISBN 978-80-247-0898-1.
- [8] BALÍK, Michael a kol.. *Odvlhčování staveb*. Vyd.2, přeprac. Praha: Grada, 2008. Stavitel. ISBN 978-80-247-2693-9.
- [9] ŠOUREK, Vítězslav. *Ochrana stavebních materiálů vodoodpudivými přípravky*. In: *Stavebnictví3000.cz*. [online]. 2008. [vid. 12.11.2016]. Dostupné z: <http://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/ochrana-stavebnich-materialu-vodoodpudivymi-pripra/>
- [10] *Lhoist.cz*. [online] © Lhoist. 2014. [vid. 29.12.2016] Dostupné z: [http://www.lhoist.com/cs\\_cs/v%C5%A1e-o-v%C3%A1pn%C4%9B-miner%C3%A1lech](http://www.lhoist.com/cs_cs/v%C5%A1e-o-v%C3%A1pn%C4%9B-miner%C3%A1lech)
- [11] SVOBODA, Luboš a kol. *Stavební hmoty*. Vyd. 1. Praha: Jaga group, 2004. 470 s. ISBN 80-8076-007-1.
- [12] KOTLÍK, Petr. *Stavební materiály historických objektů*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 1999. ISBN 80-7080-347-9.
- [13] [online]. [vid. 29.12.2016] Dostupné z: [http://www.hmotyjedna.web.cz/navody/vapno\\_theorie.doc](http://www.hmotyjedna.web.cz/navody/vapno_theorie.doc)
- [14] KOTLÍK, Petr a kol. *Vápno*. Praha: STOP, 2001. ISBN 80-902668-8-6.
- [15] MICHONOVÁ, Dagmar. *Příprava vápenných malt v péči o stavební památky*. Praha: Informační centrum ČKAIT, 2006. Materiálově technologické zásady péče o historické stavby. ISBN 80-86769-81-X.
- [16] GIRSA, Václav a Dagmar MICHONOVÁ. *Tradiční vápenné omítky: poznání a praktické postupy*. Praha: IC ČKAIT, 2015. ISBN 978-80-87438-72-5.

- [17] FÁRA, Pavel. *Sanace vlhkého zdiva*. Praha: STOP, 2003. ISBN 80-86657-02-7.
- [18] REJMAN, Petr. *Vliv hydrofobizačních prostředků na vlastnosti kamenných objektů zatížených vzlinající vlhkostí a vodorozpustnými solemi*. Pardubice. 2006. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice. Obor Restaurování kamene a souvisejících materiálů.
- [19] ROVNANÍKOVÁ, Pavla, Pavel ROVNANÍK a Richard KŘÍSTEK. *Stavební chemie*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. ISBN 80-7204-408-7.
- [20] BARTOVSKÁ, Lidmila a Marie ŠIŠKOVÁ. *Fyzikální chemie povrchů a koloidních soustav*. Vyd.5, přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2005. ISBN 80-7080-579-X.
- [21] ] BARTOVSKÁ, Lidmila a Marie ŠIŠKOVÁ. *Co je co v povrchové a koloidní chemii – výkladový slovník*. [online] Vydavatelství VŠCHT. 2005. Elektronická publikace. Dostupné z: [http://147.33.74.135/knihy/uid\\_es-001/](http://147.33.74.135/knihy/uid_es-001/)
- [22] *Povrchové napětí*. [online]. [vid. 4.11.2016]. Wikipedia.org. 2016. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Povrchov%C3%A9\\_nap%C4%9Bt%C3%AD](https://cs.wikipedia.org/wiki/Povrchov%C3%A9_nap%C4%9Bt%C3%AD)
- [23] Kmlinux. *Učební texty - Molekulární pohled*. [online] FJFI ČVUT Praha. 2008. [vid. 4.11.2016] Dostupné z: <http://kmlinux.fjfi.cvut.cz/~novotfil/skola/ROZHRANI/A-PREDN-07/02-Molekularni-pohled.doc>
- [24] KRÁSNÝ I. *Měření kontaktních úhlů smáčení a určování povrchové energie plastů*. Zlín. 2010. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Dostupné také z: [http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/14169/kr%C3%A1sn%C3%BD\\_2010\\_dp.pdf?sequence=1](http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/14169/kr%C3%A1sn%C3%BD_2010_dp.pdf?sequence=1)
- [25] [online]. Dostupné z: <https://pixabay.com/cs/pavu%C4%8Dina-morgentau-rosa-4193/>
- [26] [online]. Dostupné z: <http://cs.dnatreer.ru/319699-s-782/>
- [27] [online]. [vid. 5.11.2016]. Dostupné z: <http://www.vlhke-zdivo.cz/vzlinajici-vlhkost>
- [28] KEDROŇOVÁ E.: *Měření kontaktního úhlu sedící kapky jako metoda charakterizace povrchu*. [online]. Masarykova Univerzita. Brno. 2012. [vid. 5.11.2016]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/mereni-kontaktneho-uhlu-sedici-kapky-jako-metoda-charakterizace-povrchu>
- [29] [online]. [vid. 5.11.2016]. Dostupné z: [http://lejpt.academicdirect.org/A10/get\\_htm.php?htm=029\\_038](http://lejpt.academicdirect.org/A10/get_htm.php?htm=029_038)
- [30] [online]. [vid. 5.11.2016]. Dostupné z: <http://www.upc.edu/sct/en/equip/778/contact-angle-measure.html>
- [31] *BiolinScientific*. [online]. [vid. 5.11.2016]. Dostupné z: [http://www.biolinscientific.com/zafepress.php?url=%2Fpdf%2FAttention%2FProducts%2FTheta%20-%20Optical%20Tensiometer%2FAT\\_P\\_Theta\\_QC\\_Brochure-26-10-2011.pdf](http://www.biolinscientific.com/zafepress.php?url=%2Fpdf%2FAttention%2FProducts%2FTheta%20-%20Optical%20Tensiometer%2FAT_P_Theta_QC_Brochure-26-10-2011.pdf)
- [32] *Krüss*. [online]. [vid. 5.11.2016]. Dostupné z: <http://www.kruss.de/products/>
- [33] ZELINGER, Jiří, Eva ŠIMŮNKOVÁ, Petr KOTLÍK a Viktor HEIDINGSFELD. *Chemické problémy restaurování uměleckých děl, Díl II. Část C) Vodní disperze polymerů, jejich vlastnosti a možnosti použití pro restaurování uměleckých děl*. Praha: Laboratoř chemie restaurování uměleckých děl – VŠCHT Praha, 1976.
- [34] ŠŤASTNÝ, Pavel. *Možnosti ochrany fasád pomocí hydrofobizace*. Učební text. [online]. 2007. [vid. 22.12.2016]. Dostupné z: [http://pavelstastny.net/prednasky\\_pdf/03\\_hydrofobizace.pdf](http://pavelstastny.net/prednasky_pdf/03_hydrofobizace.pdf)



- [35] KOTLÍK, Petr. Hydrofobizace stavebních materiálů. In: *iMateriály.cz*. [online]. 2008. [vid. 12.11.2016]. Dostupné z: [http://imaterialy.dumabyt.cz/rubriky/clanky/hydrofobizace-stavebnich-materialu\\_101418.html](http://imaterialy.dumabyt.cz/rubriky/clanky/hydrofobizace-stavebnich-materialu_101418.html)
- [36] FEIGERLE J. a Jiří HOŠEK. *Hydrofobizace struktury stavebních hmot*. Praha: Stavební ústav, 1984.
- [37] NUNES, Christiana Lara a Zuzana SLÍŽKOVÁ. *Vápenná malta se zvýšenou vnitřní hydrofobicitou*. Praha. 2015. Příspěvek technických věd k záchraně a restaurování památek. ÚTAM AV ČR, v. v. i.
- [38] ŠOUREK, Vítězslav. Silikonové hydrofobizační přípravky pro povrchové úpravy. In: *Stavebnictví3000.cz*. [online]. 2007. [vid. 12.11.2016]. Dostupné z: <http://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/silikonove-hydrofobizacni-pripravky-pro-povrchove/>
- [39] SCHÖNFELDER, Daniel. *Hydrofobizace v mostním stavitelství*. In: ASB-portal.cz. [online]. 2013. [vid. 12.11.2016]. Dostupné z: <http://www.asb-portal.cz/inzenyrske-stavby/mosty/hydrofobizace-v-mostnim-stavitelstvi>
- [40] KOTLÍK, Petr a Olga KOTLÍKOVÁ. *Hydrofobizační a zpevňující prostředky*. In: *Hmoty a materiály*.
- [41] NOVÁČEK, Jaroslav. *Ověření účinnosti hydrofobizačních přísad určených ke strukturální hydrofobizaci silikátových maltových směsí*. Brno. 2008. Práce v rámci Studentské vědecké a odborné činnosti. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, katedra technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. RNDr. Ing. Stanislav Šťastník, CSc.
- [42] HEIDINGSFELD, Viktor. *Nátěry fasád*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Grada, 2007. Profi & hobby. ISBN 978-80-247-1472-1.
- [43] [online]. [vid. 25.10.2016]. Dostupné z: <http://nabidky.edb.cz/Nabidka-14362-Silikonove-hydrofobizacni-pripravky-Lukofob>
- [44] RATHAUSKÝ, Jiří. *Organokřemičité prostředky pro konzervaci přírodního kamene a stavebních materiálů*. Praha: Státní restaurátorské ateliéry Praha, 1990.
- [45] PAZDERKA, Jiří. *Principy použití krystalizačních hydroizolací*. In: ASB-portal.cz. [online]. 2008. [vid. 27.12.2016]. Dostupné z: <http://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/materialy-a-vyroby/beton/principy-pouziti-krystalizacnich-hydroizolaci>
- [46] *Nekap.cz/xypex*. [online] © Nekap, s.r.o. 2012. [vid. 27.12.2016] Dostupné z: <http://www.nekap.cz/xypex/faq.php?section=obecne>
- [47] DROCHYTKA, Rostislav, Pavla MATULOVÁ a Pavel DOHNÁLEK. *Současné hydroizolační krystalizační látky*. In: ASB-portal.cz. [online]. 2009. [vid. 27.12.2016]. Dostupné z: <http://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/materialy-a-vyroby/hydroizolace/soucasne-hydroizolacni-krystalizacni-latky>
- [48] *Sanax.cz*. [online] © Sanax Group, s.r.o. 2014-2016. [vid. 27.12.2016] Dostupné z: [http://sanax.cz/files/83TL\\_ResiCote\\_LI.pdf](http://sanax.cz/files/83TL_ResiCote_LI.pdf)
- [49] PAZDERKA, Jiří. Principy použití krystalizačních hydroizolací. *Beton: technologie - konstrukce - sanace*. Praha. Česká betonářská společnost. 2/2009. Str. 16 – 19. ISSN 1213-3116.

- [50] *Regio.cz.* [online] © Regio Czech, s.r.o. [vid. 27.12.2016] Dostupné z: <http://www.regiocz.cz/bergo/eshop/20-1-AKVATRON/69-2-Krystalizacni-nater/5/265-Akvatron-6-5-kg//description#anch1>
- [51] *Nekap.cz/xypex.* [online] © Nekap, s.r.o. 2012. [vid. 27.12.2016] Dostupné z: <http://www.nekap.cz/xypex/xypex.php>
- [52] *Lhoist.cz.* [online] © Lhoist. 2014. [vid. 11.12.2016] Dostupné z: [http://www.lhoist.com/cs\\_cs](http://www.lhoist.com/cs_cs)
- [53] ZIMMERMANN, Štěpán. *Křemelina - reaktivní příměs do cementových kompozitů.* Brno. 2015. 64 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav chemie. Vedoucí práce prof. RNDr. Pavla Rovnaníková, CSc.
- [54] *MineraLion.* [online] Vaňátko, Petr. 2014. [vid. 15.12.2016] Dostupné z: <http://www.mineralion.cz/cs/>
- [55] ROVNANÍKOVÁ, Pavla, Eva NAVRÁTILOVÁ a Ludmila ŠMERDOVÁ. *Možnosti využití pálených jílu ve vápenných maltách.* In: tzb-info.cz. [online]. 2013. [vid. 15.12.2016]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/9554-moznosti-vyuziti-palenyh-jilu-ve-vapennyh-maltach>
- [56] PAVLÍKOVÁ, Milena. *Úloha přísad k silikátovým pojivům a pucolánově aktivní materiály.* Učební text. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra materiálového inženýrství a chemie. Dostupné také z: <http://tpm.fsv.cvut.cz/student/documents/files/CHS/CHS6.pdf>
- [57] *LB-minerals.cz.* [online] © LB MINERALS, s.r.o. 2015-2016. [vid. 12.12.2016] Dostupné z: <http://www.lb-minerals.cz/cz>
- [58] Realsan s.r.o. *Aplikační list produktu Radcon Formula #7<sup>®</sup>.*
- [59] Realsan s.r.o. *Aplikační list produktu Sikkaton-A.*
- [60] *Truhlářství postaru.* [online]. Kodýdek, Miloš. 2013. [vid. 15.12.2016] Dostupné z: <http://www.truhlarstvi-postaru.cz/index.php/postupy-a-navody/52-povrchova-uprava-v-tradicnim-truhlarstvi-a-nase-pokusy>
- [61] *Ruční nářadí.* [online]. 2015. [vid. 15.12.2016] Dostupné z: <http://rucni-naradi.blog.cz/1004/lneny-olej-a-fermez-v-tradicni-truhlarine-a-nastrojarine>
- [62] *Painteco.cz.* [online]. 2015. [vid. 15.12.2016] Dostupné z: <http://painteco.cz/>
- [63] STOLZ, Hermann Josef. *Oleochemicals – important additives for building protection.* Lisboa. 2007. 11 s. Dostupné také z: [http://www.apfac.pt/congresso2007/comunicacoes/Paper%2037\\_07.pdf](http://www.apfac.pt/congresso2007/comunicacoes/Paper%2037_07.pdf)
- [64] KABELÉ, Petr. *Vysokohodnotné a kompatibilní vápenné malty pro extrémní aplikaci při restaurování, opravách a preventivní údržbě architektonického dědictví.* Praha. 2015. Periodická průběžná zpráva za rok 2015. 86 s. ČVUT v Praze. Identifikační kód: DF11P01OVV008. Dostupné také z: [http://cet.arcchip.cz/~www-telc/upload/files/PPZ\\_2015\\_DF11P01OVV008.pdf](http://cet.arcchip.cz/~www-telc/upload/files/PPZ_2015_DF11P01OVV008.pdf)
- [65] HOBST, Leonard, Jiří ADÁMEK, Petr CIKRLE a Pavel SCHMID. *Diagnostika stavebních konstrukcí: přednášky.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2005.

## Seznam použitých norem

ČSN EN 1015-3: *Zkušební metody malt pro zdivo – Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty s použitím setřásacího stolku.*

ÚNMZ. Vydána: 3/2000, změny 6/2000 a 12/2007

ČSN EN 1015-10: *Zkušební metody malt pro zdivo – Část 10: Stanovení objemové hmotnosti suché zatvrdlé malty*

ÚNMZ. Vydána: 6/2000, změna 12/2007

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

ÚNMZ. Vydána: 6/2000, změna 12/2007

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

ÚNMZ. Vydána 6/2003

ČSN EN 1015-19: *Zkušební metody malt pro zdivo – Část 19: Stanovení propustnosti vodních par zatvrdlými maltami pro vnitřní a vnější omítky*

ÚNMZ. Vydána: 10/1999, změna 5/2005

ČSN EN 12504-4: *Zkoušení betonu - Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu a stanovení dynamického modulu pružnosti u betonu a u malt*

ÚNMZ. Vydána 3/2005

## DALŠÍ ZKUŠEBNÍ POSTUPY:

IZP 123-17/2006: Interní postup - Stanovení vlhkosti a nasákavosti malt

Katedra materiálového inženýrství a chemie, Fakulta stavební, ČVUT v Praze

K 123/8: Metodický zkušební postup - Stanovení součinitele tepelné vodivosti materiálů přístrojem Isomet

Katedra materiálového inženýrství a chemie, Fakulta stavební, ČVUT v Praze

## Seznam obrázků

Obr. 1: Různé druhy vápence. Vlevo: žlutá hornina z Polska, uprostřed: tmavá, téměř černá hornina z Brazílie (nejčistší), vpravo: vápenec s vysokým obsahem korálů a mušlí z Dánska [10] .....	11
Obr. 2: Těžba vápence v lomu [10] .....	11
Obr. 3: Vlevo: rotační pece, vpravo: vertikální pece [10] .....	12
Obr. 4: Průběh karbonatace vápenné omítky [13] .....	15
Obr. 5: Částice v objemové fázi a v povrchové vrstvě [23] .....	21
Obr. 6: Grafické znázornění mezifázového napětí [22] .....	21
Obr. 7: Vlevo: kapky vody [25]; vpravo: kapky rtuti [26] .....	22
Obr. 8: Vlevo: kancelářská sponka na hladině [22]; vpravo: vzlínající proud [22] .....	23
Obr. 9: Grafické znázornění smáčecího úhlu [21] .....	23
Obr. 10: Dokonalé smáčení [20] .....	24
Obr. 11: Dobré smáčení [20] .....	24
Obr. 12: Špatné smáčení [20] .....	25
Obr. 13: Dokonalé nesmáčení [20] .....	25
Obr. 14: Hystereze smáčecího úhlu [21] .....	26
Obr. 15: Vliv adsorpce plynu [21] .....	27
Obr. 16: Vlevo: vliv nerovnosti povrchu [21], vpravo: vliv nehomogenity materiálu složeného ze dvou chemicky odlišných fází [21] .....	27
Obr. 17: Vliv povrchového napětí na chování kapalin v kapilárách [20] .....	28
Obr. 18: Vliv průměru kapiláry [27] .....	28
Obr. 19: Vlevo: schéma přístroje [29]; vpravo: příklad optického přístroje pro přímé měření smáčecího úhlu [30] .....	30
Obr. 20: Přístroj firmy BiolinScientific–Attension [31] .....	30
Obr. 21: Metoda přilínající bubliny [21] .....	31
Obr. 22: Metoda měření úhlu smáčení na naklánějící se destičce [24] .....	31
Obr. 23: Meniskus kapaliny vzlínající na povrch svislé destičky [21] .....	32
Obr. 24: Schéma metody vyvažování Wilhelmyho destičky [24] .....	33
Obr. 25: Metoda vyvažování Wilhelmyho destičky – detail přístroje firmy Krüss [32] .....	33
Obr. 26: Předpokládaná geometrie kapky [24] .....	34

Obr. 27: Smáčecí úhel kapaliny na nehydrofobizovaném materiálu a na hydrofobizovaném materiálu [9] .....	35
Obr. 28: Vliv vnějšího tlaku na průchod vlhkosti kapilárou [34].....	35
Obr. 29: Vlevo: schéma silikonové látky navázané na silikátový materiál [9], vpravo: princip hydrofobizačního efektu silikonových látek [39] .....	37
Obr. 30: Druhy hydrofobních látek nejčastěji používaných pro stavební materiály [34] ...	38
Obr. 31: Různé formy hydrofobních látek [34].....	39
Obr. 32: Účinek hydrofobizace [43].....	41
Obr. 33: Kapka na materiálu ošetřeném hydrofobizací [9] .....	41
Obr. 34: Utěsnění porézního systému [47].....	43
Obr. 35: Přípravek pronikající do pórů, tvorba utěšňujících látek [50].....	44
Obr. 36: Vlevo: neošetřený beton, patrné jsou velké krystaly částic $\text{Ca(OH)}_2$ , uprostřed: krystalické formace XYPEXu vyrůstající z oblastí částic $\text{Ca(OH)}_2$ a prorůstající C-S-H gelem, vpravo: bohaté krystalické formace XYPEXu rozvinuté z C-S-H gelu po 26 dnech od provedení nátěru [51] .....	45
Obr. 37: Kontaktní úhel kapky na povrchu neošetřeného a ošetřeného materiálu [49] .....	46
Obr. 38: Graf objemového zastoupení velikosti částic pro vápno Čerťák CL 90-S.....	49
Obr. 39: Vápno Čerťák CL 90-S .....	50
Obr. 40: Graf objemového zastoupení velikosti částic pro filtrační křemelinu F4 Borovany .....	52
Obr. 41: Filtrační křemelina F4 Borovany .....	53
Obr. 42: Křivka zrnitosti písků PG 1, PG 2 a PG 3 .....	53
Obr. 43: Křivka zrnitosti směsi písků PG 1, PG 2 a PG 3 v poměru 1 : 1 : 1 .....	54
Obr. 44: Vlevo nahoře: písek PG 3, vpravo nahoře: písek PG 2, dole: písek PG 1 .....	54
Obr. 45: Přípravek Radcon Formula #7 .....	55
Obr. 46: Přípravek Sikkaton-A.....	56
Obr. 47: Vlevo: lněná fermež od výrobce Painteco, vpravo: vzorky ošetřené lněnou fermeží .....	57
Obr. 48: Vzorec stearanu vápenatého.....	58
Obr. 49: Vzorec oleátu sodného .....	58
Obr. 50: Vlevo: stearan vápenatý, vpravo: oleát sodný.....	59
Obr. 51: Vlevo: normová míchačka, vpravo: směs po ručním zamíchání .....	61
Obr. 52: Plnění malty do forem .....	62
Obr. 53: Ošetřování vzorků .....	63

Obr. 54: Uložení vzorků .....	63
Obr. 55: Aplikace nátěru lněné fermeže .....	64
Obr. 56: Vlevo: karbonatační komora, vpravo: vzorky uložené v karbonatační komoře ...	65
Obr. 57: Vlevo: řezání váženky, vpravo: aplikace roztoku fenolftaleinu.....	66
Obr. 58: Vlevo: měření hloubky karbonatace, vpravo: porovnání hloubky karbonatace u referenční omítky a omítky ošetřené nátěrem .....	66
Obr. 59: Vlevo: měření rozměrů vzorku digitálním posuvným měřítkem, vpravo: vážení vzorku na digitálních vahách.....	67
Obr. 60: Vlevo: vážení vzorku na digitálních vahách, vpravo: vzorek připravený v měřicí nádobce pyknometru .....	69
Obr. 61: Vlevo: aparatura na evakuaci, vpravo: vzorky umístěné v nádobce, ze které byl vývěvou odsátý vzduch .....	71
Obr. 62: Měření Archimédovy hmotnosti .....	72
Obr. 63: Grafické znázornění objemové hmotnosti .....	75
Obr. 64: Grafické znázornění otevřené pórovitosti .....	76
Obr. 65: Vlevo: grafické znázornění hustoty matrice, vpravo: grafické znázornění pórovitosti z hustoty matrice .....	77
Obr. 66: Grafické znázornění výsledků získaných rtuťovou porozimetrií .....	78
Obr. 67: Zkušební zařízení FP 100 firmy Heckert .....	79
Obr. 68: Vlevo: umístění tělesa v nástavci firmy ELE International pro zkoušku v tahu za ohybu, vpravo: rozlomené trámce po zkoušce pevnosti v tahu za ohybu .....	80
Obr. 69: Vlevo: umístění nástavce do zkušebního zařízení, vpravo: těleso v nástavci firmy ELE International pro zkoušku v tlaku .....	81
Obr. 70: Vlevo: odtržení nezátížených částí trámečku, vpravo: vzorek po zkoušce pevnosti v tlaku – patrný tvar „přesýpacích hodin“ .....	82
Obr. 71: Vlevo: aparatura pro měření dynamického modulu pružnosti, vpravo: průchod vlnění z budiče skrz vzorek do snímače .....	83
Obr. 72: Grafické znázornění dynamického modulu pružnosti.....	87
Obr. 73: Grafické znázornění pevnosti v tlaku.....	87
Obr. 74: Grafické znázornění pevnosti v tahu .....	87
Obr. 75: Vzorek umístěný na houbu, ponořený přibližně 2 mm do vody .....	90
Obr. 76: Měření absorpčních vlastností.....	91
Obr. 77: Příklad grafu, který je vyobrazením hodnot naměřených při sorpčním experimentu, patrná je též přímka vložená metodou lineární regrese.....	91

Obr. 78: Vlevo: zaizolování vzorku epoxidovým lepidlem, vpravo: vzorky s narýsovanou stupnicí .....	93
Obr. 79: Vlevo: vzorky nainstalované v nádobě s vodou, vpravo: řezání vzorků na dílky.	94
Obr. 80: Vlevo: vážení dílků, vpravo: vzorky v sušárně .....	94
Obr. 81: Nařezané dílky zbylé po měření svislé nasákavosti u vzorků skupiny VO .....	95
Obr. 82: Grafické znázornění sorpčního experimentu .....	97
Obr. 83: Grafické znázornění dlouhodobé nasákavosti materiálů VO-FER-N a VO-R .....	99
Obr. 84: Grafické znázornění obsahu nasycené vlhkosti .....	99
Obr. 85: Grafické znázornění hmotnostní nasákavosti.....	99
Obr. 86: Grafické znázornění svislé nasákavosti .....	101
Obr. 87: Vlevo: miska naplněná silikagelem, vpravo: utěsňování vzorku v misce.....	105
Obr. 88: Vlevo: vzorky v klimatizační komoře, vpravo: vážení vzorku .....	106
Obr. 89: Vzorky ponechané v klimatizační komoře kvůli ustálení vlhkosti .....	106
Obr. 90: Vlevo: baňky se solným roztokem, vpravo: miska naplněná roztokem.....	107
Obr. 91: Vzorky připravené k měření.....	107
Obr. 92: Grafické znázornění faktoru difúzního odporu .....	110
Obr. 93: Grafické znázornění faktoru difúzního odporu pro vybrané materiály.....	111
Obr. 94: Měření tepelně-technických vlastností přístrojem Isomet .....	114
Obr. 95: Vzorek uzavřený v PE obalu po dobu měření.....	115
Obr. 96: Grafické znázornění součinitele tepelné vodivosti.....	117
Obr. 97: Grafické znázornění měrné tepelné kapacity .....	117
Obr. 98: Grafické znázornění součinitele teplotní vodivosti.....	117

## Seznam tabulek

Tab. 1: Typy omítek [7].....	9
Tab. 2: Druhy vzdušného vápna [5] .....	17
Tab. 3: Receptury omítek .....	48
Tab. 4: Vlastnosti vápna [52] .....	49
Tab. 5: Vlastnosti křemeliny [57].....	52
Tab. 6: Objemová hmotnost .....	74
Tab. 7: Základní materiálové charakteristiky .....	76
Tab. 8: Mechanické vlastnosti – pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku.....	85
Tab. 9: Mechanické vlastnosti – dynamický modul pružnosti .....	86
Tab. 10: Parametry spojené s transportem kapalné vlhkosti .....	96
Tab. 11: Difúzní vlastnosti .....	109
Tab. 12: Tepelně-technické vlastnosti .....	116