VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

STANOVENÍ ÚČINNOSTI HYDROIZOLAČNÍ INFUZNÍ CLONY V RŮZNÝCH TYPECH STAVEBNÍCH MATERIÁLŮ VYSTAVENÝCH KAPILÁRNÍ VLHKOSTI

DETERMINATION OF WATERPROOFING SCREENS EFFICIENCY IN VARIOUS TYPES OF BUILDING MATERIALS EXPOSED TO CAPILLARY WETNESS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE Bc. Martin Červenka
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
SUPERVISOR

BRNO 2016

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant	Bc. Martin Červenka
Název	Stanovení účinnosti hydroizolační infuzní clony v různých typech stavebních materiálů vystavených kapilární vlhkosti
Vedoucí bakalářské práce	prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Datum zadání bakalářské práce	31. 3. 2015
Datum odevzdání bakalářské práce	15. 1. 2016

V Brně dne 31. 3. 2015

....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Vedoucí ústavu

....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

Směrnice WTA 4-4-04/D – Injektáž zdiva proti kapilární vlhkosti
DROCHYTKA, R.. Technické podmínky pro sanace betonových konstrukcí TPSSBK III. Brno: Sdružení pro sanace betonových konstrukcí, 2012, 265 s. ISBN 978-80-260-2210-7.
DROCHYTKA, R.. Trvanlivost stavebních materiálů: Studijní opory. Brno, 2007. VUT v Brně, fakulta stavební.
ČSN 73 2578 – Zkouška vodotěsnosti povrchové úpravy stavebních konstrukcí
ČSN 73 1357 – Stanovení kapilárních vlastností pórobetonu
ČSN EN 772 11 – Nasákavost pálených zdících prvků
ČSN EN 1052 1 – Stanovení pevnosti v tahu za ohybu zdiva
ČSN 72 5010 – Stanovení nasákavosti, zdánlivé pórovitosti, objemové hmotnosti a zdánlivé hustoty vypálených keramických směsí a výrobků
Výzkumné zprávy a protokoly ústavu THD, příspěvky ze sborníků konferencí, odborné články, časopisy, normy.

Zásady pro vypracování

Sanace vlhkého zdiva prostřednictvím chemické injektáže je v dnešní době již značně rozšířenou a hojně používanou metodou.
Cílem diplomové práce je stanovení hodnot vzlínavosti u zmenšených těles, opatřených různými hydroizolačními materiály a na základě těchto výsledků zvolit ideální gel pro další měření. Za účelem ověření celkové účinnosti zvolené infuzní clony aplikujte experimenty dle směrnice WTA 4-4-04/D – „Injektáž zdiva proti kapilární vlhkosti“, na pilířích z různých druhé hmot, nasycených vodou s následnou aplikací infuzního gelu. Poté bude sledován vliv přítomnosti gelu na vlhkost testovaného zkušebního vzorku.
Rozsah diplomové práce nejméně 60 stran včetně tabulkové a grafické přílohy.

1. Popište, jakým způsobem ovlivňuje vlhkost degradaci a trvanlivost stavebních materiálů.
2. Zhodnoťte fyzikálně mechanické vlastnosti nejčastěji používaných materiálů ve stavebnictví, testovaných při tvorbě diplomové práce.
3. Shrňte vlastnosti zvoleného injektážního gelu.
4. Proveďte zkoušku vzlínavosti zkušebních těles opatřených různými infuzními gely a na základě výsledků zvolte ideální injektážní materiál pro další testování.
5. Proveďte ověření účinnosti zvolené infuzní clony v různých typech stavebních materiálů, prostřednictvím zděných pilířů.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

.....

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Vedoucí diplomové práce

Abstrakt

Zvýšená vlhkost zdiva se vyskytuje zejména u starších staveb. V některých případech mohou tyto problémy vznikat i u novostaveb. Tento problém je nutné odborně řešit a přistoupit k sanaci stavebního objektu. Sanace vlhkého zdiva prostřednictvím chemické injektáže je v dnešní době již značně rozšířenou a hojně používanou metodou. Na rozdíl od mechanických metod sanace vlhkého zdiva při provedení chemických injektáží není nutnost většího zásahu do konstrukce a je tedy šetrná ke stavebnímu objektu. Hlavním cílem diplomové práce je sestavit metodiku pro testování injektážních gelů, jejíž součástí bude výběr jednoho ideálního injektážního gelu.

Klíčová slova

Vlhkost, zdící materiály, hydroizolace, sanace, injektáž, infuzní clona, testování účinnosti, metodika výběru optimálního injektážního prostředku.

Abstract

Increased moisture of masonry occurs mainly in older buildings. In some cases these problems arise even in new buildings. This issue should be properly treated and process of rehabilitation of the building must be executed. Humid walls can be treated by chemical injections, which is nowadays quite extensive and widely used method. Unlike mechanical methods humid walls in the implementation of chemical grouting does not need a major redesign and thus is friendly to the construction of the object. The main objective of this thesis is to establish a methodology for testing the injection materials, which will include a selection of ideal injection gel.

Keywords

Humidity, mason materials, waterproofing, rehabilitation, injection, infusion curtain, experimental testing, methodology for choosing the optimal injection funds.

Bibliografická citace

ČERVENKA, Martin Stanovení účinnosti hydroizolační infuzní clony v různých typech stavebních materiálů vystavených kapilární vlhkosti, Brno, 2016. s. 94. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 14. 1. 2016

…….

podpis autora

Bc. Martin Červenka

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval prof. Ing. Rostislavu Drochytkovi, CSc., MBA, jako vedoucímu mé diplomové práce, za jeho odborné vedení, za cenné připomínky a rady při vypracování této práce. Tato diplomová práce byla zpracována s využitím infrastruktury Centra AdMaS.

Obsah:

1 ÚVOD 10
2 CÍL 11
3 TEORETICKÁ ČÁST 12
3.1 DEGRADACE STAVEBNÍCH MATERIÁLŮ 12
3.1.1 Fyzikální degradace 12
3.1.2 Chemická degradace 13
3.1.3 Mikrobiologické a biologické degradační procesy 15
3.2 TRANSPORT VLHKOSTI V PÓROVITÉM SYSTÉMU STAVEBNÍCH MATERIÁLŮ 16
3.2.1 Kapilárně porézní prostředí 17
3.2.2 Transport vlhkosti 17
3.3 PŘÍČINY ZAVLHNUTÍ ZDIVA 22
3.3.1 Faktory podmíněné zvýšenou vlhkostí 23
3.3.2 Průzkumy staveb 24
3.4 SANACE VLHKÉHO ZDIVA 28
3.4.1 Mechanické metody 29
3.4.2 Infuzní – chemické metody 33
3.4.3 Vzduchové provětrávací dutiny 39
3.4.4 Elektrofyzikání metody 42
3.4.5 Magnetokineze 44
3.4.6 Větrání objektů 45
3.4.7 Terénní úpravy 45
3.4.8 Pulzující podpovrchová voda 45
3.4.9 Povrchové úpravy 46
3.5 VLASTNOSTI STAVEBNÍCH MATERIÁLŮ 48
3.5.1 Cihlářské výrobky 48
3.5.2 Stavební kámen - pískovec 49
3.5.3 Zdící malta 49
3.5.4 Pórobeton 50
3.5.5 Shrnutí vlastností uvedených materiálů 51
4 PRAKTICKÁ ČÁST 52
4.1 METODIKA ŘEŠENÍ PRAKTICKÉ ČÁSTI 52
4.1.1 Zkouška vodotěsnosti (ČSN 73 2578) 52
4.1.2 Stanovení nasákavosti (ČSN 73 1357) 54
4.1.3 Výběr tří gelů s nejlepšími výsledky 54
4.1.4 Míra penetrace v závislosti na vlhkosti 54
4.1.5 Míra penetrace v závislosti na teplotě 55
4.1.6 Stanovení vzlínavosti (ČSN 73 1357) 55
4.1.7 Výběr jednoho gelu s nejlepšími výsledky 55
4.1.8 Ověření účinnosti pomocí zděných pilířů dle WTA 56
4.1.9 Ověření účinnosti in-situ 57
4.2 Infuzní gel 57
4.2.1 Testované infuzní gely 57
4.3 Modifikovaná metoda ověření účinnosti dodatečně vytvořené injektážní clony pro pórobeton dle WTA 58
4.3.1 Zkušební materiál 59
4.3.2 Beztlaková injektáž 60
4.3.3 Injektáž a uložení zkušebních těles pro zkoušky účinnosti 61
4.3.4 Zkouška účinnosti 61
4.3.5 Identifikace injektážního materiálu 62
4.3.6 Vyhodnocení 62
4.4 Zkoušení injektážních gelů dle navržené metodiky 63
4.4.1 Výběr tří gelů s nejlepšími výsledky 63
4.4.2 Stanovení vzlínavosti (ČSN 73 1357) 66
4.4.3 Výběr jednoho gelu s nejlepšími výsledky 68
4.4.4 Ověření účinnosti pomocí zděných pilířů dle WTA 70
4.4.5 Ověření účinnosti in-situ 80

4.5 Shrnutí vlastností zvoleného injektážního gelu 82
5 ZÁVĚR 84
Použitá literatura a normy 89
Seznam tabulek 91
Seznam obrázků 92

1 ÚVOD

Dodatečná ochrana proti zvýšené vlhkosti je opatření, které se nejčastěji týká starších staveb. Tyto stavby mají velmi často vodotěsnou izolaci již nefunkční. To může být z důvodu degradace materiálu izolace nebo u některých staveb nebyla vůbec hydroizolace použita. V posledních letech je však zvýšená vlhkost problémem také u kvality novostaveb, kdy v důsledku zvýšené vlhkosti zdiva není možno novostavbu zkolaudovat. Problém zvýšené vlhkosti je nejčastěji způsoben chybnou kombinací izolačních materiálů či nedodržením správného technologického postupu pracovníky.

Počátečním signálem zvýšené vlhkosti zdiva jsou zřetelně viditelné tmavé zavlhlé plochy na stěně zdiva. Pokud je zdivo vystaveno delší dobu účinkům zvýšené vlhkosti, může poté docházet k odpadávání či rozpadu omítky. Dalším negativním jevem je působení rozpustných solí, mikroorganismů, bakterií, plísní či hub. Místnosti, napadené mikroorganismy (především plísní, jsou z hygienického hlediska neobyvatelné a pobyt v takovýchto místnostech může mít negativní dopad na zdraví člověka. Zvýšená vlhkost zdiva nemá negativní účinky pouze estetické, ale také v důsledku mokrého zdiva dochází ke snižování únosnosti zdiva a snižování tepelně izolačních vlastností.

S rozvojem vědy v posledních letech přichází stále nové způsoby sanací vlhkého zdiva. Tento rozvoj je spojen nejvíce s oblastí chemie. V důsledku technického pokroku, hlavně tedy používání nových stavebních materiálů, dochází k problémům u sanovaných stavebních objektů spojených s nedostatkem zkušeností pro provedení sanace dané materiálové skladby zdiva. Tyto fakta byly podnětem pro spojení skupinou vědců, kteří s cílem rozvíjet svá poznání ve všech oborech sanací staveb vytvořili v Německu v roce 1976 WTA – Vědeckotechnickou společnost pro sanace a péči o památky. Brzy se činnost WTA postupně rozšířila do dalších evropských zemí. V České republice byla na Ministerstvu vnitra ČR zaregistrována WTA CZ v červnu 1998.

Účelem této práce je nastínit přehled o problematice vlhkého zdiva, zhodnotit nejčastěji používané zdící materiály, zhodnotit možnosti používaných sanačních metod vlhkého zdiva, zejména metody chemické infuzní clony.

2 CÍL

Sanace vlhkého zdiva prostřednictvím chemické injektáže je moderní, dnes již značně rozšířenou a hojně používanou metodou. Obliba této metody spočívá především v její jednoduché aplikaci. Na rozdíl od mechanických metod sanace vlhkého zdiva při provedení chemických injektáží není nutnost většího zásahu do konstrukce a je tedy šetrná ke stavebnímu objektu. Další výhodou je příznivá cena této metody.

Chemickou injektáží pro sanaci vlhkého zdiva dojde k vytvoření dodatečné horizontální izolaci proti vzlínající vlhkosti. Hydroizolační bariéra je ve zdivu vytvořena napuštěním chemické látky do zavlhlého zdiva. Tato látka proniká do pórů, kapilár i trhlin stavebního materiálu. Ve zdivu pak vzniká prosycená zóna, která brání průchodu vzlínající vodě nad tuto zónu. Kvalita chemické injektáže se odvíjí jednak od správného technologického provedení, tak i od schopnosti pronikání injektážního prostředku do pórů stavebního materiálu dané stavební konstrukce.

Cílem diplomové práce je sestavit metodiku pro testování injektážních gelů, jejíž součástí bude výběr jednoho ideálního injektážního gelu z osmi možných gelů, dodaných firmou Betosan s.r.o. pro výzkum. Součástí praktické části bude návrh metody stanovení vzlínavosti zmenšených těles, s aplikací různých injektážních gelů. Další zkouškou bude ověření účinnosti injektážních gelů. Pro toto ověření bude provedena zkouška ověření účinnosti pomocí zděných pilířů dle směrnice WTA 4-4-04/D a zkouška ověření účinnosti in-situ. Dalším cílem diplomové práce je vytvoření metodiky testování zděných pilířů pórobetonu pomocí modifikované metody dle WTA. Poslední částí diplomové práce bude shrnutí vlastností zvoleného injektážního gelu.

3 TEORETICKÁ ČÁST

3.1 DEGRADACE STAVEBNÍCH MATERIÁLŮ

Trvanlivost stavebních materiálů označuje schopnost materiálu odolávat účinkům degradačních procesů. Tyto procesy mohou vést ke změně významných vlastností stavebních materiálů a následně vlastností celé stavby. S trvanlivostí stavebních materiálů se tedy pojí i celková životnost stavby. Životnost stavby vyjadřuje celkovou dobu, po kterou stavba plní svoji navrženou funkci, aniž by docházelo k neekonomickému zvýšení nákladů na její provoz. Dle ČSN EN 1900 jsou při projekci stavby navrhovány s následující návrhovou životností (Tab. 1):

Tab. 1: Kategorie a hodnoty informativní návrhové životnosti nosných konstrukcí dle ČSN EN 1990 (2004) [1]

Kategorie	Informativní návrhová životnost (v letech)		Příklad
	dle ČSN EN 1990	dle NA ČSN EN 1990	
1	10	10	dočasné stavby
2	10 – 25	10 – 25 konstrukce	vyměnitelné části
3	25 – 50	25 – 50 stavby	zemědělské a obdobné
4	50	80	budovy, běžné stavby
5	100	100 stavby	mosty, monument

Proces degradace (zvětrávání) lze definovat jako změnu složení minerálů materiálu vlivem povrchových faktorů. Do těchto faktorů můžeme řadit např. působení atmosféry, vody, ledu, změny teplot během dne či působení biologických činitelů. Tento proces degradace nemůžeme nikdy zastavit, ale správnými opatřeními jej můžeme zpomalit. Následkem degradačních procesů dochází ke změnám mechanických, fyzikálních, chemických a estetických vlastností materiálu. [1]

3.1.1 Fyzikální degradace

Mezi fyzikální degradace se řadí ty procesy, při kterých na materiál působí vnější nebo vnitřní síly, které narušují jeho porézní strukturu. Tyto síly vyvolávají tlaky, které jsou nejčastěji způsobeny změnou teploty, vodou (srážkovou, povrchovou, vzlínající či kondenzační), vznikem nových minerálů z rozpustných solí ve vodě nebo mechanickými účinky. [2]

Vzniklé vnitřní tlaky, vzniklé krystalizací solí popř. hydratačními tlaky, narušují póry stavebních materiálů. Tyto tlaky jsou způsobeny zvětšujícím se objemem krystalů soli. Konečné tlaky těchto krystalů dosahují hodnot až v desítkách MPa, což jsou hodnoty vyšší, než běžné pevnosti v tahu stavebních materiálů. Příklady vyvozených tlaků jsou uvedeny v následující tabulce (Tab. 2):

Tab. 2: Hydratační tlaky vznikající při rekrystalizaci některých solí [1]

Výchozí látka	Vznikající látka	Vyvozený přetlak [MPa]
$CaSO_4$	$CaSO_4.2H_2O$	110
Na_2SO_4	$Na_2SO_4.2H_2O$	25
Na_2CO_3	$Na_2CO_3.10H_2O$	30

Obecně můžeme soli, z hlediska schopnosti rekrystalizace, rozdělit do tří skupin. Do první skupiny se řadí soli, nad jejichž nasycenými roztoky se udržuje relativní vlhkost větší než cca 75 %. Druhá skupina má tuto hranici cca 50 – 75 %. Tyto dvě skupiny, zejména ta první, můžou za vhodných podmínek přijímat či ztrácet krystalovou vodu, tzn., že mohou rekrystalizovat. Třetí skupina solí, s hranicí relativní vlhkostí vzduchu nad nasyceným roztokem pod 50 %, nekrystalizuje (resp. krystalizuje pouze za velmi extrémních podmínek), avšak ohrožuje stavební materiál nepřímo. Svou vysokou hygroskopickou vlastností přispívají k zavlhčení stavebního materiálu a vytváří tak vhodné prostředí pro jiné korozní mechanismy. [1]

3.1.2 Chemická degradace

Chemické degradační procesy stavebních materiálů jsou děje, při kterých dochází ke snížení hlavních fyzikálně mechanických vlastností v důsledku působení agresivního prostředí. Nedílnou součástí při těchto procesech je přítomnost vody. Reakcí mezi tuhou a kapalnou (příp. plynou fází) vznikají chemické reakce, které jsou podstatou degradačních procesů. Aby mohla tato reakce probíhat, musí být zajištěn neustálý transport kapalné fáze a jejich účinných složek.

Při chemické degradaci dochází nejčastěji k chemické reakci mezi roztokem rozpuštěných solí a složkami hmoty, která vede ke změně pórového systému materiálu. U stavebních materiálů je reakce zapříčiněna chemicky méně stabilními složkami hmoty, jakož je například uhličitan vápenatý $CaCO_3$ s roztoky slabých kyselin. Vznikají rozpustné

soli, které jsou transportovány směrem k povrchu, kde se hromadí a následně krystalizují. Na povrchu materiálu poté vznikají výkvěty solí. Při této a podobných chemických reakcích dochází k nárůstu objemu nových zkrystalizovaných produktů a tím dochází k nárůstu vnitřního napětí ve struktuře stavebních látek (viz Tab. 3). Další negativní stránkou, spojenou s touto reakcí, je vymývání pojivových složek (např. u malt či betonů). Dochází ke snížení mechanických vlastností, zvýšení pórovitosti, což má za následek snížení mrazuvzdornosti materiálu.

Tab. 3: Objemové změny probíhající při hydrataci některých látek [1]

Výchozí látka	Reagující složka	Vznikající sloučenina	Průměrné zvětšení objemu [%]
$Ca(OH)_2$	CO_2	$CaCO_2$	6
$Ca(OH)_2$	$SO_3 + H_2O$	$CaSO_4.2H_2O$	30
$Ca(OH)_2$	$2HCl + H_2O$	CaCl2.6H2O	305
$MgSO_4.6H_2O$	$5H_2O$	$MgSO_4.6H_2O$	145
$MgSO_4.6H_2O$	H_2O	$MgSO_4.6H_2O$	11
$CaCl_2.2H_2O$	$2H_2O$	$CaCl_2.4H_2O$	35
$CaCl_2.4H_2O$	$2H_2O$	$CaCl_2.6H_2O$	24

Jak už bylo zmíněno, při těchto reakcích je důležitou složkou voda. Dle chemických vlastností lze vodu (srážkovou, podzemní, provozní či technologickou) dělit na hladovou, kyselou, síranovou, humusovou a hlinitou.

Voda hladová je obyčejná dešťová voda, která není nasycena rozpustnými látkami. Řadí se mezi velmi měkké vody. Dokáže velmi silně a účinně rozpouštět nekarbonizovaný hydroxid vápna. Rozpouští i silikáty a hlinitany, avšak tato reakce probíhá výrazně pomaleji.

Kyselá voda má ve svém složení obsažen oxid uhličitý CO_2. Při kontaktu s maltou dochází k rozpouštění uhličitanu vápenatého $CaCO_3$ za vzniku hydrogen uhličitanu vápenatého $Ca(HCO_3)_2$. Tento dvojuhličitan se na povrchu zdiva opět rozkládá, což má za následek vytvoření bílého povlaku na povrchu. Celý tento proces lze popsat těmito rovnicemi:

$CO_2 + H_2O \longrightarrow H_2CO_3$

$CaCO_3 + H_2CO_3 \longrightarrow Ca(HCO_3)_2$

$Ca(HCO_3)_2 \longrightarrow CaCO_3 + CO_2 + H_2O$

Volná kyselina uhličitá je daleko agresivnější v nenasycené měkké vodě než ve vodě tvrdé. V měkké vodě stačí pouhých 10 mg H_2CO_3 na litr, aby docházelo k rozpouštění uhličitanu vápenatého. Proti účinkům kyselé vody je možno se chránit provedením kvalitní hydroizolace nebo pomocí tzv. vápencových obrovnávek, které nasytí okolní zeminu vápnem. Další ochranou mohou být nátěry, odolné proti vodě s oxidem uhličitým. Snížit rizika lze také volbou použitého cementu, kdy je třeba brát na zřetel, že tavené, vysokopecní nebo železoportlandské cementy mají menší obsah vápna než cement portlandský, a proto jsou odolnější.

Síranové vody jsou charakteristické obsahem síranových solí, sirovodíkem a kyselinou sírovou či siřičitou. Působení kyseliny sírové H_2SO_4 na stavební materiály vystihuje následující reakce: $H_2SO_4 + CaO \longrightarrow CaSO_4 + H_2O$.
Oxid siřičitý SO_2, který je obsažen atmosféře, tvoří za přítomnosti vody sádrovec dle reakce: $CaCO_3 + SO_2 + ½O_2 + 2H_2O \longrightarrow CaSO_4.2H_2O + CO_2$. Sádrovec má velký molární objem a za vhodných podmínek může krystalizovat do mnohonásobně větších krystalů a vytvářet tak velký tlak na stěny pórů stavebního materiálu. [1]

3.1.3 Mikrobiologické a biologické degradační procesy

Mimo již zmíněné výše uvedené problémy se můžou na vlhkém zdivu vyskytovat mikroorganismy či biologičtí činitelé. Produkty metabolismu organismů reagují s cementovými minerály a anorganickými minerály, čímž dochází k biochemické destrukci stavebního materiálu. Mikroorganismy pronikají běžně do hloubky 5 – 10 cm. Hloubka průniku je závislá zejména na struktuře materiálu, pórovém systému a stupni biochemické destrukce a může dosahovat hloubky až 30 cm pod povrchem zdiva. Nejblíže povrchu jsou obvykle nacházeny kolonie nitrifikačních bakterií a půdní flóra, hlouběji pak sirné bakterie. [1]

Jako nejčastější živé organismy, které narušují stavební materiály, jsou uváděny bakterie, řasy, mechy, lišejníky, plísně, vyšší rostliny i živočichové. Některé živé organismy můžou mít na stavební materiály i biofyzikální vliv. Jedná se nejčastěji o mechanické poškození, způsobené vrůstáním kořenů nebo houbových vláken do substrátu. U tohoto vlivu, může hloubka narušení dosahovat až několik desítek metrů pod povrchem. [2]

3.2 TRANSPORT VLHKOSTI V PÓROVITÉM SYSTÉMU STAVEBNÍCH MATERIÁLŮ

Kromě nosné funkce je jednou z hlavních úloh zdiva upravovat co nejvíce vnitřní klima tak, aby byla stavba co nejméně závislá na vnějších podmínkách. Zdivo tedy slouží jako tepelná a akustická izolace. Při vhodném uspořádání struktury dochází k propojení otevřených pórů, které přispívá k difúzi vzduchu. Pokud se však v pórech vyskytuje voda, dochází ke zhoršení materiálových vlastností, které jsou u zdiva potřebné. Negativními účinky působení vody jsou např. zhoršení tepelného odporu, rozpouští a transportuje škodlivé látky z vnějšího prostoru dovnitř konstrukce, zhoršení vnitřních klimatických podmínek konstrukce, což má za následek výskyt plísní a bakterií. V některých případech může zvýšený obsah vody vést ke snížení pevnosti a soudržnosti stavebního materiálu, obzvlášť zmrznutí materiálu nasyceného vodou může způsobit i jeho porušení. Z těchto důvodů je třeba stavební konstrukci před vodou chránit.

Vlhkost, která je přítomna ve zdivu, je určena zejména vlhkostními podmínkami nastavených mezi zdivem a okolním prostředím. K navlhnutí zdiva dochází tehdy, je-li rychlost nasakování větší než rychlost vysoušení zdiva. Pokud jsou tyto velikosti rychlostí opačné, dochází k vysoušení zdiva. Při vysoušení nastávají dva procesy, probíhající současně. Jedním je pohyb tepla až do vypaření veškeré volné vody a druhým je pohyb vody napříč tělesem až na povrch materiálu. Teplo se šíří od vystaveného povrchu směrem dovnitř za pomoci proudění, sáláním, či jejich kombinací.

Voda se může v materiálu šířit ve skupenství kapalném nebo plynném. V tuhém tělese je pohyb vody závislý na gradientu koncentrace a může být způsoben pomocí těchto mechanismů: [3]

- difúze kapaliny
- kapilární tok (vzlínavost)
- tok, způsobený gradientem tlaku nebo smršťováním neformovatelných těles
- tok způsobený gravitací
- tok zapříčiněný postupným vypařováním a kondenzací

3.2.1 Kapilárně porézní prostředí

Je známo, že téměř všechny stavební materiály jsou porézního charakteru, tzn., že obsahují ve své struktuře póry. Póry nazýváme prostory v materiálu, které jsou vyplněny kapalinou nebo plynem. Póry mohou být mezi sebou navzájem propojené anebo také jednotlivě uzavřené. U porézního materiálu lze jednoznačně určit celkový objem všech pórů následujícím vztahem:

$$\pi = \frac{V_p}{V}$$

kde je: π pórovitost [%]

V_p celkový objem pórů [mm^3]

V celkový objem tělesa [mm^3]

Porézní materiál, který s vodou nereaguje, nazýváme hydrofobní, naopak porézní materiál, který s vodou reaguje, ať už fyzikálně, fyzikálně chemicky či chemicky, nazýváme hydrofilní. O kapilárně porézním materiálu lze hovořit, je-li tvar pórů takový, že umožňuje vznik kapilárních jevů. Dle velikosti lze póry stavebních materiálů rozdělit následovně:

- Submikroskopické póry – jedná se o póry velikosti poloměru 10^{-10} až 10^{-9} m. Tyto póry jsou menší, než je střední volná dráha molekuly vody, a proto se těmito póry voda nemůže pohybovat.
- Mikropóry – velikost poloměru leží v rozmezí 10^{-9} až 10^{-8} m. V těchto pórech se voda opět nemůže pohybovat, může zde však již docházet k tzv. kapilární kondenzaci.
- Kapilární póry – jsou póry, které mají velikost poloměru 10^{-7} až 10^{-3} m. Pohyb vody v těchto pórech je způsoben povrchovým napětím. Jsou zde tedy využívány kapilární jevy a proudění kapaliny je laminárního charakteru.
- Makropóry – poloměr těchto pórů přesahuje velikost 10^{-3} m. Jedná se o dutiny, kterých již přestávají působit kapilární síly, a uplatňuje se zde vliv gravitace. Z tohoto důvodu se tato skupina pórů neřadí do tříd kapilárně porézních látek. Pohyb kapaliny zde může být i turbulentního charakteru. [3]

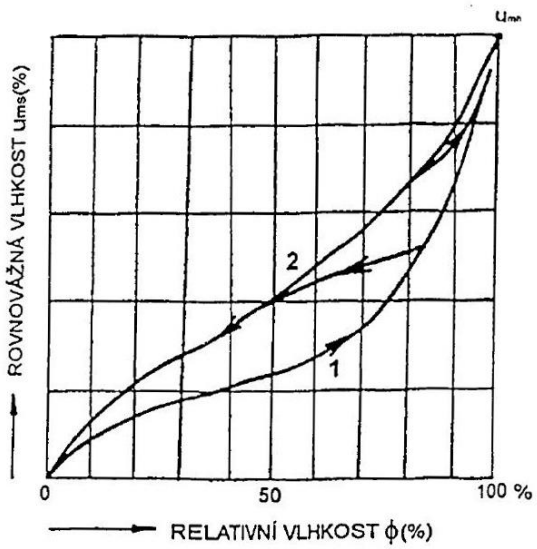
3.2.2 Transport vlhkosti

Vzájemná vazba, která je způsobena silovým působením mezi molekulami vody a povrchem materiálu, se nazývá fyzikální sorpce. Pokud je suchý materiál vystaven vlhkému

vzduchu (vzduchu s obsahem vodní páry), pak tento materiál na svém povrchu váže molekuly vody, čímž dochází k navýšení hmotnosti suchého materiálu. Poté vlivem Van der Waalsových sil vzniká na povrchu tuhých látek hromadění plynných a kapalných fází látek. Tento jev, nazývaný adsorpce, způsobuje vznik molekulární vrstvy vodní páry na stěnách pórů.

Absorpce nastává, pokud kapalná nebo plynná fáze proniká difúzí z povrchu dovnitř tuhé fáze. Při chemisorpci nastává v materiálu chemická reakce, při které se uplatňuje chemické vazby vody a tuhé fáze materiálu. [4]

Při zvýšení relativní vlhkosti vnějšího prostředí dochází v materiálu k sorpci a naopak při snížení relativní vlhkosti vnějšího prostředí dochází k desorpci. Průběh izotermy rovnovážné vlhkosti není stejný sorpci a desorpci, ale mírně se liší (viz. Obr. 1). Tato odlišnost je zapříčiněna tzv. lahvovitými póry, které jsou ve stavebních materiálech velmi časté. Kondenzace v těchto pórech probíhá i na jeho zúženém hrdle a pór se tak zaplňuje vodou. Vysychání v takto geometricky tvarovaných pórech probíhá za podstatně nižšího tlaku, než bylo potřeba pro jeho nasycení. Tento jev se nazývá hystereze sorpce. [3]



1 Sorpční izoterma při rovnováze zvlhčování

2 Desorpční izoterma při rovnováze vysušování

Obr. 1 – Vliv relativní vlhkosti vzduchu na rovnovážnou vlhkost stavebního materiálu [3]

Pohyb vody ve zdivu můžeme dělit na mechanismy difúze pro vodní páru a kapilární vedení pro kapaliny. V souvislosti s možnými způsoby přenosu vody a páry porézními materiály je třeba také zmínit transport vodních par zdivem způsobený elektrickým polem, kondenzaci a proces vysychání zdiva. [3]

Difúze

U stavebních objektů dochází k rozdílům mezi teplotami exteriéru a interiéru, resp. i k rozdílu relativních vlhkostí vzduchu. Vzhledem k tomu, že veškeré látky o vyšší koncentraci mají tendenci přecházet do prostředí o nižší koncentraci, vzniká tok vlhkosti a tok tepla konstrukcemi. Tento transport se nazývá difúze. [5]

Dle Fickova zákona platí:

$$q_p = -D.\frac{\partial c}{\partial x}$$

kde je: q_p hustota hmotnostního toku vodní páry [$kg.m^{-2}.s^{-1}$]

c koncentrace vodní páry [$kg.m^{-3}$]

D součinitel difúze vodní páry příslušným materiálem [$m^2.s^{-1}$]

Z Fickova zákona lze vyjádřit hustotu hmotnostního toku některou z vrstev materiálu, pouze když je v této vrstvě konstantní koncentrační spád. Za reálných podmínek k tomu stavu téměř nedochází a poměry difúze jsou složitější. Při prostupu difúze materiálem dochází k neustálému vyrovnávání koncentrací a tím se koncentrační spády v průběhu času neustále mění. Difúze je způsobena termickým pohybem molekul, který v roztoku vytváří osmotický tlak. Při stejné koncentraci je osmotický tlak všude stejný, avšak při probíhající difúzi koncentrace klesá se směrem difúzního tlaku a tím klesá i osmotický tlak. Z tohoto faktu lze konstatovat, že pohyb rozpuštěné látky v roztoku je následkem spádu osmotického tlaku.

Ve stavební praxi je z této problematiky nejdůležitější difúzní odpor stavebních materiálů vůči průniku vodní páry, který je v praxi známý pod názvem faktor difúzního odporu μ [-]. U konkrétního materiálu lze pak vyjádřit celkový difúzní odpor d_μ [m], který dostaneme vynásobením faktoru difúzního odporu s tloušťkou materiálu. Jednotlivé difúzní odpory určitých vrstev stavební konstrukce by se měli zmenšovat směrem k exteriéru. Je to z důvodu, že po většinu roku je směr difúzního toku z interiéru do exteriéru a takto navrhnutá skladba vrstev lépe odvádí vlhkost z konstrukce. Naopak tomu zvětšováním difúzního odporu u vrstev stavební konstrukce směrem k exteriéru vzniká brzdící vrstva, která napomáhá k tvorbě kondenzované vody. [3]

- **Kapilární vzlínavost**

Jev, kdy v pórovité látce vystoupí voda nad úroveň hladiny vody v okolí, se nazývá kapilární vzlínavost. Tento jev je zapříčiněn kapilární elevací. Vzlínavost lze pro demonstraci

vyvodit pomocí úzké skleněné trubičky, ve které bude po ponoření do vody stoupat hladina až do výšky, kdy se kapilární elevace vyrovná hmotnosti vody ve sloupci.

Velmi důležitými veličinami při průběhu kapilární vzlínavosti jsou rychlost a výška výstupu. Jelikož rychlost vzlínavosti je v jednotlivých výškách jiná, musíme rychlost rozdělovat na okamžitou a průměrnou (udává časové období, za které kapalina vystoupala do určité délkové změny).

Maximální výšku vzlinutí lze vyjádřit z rovnosti kohezního tlaku v kapiláře a hydrostatického tlaku vzlinuté kapaliny následovně:

$$\frac{2.\sigma.cos\Theta}{r} = h.\rho.g \quad => \quad h = \frac{2.\sigma.cos\Theta}{r.\rho.g}$$

kde je:

h	výška vzlinutí [m]
σ	povrchové napětí kapaliny [$N.m^{-1}$]
Θ	úhel smáčení mezi kapalinou a stěnou kapiláry [˚]
r	poloměr kapiláry [m]
ρ	měrná hmotnost kapaliny [$kg.m^{-3}$]
g	tíhové zrychlení 9,81 $m.s^{-2}$

Pro smáčivé kapaliny se cos Θ blíží 1, povrchové napětí vody má hodnotu přibližně 0,07275 $N.m^{-1}$ a měrnou hmotnost přibližně 1000 $kg.m^{-3}$. Z těchto faktů lze pro maximální výšku vzlinutí zjednodušit vzorec následovně:

$$h = \frac{0{,}0000149}{r}\ [\text{m}] = \frac{0{,}149}{\text{r}}\ [\text{cm}]$$

Z tohoto vzorce je jednoznačné, že výška vzlinutí bude tím větší, čím bude menší poloměr kapiláry. Průměrná hodnota poloměru kapiláry ve zdivu je nejčastěji 10^{-5} m. U těchto poloměrů dosahuje výška vzlinutí 1,49 m, což odpovídá i hodnotám z praxe, jelikož u starších zavlhlých domů bývá výška vzlinutí nejčastěji do výše cca 1,5 m nad okolním terénem. Je potřeba také zmínit fakt, že ve vodě jsou rozpuštěny soli, které zvyšují povrchové napětí. Obsažená sůl ve vodě má však i za následek zvýšení měrné hmotnosti. Ve výsledku to znamená, že maximální výška vzlinutí vody není téměř rozpuštěnou solí ovlivněna.

Rychlost vzlínání se vypočítá ze vztahu:

$$v = \frac{r.\sigma.cos\Theta}{4.\eta.h}$$

kde je: v rychlost vzlínání [m.s^{-1}]

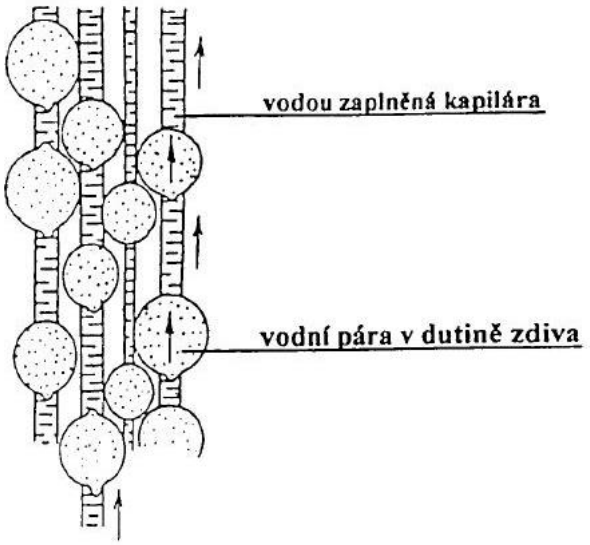
η viskozita kapaliny [-]

Čas, který je potřeba k dosažení výšky h, se vypočítá dle vzorce:

$$t = \frac{2.\eta.h^2}{r.\rho.cos\Theta}$$

kde je: t čas [s]

V praxi je nutno tyto obecné fyzikální zákonitosti doplnit o další poznatky. Ve stavebních materiálech se nenachází kapiláry jako pravidelné trubice stejného poloměru, ale jsou tvořeny soustavou pórů různé velikosti, jež jsou navzájem spojeny úzkými průduchy. Stěny pórů nejsou dokonale hladké, ale obsahují řadu výstupků, způsobených krystaly solí, minerálů a šupinkami slíd. Rozměry takto vzniklých rýh poté mají vliv na výšku vzlinutí.

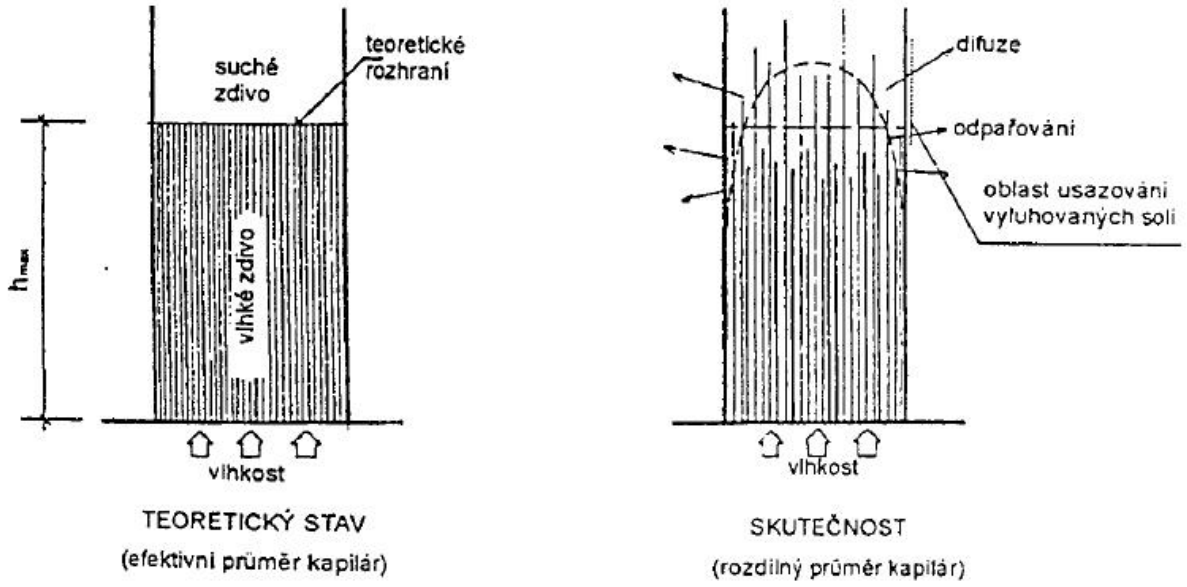


Obr. 2 – Schematické znázornění prostupu vlhkosti kapilárami a dutinami (podle Krischera) [3]

Ve stavebním materiálu se voda pohybuje systémem kapilár a dutin. Voda stoupá kapilárou až do chvíle, kdy narazí na pór velkého průměru. U pórů s velikostí na 10^{-3} m již nedochází ke kapilárnímu vzlínání, jelikož zde převládá vliv gravitace. Voda se zde však nezastaví a pomoci difúze je transportována k protější straně, kde z páry přechází opět

do kapalného stavu a pokračuje proces kapilárního vzlínání k dalšímu póru. Průběh pohybu vody kapilárami a dutinami zdiva je zobrazen na *Obr. 2*. Při pohybu vlhkosti lze také pozorovat pevně vázanou vodu, která vzniká jako slabá vrstvička na stěnách pórů a kapilár. Tato voda, stejně jako voda vzlínající, stoupá pozvolna vzhůru, proti směru zemské gravitace.

U starších staveb bývá často maximální výška vzlinutí vyšší než u staveb novějších, ačkoli jsou ze stejného materiálu a působí na ně srovnatelné vlhkostní podmínky. Tato skutečnost je způsobena obsahem solí ve vodě, kterých je u starších budov obsaženo více. Soli se v pórech usazují a zmenšují tak jejich poloměr, čímž dochází ke vzrůstu maximální výšky vzlinutí. Hranice mezi suchým a vlhkým stavebním materiálem není ostrá, což je způsobeno převážně různým rozdělením pórů a současným výskytem makro a mikropórů v materiálu. [3]



Obr. 3 – Rozhraní zvýšené a normální vlhkosti zdiva [3]

3.3 PŘÍČINY ZAVLHNUTÍ ZDIVA

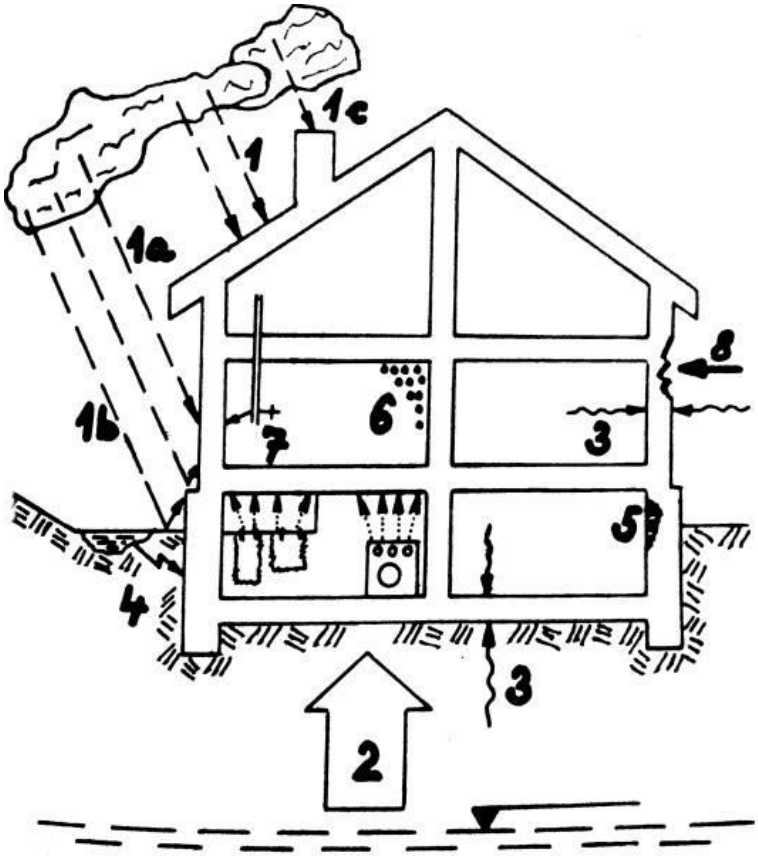
Stupeň zavlhčení zdiva bývá téměř vždy ovlivněn stářím budovy. O zavlhlých stavbách se zpracovávají objektivizace poznatků o poruchách neboli průzkumy zavlhlých staveb.

Nejčastější závady, které způsobují zavlhnutí zdiva, jsou zapříčiněny:

- chybějící izolací stavebního objektu,
- izolací, která již následkem stáří propouští vzlínající vodu a vodní páru,

- špatně navrženou izolací stavebního objektu,
- změnou podmínek místa, kde je stavba situována,
- vadnou sanitní instalací,
- nedostatečným větráním,
- nepropustným nátěrem, obkladem či povrchem, který je aplikován na zdivo
- škodlivými zásahy do stavebního objektu.

Základní příčiny vlhnutí zdiva jsou znázorněny na následujícím obrázku (*Obr. 4*). [6]



1 Voda srážková
1a Voda srážková hnaná větrem
1b Voda srážková odstřikující
1c Voda srážková pronikající komínovým průduchem
2 Voda vzlínající (kapilární)
3 Difuze vodní páry a voda kondenzovaná
4 Voda s hydrostatickým tlakem
5 Hygroskopicita stavebního materiálu
6 Mikroorganismy
7 Vadná sanitární instalace
8 Narušení zdiva účinkem vody a mrazu

Obr. 4 – Typické cesty pro průnik vody a vlhkosti do zdiva [7]

3.3.1 Faktory podmíněné zvýšenou vlhkostí

Nepříznivé jevy působící na stavební objekty, mají vliv na spolehlivost a trvanlivost konstrukce. Typy vad na stavebních objektech, způsobené vlhkostí, můžeme dělit následovně:

- vady vnější (estetické),
- vady prostředí z hlediska hygienického a ekologického,
- vady závažné z hlediska stavebního a statického.

Častou estetickou závadou jsou výkvěty na povrchu zdiva, které jsou způsobeny vnášením rozpustných solí ve vodě do zdiva. Výkvěty se tvoří zejména v oblastech odpařovacích zón. Nejčastěji se vyskytující soli bývají sírany, chloridy a dusičnany. Výkvěty vnitřní, způsobují vzrůstajícím objemem krystalizační tlaky, které porušují nejen omítku a maltu, ale i vlastní zdivo. Další estetickou vadou může být biokoroze. Působení chemismu solí i působení biokoroze je detailněji popsáno v kapitole 3.1.

V praxi se můžeme setkat i s typy poruch u nových staveb. Tyto poruchy jsou zapříčiněny nevhodným použitím stavebních materiálů či nevhodným technologickým postupem. Může se jednat např. o aplikaci difúzně nepropustných materiálů na vlhké zdivo nebo použití tvrdé a hutné omítky na měkké jádro. [6]

Zvýšená vlhkost má jednoznačně vliv i na snížení pevnosti v tlaku pórovitých stavebních materiálů. Výjimku tvoří pouze beton, který ve vlhkém prostředí (není-li však doprovázeno mrazem či chemickou agresivitou) naopak pevnost zvyšuje. Pro příklad ukázky snížení mechanicko-fyzikálních vlastností budou v následující tabulce uvedeny u vybraných materiálů pevnosti v tlaku v suchém a nasáklém stavu.

Tab. 4: Pevnost cihel, malty a pískovce v závislosti na vlhkosti [5]

	Pevnost v tlaku [MPa]	**Vlhkost [%]**	**Poměr pevnosti [-]**
Cihla v suchém stavu	16,10	1,95	0,48
Cihla v nasáklém stavu	7,68	16,81	
Malta v suchém stavu	1,06	0,86	0,78
Malta v nasáklém stavu	0,83	13,45	
Pískovec v suchém stavu	52,11	1,02	0,85
Pískovec v nasáklém stavu	44,54	5,82	

3.3.2 Průzkumy staveb

Před návrhem samotného sanačního opatření proti zvýšené vlhkosti zdiva, je třeba provést důkladné prošetření stavebního objektu. Rozlišujeme tři následující průzkumy objektu: Inženýrsko-geologický a hydrologický průzkum, stavebně historický průzkum a stavebně technický průzkum. Ne všechny uvedené průzkumy se musí provádět v celém rozsahu a lze je částečně vypustit, avšak za předpokladu dostatečných zkušeností autora sanačního zásahu s podobnými stavbami. Jako další se provádí průzkum vlhkosti.

Pro každý průzkum staveb je nutné informovat se o současné izolační situaci stavby. Zjistit historii výstavby objektu a také všechny provedené změny v průběhu od vystavění

objektu do současnosti. Je nutno provést stavebně technický průzkum s ohledem na stav stavebních materiálů, použitých na stavebním objektu. Provést rozbor vody obsažené ve zdivu a zjistit její celkové množství. V neposlední řadě je třeba všechny vlastní průzkumy koordinovat s projektanty případné rekonstrukce či obnovy. [6]

- **Inženýrsko-geologický a hydrologický průzkum**

Základem tohoto průzkumu je archivní studie použitých materiálů a rozbor vzorků zeminy z těsného okolí objektu. Za pomoci kopaných či vrtaných sond se určí složení základové půdy a získají se základní informace o základových poměrech stavebního objektu. Ze vzorků půdy a jeho vyhodnocení lze dojít k závěru, zda je současný stav okolí objektu ve stavu, ve kterém dochází k vzlínání vlhkosti základovou spárou. Tyto průzkumy mohou provádět pouze odborné, k tomu školené, organizace.

- **Stavebně historický průzkum**

Tento průzkum studuje zejména původní dokumentace. Při porovnání této dokumentace se skutečností jsou zjištěny všechny rekonstrukce a změny, které nastaly během užívání stavby. Díky tomuto průzkumu se tedy často odhalí příčiny kolísaní vlhkosti či tvorby nových vlhkostních map z důvodu např. zazdění okenních či dveřních otvorů. Z tohoto důvodu tento průzkum nelze podceňovat a je třeba ho provádět stejně důkladně jako další průzkumy.

- **Stavebně technický průzkum**

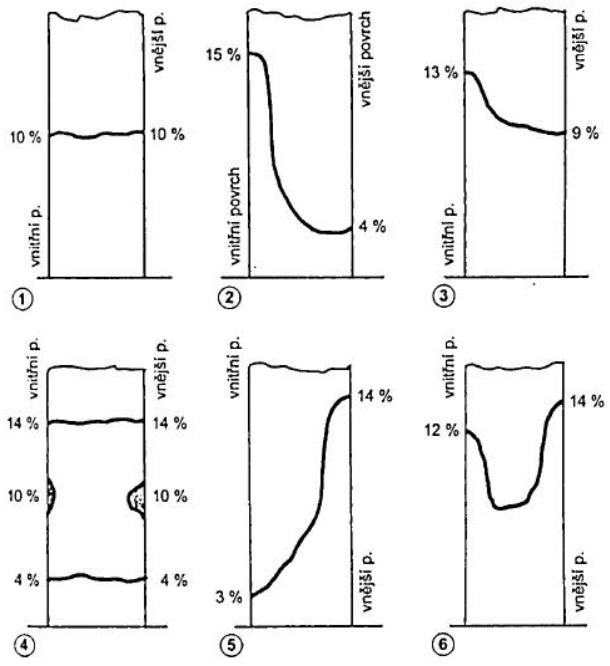
U tohoto průzkumu sledujeme plochy stavebního objektu s odpadlou omítkou a vrtáme sondy do materiálu. V odvislosti na tyto dva poznatky poté hodnotíme technický stav základového a nadzemního zdiva, existenci, popř. stav, původní hydroizolace, druh materiálu a složení konstrukce a lze také zjistit souvislosti s případnými statickými poruchami. Součástí tohoto průzkumu je také posouzení celkové statické bezpečnosti objektu. Pomocí vrtaných sond sledujeme zejména druh zdících malt, omítek, druh cihel (či jiného stavebního materiálu), praskliny a kaverny ve zdivu. Vzhledem k tomu, že existují tzv. dvouplášťové konstrukce, je doporučeno provést v některých místech konstrukce vrtané sondy v celé tloušťce zdi.

- **Průzkum vlhkosti**

Vzorky pro měření nikdy neodebíráme (nebo měření neprovádíme) v místě kritickém, tedy v místě, kde např. došlo k poruše dešťového svodu, došlo k poruše sanitární instalace apod. Samotný průzkum může být proveden destruktivním či nedestruktivním způsobem. Základní pravidla pro měření vlhkosti jsou: měření se provádí ve třech výškových úrovních zdiva (např. 300, 750 a 1500 mm nad úrovní podlahy), avšak vždy minimálně 300 mm nad hranicí prosakující vlhkosti ve zdivu. Měření musí být provedeno jak na zdícím materiálu, tak na použité zdící maltě. Měření provedeme alespoň dvakrát. Rozestup mezi jednotlivými měření musí být minimálně 3 měsíce.

Mezi nedestruktivní zkoušky patří např. v praxi požívaná metoda odporová a kapacitní. Principem těchto metod je sledování elektrického odporu zdiva a jeho změn následkem změny vlhkosti. Toto měření bývá však často nepřesné, z důvodu nedostatečné hloubky měření. Také sanilita zdiva, která je na povrchu zdiva zvýšená, může toto měření ovlivnit.

Zjišťování vlhkosti hmotnostní metodou patří mezi destruktivní měření, kdy je třeba provést odběr vzorku ze zdiva, avšak tato metoda patří k nejspolehlivějším z hlediska přesnosti určení vlhkosti ve zdivu a velmi často se využívá. Principem této metody je porovnání hmotnosti vzorku po odebrání z konstrukce s hmotností vzorku po vysušení v sušárně. [6]



1 Vlhkost vzlínající

2 Vlhkost kondenzovaná z vnitřní strany

3 Vlhkost vzlínající a kondenzovaná

4 Vlhkost kombinovaná z různých příčin

5 Vlhkost z pronikání dešťové vody do zdi (I. typ)

6 Vlhkost z pronikání dešťové vody do zdi (II. typ)

Obr. 5 – Orientační příčiny vlhnutí na základě měření vlhkosti v průběhu tloušťky zdiva (hodnoty vlhkosti jsou příkladové)[6]

Jako další destruktivní metodu měření vlhkosti, která se v praxi často využívá, je třeba uvést chemickou metodu karbidu vápníku. Principem této metody je reakce vody obsažené v odebraném vzorku s karbidem vápníku. $CaC_2 + 2H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + C_2H_2$. Z uvedené rovnice lze pozorovat, že reakcí karbidu vápníku s vodou vzniká acetylén. Z vyvozeného tlaku tohoto plynu jsme schopni okamžitě určit vlhkost.

Klasifikace vlhkosti objektu je dána normou ČSN 73 0610 (Hydroizolace staveb – Sanace vlhkého zdiva, základní ustanovení). Klasifikační tabulka (Tab. 5) je vztažena na objekty vyzděné z cihel za použití běžné malty. Jen výjimečně je tato tabulka vztažena na stavební kámen (pískovec, opuka,…). [5]

Tab. 5: Klasifikace vlhkosti zdiva dle ČSN 73 0610 [5]

Stupeň vlhkosti	Vlhkost zdiva w v % hmotnosti
Velmi nízká	$w < 3$
Nízká	$3 \leq w \leq 5$
Zvýšená	$5 \leq w \leq 7,5$
Vysoká	$7,5 \leq w \leq 10$
Velmi vysoká	$w > 10$

Hmotnostní vlhkost pórovitých materiálů je u stavebních objektů závislá také na relativní vlhkosti prostředí uvnitř objektu. Zároveň má i naopak vysoká vlhkost stavebních materiálů vliv na zvýšenou relativní vlhkost místnosti stavebního objektu, avšak tento jev nebyl dosud empiricky podložen. Při pohybu vlhkosti zdivem nastává postup vlhkosti hlavně spárami zdiva nebo difúzně prostupnými zdícími materiály.

Tab. 6: Běžná vlhkost stavebních materiálů [%] v závislosti na relativní vlhkosti [5]

Relativní vlhkost	35	60	70	90	100
Cihla plná pálená	0,9	1,5	1,7	1,9	2,7
Vápeno-cementová malta 1:3	-	2,8	3,3	4,3	8
Vápenitý pískovec	0,7	-	1,6	-	5,9
Opuka	-	5	6	8	-

Sanilita zdiva je další z částí, kterou se vlhkostní průzkum stavebního objektu zabývá. Vlivem nárůstu objemu krystalů solí dochází k praskání a odtrhávání omítek, ale i k částečné destrukci zdiva. Množství sanility udává množství chloridů, síranů a dusičnanů. K zasolení zdiva dochází převážně v blízkosti povrchu zdiva. To potvrzuje skutečnost, že 80 % zasolení zdiva se nachází do hloubky cca 15 mm od povrchu zdiva. Soli mají schopnost vázat vlhkost ze vzduchu a tím zvyšují rovnoměrnou vlhkost stavebních materiálů. Stupeň sanility stanovíme dle ČSN P 73 0610. [6]

Chemismus zdiva spočívá ve stanovení pH. U novostaveb se setkáváme s pH okolo hodnoty 11, tedy zásaditým. Zdivo ve stáří několik desítek let mívá pH v rozmezí 7 až 8. Historické zdivo staré několik století bývá mírně kyselé, s hodnotou pH okolo 6. [8]

Průzkum na výskyt mikroorganismů provádíme zejména u dřevěných prvků. Dřevěné prvky nasycené vodou tvoří optimální mikroklima pro výskyt mikroorganismů. V rámci průzkumu dochází k popisu tvaru, barvy, množství, zápachu prostředí. Vzorky se nechají následně laboratorně vyhodnotit. [6]

3.4 SANACE VLHKÉHO ZDIVA

Zvýšená vlhkost stavební konstrukce snižuje mechanické vlastnosti, tepelně-izolační vlastnosti, může způsobovat biologické poškození atd. Z toho důvodu je stavební konstrukce se zvýšenou vlhkostí nutno sanovat. Norma ČSN P 73 0610 [21] definuje sanaci vlhkého zdiva jako dodatečné hydroizolační zásahy do konstrukcí spodní a přízemní části stavby i okolního horninového prostředí, vedoucí k výraznému a trvalému snížení vlhkosti v podzemním i nadzemním zdivu staveb i v souvisejících konstrukcích, a v případě potřeby i ke snížení vlhkosti vnitřního vzduchu v budovách.

V rámci této práce budou popsány pouze metody sanace vlhkého zdiva, které jsou prováděny v důsledku působení vody v podloží objektu. V místě podloží může podzemní i povrchová voda způsobovat u stavebních objektů: [8]

- Podmáčení základů
- Zvýšené vzlínání do zdiva
- Zatopení suterénu objektů

Metody sanace vlhkého zdiva používané v České republice rozděluje Vlček M. a Klečka T. [9] následovně:

A) Přímé metody

1. Mechanické metody
2. Infuzní - chemické metody
3. Vzduchové provětrávací dutiny
4. Elektrofyzikální metody
5. Magnetokineze

B) Nepřímé metody

1. Větrání objektů
2. Terénní úpravy
3. Pulzující podpovrchová voda
4. Povrchové úpravy

Přímé metody přímo zabraňují dalšímu přísunu vlhkosti do stavební konstrukce, rozumíme jimi tedy hlavní sanační práce. Metody nepřímé jsou prováděny jako doplňkové opatření pro hlavní sanační práce. Nezabraňují dalšímu přísunu vlhkosti jako metody přímé, ale napomáhají snadnému odchodu vlhkosti mimo stavbu. Ve většině případů se sanace vlhkého zdiva provádí jako kombinace několika těchto metod. [9]

3.4.1 Mechanické metody

Princip této metody spočívá v tom, že vložíme novou hydroizolaci do nově připraveného prostoru ve zdivu. Tato nová hydroizolace poté mechanicky zabraňuje průniku vlhkosti do konstrukce.

- **Ruční podřezávání zdiva**

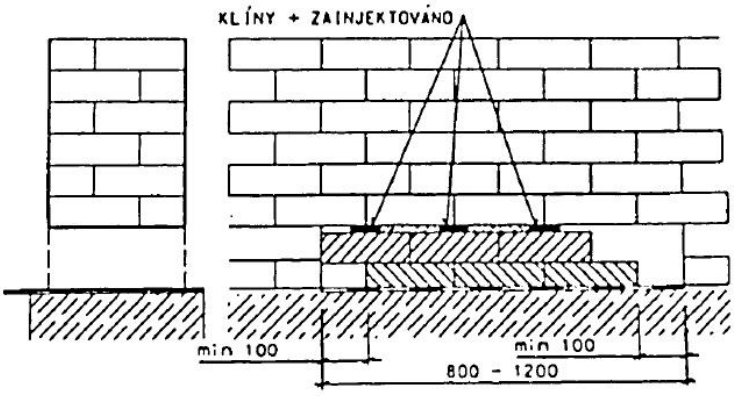
Tato metoda se řadí již téměř k zastaralým a v dnešní době výkonných strojů se téměř nevyužívá. Princip metody je v podřezání vlhkého zdiva v ložné spáře a následném vkládávání hydroizolace do vytvořené spáry. Aby bylo možno tuto metodu aplikovat, musí být ložná spára vodorovná a musí k ní být přístup z obou stran obvodové zdi. Vzhledem k malé spáře se většinou jako hydroizolace požívá PVC, sklolaminát či plech. Po vyplnění spáry hydroizolací se spára zainjektuje cementovou maltou. Tato metoda je možná provádět u obvodových zdí do tloušťky 0,6 m.

- **Podsekávání**

Podsekávání neboli probourávání je metodou, při níž dochází k úplnému odstranění nejčastěji dvou řad zdiva v celé jeho tloušťce a délce 0,8 – 1,2 m. Po zarovnání spodní hrany vzniklého otvoru se položí hydroizolace s přesahem 100 mm na každé straně. Otvor se znovu vyzdí a po zatvrdnutí malty se pokračuje v dalším úseku, nikdy ne však a úseku hned vedle. Pro urychlení se v praxi často používá vyklínování spáry pomocí pevného plochého materiálu (kamenné či betonové dlaždice, klín z umělé hmoty). Při vybourávání stěny tlustější než 0,6 m je nutno postupovat nadvakrát. Nejprve vysekáme zdivo jedné poloviny tloušťky zdiva,

vložíme hydroizolaci, zazdíme, zaklínujeme a zainjektujeme. Poté provedeme stejný postup z druhé strany zdiva.

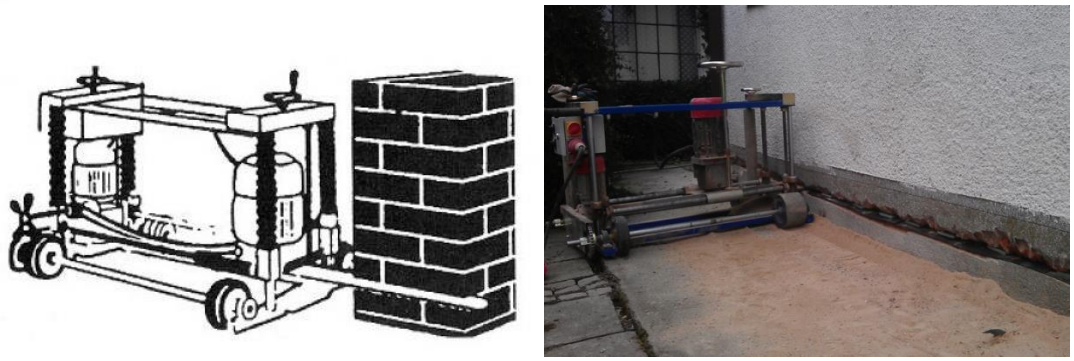
Jedná se o velmi pomalou a dnes již překonanou metodu. Svým technologickým postupem zasahuje hodně do statiky konstrukce a také příliš mnoho spojů u hydroizolace není optimální. Dnes se využívá jen u menších staveb.



Obr. 6 – Způsob vkládání hydroizolace při podsekávání zdiva [9]

- **Podřezávání řetězovou pilou**

Princip metody je stejný jako u ručního podřezávání, avšak u této metody odpadá namáhavá ruční práce, která je nahrazena pilou s motorovým nebo elektrickým pohonem. Tím došlo k výraznému zefektivnění práce a zrychlení celého procesu. Opět je vhodné vést řez přes ložnou spáru, avšak některé typy pil si poradí i s řezy skrz smíšené zdivo. Maximální tloušťka zdi je určena délkou ocelové lišty, která vede řetěz pily. Na zubech pily jsou osázeny vidiové plátky.



Obr. 7 – Schéma a foto řetězové pily [9], [17]

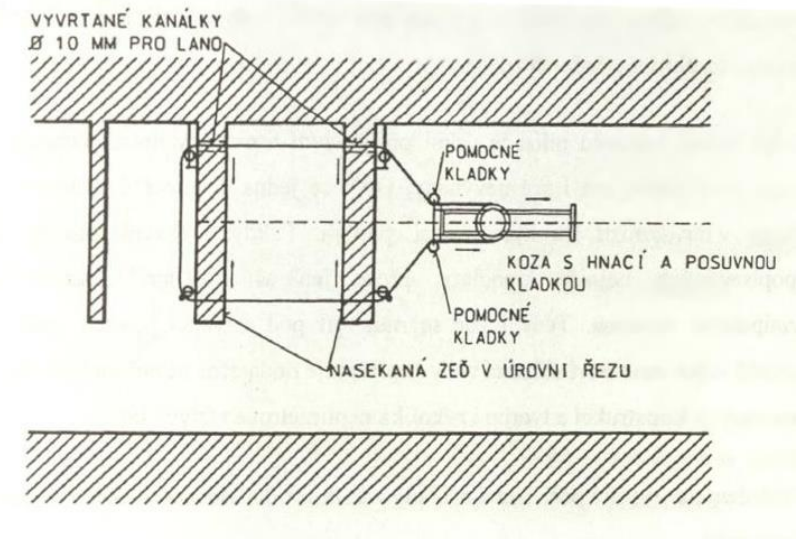
Ve výšce, kde bude procházet řez, se otluče omítka. Vedle zdi se připraví nejméně 1,5 m široký podklad, pro rovný pojezd stroje. Po prořezání úseku o délce 1,0 m se stroj zastaví.

Vytvořená řezná spára se vyčistí a vloží se do ní hydroizolační pás na bázi polyetylénu nebo sklolaminátu. Poté se spára zajistí klíny z umělé hmoty a pokračuje se řezáním dalšího úseku. Spoje mezi jednotlivými úseky musí přesahovat minimálně o 30 – 50 mm. Vyplnění spáry se provede injektováním cementovou hydrofobizovanou maltou.

Výhodou této metody je jednoznačně rychlost a jednoduchost. Nevýhodou je nutnost vytvoření pojezdové roviny v okolí obvodové zdi, což může být u některých objektů problém. Další nevýhodou je hlučnost a prašnost této metody.

- **Podřezávání lanovou pilou**

Princip metody je stejný jako u předchozí, avšak s tím rozdílem, že lanová pila je schopna podřezávat jakýkoli materiál bez ohledu na jeho tloušťku. Na rozdíl od pily řetězové je možno provádět řez i vodorovně. Lano pily je poskládáno ze segmentů dlouhých cca 300 mm. Tyto segmenty je možno libovolně přidávat, odebírat či měnit. Proto je možné vytvořit libovolnou délku lana či lano jednoduše opravit. Každý segment je na svém konci opatřen diamantovým prstencem. Před začátkem řezání se na koncích vymezených úseků vyvrtají otvory, jimiž je následně provlečeno lano. Za pomoci oběžného kola a soustavy kladek je lano neustále dokonale napínáno, a tak je zajištěn dokonalý řezný efekt. Při řezání je nutno zajistit chlazení lana pomocí vody. Postup pro vkládání hydroizolace a následné utěsnění spár je obdobné jako u řezání pomocí řetězové pily.



Obr. 8 – Schéma lanové pily [9]

Výhodou této metody je jednoznačně účinnost prořezání jakéhokoli materiálu a s tím spojeno, že není nutno mít jasně definovanou ložnou spáru pro směr řezu. Nevýhodou jsou vysoké počáteční náklady na pořízení stroje a náhradních dílů.

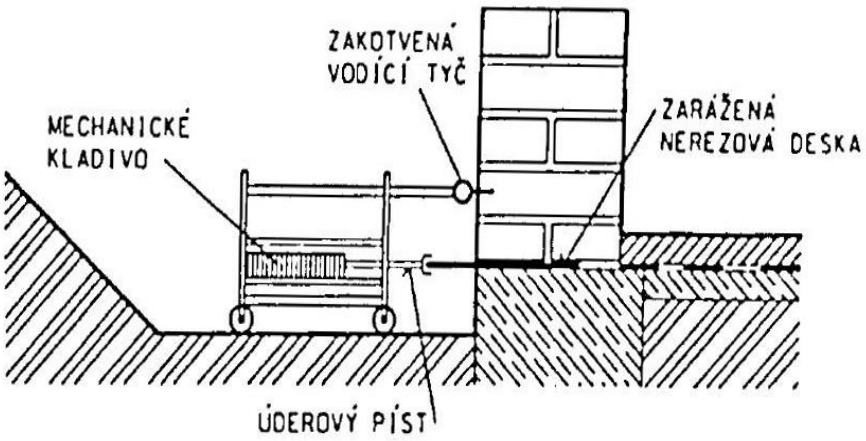
- **Podřezávání kotoučovou pilou**

Princip spočívá opět ve vytvoření nové spáry pro vložení nové hydroizolace, ale jako zařízení pro řezání je využito kruhové pily o průměru až 1,2 m. Zuby jsou stejně jako u pily řetězové opatřeny vidiovými hroty. Při řezání je potřeba kotouč dostatečně chladit vodou. Následkem chlazení dochází k nežádoucímu smíchání vody s prachem, vytvoření jemné kaše, která se usazuje na zemi. Tato kaše může být zdrojem další přidané vlhkosti do zdiva, a proto je třeba tuto kaši ihned po dokončení řezání odstranit.

Výhodou této metody je malá poruchovost strojního zařízení. Výhodně využita může být zejména u podřezávání na dlouhých rovných frontách. Nevýhodami jsou malá řezná hloubka a prašnost. Metoda není vhodná pro podřezávání koutů či malých místností.

- **Metoda HW**

Při této metodě je do ložné spáry zarážena vlnitá deska z nerezového plechu. Podmínkou je pravidelná vodorovná spára ve zdivu. Vlnité plechy mají obvykle tloušťku 1,5 mm a výšku 5 – 6 mm. U silnějšího zdiva nad 500 mm se používají tvrzené plechy. Pro lepší zarážení plechů do zdiva jsou plechy opatřeny hroty. Vlnitý tvar plechu napomáhá lepšímu průchodu do zdiva a má také zpevňující účinky. Hlavní součástí strojního zařízení je pneumatické nebo elektrické kladivo, jehož údery zarážejí desku do spáry zdiva. Při napojení další části vlnitého plechu musí dojít k překrytí dvou krajních vln plechů.



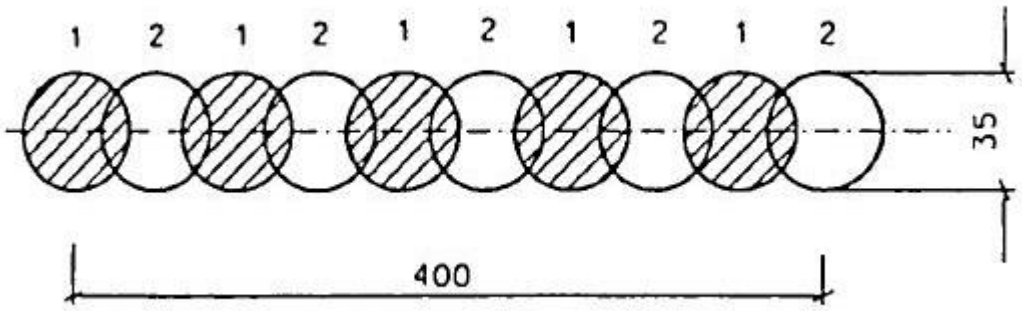
Obr. 9 – Princip zarážení izolačních plechů do zdiva (HW systém)[9]

Výhodou této metody je rychlost, nízká prašnost při provádění a vysoká životnost vložené hydroizolace. Nevýhodou je cena nerezových plechů. Vliv rázů může mít negativní vliv na statiku stavebního objektu. Další nevýhodou je nemožnost využití této metody u zdiva s nepravidelnou horizontální spárou a také to, že při napojování plechů můžou vznikat netěsnosti.

- **Metoda MASSARI**

Tato mechanická metoda nevyužívá pro vložení nové hydroizolace průběžnou drážku, ale využívá soustavu účelově vyvrtaných otvorů. Vrty o průměru 35 mm se vrtají pomocí jádrových vrtáků. Šířka jedné řady se volí cca 400 mm. Získaný otvor je po vyčištění vyplněn polyesterovou pryskyřicí, ředidlem, oxidujícím katalyzátorem a plnivem (písek nebo mletý kámen). Tato směs v důsledku okolní teploty polymeruje a nabývá na pevnosti. Po několika hodinách je již schopna unést požadované zatížení a přistupuje se k vyvrtání mezivrstev. Krajní vrty musí vždy částečně zasahovat do vrtů prvních. Poté se proces vyplnění opět opakuje.

Výhodou této metody je vysoká účinnost, nízká prašnost a také to, že je ji možno provést téměř na jakémkoli druhu stavebního materiálu. Nevýhodou je však cena strojního zařízení a pomalý postup pracovní technologie. Další nevýhodou je chybějící přesah polyesterové vrstvy, na kterou by se hydroizolace jednoduše napojily. [9]



Obr. 10 – Schéma vrtů metody MASSARI prvního a druhého cyklu [9]

3.4.2 Infuzní – chemické metody

Principem této metody je vytvoření vodonepropustné bariéry ve zdivu pomocí chemických látek, které se napouští do zdiva. Látka proniká do pórů, kapilár a trhlin a zabraňuje dalšímu transportu vlínající vlhkosti nad tuto bariéru.

Chemické infuzní metody jsou progresivní novodobé sanační metody, které si našly své uplatnění v současné stavební praxi. Jejich předností jsou zejména snadná aplikace a malá časová náročnost. V praxi je někdy využívána i možnost injektáže celé plochy stěny, v případě nemožnosti provést vertikální hydroizolaci z vnější strany zdiva.

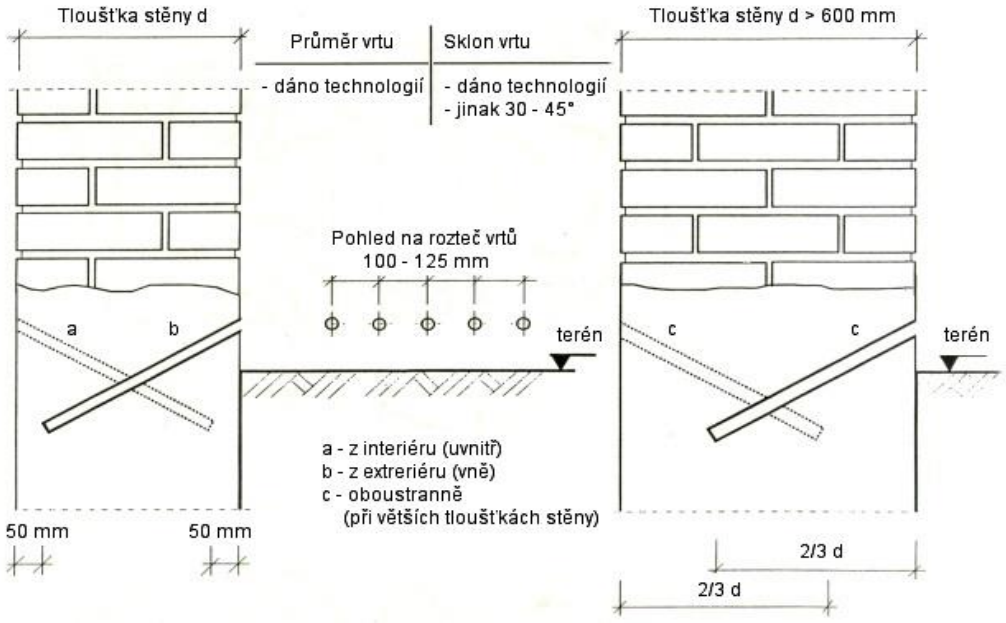
Na počátku je nutné v místě budoucí bariéry osekat omítku, aby po injektáži nedocházelo k vsakování injektážního roztoku do omítky a tedy zbytečným ztrátám. V plánovaném místě sanování se vytyčí vodorovná řada vrtů v jedné nebo dvou řadách nad sebou s prostřídáním. Poté se za pomocí vrtacího zařízení vyvrtají do zdi vrty. Hloubka provedených vrtů musí být vždy o 50 – 100 mm kratší než je celková tloušťka zdiva a průměr vrtu se volí v rozmezí 15 - 42 mm dle pokynů výrobce injektážní látky. Podle druhu a jeho poréznosti zdiva volíme rozteč mezi středy vrtů 100 – 150 mm. Vzdálenost volíme vždy takovou, aby se napouštěná látka jednotlivých vrtů vždy propojila s napuštěnou látkou ze sousedního vrtu. Na vzdálenost vrtů má tedy největší význam schopnost penetrace injektážní látky v daném materiálu. Vrty se provádějí vodorovně nebo pod sklonem 15 – 45 º. Vyvrtané otvory jsou vyčištěny stlačeným vzduchem a poté je do vrtů aplikován samotný chemický injektážní roztok. Po ukončení infuze jsou vrty uzavřeny cementovou maltou dle zvolené metody a statických podmínek.

Podle způsobu aplikace injektážní hmoty můžeme rozdělit injektáže na beztlakové, s hydrostatickým přetlakem a tlakové. [9]

- **Beztlaková injektáž**

Beztlakové injektáže jsou v současnosti nejčastějším voleným způsobem při provádění chemických injektáží vlhkého zdiva. Pro tento způsob aplikace se volí nejčastěji nízkoviskózní roztoky, které mají lepší schopnost penetrace do stavebního materiálu. Maximální osová vzdálenost mezi vrty je u této injektáže 150 mm, avšak obvykle se volí 100 – 125 mm. Tato vzdálenost je udávána výrobcem a volí se dle nasákavosti zdiva a schopností penetrace infuzního roztoku. Průměr vyvrtaných otvorů je volen 30 – 35 mm. Vrty vrtáme do hloubky cca o 50 mm menší než je celková tloušťka zdiva. Sklon vrtů je volen v rozmezí 30 – 45 º a je nutno dodržet, aby vrt procházel minimálně jednou spárou zdiva. U novodobých chemických infuzních gelů, u kterých je zajištěno výrobcem, že gel nebude vytékat z vrtů, je možno provést vrty též vodorovně. Při tloušťkách zdiva nad 600 mm a v rozích zdiva je vhodnější provádět vrty z obou stran. Hloubka vrtů by pak měla být minimálně 1/2 až 2/3 tloušťky zdiva. Poté je provedena samotná beztlaková injektáž

infuzního prostředku. U děrovaných cihel nebo zdiva s většími dutinami nastává problém s únikem injektážního roztoku. Taková zdiva se před aplikací injektáže musí speciálně zaopatřit vyplněním dutiny tekutým, nesmrštivým a se zdivem slučitelným materiálem za přítomnosti pojiva, aby injektážní roztok nemohl unikat ze zdiva. Minimální doba plnění infuzního roztoku je 24 hodin, avšak obvykle se injektáž provádí do doby, až je ve zdivu vytvořen souvislá vodorovná clona, zabraňující vzlínání kapilární vlhkosti. Nevýhodou této metody je obtížné utěsnění hadičky v ústí otvoru při plnění vrtu. Výhodou je jednoduchost aplikace a nenáročnost na strojní techniku, která je zapotřebí u tlakové injektáže. [12]



Obr. 11 – Beztlaková injektáž [18]

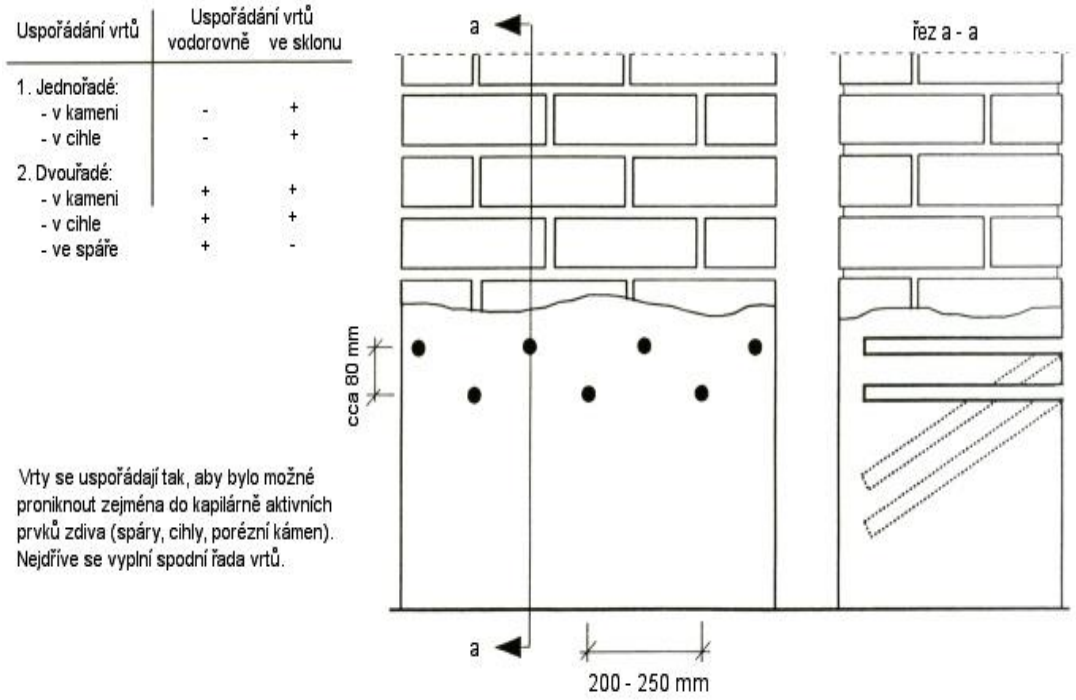
- **Injektáž s hydrostatickým přetlakem**

Princip i příprava se shoduje s beztlakovou injektáží, jen vrty je možno provést v menším sklonu. Ústí hadičky se osadí na počátek vrtu a vše se dokonale utěsní pomocí maltové ucpávky. Nádoby s injektážním roztokem jsou umístěny 0,5 – 2,0 m nad vrtem. Přetlak vyvozuje výškový rozdíl hladin mezi nádobou a vrtem. Využívá se pouze u méně porézního zdiva. Nevýhodou této metody je pracnost a obtížnost utěsnění hadičky maltou v ústí vrtu. [9]

- **Tlaková injektáž**

Tento způsob aplikace se provádí zejména u silně zavlhlého zdiva. Průměr vrtů je volen 10 – 18 mm. Osová vzdálenost mezi středy vrtů je obvykle 100 – 125 mm avšak za určitých podmínek, doložených výrobcem injektážní hmoty, může být i větší. Při tlakové injektáži jsou

otvory vyvrtány vodorovně do ložné spáry zdiva nebo pod úhlem menším než 30 º. Otvory jsou vyvrtány do hloubky cca 50 mm od protější strany zdiva. U velmi nasákavého zdiva se vyvrtají vrty ve dvou řadách. Při tloušťce zdiva větší než 600 mm musí být vrty vyvrtány a tlaková injektáž provedena z obou stran zdiva. Pokud jsou ve zdivu dutiny, trhliny, příp. otevřené spáry do 5 mm je třeba provést (před samotnou injektáží infuzního prostředku) vyplnění těchto netěsností tekutou maltou za pomoci injektážní trysky pod tlakem cca 10 barů. Po zatuhnutí je provedena injektáž infuzního roztoku rovněž pod tlakem cca 10 barů. Po 24 hodinách jsou z vrtů vytaženy pomocné hmoždinky pro opakované plnění roztoku a vrty se uzavřou. Výhoda oproti beztlakové injektáži je pouze v rychlosti a manipulaci provádění, vyššího stupně nasycení kapilár však dosaženo není. [12]



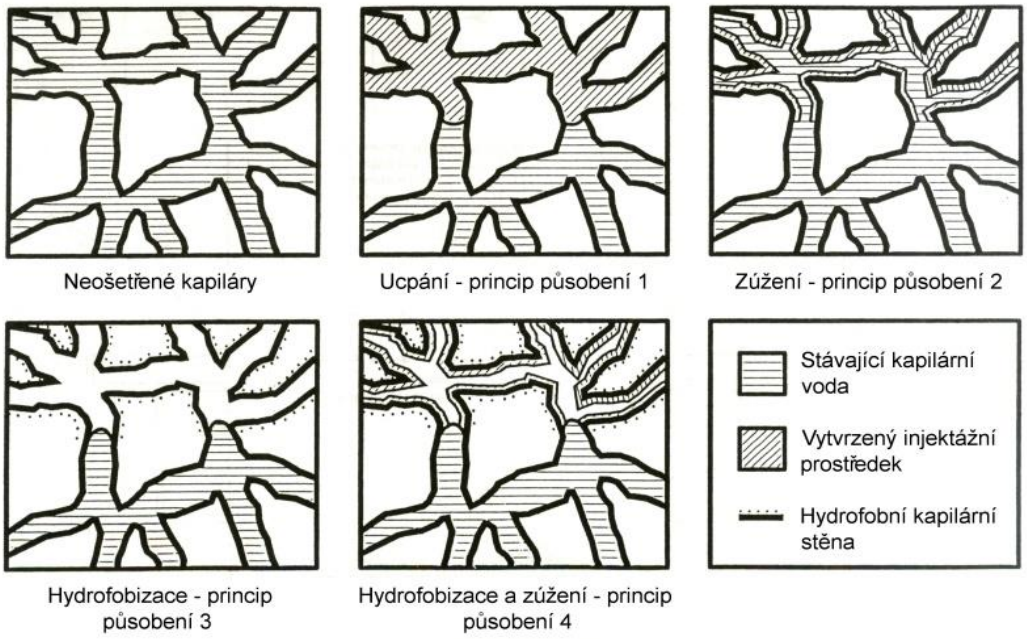
Obr. 12 – Tlaková injektáž [18]

- **Funkční principy injektáže**

Injektážních prostředků, dostupných na trhu, je hned několik typů. Liší se od sebe chemickým složením, způsobem aplikace apod. Proto je nutný pro dostatečnou funkčnost injektáže správný výběr injektážního prostředku. Každý prostředek má vymezenou oblast použití, důležité jsou zejména údaje o tom, jestli je prostředek vhodný pro beztlakovou či tlakovou injektáž, údaje o maximálních osových vzdálenostech mezi vrty pro jednotlivé druhy stavebních materiálů, přibližná spotřeba prostředku na běžný metr vrtu atd. Dalším

důležitým údajem pro použitelnost prostředku je určení horní hranice stupně vlhkosti zdiva. Účinky jednotlivých prostředků jsou ve vlhkém prostředí rozdílné a od určitého stupně vlhkosti zdiva již nelze vpravit do pórů materiálu dostatek injektážního prostředku (póry jsou z velké části zaplněny vodou). [9]

- **Princip působení chemických clon ve zdivu**



Obr. 13 – Principy působení snižování vlhkosti – schematické zobrazení [18]

Dle M. Balíka (viz *Obr. 13*) [5] můžeme hlavní principy chemických clon ve zdivu rozdělovat následovně:

utěsnění kapilár – Penetrovaná látka má v pórech materiálu za úkol ztuhnout do nepropustné formy a tím póry ucpat. Do této skupiny lze zařadit i zarůstání pórů krystaly CSH.

zúžení kapiláry – Penetrovaná látka zužuje průměr kapilár a tím snižuje množství vody nasáté kapilárami. Vysychání je docíleno tím, že odpařené vody z povrchu je více než vody dopravované do materiálu.

hydrofobizace – Penetrovaná látka má za úkol zhydrofobizovat stěny pórů a zamezit tak kapilárnímu vzlínání vody. V současnosti je tato metoda nejrozšířenější i z důvodu, že struktura a průřez pórů zůstává téměř nezměněný a metodu lze po snížení účinnosti aplikovat znovu.

kombinace jednotlivých principů – např. hydrofobizace a zúžení apod.

- **Dělení injektážních prostředků dle chemické báze**

Pro injektáže se používají jednosložkové nebo vícesložkové injektážní hmoty, jako jsou např.: akryláty, epoxidové pryskyřice, parafíny, polyuretanové pryskyřice, silikáty, silany, silikonáty, silikonové emulze, siloxany. Princip působení a příklady injektážních prostředků jsou uvedeny v Tab. 7. [5]

Tab. 7: Přehled druhů injektážních materiálů a jejich působení v pórech zdiva [10]

Typ	**Funkce**
Vodní suspenze	Zúžení pórů
Cementové suspenze	
Mikrocementové suspenze	
Jemné suspenze	
Vodní roztoky	Zúžení pórů a jejich hydrofobizace
Alkalisilikáty	
Metylsilikonáty	
Více alkalické silikonáty	
Vodní emulze	Hydrofobizace pórů a jejich zúžení
Silikonové emulze	
Bitumenové emulze	
Roztoky v organických rozpouštědlech	Hydrofobizace pórů
Siloxanové roztoky	
Roztoky silikonových pryskyřic	
Etylester kyseliny křemičité	
Roztoky syntetických pryskyřic	
(Převážně polyuretany a akryláty)	
Bitumenové roztoky	
Taveniny	Vyplnění pórů
Parafíny	
Bitumen	

- **Volba injektážního prostředku**

Každý druh injektážního prostředku má svoji oblast použití. Tato oblast využití musí být výrobcem přesně definována. Před samotným použitím daného prostředku je třeba seznámení s jeho chemickou bází, abychom byli schopni využít jeho funkční působení. Také stavební materiál injektovaného zdiva má velký podíl na výběru injektážního prostředku. Obdobně tak i způsob aplikace. Některé injektážní prostředky jsou vhodné pro beztlakovou injektáž a některé zase pro tlakovou injektáž. Velmi důležitým faktorem, který je nutno před sanací zkontrolovat, je maximální vlhkost stavebního materiálu, do které je daný injektážní prostředek ještě možno využít. [9]

3.4.3 Vzduchové provětrávací dutiny

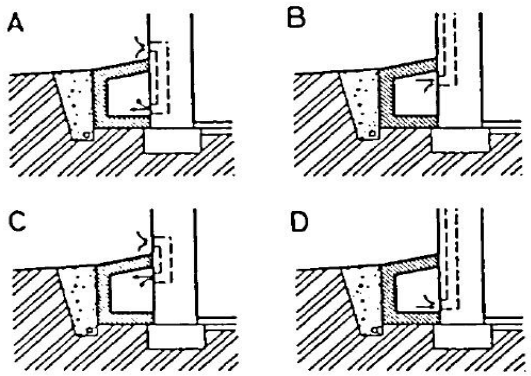
Základním principem těchto metod je oddělení zdroje vlhkosti od stavebního materiálu konstrukce. K tomuto účelu se využívá vzduchových provětrávacích dutin. Vhodnou cirkulací vzduchu můžeme dosáhnout toho, že vzduch proudící okolo vlhkého materiálu přebírá částečně jeho vlhkost a odnáší ji z konstrukce do okolního ovzduší. Novodobou metodou je vytvoření umělé cirkulace vzduchu za pomoci ventilátorů. Tato cirkulace je jistě účinnější, avšak je závislá na lidském faktoru a kontrole její správné funkčnosti. S rozvojem asfaltových hydroizolačních pásů bylo využívání těchto metod velmi omezeno. U objektů s provedením této metody sanace vlhkého zdiva navíc hrozí, že při případných přístavbách či rekonstrukcích bude na tento vzduchový systém narušen nebo dokonce úplně zrušen či zasypán. V současnosti se tyto metody využívají spíše jako doplnění jiných sanačních metod vlhkého zdiva.

- **Provětrávané štoly**

Principem štol je vytvoření vzduchové dutiny, jež je chráněna před účinky pozemní vlhkosti. Pomocí přívodu vzduchu a odváděcích komínů je docíleno komínového tahu a tím co největšího odvodu vlhkosti z konstrukce.

Vytvořená štola by měla zasahovat co nejvíce pod úrovní zeminy, nejlépe až k základové spáře. Po výkopu je vhodné zdivo zcela obnažit od omítky, spáry vysekat alespoň do hloubky 20 mm a nechat zdivo samovolně vysušit. Při provádění štoly je nutno vytvořit široký výkop, který je vhodné využít i pro vybudování samotné štoly tak, aby byla průlezná a bylo možné její kontrolování v budoucnosti. Po vybudování štoly je vhodné na její vnější straně

vybudovat drenážní kanálek pro odvod vody. Větrací průduchy štoly vytvoříme nejlépe z umělohmotných trub. Celkové množství nasávacích otvorů a odváděcích komínů se odvíjí od celkové vysušované plochy a také na množství koutů a rohů. Základním principem fungování vysušování této metody je zajištění proudění vzduchu ve všech částech štoly.



A Přívod vzduchu u dna štoly

B Odvod vzduchu pod stropem štoly

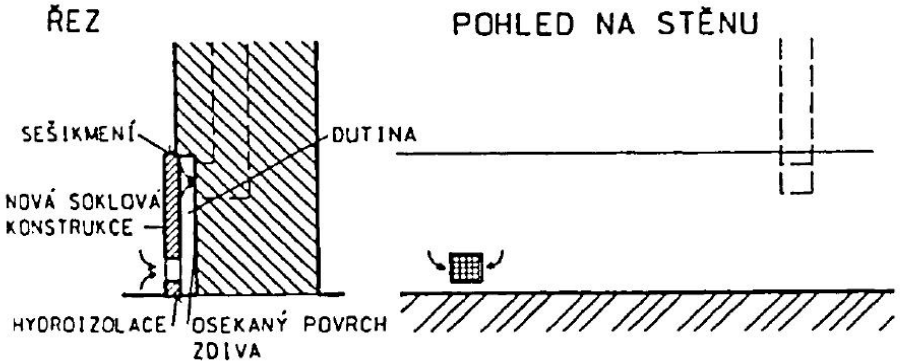
C Přívod vzduchu pod stropem štoly

D Odvod vzduchu u dna štoly

Obr. 14 – Princip funkce sanační štoly s přívodem a odvodem vzduchu [9]

- **Provětrávací sokly**

Princip je stejný jako u provětrávané štoly, avšak zde je vzduchová dutina vytvořena mezi stavebním objektem a vytvořeným soklem. Obvykle je nutno původní sokl konstrukce osekat a vyzdít znovu. Zdivo v pozadí soklu je třeba důkladně osekat, očistit a nechat obnažené. Soklová přizdívka musí být vždy založena na hydroizolaci. Princip cirkulace vzduchu je obdobný jako u štoly. Při použití této metody lze využít i tzv. zavěšeného soklu, který nám opět vytvoří potřebnou dutinu, ale vzniká u něj štěrbina pod i nad soklovou deskou. Tyto štěrbiny se mohou však v praxi snadno ucpávat, což způsobuje značné problémy.



Obr. 15 – Princip soklové provětrávací dutiny [9]

- **Anglické dvorky**

Anglické dvorky umožňují snadnou difúzi vodních par ze zdiva. Zabraňují přímému styku zeminy s částí zdiva pod úrovní země. Oproti štolám mají anglické dvorky však řadu nevýhod. Když pomineme částečnou nevzhlednost, která snižuje celkovou estetičnost objektu, pak anglické dvorky nezabraňují průniku srážkové vody a musí se často čistit od usazených nečistot. Avšak oproti metodě s provětrávacími sokly nepotřebuje zřízení odvodových komínů, jejichž výstavba je často pracná. V současnosti se v praxi vyskytují i řešení, kdy je anglický dvorek zasypán štěrkem. Štěrk má dobrou propustnost par a malou kapilární vzlínavost, a proto je jeho styk se stavebním objektem výhodnější než s okolní zeminou objektu.

- **Provětrávané podlahy**

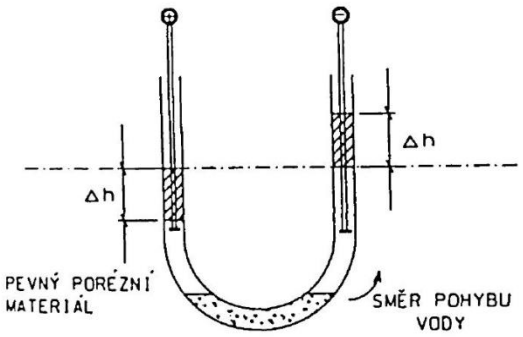
V České republice je tato metoda dosti opomíjená, avšak mělo by se na ni brát většího zřetele. Pokud je nová hydroizolace položena na neizolovanou stávající podlahu, dochází v průběhu několika let k nejen k zničení všech organických materiálů pod izolací, ale i k transportu vlhkosti z vodorovné konstrukce do vertikálních konstrukcí. Proto je třeba i při izolaci podlahy dbát na vytvoření soustavy kanálků a komínků, které zajišťují přívod a odvod vzduchu. Ideálním řešením je vytvoření samostatné nové nosné konstrukce podlahy, avšak toto řešení je i velmi nákladné. Další alternativou je použití podlahových dílců např. firmy WEIDMAT, jež mají ve své struktuře zabudované umělohmotné kopulky (hrníčky), které zajišťují dostatečné proudění vzduchu v podlaze.

- **Vzduchové dutiny na interiérových stranách stěn**

Tato metoda se využívá pouze pro optické zmizení vlhkosti, za pomoci obkladu nebo předstěny a dodržení určitých konstrukčních pravidel. Vlhkou stěnu nemůžeme pouze obyčejně překrýt např. keramickým obkladem či olejovým nátěrem. Tím bychom sice vlhkost na čas opticky zakryli, ale časem by vlhkost vystoupala nad tyto provedené úpravy. Proto i při provádění interiérových úprav je třeba dbát na vytvoření vzduchové provětrávané dutiny s nasávacími a výdechovými otvory. Aby nedocházelo ve vzduchové dutině ke kondenzaci vody, je vhodné stěnu omítnout hydrofobní omítkou, která má malou tepelnou vodivost. [9]

3.4.4 Elektrofyzikání metody

U těchto metod je využíváno tzv. elektrokinetického jevu, který vychází ze skutečnosti, že voda v pórovitých tělesech se dává do pohybu, působí-li na toto těleso stejnosměrný elektrický proud.



Obr. 16 – Princip elektroosmotického jevu [9]

Princip elektroosmotického jevu jako první popsal prof. F. F. Reuss z Moskevské univerzity roku 1807. K závěrům přišel při sledování U trubice naplněné vodou s okolím z práškového křemene. Po zavedení stejnosměrného proudu hladina vody u záporného pólu vystoupala výše a naopak hladina vody u kladného pólu sestoupila níže oproti původní hladině. Pro sanační praxi je důležitý kladný zeta potenciál a kladné částice u stěny kapiláry vzniklé prouděním tekutiny kapilárou. Pomocí stejnosměrného napětí docílíme toho, že kladné náboje (spolu s nimi molekuly vody) putují k anodě.

Výhodou těchto metod je to, že nedochází k mechanickému zasahování do zdiva a tím odpadá nutnost statického posouzení. Metody nenarušují vzhled fasády. Do zdiva se nezanášejí žádné nové chemické prvky, jako u chemických infuzí, které by mohli nenávratně ovlivnit chemismus a znehodnotit zdivo. Je možno urychlit celý proces vysoušení přídavným napětí.

Nevýhodou těchto je metod nevhodnost použití ve zdivu s velkým obsahem soli nebo při obsahu velmi tvrdé vody. Metody aktivní elektroosmózy nelze využívat ani tam, kde je ve zdivu použita ocelová armatura, která by s elektroosmózou vytvořila vlastní krátké spojení. Ani u starších staveb, kde pH zdiva je menší než 6 tato metoda nelze využít. Dále se nedoporučuje používat tyto metody tam, kde se vyskytuje vlhkost vytvořená kondenzací vodní páry. Metodu nelze použít v případě tlakové vody.

- **Pasivní elektroosmóza**

Při pasivní elektroosmóze využíváme zabudovaných elektrod ve vlhkém zdivu a elektrod zabudovaných do zeminy. Elektrody jsou spolu nakrátko propojeny. Jsou nejčastěji vyrobeny z oceli nebo mědi. Mezi těmito elektrodami je vytvořeno slabé elektrické napětí (0,2 – 0,5 V). Životnost nainstalovaných soustav elektrod se udává 1 – 3 roky, než dojde ke zkarbonizování barického maltového lože, ve kterém je elektroda uložena ve vlhkém zdivu.

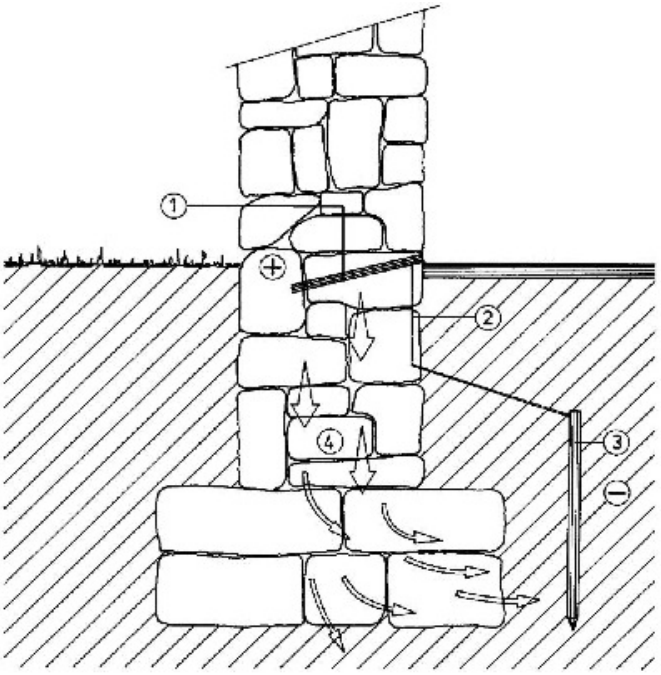
- **Galvanoosmóza**

Rozdíl od pasivní elektroosmózy je ten, že elektrody zabudované ve zdivu a elektrody zabudované v zemině jsou z různých materiálů. Působením těchto materiálů ve vlhkém prostředí je vytvoření tzv. galvanického článku, který je zdrojem elektrického napětí. Toto vzniklé napětí je však velmi malé. Na tuto metody působí rušivě bludné proudy a napětí elektrické trakce.

Vzhledem na nízkou účinnost a popsané nedostatky se galvanoosmóza i pasivní elektroosmóza dnes v praxi již téměř nevyužívá.

- **Aktivní elektroosmóza**

Aktivní elektroosmóza odstraňuje nedostatky předchozích metod tím, že je zde přidaný zdroj elektrického napětí, který působí proti vzlínající vlhkosti.



1 Pásová elektroda - anoda
2 Připojovací kabel
3 Zemní elektroda - katoda
4 Transport kapilární vlhkosti

Obr. 17 - Schéma aktivní elektroosmózy [16]

Životnost závisí na kvalitě použitého materiálu. Jako materiál pro anodickou (kladnou) elektrodu se v současnosti nejčastěji používají modifikace uhlíku. V praxi jsou často elektrody sestaveny jako pásové vodiče z obou stran zdiva. Jako elektrody se v těchto případech mohou použít vodivé nátěry či umělohmotné vodivé nátěry. Další možností je uchycení elektrod do předem vyvrtaných otvorů. Pro tuto možnost vznikl název tyčové elektrody. Pokud elektrody zasahují do vyvrtaných otvorů ve zdivu vytvořenými smyčkami, nazýváme ji smyčková elektroda. Katodické (záporné) elektrody jsou v zemině nejčastěji zabudované jako tyčové nebo plošné. Napětí dodávané do této soustavy elektrod se používá obvykle 1 – 10 V.

- **Kombinovaná aktivní elektroosmóza s chemickou injektáží**

Nevýhodou aktivní elektroosmózy je její zmenšující se účinnost pro zvyšující průměry pórů. Kombinací s chemickou injektáží lze tento problém odstranit tím, že póry o větším průměru utěsníme injektážní hmotou. Tato hmota musí být elektrovodivá, aby mohla být aktivní elektroosmóza využita pro malé póry zdiva. [9]

3.4.5 Magnetokineze

Magnetokinezi můžeme nazývat též metodou elektronickou – vysokofrekvenční. Do objektu umístníme přístroj, který vysílá elektromagnetické vlny. Jako zdroj je využito napojení na elektrickou síť nebo může být také využito potenciálu magnetického pole. Samotná magnetokineze je složena z magnetoosmózy a magetoforézy. Magnetoosmóza využívá vysokofrekvenčního, přesně definovaného, slabého elektromagnetického pole orientaci elektrického potenciálu ve zdivu. Princip je pak stejný jako u elektroosmózy a kapilární vlhkost je tlačena ve zdivu směrem dolů. Magnetoforéza pomocí usměrněného elektromagnetického pole vyvozuje pohyb jemných částic (např. solí). Některé zařízení tedy zdivo nejen odvlhčují, ale i odsolují. Odsolování probíhá formou zachycení soli ve staré omítce na povrchu zdiva. Tato omítka se poté otlouká. V České republice je nejrozšířenější zařízení pro tuto metodu zařízení od firmy AQUAPOL. Dosah přístroje se uvádí 6 – 17 m ve volném prostředí, propustnost pevnými látkami cca 1 – 4,5 m.

Velkou výhodou této metody je jednoduchost její instalace a také šetrnost ke stavbě, kdy tato metoda nezasahuje do statiky konstrukce. Nevýhodou je špatná účinnost u zdiva, které je v trvalém kontaktu se zeminou. Metodu nelze použít v případě tlakové vody. Vliv na zdraví lidského organismu nebyl dosud doložen. [9]

3.4.6 Větrání objektů

Základní hygienické předpisy nám udávají pro obytné místnosti cirkulaci vzduchu a jeho výměnu alespoň 50 % za hodinu. U nebytových prostor je tato hranice nižší, ale vždy by mělo alespoň k částečné výměně vzduchu docházet. Při dnešní tendenci energetických úspor jsou okna i dveře dokonaleji utěsněna, což významně ovlivňuje infiltraci vzduchu do stavebního objektu. V moderních domech jsou sice vybudovány umělé cirkulace vzduchu, ale pokud člověk tyto prostředky, ať už vědomě či nevědomě, nespustí, pak může docházet ke zvýšení vlhkosti v interiéru. Dobré větrání celého objektu, zejména suterénních místností, by měla být řešena již v projektu nové stavby a navržena tak, aby cirkulace vzduchu nebyla závislá na lidské činnosti. Časté větrání stavebního objektu téměř vždy napomáhá vysušování stavby. [9]

3.4.7 Terénní úpravy

Terénní úpravy zabraňují vodě, která se hromadí v důsledku např. dešťů či svahování, aby přišla do kontaktu se stavebním objektem. Je třeba, aby tato voda byla odvedena co nejdále od stavebního objektu. Tato skutečnost je téměř vždy zohledněna při terénních úpravách nového objektu, avšak při využívání objektu může nastat změna situace a voda místo toho, aby odtékala, tak je přiváděna ke stavbě. Při výzkumu bylo zjištěno, že až 30 % zdrojů příčin vlhkosti staveb je zapříčiněno špatným odvodem vody od stavebního objektu. Také nevhodné navýšení terénu v okolí stavby bez navýšení svislé hydroizolace může být novým zdrojem vlhkosti stavebního objektu. [9]

3.4.8 Pulzující podpovrchová voda

Při požití štěrku jako zásyp těsného okolí stavebního objektu, může dojít k propouštění vody do podzákladí a např. při prudkém dešti či tání sněhu se tato stavba ocitá ve vaně s vodou. Běžná zemní hydroizolace proti zemní vlhkosti tomuto náporu vody neodolá. K těmto událostem dochází nepravidelně, z čehož pramení název pulzující podpovrchová voda. V těchto případech se problém řeší provedením drenážního systému v podzákladí, který je nutno zaústit přímo do kanalizace. [9]

3.4.9 Povrchové úpravy

Při zvýšené vlhkosti je též možno využít upravených stavebních materiálů na povrch zdiva. Tyto úpravy se používají buď samostatně, nebo jako dodatečná úprava povrchu po provedení některé z přímých metod sanace vlhkého zdiva. Zvolená povrchová úprava může povrch z hlediska prostupu vodních par buď utěsnit, anebo naopak mnohonásobně zvětšit.

- **Utěsnění povrchů zdiva**

Toto opatření se využívá v návaznosti na plošné izolace podlah. Aplikací povlaků, profilovaných sanačních fólií či omítkových utěsňovacích ploch dochází k utěsnění povrchů zdiva. Tyto opatření se používají pouze tam, kde technické podmínky nedovolují jiná řešení, neboť způsobují uzavření vlhkosti uvnitř zdiva. Vlhkost tedy kumuluje do jiných oblastí (zpravidla výše). I přes tento fakt jsou utěsňovací povlaky při sanaci vlhkého zdiva nedílnou součástí.

- **Sanační omítky**

Sanační omítky slouží pro omítnutí zdiva se zvýšenou vlhkostí anebo zdiva se zvýšenou sanilitou (agresivní soli jsou ukládány v určitých vrstvách a nedostávají se na povrch omítky). Téměř vždy tato metoda doplňuje některou z přímých sanačních metod vlhkého zdiva. Základní vlastností sanačních omítek je vysoká poréznost a propustnost pro vodní páry. Sanační omítky jsou vyráběny jako suché maltové směsi o různé zrnitosti. Jelikož české normy neudávají technické požadavky na kvalitu sanačních omítek, využívají se v praxi k tomuto účelu fyzikální hodnoty německé normy WTA 2-9-04. Firma provádějící sanační zásah je povinna zkontrolovat, zda má daná omítka certifikát WTA. Projektant sanačního opatření však rozhoduje o typu omítky (malta na cementovém základě, na vápenném základě apod.) a o skladbě omítky (volí jednu nebo dvě vrstvy sanační omítky, zda bude použit sanační podklad)

U některých typů sanačních omítek dochází ve složení k velké podobnosti na historické omítky. Z toho důvodu je použití těchto omítek vhodné i při rekonstrukcích historických památkových budov.

Tab. 8: Požadavky na sanační omítku dle WTA [19]

	Vlastnosti	Jednotky	Požadavek
ČERSTVÁ OMÍTKA	Konzistence	cm	17,0 + 0,5
	Hustota ρ_2	kg/dm3	-
	Obsah pórů	%	> 25
	Vodoodpudivost	%	> 85
PEVNÁ OMÍTKA	Hustota ρ_1	kg/dm3	< 1,4
	Faktor difuzního odporu	-	< 12
	Pevnost v ohybu β_{BZ}	N/mm2	-
	Pevnost v tlaku β_D	N/mm2	1,5 - 5
	Poměr mezi pevnostmi β_D/β_{BZ}	-	< 3
	Kapilární vzlínavost w_{24}	Kg/m2	> 0,3
	Hloubka vniknutí vody h	mm	< 5
	Poréznost	%	> 40
	Odolnost solím	-	trvalá

Tab. 9: Opatření v souvislosti se stupněm zasolení [6]

Stupeň zasolení	Opatření	Tl. vrstvy (cm)
nepatrné	1. podhoz	≤ 0,5
	2. sanační omítka - WTA	≥ 2
střední až vysoké	1. podhoz	≤ 0,5
	2. sanační omítka - WTA	1 - 2
	3. sanační omítka - WTA	1 - 2

- **Barevné povlaky fasád**

Barevné povlaky fasád se používají jako finální úprava po dokončení odvlhčovacích opatřeních. Volba nátěru se musí řídit danými zásadami. Na nové omítnuté plochy, které nejsou opatřeny sanační omítkou, můžeme použít téměř jakýkoli typ nátěrové hmoty. To stejné platí i pro plochy, kde zůstaly staré silikátové nebo vápenné nátěry. Plochy, na kterých byl použit disperzní nátěr, lze překrýt pouze opět disperzním nátěrem nebo silikonovými hmotami. Plochy opatřené sanační omítkou lze překrýt pouze nátěrem s co nejnižším difúzním odporem, což splňují např. nátěry silikátové nebo silikonové. [6]

3.5 VLASTNOSTI STAVEBNÍCH MATERIÁLŮ

Následující kapitola bude pojednávat o vybraných stavebních materiálech, které byly testovány při tvorbě praktické části této diplomové práce.

3.5.1 Cihlářské výrobky

Cihlářské výrobky spadají pod keramické výrobky vyráběné zpracováním cihlářské hlíny a jílu. V České republice patří mezi nejpoužívanější stavební materiály. Tuto pozici si vysloužily zejména díky zdícím výrobkům a střešní krytině. Výrobní směs obsahuje kromě již zmíněné plastické zeminy také ostřiva (např. písek, škvára nebo cihelná drť) a taviva (např. uhelný prach, piliny z tvrdého dřeva, křemelina nebo polystyrenové granule).

Typický vypálený cihelný střep (nebo také cihlářský výrobek) má načervenalou barvu. Tuto barvu udávají oxidy železa obsažené v cihelném střepu. Dalším typickým znakem je hmotnostní nasákavost přes 20 %. Díky své pórovitosti jsou cihlářské výrobky schopny přijímat a uvolňovat vlhkost. Další vlastností je nehořlavost a snadná recyklovatelnost výrobků po skončení své životnosti. Cihlářské výrobky jsou také považovány za dobrý zvukový izolant.

Fyzikální vlastnosti cihlářských výrobků jsou závislé na množství vstupních surovin, na intenzitě výpalu a způsobu tváření. Orientační hodnoty základních fyzikálních vlastností cihelného střepu jsou uvedeny v Tab. 10. [4]

Tab. 10: Orientační fyzikální vlastnosti cihelného střepu [4]

Vlastnost	Jednotka	Hodnota
Hustota	$kg.m^{-3}$	2600 - 2700
Objemová hmotnost (suchý stav)	$kg.m^{-3}$	1600 - 2200
Hmotnostní nasákavost	%	20 - 25
Objemová nasákavost	%	36 - 55
Modul pružnosti	MPa	8000 - 12000
Součinitel tepelné vodivosti	$W.m^{-1}.K^{-1}$	0,65 - 0,80
Měrná tepelná kapacita	$kJ.kg^{-1}.K^{-1}$	0,9 - 1,1
Součinitel délkové teplotní roztažnosti	K^{-1}	$5{,}0.10^{-6}$
Faktor difúzního odporu	-	5 až 10

3.5.2 Stavební kámen - pískovec

Kámen byl pro stavební účely využíván už od pradávna. Jedná se o přírodní zdroj materiálu, který člověk svou prací účelně přeměňuje na stavební materiál. Pro stavební materiál se využívají horniny, které nejlépe odolávají účinkům vnějších vlivů, čímž mají velkou odolnost vůči poškození. Kameny jsou opracovávány do tvarů, ve kterých budou plnit svoji funkci. Neopracované kameny či jen hrubě opracované kameny se nazývají lomařské výrobky. Významnou vlastností stavebního kamene je velká pevnost v tlaku a hutnost materiálu. V současnosti se stavební kámen jako konstrukční materiál již téměř nevyužívá, protože se svými vlastnostmi nemůže rovnat betonu a oceli, avšak z hlediska architektonického je stavební kámen nenahraditelný. Proto je jeho současné využití zejména při rekonstrukcích architektonických památek. Mezi nejčastěji využívané horniny patří např. žula, pískovec, vápenec, mramor a opuky.

Pískovec patří k nejpoužívanějším kamenům využívaných ve stavebnictví. Jedná se o usazenou horninu nejčastěji obsahující křemenná zrna spojená tmelem (křemičitým, vápnitým, kaolinitickým, železitým, jílovitým, atd.). Z důvodů vyšších pevností v tlaku jsou pro stavební účely nejvhodnější pískovce s tmelem křemičitým, vápnitým nebo kaolinitickým. Dle povahy tmelu se také odvíjí barva pískovce, obsah $CaCO_3$ způsobuje bělavé zabarvení, obsah Fe_2O_3 způsobuje načervenalou barvu, kdežto obsah hydroxidu železa zabarvuje pískovec do hněda. Fyzikálně-mechanické vlastnosti jsou uvedeny v Tab. 11. [4]

Tab. 11: Fyzikálně-mechanické vlastnosti pískovce [4]

Vlastnost	Jednotka	Hodnota
Objemová hmotnost	$kg.m^{-3}$	2000 - 2400
Pevnost v tlaku	MPa	30 - 80
Pevnost v ohybu	MPa	3,8
Nasákavost	%	4,0 - 8,5
Součinitel tepelné vodivosti	$W.m^{-1}.K^{-1}$	0,90 - 1,70
Měrná tepelná kapacita	$kJ.kg^{-1}.K^{-1}$	0,72
Faktor difúzního odporu	-	23

3.5.3 Zdící malta

Malta je kašovitá směs drobného kameniva, anorganického pojiva a vody, popřípadě přísad a příměsí. Tato směs po čase tuhne, tvrdne a nabývá na pevnosti. Malta se velmi často používá jako spojovací materiál stavebních prvků či dílců. Jako anorganické pojivo bývá

nejčastěji použito vzdušné vápno nebo cement, podle toho zdící malty označujeme jako vápenné malty (MV), cementové malty (MC) nebo vápenocementové malty (MVC). Dle množství obsahu zvoleného pojiva se odvíjí vlastnosti malt. Cementová malta nabývá větších pevností v tlaku než malta vápenná, avšak nastává větší riziko smršťovacích trhlin, protože cement málo váže vodu při vytvrzování. U vápenné malty dosahujeme menších pevností v tlaku, ale za to je pojivový systém pružnější.

U zatvrdlé zdící malty jsou nejdůležitějšími vlastnostmi pevnost v tlaku, soudržnost, absorpce vody, propustnost vodních par, objemová hmotnost, tepelná vodivost, reakce na oheň a trvanlivost. Konkrétní požadavky jsou uvedeny v normě ČSN EN 998-2. Pevnost v tlaku je deklarovaná výrobcem, pevnostní třídy jsou uvedeny v Tab. 12. Nasákavost zdících malt se obvykle pohybuje v rozmezí 2 – 8 %. Soudržnost se zdícími prvky je závislá na hodnotě počáteční smykové pevnosti. [4]

Tab. 12: Hodnoty pevnosti v tlaku v třídách malt [4]

Třída	M1	M2,5	M5	M10	M15	M20
Pevnost v tlaku [MPa] (ve stáří 28 dnů)	1	2,5	5	10	15	20

3.5.4 Pórobeton

Pórobeton je silikátový kompozit, který obsahuje až 80 % objemu uzavřených makropórů o velikosti 0,5 až 2,5 mm. Jedná se o nejvýznamnější druh přímo lehčeného betonu. Charakteristické vlastnosti pórobetonu jsou především lehkost, křehkost, pórovitost a kvalitní tepelně izolační schopnost. Zabarvení výrobků může být buď bílé, je-li plnivem křemičitý písek, nebo šedé, je-li plnivem elektrárenský popílek. Nejdůležitější fyzikální vlastností u pórobetonu je pevnost v tlaku a objemová hmotnost. Z toho důvodu jsou pórobetonové výrobky označeny dvojicí čísel s hodnotami těchto vlastností (např. označení P2-400, kde první číslo označuje minimální charakteristickou pevnost v tlaku 2 MPa a druhé číslo označuje maximální objemovou hmotnost 400 $kg.m^{-3}$, kterou musí mít pórobeton v suchém stavu). [4]

Pevnost v tlaku závisí na tvaru a vlhkosti zkoušeného tělesa. Při vlhkosti 6 %, kterou pískovcový pórobeton běžně dosahuje při ustálené vlhkosti, klesá pevnost v tlaku až o 15 % oproti pískovcovému pórobetonu ve vysušeném stavu. Z toho důvodu je u výrobků udávána

i pevnost v tlaku při tzv. praktické vlhkosti. Vlhkost pórobetonu neovlivňuje jen pevnosti, ale má vliv na všechny fyzikálně-mechanické vlastnosti. Při vzrůstající vlhkosti narůstá objemová hmotnost pórobetonu, čímž se i výrazně zhoršují tepelně-izolační vlastnosti (součinitel tepelné vodivosti λ se zvětšuje). Další fyzikálně-mechanické vlastnosti jsou uvedeny v Tab. 13. [11]

Tab. 13: Fyzikálně-mechanické vlastnosti pískových pórobetonových tvárnic [4]

Vlastnost	Jednotka	Pevnostní třída tvárnice				
		P2-400	P2-500	P4-500	P4-600	P6-700
Minimální pevnost v tlaku	MPa	2	2	4	4	6
Maximální objemová hmotnost (suchý stav)	$kg.m^{-3}$	400	500	500	600	700
Maximální objemová hmotnost (vlhkost 6 %)	$kg.m^{-3}$	550 - 450	650 - 550	550	660	850
Součinitel tepelné vodivosti (suchý stav)	$W.m^{-1}.K^{-1}$	0,1	0,12	0,12	0,15	0,18
Součinitel tepelné vodivosti (vlhkost 6 %)	$W.m^{-1}.K^{-1}$	0,12	0,15	0,16	0,18	0,22
Nasákavost	%	80	70	70	65	60
Faktor difúzního odporu	-	7,5	9,84	8,63	12,82	14,14

3.5.5 Shrnutí vlastností uvedených materiálů

Pokud porovnáme uvedené materiály po stránce jejich tepelně izolačních vlastností, pak nalezneme nejlepší hodnoty (tedy nejnižší součinitel tepelné vodivosti) u pórobetonu. S vysokou pórovitostí je ovšem spojena i jeho vysoká nasákavost, kterou má pórobeton z uvedených zdících materiálů nejvyšší. Nasákavost pórobetonu může při objemové hmotnosti 400 $kg.m^{-3}$ dosahovat až 80 %. Cihlářský střep, pískovcový stavební kámen ani zdící maltu již mezi kvalitní tepelné izolanty řadit nemůžeme. Cihla plná pálená a pískovcový stavební kámen jsou však díky vyšší objemové hmotnosti kvalitními zvukovými izolanty, čemuž se pórobeton nemůže rovnat. Ze zdících prvků vykazuje nejnižší nasákavost 4 – 8,5 % pískovcový stavební kámen, který dosahuje i nejvyšší pevnosti v tlaku 30 až 80 MPa.

4 PRAKTICKÁ ČÁST

Cílem praktické části této práce je navržení metody pro výběr optimálního injektážního gelu ve stavebních zdících materiálech. Metodika pro zvolení nejoptimálnějšího injektážního gelu je zobrazena na schématu níže (*Obr. 18*). Součástí řešení praktické části je také návrh metodiky testování zděných pilířů pórobetonu pomocí modifikované metody dle WTA. Výsledkem této práce je výběr nejlepšího injektážního gelu, z osmi dodaných gelů firmou Betosan s.r.o. pro výzkum, pomocí navržené metodiky. Na závěr praktické části diplomové práce budou shrnuty vlastnosti zvoleného injektážního gelu.

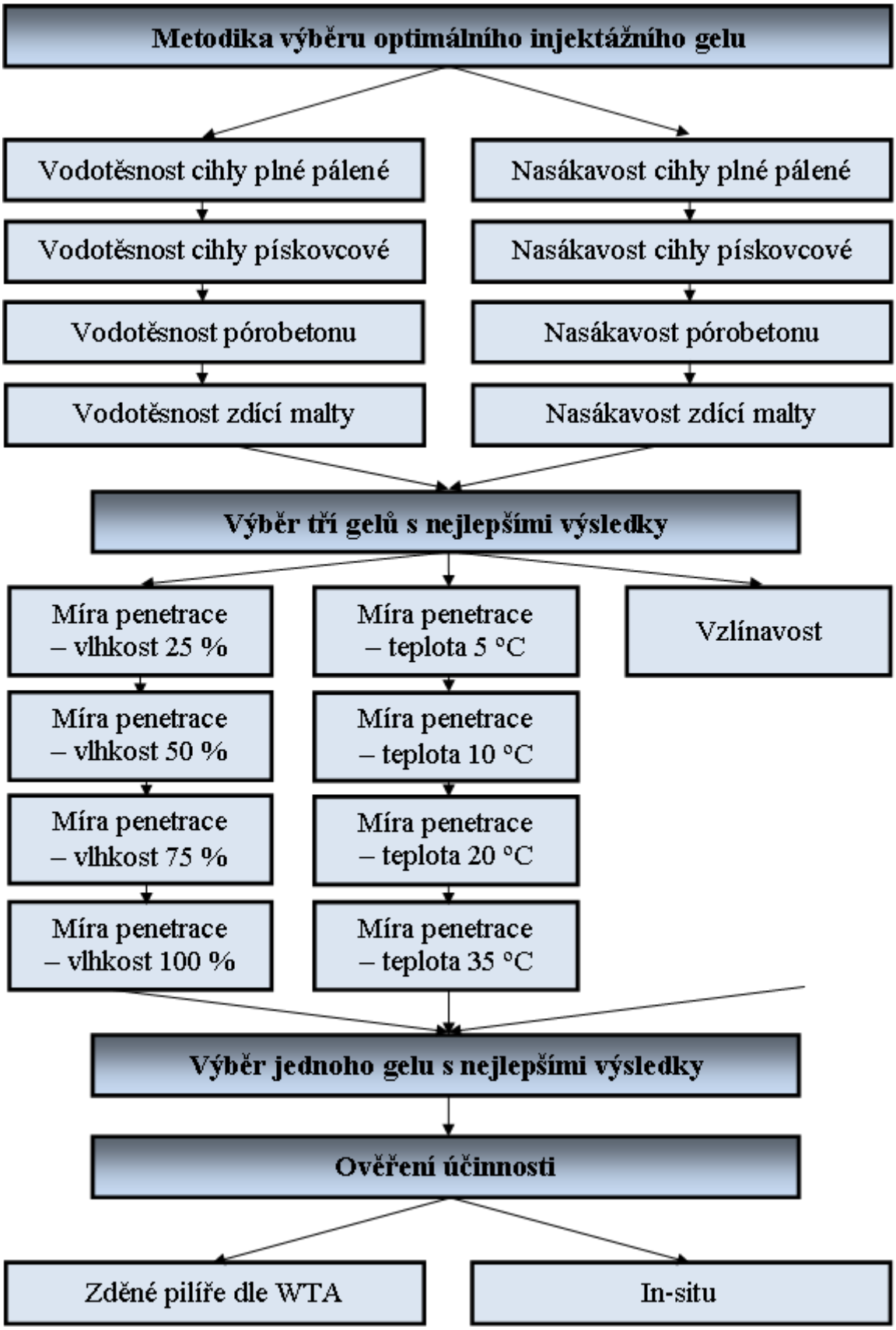
4.1 METODIKA ŘEŠENÍ PRAKTICKÉ ČÁSTI

Pro metodiku byla zvolena série laboratorních zkoušek, jejichž výsledky jsou podkladem pro multikriteriální optimalizační výběr injektážního gelu na alkylakoxylanové bázi s ideálními vlastnostmi pro použití v praxi. Pro testování injektážních gelů byly zvoleny tyto stavební materiály: cihla plná pálena, cihla pískovcová, pórobeton a zdící malta. Použité zkoušky jsou popsány v následujících podkapitolách.

Pro ověření účinnosti vybraného nejlepšího injektážního gelu byla zvolena laboratorní zkouška pomocí zděných pilířů dle směrnice 4-4-04/D WTA a zkouška in-situ na vybraném zkušebním objektu se zvýšenou vlhkostí.

4.1.1 Zkouška vodotěsnosti (ČSN 73 2578)

Tuto zkoušku lze nalézt v normě ČSN 73 2578 pod označením zkouška vodotěsnosti povrchové úpravy stavebních konstrukcí. Podstatou této zkoušky je zjištění množství vody, které během dané doby prosákne do zkoušeného vzorku skrz jeho povrch. Zkouška bude provedena na vzorcích o velikosti příčně rozřízlé cihly plné pálené, tedy cca 140 x 140 x 65 mm. Vzorky pískovcové cihly, pórobetonu a maltových dílců budou upraveny do této velikosti. Pro zkoušku jednoho gelu budou nachystány tři zkušební vzorky opatřeny injektážním gelem na jeho povrchu o velikosti 140 x 140 mm.



Obr. 18 – Metodika výběru optimálního injektážního gelu

4.1.2 Stanovení nasákavosti (ČSN 73 1357)

Pro stanovení nasákavosti jsou zkušební tělesa úplně ponořeny do vody na stanovenou dobu. Podstatou zkoušky je porovnání hmotnosti nasáklého vzorku se vzorkem zcela vysušeným. Postup zkoušky je prováděn dle normy ČSN 73 1357. Zkouška je opět prováděna na vzorcích velikosti cca 140 x 140 x 65 mm. Pro zkoušku jednoho gelu budou nachystány tři zkušební vzorky opatřeny injektážním gelem ze všech stran jeho povrchu.

4.1.3 Výběr tří gelů s nejlepšími výsledky

Výběr tří nejlepších injektážních gelů bude proveden pomocí metody kvantitativního párového srovnání. Výpočet váhy kriterií bude stanoven pomocí Sattiho matice. Tři gely s nejlepšími výsledky budou podrobeny dalšímu zkoušení.

4.1.4 Míra penetrace v závislosti na vlhkosti

Tuto zkoušku je opět vhodné provádět na zkušebních vzorcích o velikosti cca 140 x 140 x 65 mm. Pro zkoušku jednoho gelu budou nachystány tři zkušební vzorky o vlhkostech 25 %, 50 %, 75 % a 100 %.

Aplikace prostředku se provádí do zmenšených vrtů, které napodobují princip použití injektážních gelů v praxi. Zmenšené vrty jsou vyvrtány 40 mm od okraje vzorku s osovou roztečí mezi vrty 60 mm. Vrty jsou průměru 6 - 8 mm. Hloubka vrtů je (55 ± 5) mm, tedy zhruba o 10 mm menší než je tloušťka zkušebních vzorků. Před samotnou aplikací prostředku je vhodné vzniklé vrty vyčistit za pomoci vzduchového kompresoru.

Pro každý materiál musí být nejprve stanovena maximální stoprocentní vlhkost a poté čas, po který musí být vzorek umístněn do sušárny při dané teplotě, aby dosahoval právě námi požadovanou procentuální vlhkost. Tímto způsobem poté připravíme zkušební vzorky o určité vlhkosti pro následnou aplikaci injektážního gelu. Po aplikaci injektážního gelu do zmenšených vrtů je nutno vzorky umístnit po dobu nejméně pěti dnů do neprodyšně uzavřených platových sáčků, aby nedošlo ke změně vlhkosti testovaných vzorků.

Po uplynutí dostatečné doby pro maximálně možnou penetraci injektážního gelu do zkušebního materiálu vzorky vyjmeme z plastových sáčků a podélně rozřízneme v rovině kolmé na rovinu vrtů. Poté je na tělesa aplikován vlhkostní indikátor a za pomoci UV záření sledujeme míru penetrace. Zelená místa značí přítomnost indikátoru, čili místa, která

absorbují vlhkost. Tmavá místa značí přítomnost injektážního gelu. Ze sady zkušebních těles o stejné vlhkosti je pak určena střední hodnota průměru penetrované oblasti kolem jednoho zmenšeného injektážního vrtu.

4.1.5 Míra penetrace v závislosti na teplotě

Pro tuto zkoušku byla zvolena stejná velikost zkušebních vzorků i stejný postup aplikace injektážního gelu jako při předchozí zkoušce míry penetrace v závislosti na vlhkosti. Avšak u této metody již nedochází k aplikaci injektážních gelů do materiálu o různé vlhkosti, ale do materiálu s různou teplotou. Testované spektrum teplot bylo zvoleno: 5 ºC, 10 ºC, 20 ºC a 35 ºC. V případě teplot 5 ºC, 10 ºC jsou tělesa uložena v chladicím boxu. V případě teplot 20 ºC a 35 ºC jsou tělesa uložena v sušárně. V obou případech jsou tělesa vystavena těmto podmínkám po dobu 72 hodin. Poté dochází k aplikaci injektážního gelu při dané teplotě.

Stejně jako v předchozí zkoušce, po uplynutí doby, potřebné k maximální možné penetraci zkušebního tělesa injektážním gelem, zkušební tělesa podélně rozřízneme napůl (řez provedeme v rovině kolmé na rovinu vrtů). Pomocí vlhkostního indikátoru a UV záření opět určíme penetrovanou oblast kolem zmenšeného injektážního vrtu.

4.1.6 Stanovení vzlínavosti (ČSN 73 1357)

Vzlínavost vlhkosti ve stavebních materiálech je základním důvodem aplikace injektážních prostředků. Zkouška se provádí dle normy ČSN 73 1357. V případě cihly plné pálené a cihly pískovcové použijeme jako zkušební vzorek celou cihlu a v případě pórobetonu a zdící malty vytvoříme zkušební vzorky o rozměru 100 x 100 x 300 mm. Penetrování vzorků probíhá do zmenšených vrtů, které jsou umístěny ve výšce (10 ± 1) mm nad spodní hranou vzorku. Principem této zkoušky je částečné ponoření vzorku do nádoby s vodou na stanovenou dobu. Vzlínavost se určí v g vody na 100 mm^2, která v průběhu zkoušky navzlínala do zkušebního vzorku.

4.1.7 Výběr jednoho gelu s nejlepšími výsledky

Výběr jednoho nejlepšího injektážního gelu bude proveden opět pomocí metody kvantitativního párového srovnání. Výpočet váhy kriterií bude stanoven pomocí Sattiho matice. Gel s nejlepším výsledkem bude zvolen jako nejlepší pro injektáž vlhkého zdiva a jeho účinnost bude ověřena dalšími zkouškami.

4.1.8 Ověření účinnosti pomocí zděných pilířů dle WTA

Funkčnost dodatečně vzniklé chemické bariéry, která vznikla ve stavebním materiálu za účelem zabránění vzlínání kapilární vlhkosti nad tuto bariéru, lze ověřit v nasimulovaných podmínkách pomocí zmenšených modelových těles, záměrně vytvořených pro tuto zkoušku. Tyto podmínky byly vytvořeny v návaznosti na skutečnostech vzniklých v praxi. Zkouška je provedena dle pokynů a zásad uvedených ve směrnici WTA 4-4-04/D: Injektáž zdiva proti kapilární vlhkosti. Způsob napouštění injektážního gelu je proveden dle pokynů výrobce, tak jak k tomu dochází v praxi u reálných stavebních objektů.

Pro účely této zkoušky je nutno vyzdít dle směrnice WTA 4-4-04/D zkušební pilíře z cihly plné pálené a cihly pískovcové. Pro možnost ověření účinnosti dodatečně vzniklé vodorovné injektážní clony u pórobetonu, bylo nutno vytvořit modifikovanou metodu pro pórobeton dle směrnice WTA 4-4-04/D, uvedenou v kap. 4.3. Dle této metody jsou následně vyzděny zkušební pilíře pórobetonové, v dvojím provedení (klasické zdění, přesné zdění). Pro možnosti porovnání účinnosti je nutno od každého typu zděných pilířů připravit také referenční zděné pilíře, které nebudou napuštěny injektážním gelem.

Obr. 19 – Vyzděné zkušební pilíře (postupně zleva: 2x cihla pískovcová, 2x cihla plná pálená, 2x pórobeton klasické zdění)

4.1.9 Ověření účinnosti in-situ

Pro možnost ověření účinnosti vybraného injektážního gelu je důležitým krokem otestování na reálném stavebním objektu. Pro tuto zkoušku je nutno vybrat stavební objekt se zvýšenou vlhkostí. Na tomto objektu bude provedena beztlaková injektáž injektážního gelu dle pokynů výrobce. V této zkoušce bude porovnána vlhkost stavební konstrukce v místě nad zamýšlenou úrovní vrtů pro infuzní clonu s vlhkostí stavební konstrukce v témže místě po uplynutí dané doby od aplikace injektážního gelu do vrtů.

4.2 Infuzní gel

Ideální injektážní gel musí mít dostatečné penetrační a hydrofobizační účinky, tak aby po jeho aplikaci vznikala v sanovaném zdivu dokonale propojená infuzní clona, která zbraňuje vzlínání vlhkosti ve zdivu nad tuto dodatečně vytvořenou bariéru. Důležitým aspektem pro účinnou penetraci je dobrá reakce infuzního gelu s vlhkostí sanovaného zdiva, což napomáhá lepšímu šíření infuzního gelu v pórech stavebního materiálu.

4.2.1 Testované infuzní gely

Pro námi prováděné testování bylo dodáno 8 injektážních gelů firmou Betosan s.r.o. Injektážní gely jsou na alkylakoxylanové bázi, která je speciálně navržena tak, aby při aplikaci injektážních gelů s touto bází docházelo ke spotřebovávání vlhkosti ze vzduchu (v praxi je tedy spotřebovávána vlhkost ze zdiva). Touto chemickou reakcí vzniká alkohol, který se v průběhu času odpařuje, čímž je následně vytvořena finální hydrofobní matrice ve zdiva, která je tvořena vazbou –Si-O-Si-. Do těchto gelů byly přidány v různých procentuálních množstvích (viz Tab. 14) tyto druhotné suroviny: křemičitý úlet, metakaoliny, zeolity, bentonity a jílové minerály. Přímé složení injektážních gelů podléhá obchodnímu utajení a je u výrobce injektážních gelů i u zpracovatele diplomové práce. Detailní složení určitých injektážních gelů bude uvedeno při obhajobě diplomové práce. Gely s označením E, G a H jsou složeny methylsilikonátu draselného, hydyroxidu draselného, vody, walocelu CRT 10G a dané druhotné suroviny. Gel E obsahuje menší množství methylsilikonátu draselného a vody oproti gelům G a H. Gely s označením A, B, C, D a F mají složení následující: triethoxy(octyl)silan, triethoxy(2,4,4-trimethylpentyl)silan, etanol, voda, walocel CRT 10G a daná druhotná surovina. Množství etanolu bylo u všech těchto pěti gelů stanoveno stejné. Největší dávka triethoxy(octyl)silanu byla u gelu B a F, nejmenší byla u gelu D. Také

množství triethoxy(2,4,4-trimethylpentyl)silanu bylo rozdílné. Největší množství bylo dávkováno u gelu F a nejmenší u gelu B.

Tab. 14: Použité druhotné suroviny do injektážních gelů

Surovina	Označení receptury							
	A	B	C	D	E	F	G	H
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Druhotná surovina 1 - křemičité úlety	-	-	-	-	-	-	3	3
Druhotná surovina 2 - metakaoliny	-	3	-	3	-	-	-	3
Druhotná surovina 3 - zeolity	-	7	-	3	-	-	-	-
Druhotná surovina 4 - bentonity	-	-	-	-	50	5	25	20
Druhotná surovina 5 - jílové minerály	10	5	10	5	8	-	-	-

4.3 Modifikovaná metoda ověření účinnosti dodatečně vytvořené injektážní clony pro pórobeton dle WTA

Ověření funkčnosti dodatečně vzniklé vodorovné injektážní clony, vytvořené za účelem zastavení vzlínající kapilární vlhkosti, se provádí v simulovaných podmínkách, které co nejvíce odpovídají podmínkám v praxi. Pro tyto účely se využívají zmenšená modelová tělesa, u nichž je simulována vzlínající kapilární vlhkost. Modelová tělesa se poté napouští injektážním materiálem dle pokynů uváděných výrobcem stejným způsobem, jako k tomu dochází u reálných budov. Celá zkouška je prováděna dle pokynů a zásad WTA uvedených ve směrnici 4-4-04/D: Injektáž zdiva proti kapilární vlhkosti. [18]

Tab. 15: Obecné schéma provádění zkoušky [18]

	Průkazní zkouška		
	Při stupni nasyceni materiálu vodou do 60 %	Při stupni nasyceni materiálu vodou do 80 %	Při stupni nasyceni materiálu vodou do 95 %
	Cihly vyzděné podle doporučení WTA		
Předcházející kondicionování zkušebního vzorku (tělesa); Stupeň nasycení vodou	do 60 % ± 10 %	do 80 % ± 10 %	do 95 % ± 5 %
Injektážní metoda	Injektáž podle protokolovaných doporučení výrobce		
Stav po injektáži podle doporučení WTA	Při protokolovaném klimatu místnosti		
Zkouška na účinnost	Porovnání injektovaného zkušebního tělesa s neinjektovaným tělesem referenčním měřením množství odpařené vody příp. obsahu vody v materiálu podle doporučení WTA		

Vzhledem k tomu, že v praxi se v současnosti injektážní prostředky používají i na pórobetonový materiál, vyvstal požadavek na vytvoření metody pro posouzení funkční účinnosti dodatečně vytvořené injektážní clony proti vzlínající kapilární vlhkosti právě i pro pórobeton.

4.3.1 Zkušební materiál

Aby bylo možno zajistit stejné podmínky zkoušky, je třeba používat pouze dále uváděný materiál. Všechen použitý materiál a všechny důležité zkušební parametry musí být uvedeny ve zprávě o zkoušce.

Pórobeton

Používají se pórobetonové tvárnice, ze kterých jsou nařezány kusy o rozměru 300 x 150 x 75 mm. Použité pórobetonové tvárnice mají následující materiálové vlastnosti:

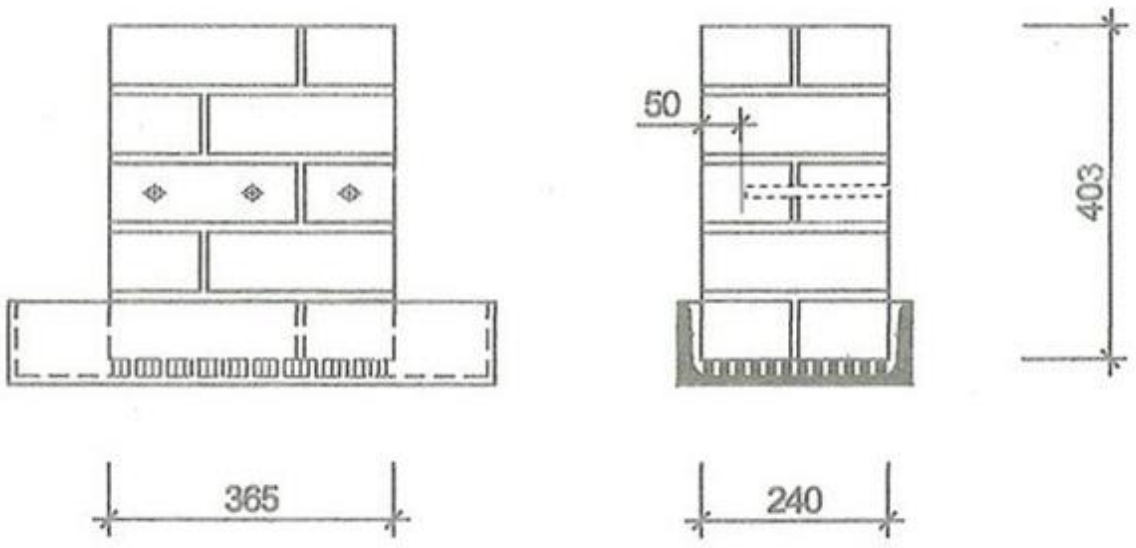
Označení:	Tvárnice z autoklávovaného pórobetonu kategorie I, Ytong P4-500
Rozměry:	250x249x599 nebo 300x249x499
Max. objemová hmotnost v suchém stavu:	$\rho = 500$ kg.m^{-3}
Max. objemová hmotnost při vlhkosti 6 %:	$\rho_v = 550$ kg.m^{-3}
Minimální pevnost v tlaku:	$f_b = 4{,}0$ MPa
Nasákavost:	u = 70 % hmotn.
Faktor difúzního odporu:	$\mu = 5 - 10$

Malty

Použitá malta na pórobetonové vzorky je rozdílná podle způsobu zdění. Při klasickém zdění (jako u cihel) je malta nanášena zednickou lžící a její příprava je provedena dle normy DIN EN 196-1 a DIN EN 197-1. Pro toto zdění je použita vápenocementová malta (2 objemové díly bílého vápenného hydrátu, hašeného za sucha; 0,5 objemového dílu cementu CEM I 32,5 podle DIN 197-1; 8 dílů písku podle EN 196-1). Pro přesné zdění bude použita cementová zdící malta na pórobeton CEMIX 061 pro tenké spáry. Nanášení malty se provádí pomocí speciální zubaté lžíce.

4.3.2 Beztlaková injektáž

Pro každý zkoušený injektážní materiál se vždy připraví tři zkušební tělesa provedena klasickým zděním a tři zkušební tělesa provedené přesným zděním. Dvě tělesa se nainjektují a třetí se použije jako referenční neupravené. Zkušební tělesa mají tvar zídky vytvořené z pěti řad zkušebních vzorků pórobetonu. Při klasickém zdění je tloušťka ložných spár cca 12 mm a tloušťka spár styčných cca 10 mm. Při přesném zdění je tloušťka ložných i styčných 1 – 3 mm. Schéma rozměrů pro beztlakovou injektáž je zobrazena na *Obr. 20*. Před provedením injektáže se všechna zkušební tělesa nechají vystavit klimatu vnitřního prostředí místnosti alespoň po dobu 28 dní. Pro zajištění kontaktu spodní části zídky s vodou při průběhu zkoušky je vhodné zkušební zídku umístnit na distanční podložky nebo mřížované rošty. Vrty se mohou provádět vodorovně nebo ve sklonu 45º, avšak nesmí zasahovat do spodní nebo vrchní řady pórobetonových vzorků. Vzdálenost středů vrtů je 100 – 125 mm, kdy velikost průměru vrtů nesmí být menší než 20 mm a zároveň větší než 30 mm. Rozmístnění vrtů musí být vždy uvedeno ve zprávě o zkoušce. Před aplikací injektážního prostředku musí být vrty vyčištěny od přebytečného prachu nejlépe tlakovým vzduchem bez obsahu oleje.



Obr. 20 – Schéma zkušebního tělesa pro beztlakovou injektáž [18]

4.3.3 Injektáž a uložení zkušebních těles pro zkoušky účinnosti

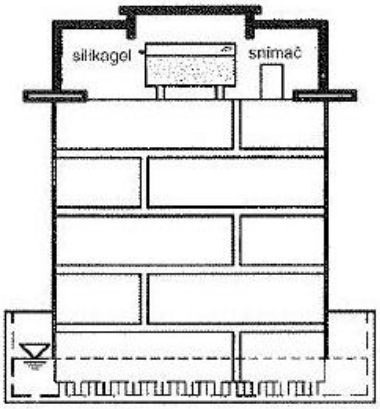
Opatření zkušebních těles se vždy vztahují k tomu, aby bylo co nejvíce dosaženo praxi odpovídajícímu stavu. Injektáž se provádí při 95 %, 80 % či 60 % stupni nasycení vodou. Po nasycení zkušebních těles vodou je provedena injektáž dle pokynů výrobce injektážního prostředku. Po injektáži je nutno zajistit zabránění úniku injektážního prostředku z vrtu. Injektované i referenční zkušební tělesa jsou umístněny do vany s vodou. Během zkoušky je nutno udržovat hladinu vody ve stejné výšce. Rovněž po injektáži se zkušební tělesa opatří po svých stranách vodotěsným povlakem nebo se obalí fólií. Zahájení zkoušky účinnosti započne za dobu uvedenou výrobcem, nejpozději však za 14 dnů.

4.3.4 Zkouška účinnosti

Před započetím zkoušky účinnosti je nutno zajistit, aby k nasáknutí vody docházelo pouze spodní stranou zkušebního tělesa (spodní řadou zkušebních vzorků) a k odpařování vlhkosti docházelo pouze horní stranou (horní řadou zkušebních vzorků). Toho lze docílit vodotěsnou izolací všech bočních stran zkušebního tělesa obalením fólií nebo provedením vodotěsného nátěru. Důležitým krokem je i zabezpečení stejných podmínek ukládání a zkoušení injektovaných a referenčních zkušebních těles.

Zjišťování množství odpařené vody

Horní strana zkušebního tělesa, na které dochází k odpařování vlhkosti, se opatří „zvonem“. Tento zvon vytvoří uzavřený prostor, ze kterého neuniká vlhkost. Do tohoto prostoru je umístněna miska se silikagelem, který tuto vlhkost pohlcuje.



Obr. 21 – Schéma uspořádání zkoušky pro měření odpařené vlhkosti ze zdiva [18]

Pravidelným vážením silikagelu zjišťujeme množství vlhkosti odpařené ze zkušebního tělesa do uzavřeného zvonu. Použitý silikagel musí být v pravidelných časových intervalech měněn, aby nedošlo k vyčerpání jeho absorpční schopnosti. Součástí zvonu by měl být také zabudovaný snímač pro dokumentaci klimatu prostoru. Schéma zkoušky je znázorněno na *Obr. 21*.

4.3.5 Identifikace injektážního materiálu

Injektážní materiál lze identifikovat za pomocí spektrální infračervené analýzy. Tato zkouška musí být provedena dle norem DIN EN 1767 a DIN 51451. Výsledky spektrální infračervené analýzy jsou podkladem pro zisk WTA osvědčení.

4.3.6 Vyhodnocení

Vyhodnocení účinnosti injektážního prostředku se provádí porovnáním naměřených hodnot vlhkosti u referenčních a injektovaných zkušebních těles. Jako platné můžeme vzít naměřené výsledky v průběhu nejméně 60 dnů od zahájení zkoušky. Výsledná účinnost se posuzuje dle následujících dvou kritérií:

1. Zjištěné množství odpařené vody je u nainjektovaných těles nejméně o 50 % menší než u tělesa referenčního.
2. Zjištěné množství odpařené vody se v průběhu měření u nainjektovaných těles již dále nenavyšuje, popř. klesá, vzhledem k referenčnímu tělesu.

Jestliže po 90 dnech od začátku zkoušky nedojde k výraznému snížení obsahu vlhkosti nainjektovaných těles, může být zkouška prodloužena, avšak při splnění účinnosti injektážního prostředku po době delší než 90 dnů, musí být tato informace uvedena ve zprávě o zkoušce.

Na závěr jsou po ukončení měření množství odpařené vody vyjmuty vzorky pórobetonu a malty z druhé řady od shora zkušební zídky. Tyto vzorky by měly být bez obsahu injektážního materiálu a následně je na těchto vzorcích zjištěn obsah vlhkosti vážkovou metodou (DARR). Zjištěné hodnoty jsou zapsány do zprávy o zkoušce. Hodnoty vlhkosti vzorků odebraných z nainjektovaných těles jsou opět porovnány s hodnotou vlhkosti vzorku odebraného z referenčního tělesa.

4.4 Zkoušení injektážních gelů dle navržené metodiky

Zkoušení bylo podrobeno osm injektážních gelů, ze kterých byly vybrány tři s nejlepší účinností. Následně byl zvolen jeden nejlepší injektážní gel, který byl podroben ověřovacím zkouškám. Zkoušky vodotěsnosti, nasákavosti, míry penetrace dle vlhkosti a míry penetrace dle teploty byly provedeny již v rámci bakalářské práce *(Testování účinnosti hydroizolačních injektážních clon v závislosti na vlastnostech stavebních materiálů)* a v rámci řešení projektu MPO FR-TI4/270 *(Gelový infuzní clonový systém pro dodatečnou hydroizolaci různých druhů zdiva s využitím druhotných surovin)*. Pro navrženou metodiku byly využity pouze výsledky těchto zkoušek pro výběr optimálního gelu. V rámci diplomové práce byly kompletně provedeny zkoušky: stanovení vzlínavosti, ověření účinnosti pomocí zděných pilířů dle WTA a ověření účinnosti in-situ.

4.4.1 Výběr tří gelů s nejlepšími výsledky

Výběr tří nejlepších injektážních gelů bude proveden pomocí metody kvantitativního párového srovnání. Výpočet váhy kriterií bude stanoven pomocí Sattiho matice. Všechna zvolená kritéria jsou uvedeny v Tab. 16. Výpočet váhy kritérií dle Sattiho matice je uveden v Tab. 17. Preferování kritérií je prováděno na základě číselné stupnice, která vyjadřuje to, že vyšší číslo v řádku, daného kritéria, je více preferované než kritérium daného sloupce. V tomto případě probíhal výběr z osmi testovaných injektážních gelů, jejichž složení je popsáno v kapitole 4.2.1.

Tab. 16: Výběr kritérií

Výběr kritérií		
č.	**Vlastnost**	**Jednotka**
1	Vodotěsnost cihly plné pálené	[l/m^2]
2	Vodotěsnost pórobetonu	[l/m^2]
3	Vodotěsnost cihly pískovcové	[l/m^2]
4	Vodotěsnost zdící malty	[l/m^2]
5	Nasákavost cihly pískovcové	[%]
6	Nasákavost pórobetonu	[%]
7	Nasákavost cihly pískovcové	[%]
8	Nasákavost zdící malty	[%]

Tab. 17: Výpočet váhy jednotlivých kritérií

Sattiho matice											
č.	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**Si**	**Ri**	**Fi**
1	1	2	2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/3	0,0833	0,7330	0,0818
2	1/2	1	1	1/3	1/3	1/2	1/2	1/3	0,0046	0,5107	0,0570
3	1/2	1	1	1/3	1/3	1/2	1/2	1/3	0,0046	0,5107	0,0570
4	2	3	3	1	1	1	1/2	1/3	3,0000	1,1472	0,1280
5	2	3	3	1	1	1	2	1/2	18,0000	1,4352	0,1602
6	2	2	2	1	1	1	1	1/2	4,0000	1,1892	0,1327
7	2	2	2	2	1/2	1	1	1/2	4,0000	1,1892	0,1327
8	3	3	3	3	2	2	2	1	648,0000	2,2462	0,2507
Suma									**677,0926**	**8,9615**	**1,0000**

Vyčíslení jednotlivých kritérií vychází z výsledků provedených zkoušek injektážních gelů. Číselné hodnoty uvedených kritérií jsou vypsány v Tab. 18.

Tab. 18: Vyčíslení jednotlivých kritérií

Rozhodovací matice								
č.	**Gel A**	**Gel B**	**Gel C**	**Gel D**	**Gel E**	**Gel F**	**Gel G**	**Gel H**
1	0,15	0,27	0,21	0,06	0,03	0,23	0,22	0,21
2	0,06	0,06	0,07	0,02	0,12	0,12	0,15	0,11
3	0,23	0,28	0,36	0,10	0,06	0,13	0,29	0,31
4	0,05	0,05	0,03	0,06	0,04	0,03	0,06	0,03
5	4,90	3,50	3,20	4,50	14,60	4,90	22,60	10,80
6	6,60	5,90	5,50	4,50	10,80	13,40	15,20	12,90
7	5,60	4,50	4,80	4,20	11,30	12,50	14,70	10,60
8	0,90	0,70	0,80	0,85	2,05	1,60	1,05	0,85

Závěrečným krokem je transformace rozhodovací matice na výpočtovou a její výpočet. Výsledek optimalizace injektážních gelů je uveden v Tab. 19. Z vypočtených výsledků jsou vybrány tři nejvhodnější injektážní gely s nejoptimálnějšími vlastnostmi pro chemickou sanaci vlhkého zdiva dle zvolených kritérií (na základě doposud provedených zkoušek).

Tab. 19: Výsledek optimalizace injektážních gelů

Výpočtová matice										
č.	**Fi**	**Optimum**	**Gel A**	**Gel B**	**Gel C**	**Gel D**	**Gel E**	**Gel F**	**Gel G**	**Gel H**
1	0,0818	min	4,09	0,00	2,04	7,16	8,18	1,36	1,70	2,04
2	0,0570	min	3,95	3,95	3,51	5,70	1,32	1,32	0,00	1,75
3	0,0570	min	2,47	1,52	0,00	4,94	5,70	4,37	1,33	0,95
4	0,1280	min	4,27	4,27	12,80	0,00	8,53	12,80	0,00	12,80
5	0,1602	min	14,61	15,77	16,02	14,94	6,60	14,61	0,00	9,74
6	0,1327	min	10,67	11,53	12,03	13,27	5,46	2,23	0,00	2,85
7	0,1327	min	11,50	12,89	12,51	13,27	4,30	2,78	0,00	5,18
8	0,2507	min	21,35	25,07	23,21	22,28	0,00	8,36	18,57	22,28
Suma			**72,90**	**74,99**	**82,12**	**81,56**	**40,09**	**47,83**	**21,60**	**57,61**

Na základě multikriteriální optimalizační metody kvantitativního párového srovnání byly pro další testování vybrány gely s nejvyššími preferencemi. Staly se jimi gel B – 74,99 %, gel C – 82,12 % a gel D – 81,56 %. Tyto gely byly optimalizační metodou stanoveny jako nejvhodnější z důvodu jejich velmi nízkých hodnot při laboratorních zkouškách nasákavosti a povrchové vodotěsnosti u všech čtyř zvolených stavebních materiálů. U ostatních injektážních gelů (s výjimkou gelu A) byly výsledky na určitých stavebních materiálech o hodně vyšší, až nevyhovující, a proto nemohly uspět v námi prováděném optimalizačním výběru.

U zvolených třech gelů byla dále také zkontrolována jejich viskozita. Při příliš nízké viskozitě injektážních gelů dochází k vytékání gelu z horizontálních vrtů, naopak při příliš velké viskozitě nedochází k požadované penetraci do pórů stavebního materiálů. U všech tří gelů byla zjištěná viskozita v požadovaném rozmezí, proto byly tyto tři gely podrobeny dalšímu zkoušení dle navržené metodiky.

4.4.2 Stanovení vzlínavosti (ČSN 73 1357)

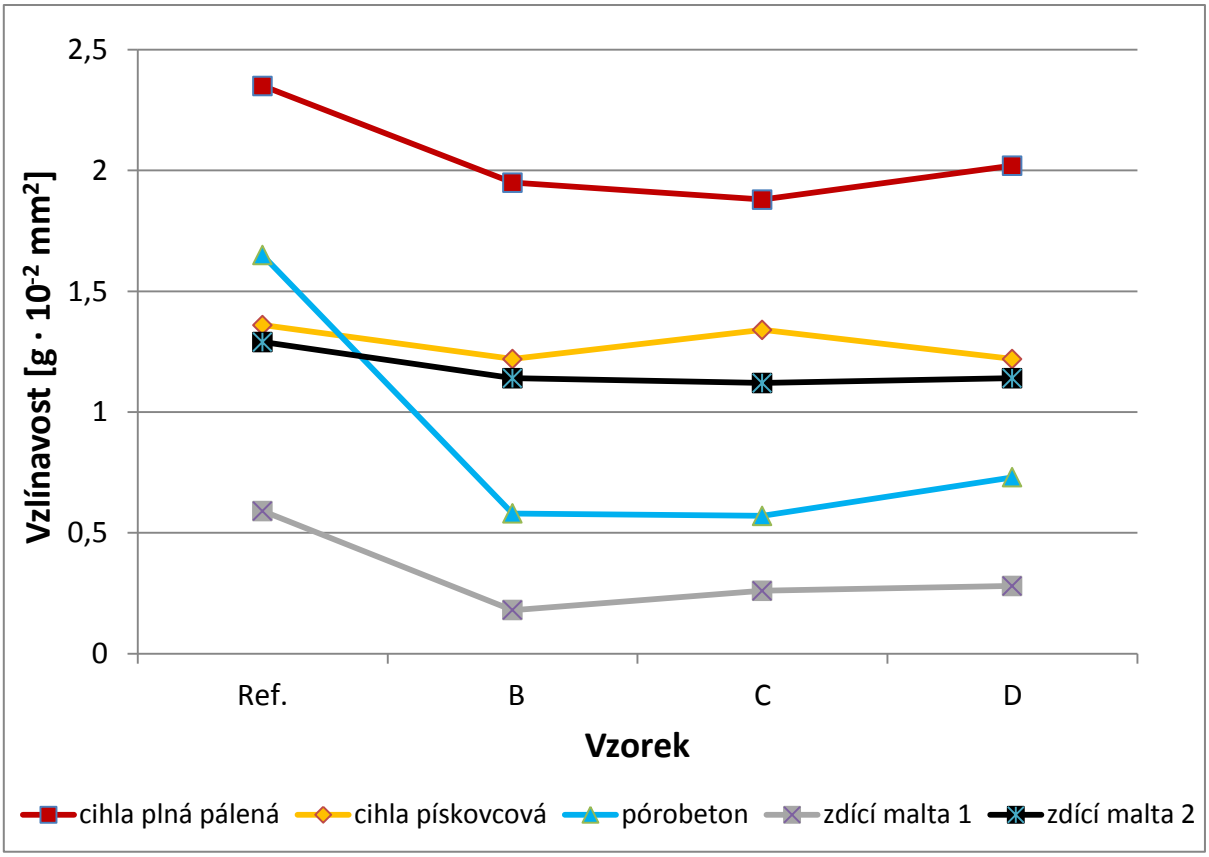
Zkoušce stanovení vzlínavosti byly podrobeny tyto stavební materiály: cihla plná pálená, cihla pískovcová, pórobeton, dva druhy zdící malty. Na závěr byla zkouška provedena také na smíšeném zdivu. Pro toto zkoušení byla vytvořena speciální tělesa ze čtvrtiny cihly plné pálené a čtvrtiny cihly pískovcové, spojené zdící maltou od firmy Betosan. Tělesa, vytvořené pro testování smíšeného zdiva, jsou zobrazeny na obrázku. Uvedené materiály byly ošetřeny třemi injektážními gely s označením B, C a D. Pro možnosti porovnání byla zkouška provedena i na referenčních tělesech bez ošetření injektážním gelem. Výsledky stanovení vzlínavosti jsou uvedeny v následující tabulce (Tab. 20) grafu (*Obr. 23*).

Obr. 22 – Zkušební vzorky smíšeného zdiva

Tab. 20: Výsledky stanovení vzlínavosti

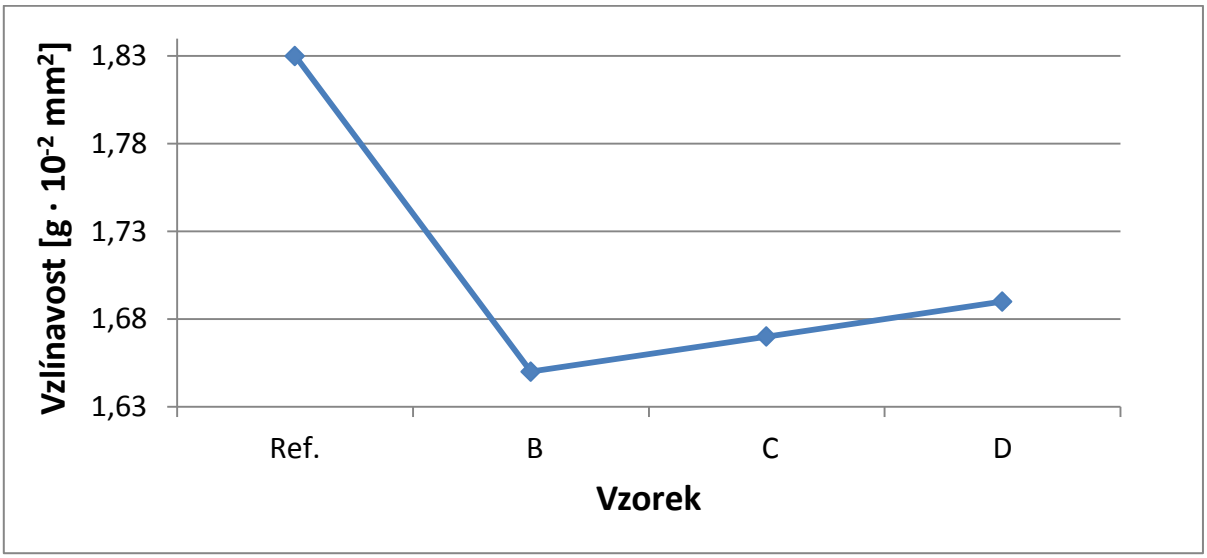
	vzlínavost [g · 10^{-2} mm^2]				
	CPP	**K**	**PB**	**ZM1**	**ZM2**
ref. vzorek	2,35	1,36	1,65	0,59	1,29
B	1,95	1,22	0,58	0,18	1,14
C	1,88	1,34	0,57	0,26	1,12
D	2,02	1,22	0,73	0,28	1,14

CPP – cihla plná pálena, K – cihla pískovcová, PB – pórobeton, ZM1 – zdící malta 1, ZM2 – zdící malta 2



Obr. 23 – Grafické vyhodnocení stanovení vzlínavosti

V následujícím grafu jsou znázorněny výsledky stanovení vzlínavosti smíšeného zdiva.



Obr. 24 – Výsledky stanovení vzlínavosti smíšeného zdiva

U naměřených výsledků lze pozorovat, že u všech zkoušených stavebních materiálů dochází po aplikaci injektážního gelu k snížení hodnot vzlínavosti. Bylo tomu tak proto, že po aplikaci injektážního gelu byly zhydrofobizovány póry stavebního materiálu a tím došlo

přerušení dalšího vzlínání vody nad tuto zhydrofobizovanou bariéru. Největší snížení hodnot vzlínavosti lze pozorovat u zkušebních vzorků pórobetonu, kdy po aplikaci injektážního gelu s označením C došlo ke snížení vzlínavosti z 1,65 g · 10^{-2} mm^2 na 0,57 g · 10^{-2} mm^2. Ovšem u cihly pískovcové po aplikaci injektážního gelu s označením C bylo sledováno nejmenší snížení vzlínavosti z 1,36 g · 10^{-2} mm^2 na 1,34 g · 10^{-2} mm^2. Z celkového hlediska zkoušených materiálů a injektážních gelů lze však konstatovat, že větší snížení vzlínavosti nastává
u vzorků opatřených injektážními gely s označením B a C než u vzorků opatřených injektážním gelem s označením D.

U speciálních těles, která imitují prostředí smíšeného zdiva, dochází opět u vzorků po aplikaci injektážního gelu ke snížení hodnot vzlínavosti. Největšího snížení vzlínavosti u vzorků smíšeného zdiva bylo dosaženo u vzorků po aplikaci injektážního gelu s označením B. U těchto vzorků došlo ke snížení vzlínavosti 1,83 g · 10^{-2} mm^2 na 1,65 g · 10^{-2} mm^2.

4.4.3 Výběr jednoho gelu s nejlepšími výsledky

Výběr jednoho nejlepšího gelu bude proveden pomocí metody kvantitativního párového srovnání. Výpočet váhy kriterií bude stanoven pomocí Sattiho matice. Všechna zvolená kritéria jsou uvedeny v Tab. 25. Výpočet váhy kritérií dle Sattiho matice je uveden v Tab. 26. Preferování kritérií je prováděno na základě číselné stupnice, která vyjadřuje to, že vyšší číslo v řádku, daného kritéria, je více preferované než kritérium daného sloupce. V tomto případě byly testovány tři injektážní gely, jejichž složení je detailněji popsáno v kapitole 4.2.1.

Tab. 21: Výběr kritérií

Výběr kritérií		
č.	**Vlastnost**	**Jednotky**
1	Míra penetrace - vlhkost 25 %	[mm]
2	Míra penetrace - vlhkost 50 %	[mm]
3	Míra penetrace - vlhkost 75 %	[mm]
4	Míra penetrace - vlhkost 100 %	[mm]
5	Míra penetrace - teplota 5 ºC	[mm]
6	Míra penetrace - teplota 10 ºC	[mm]
7	Míra penetrace - teplota 20 ºC	[mm]
8	Míra penetrace - teplota 35 ºC	[mm]
9	Vzlínavost	[g·$10^{-2}$$mm^2$]

Tab. 22: Výpočet váhy jednotlivých kritérií

Sattiho matice												
č.	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**Si**	**Ri**	**Fi**
1	1	1	1	1	3/4	3/4	3/4	3/4	4	0,3164	0,8660	0,1039
2	1	1	1	1	3/4	3/4	3/4	3/4	4	0,3164	0,8660	0,1039
3	1	1	1	1	3/4	3/4	3/4	3/4	4	0,3164	0,8660	0,1039
4	1	1	1	1	3/4	3/4	3/4	3/4	4	0,3164	0,8660	0,1039
5	1 1/3	1 1/3	1 1/3	1 1/3	1	1	1	1	4	3,1605	1,1547	0,1386
6	1 1/3	1 1/3	1 1/3	1 1/3	1	1	1	1	4	3,1605	1,1547	0,1386
7	1 1/3	1 1/3	1 1/3	1 1/3	1	1	1	1	4	3,1605	1,1547	0,1386
8	1 1/3	1 1/3	1 1/3	1 1/3	1	1	1	1	4	3,1605	1,1547	0,1386
9	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1	0,0000	0,2500	0,0300
Suma										**13,9076**	**8,3329**	**1,0000**

Vyčíslení jednotlivých kritérií vychází z výsledků provedených zkoušek injektážních gelů. Číselné hodnoty uvedených kritérií jsou vypsány v Tab. 23. Pro každé kritérium udává hodnota průměr z výsledků měření všech testovaných stavebních materiálů (cihla plná pálená, cihla pískovcová, pórobeton, zdící malta).

Tab. 23: Vyčíslení jednotlivých kritérií

Rozhodovací matice				
č.	**Vlastnost**	**Gel B**	**Gel C**	**Gel D**
1	Míra penetrace - vlhkost 25 % [mm]	24,0	29,2	12,6
2	Míra penetrace - vlhkost 50 % [mm]	27,6	29,2	18,6
3	Míra penetrace - vlhkost 75 % [mm]	34,2	34,4	19,2
4	Míra penetrace - vlhkost 100 % [mm]	43,0	48,0	27,6
5	Míra penetrace - teplota 5 ºC [mm]	30,0	28,8	26,8
6	Míra penetrace - teplota 10 ºC [mm]	36,0	33,2	35,8
7	Míra penetrace - teplota 20 ºC [mm]	34,8	41,8	36,0
8	Míra penetrace - teplota 35 ºC [mm]	44,4	45,4	36,0
9	Vzlínavost [$g \cdot 10^{-2} mm^2$]	1,014	1,034	1,078

Závěrečným krokem je transformace rozhodovací matice na výpočtovou a její výpočet. Výsledek optimalizace injektážních gelů je uveden v Tab. 24. Z vypočtených výsledků je vybrán nejvhodnější injektážní gel s nejoptimálnějšími vlastnostmi pro chemickou sanaci vlhkého zdiva dle zvolených kritérií (na základě provedených zkoušek).

Tab. 24: Výsledek optimalizace injektážních gelů

Výpočtová matice					
č.	**Fi**	**Optimum**	**Gel B**	**Gel C**	**Gel D**
1	0,1039	max	7,14	10,39	0,00
2	0,1039	max	8,82	10,39	0,00
3	0,1039	max	10,26	10,39	0,00
4	0,1039	max	7,85	10,39	0,00
5	0,1386	max	13,86	8,66	0,00
6	0,1386	max	13,86	0,00	12,87
7	0,1386	max	0,00	13,86	2,38
8	0,1386	max	12,38	13,86	0,00
9	0,0300	min	3,00	2,06	0,00
Suma			**77,16**	**80,01**	**15,24**

Na základě multikriteriální optimalizační metody kvantitativního párového srovnání byl jako nejvhodnější injektážní gel vybrán gel C s 80,01 %, těsně následovaný gelem B se 77, 16 %. Nejméně vhodný byl shledán gel D s pouhými 15,24 %. Gel C byl touto metodou vybrán, jelikož u tří z pěti testovaných materiálů bylo dosaženo nejvyšších hodnot průměrné míry penetrace při různých vlhkostech, stejně tak i míry penetrace při různých teplotách. Průměrné hodnoty ze všech zkoušených materiálů u zkoušek míry penetrace byly tedy u vzorků ošetřených gelem C nejvyšší. Tyto výsledky podpořily i výsledky stanovení vzlínavosti, kdy vykazovaly vzorky s gelem C rovněž u tří stavebních materiálů nejnižších průměrných hodnot vzlínavosti. U gelu D byla srovnatelnou s ostatními gely pouze zkouška vzlínavosti, u zkoušek míry penetrace výsledky již srovnatelné nebyly a vycházely podstatně horší než u gelů B a C. Gel C byl touto zkouškou vybrány tedy jako nejlepší a dle stanovené metodiky na něm byly dále provedeny zkoušky pro ověření účinnosti.

4.4.4 Ověření účinnosti pomocí zděných pilířů dle WTA

Pro účely této zkoušky byla připravena speciální zmenšená modelová tělesa v podobě zděných pilířů. Byly vyzděny zkušební pilíře cihly plné pálené, cihly pískovcové a pórobetonové s klasickým a přesným zděním. Pro měření vlhkosti zdiva byl použit odporový vlhkoměr. Celá zkouška byla provedena dle pokynů a zásad směrnice WTA: 4-4-04/D.

Příprava zkušebních těles

Zděné pilíře byly vyzděny na připravené rošty. Tyto rošty byly umístěny v plastových vanách tak, aby byla voda v kontaktu s celým ponořeným povrchem zkušebního pilíře. Tím

došlo k napodobení stejných podmínek, jako tomu je v praxi při vzlínání vlhkosti u reálných stavebních konstrukcí. Rozměry všech zkušebních pilířů činily 240 x 403 x 365 mm.

Obr. 25 – Zdění zkušebních pilířů dle směrnice WTA 4-4-04/D (postupně: pórobeton přesné zdění, cihla pískovcová, pórobeton klasické zdění, cihla plná pálená)

Injektáž zkušebních pilířů

Po dvaceti osmi dnech po vyzdění pilířů byla do plastových van nalita voda tak, aby její hladina sahala do výšky 3 – 5 cm výšky zděných pilířů. Tato hladina byla v průběhu celého zkoušení kontrolována a popřípadě doplňována na požadovanou hranici. Zděné pilíře se nacházely v místnosti s relativní vlhkostí 35,9 % a teplotou 22,2 ºC.

U poloviny zděných pilířů byly poté provedeny zkušební vrty v jejich středech. Druhá polovina zděných pilířů zůstala bez napuštění injektážním gelem a sloužila jako referenční. Pro zděné pilíře z cihly plné pálené a cihly pískovcové byla středová rozteč vrtů stanovena na 140 mm. Pro zděné pilíře pórobetonové s klasickým i přesným zděním byla středová rozteč vrtů stanovena na 100 mm. Z tohoto důvodu byly u zděných pilířů z cihly plné pálené a cihly pískovcové vytvořeny čtyři zkušební vrty a u zkušebních pilířů pórobetonových s klasickým i přesným zděním pouze tři. Průměr vrtáku pro provedení vrtů byl zvolen 20 mm. Hloubka provedeného vrtu činila 190 mm.

Obr. 26 – Postup vzlínající vlhkosti ve zkušebních pilířích po 24 hodinách (postupně: cihla pískovcová, cihla plná pálená, pórobeton klasické zdění, pórobeton přesné zdění)

Obr. 27 – Příprava injektážních vrtů (postupně: cihla pískovcová, cihla plná pálená)

Pomocí stlačeného vzduchu byly vrty následně vyčištěny od přebytečného prachu, aby nezabraňoval penetraci injektážního prostředku do materiálu. Poté jsme provedli beztlakovou injektáž námi ověřovaného injektážního gelu. Plnění injektážním gelem probíhalo od zadní části vrtu až po jeho ústí. Po injektáži byly zkušební pilíře ponechány ve stejných

klimatických podmínkách po dobu třiceti dnů. Poté mohlo být přistoupeno k vlastnímu měření prošlé vlhkosti zkušebními pilíři.

Obr. 28 – Injektáž zkušebních pilířů (postupně: cihla pískovcová, cihla plná pálená, pórobeton klasické zdění, pórobeton přesné zdění)

Stanovení účinnosti infuzní clony

Pro stanovení účinnosti infuzní clony bylo nutno tělesa zaopatřit vodotěsným obalem po všech jeho bočních stranách tak, aby mohla vlhkost ze zkušebních těles odcházet pouze jejich horní stranou. Tohoto bylo docíleno pomocí plastové fólie. Důležitým předpokladem pro správné výsledky zkoušky je zajištění stejných zkušebních podmínek jak pro injektovaná tělesa, tak i pro tělesa referenční. Stanovení účinnosti infuzní clony bylo provedeno následujícími nedestruktivními metodami.

Zjišťování množství odpařené vody

Důležitým krokem této metody je izolace bočních stěn zděných pilířů. Dále je nutno zajistit, aby k nasávání vody docházelo pouze stranou ponořenou do vody a k odpařování vlhkosti pouze horní stranou zkušebních pilířů. Horní strana byla opatřena plastovým „zvonem“. Tímto opatřením byl vytvořen uzavřený prostor, odkud neuniká vlhkost. Do tohoto

místa byla umístěna miska se silikagelem. Silikagel pohlcoval vlhkost prošlou zkušebním tělesem, čímž bylo možno sledovat množství vlhkosti, které pronikalo ze zkušebního tělesa do uzavřeného zvonu. Silikagel byl v pravidelných intervalech měněn, aby nedošlo k vyčerpání jeho absorpčních vlastností.

Obr. 29 – Zkušební pilíř cihly plné pálené opatřený plastovým „zvonem“ a umístění silikagelu v plastovém „zvonu“

Vyhodnocení účinnosti injektážního gelu se provádí porovnáním naměřených hodnot vlhkosti u referenčních a injektovaných zkušebních těles. Jako platné můžeme vzít naměřené výsledky v průběhu nejméně 60 dnů od zahájení zkoušky. Výsledná účinnost se posuzuje dle následujících dvou kritérií:

1. Zjištěné množství odpařené vody je u nainjektovaných těles nejméně o 50 % menší než u tělesa referenčního.
2. Zjištěné množství odpařené vody se v průběhu měření u nainjektovaných těles již dále nenavyšuje, popř. klesá, vzhledem k referenčnímu tělesu.

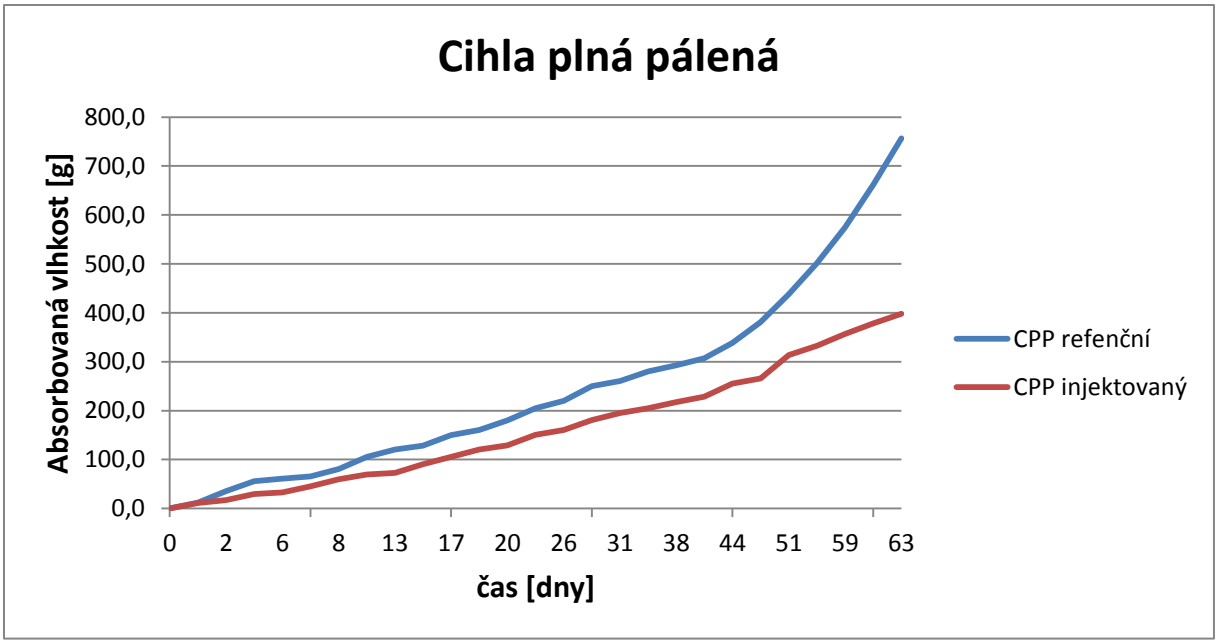
Jestliže po 90 dnech od začátku zkoušky nedojde k výraznému snížení obsahu vlhkosti nainjektovaných těles, může být zkouška prodloužena, avšak při splnění účinnosti injektážního prostředku po době delší než 90 dnů, musí být tato informace uvedena ve zprávě o zkoušce.

Výsledky jsou uvedeny v Tab. 25 a zpracovány ve čtyřech grafech níže.

Tab. 25: Výsledky stanovení obsahu uvolněné vlhkosti prostřednictvím silikagelu

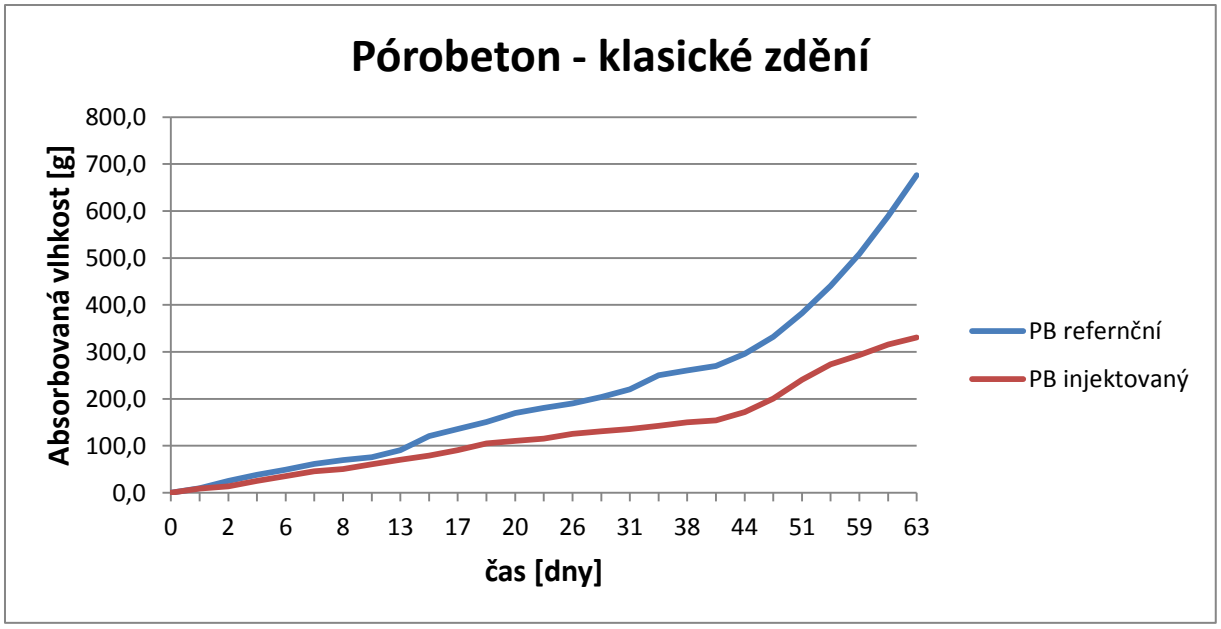
	Čas [dny]	Vzorek							
		PB - PZ R	PB – PZ I	PB – KZ R	PB – KZ I	CPP R	CPP I	K R	K I
Absorbovaná vlhkost [g]	**0**	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	1	25,6	21,2	9,6	9,1	12,0	11,3	7,0	7,4
	2	35,6	31,5	25,3	14,0	35,6	17,1	20,6	10,1
	5	48,9	45,8	38,6	25,0	55,6	29,9	35,3	18,5
	6	80,6	55,6	49,3	35,6	60,9	33,2	39,3	25,3
	7	90,6	67,5	61,5	45,6	65,6	45,6	51,3	32,3
	8	130,6	75,6	69,8	50,6	80,6	59,6	60,3	42,3
	12	146,9	89,6	75,9	60,6	105,3	69,5	80,3	52,3
	13	160,5	105,6	90,6	70,6	120,3	72,6	95,3	63,3
	14	180,5	109,5	120,6	79,3	128,3	90,6	120,3	75,3
	15	205,6	120,3	135,6	90,6	150,3	105,6	129,3	84,3
	19	223,3	130,6	150,6	105,3	160,3	120,3	145,3	95,3
	20	250,6	145,6	169,6	110,3	180,3	128,9	163,3	105,6
	22	270,3	158,9	180,9	115,3	205,3	150,6	180,9	120,3
	25	280,6	175,6	190,6	125,3	220,3	160,5	203,3	123,6
	28	290,6	198,6	203,6	130,7	250,3	180,6	250,9	129,3
	33	299,3	205,6	220,6	135,8	260,3	195,3	275,3	145,3
	40	410,5	215,6	250,6	142,5	280,3	205,3	290,3	152,3
	41	450,5	234,5	260,3	149,8	292,5	217,3	296,0	157,5
	42	490,5	253,0	270,4	154,2	307,3	228,5	298,9	159,5
	46	550,5	298,5	296,2	171,9	338,7	255,4	313,7	172,2
	49	590,6	359,2	332,1	200,2	380,7	265,6	334,3	190,8
	51	720,3	380,5	382,4	240,7	437,7	313,5	362,0	218,2
	53	750,5	395,8	440,7	273,3	501,6	332,3	396,6	251,3
	56	762,7	410,6	508,8	293,3	574,4	356,6	440,3	263,6
	59	791,5	420,1	588,9	315,5	661,6	378,3	491,9	271,3
	63	796,5	421,8	676,4	330,6	756,8	398,3	551,2	286,5

PB – PZ – pórobeton s přesným zděním, PB – KZ – pórobeton s klasickým zděním, CPP – cihla plná pálena, K – cihla pískovcová, R – referenční těleso, I – injektované těleso

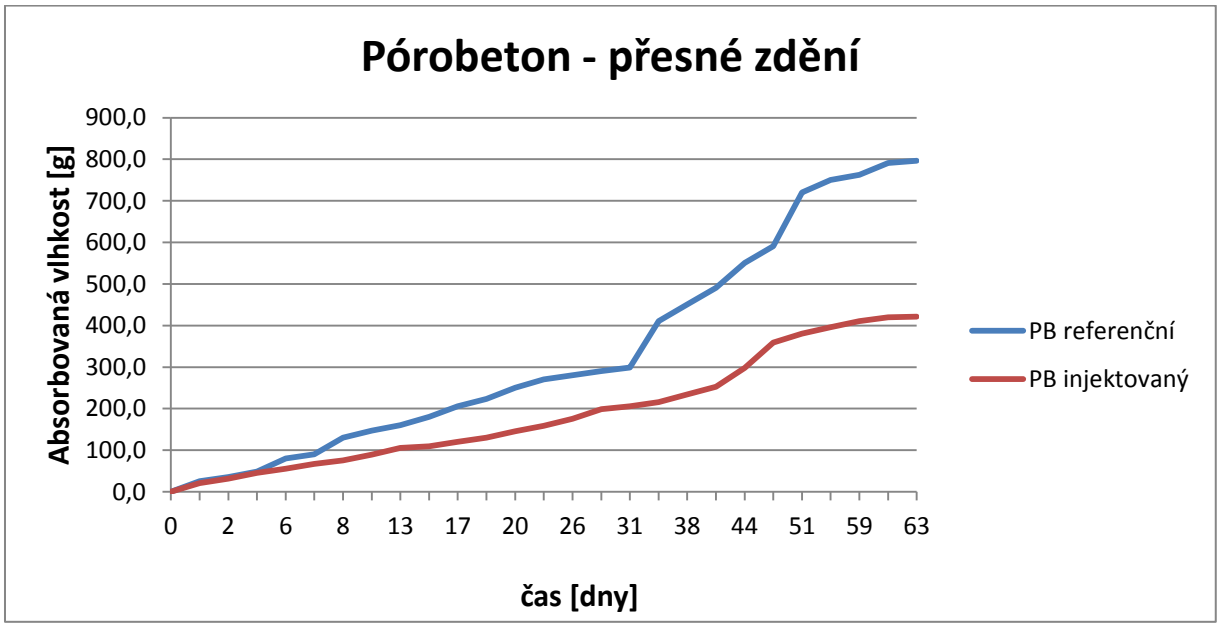


Obr. 30 – Výsledky měření prošlé vlhkosti u injektovaných a referenčních zkušebních pilířů cihly plné pálené

Obr. 31 – Výsledky měření prošlé vlhkosti u injektovaných a referenčních zkušebních pilířů cihly pískovcové



Obr. 32 – Výsledky měření prošlé vlhkosti u injektovaných a referenčních zkušebních pilířů pórobetonu s klasickým zděním



Obr. 33 – Výsledky měření prošlé vlhkosti u injektovaných a referenčních zkušebních pilířů pórobetonu s přesným zděním

Zjišťování obsahu vlhkosti metodou pevných bodů

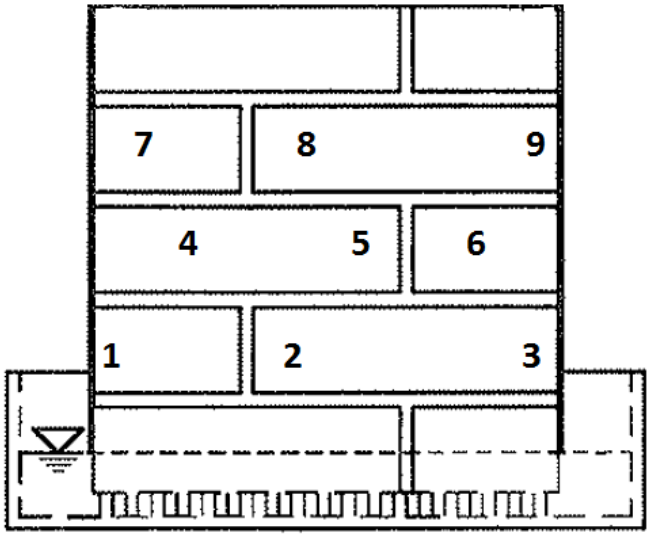
Pro stanovení obsahu vlhkosti metodou pevných bodů byla vlhkost stanovena odporovým vlhkoměrem. Před zahájením zkoušek byly na zkušebních pilířích vyznačeny měřící body tak, aby měření změny vlhkosti probíhalo vždy na stejném místě. Zkouška je prováděna stejným způsobem na injektovaných i referenčních tělesech. Výsledky jsou uvedeny v Tab. 26.

Tab. 26: Výsledky zjišťování obsahu vlhkosti metodou pevných bodů

	Vlhkost [%]													
	0 dnů				průměr	30 dnů			průměr	60 dnů				průměr
PB - PZ R	b1	52,3	b6	53,6	52,6	b1	55,9	b6	53,1	53,6	b1	56,1	b6	54,8	55,1
	b2	53,1	b7	50,8		b2	54,1	b7	52,6		b2	55,9	b7	55,1	
	b3	53,6	b8	52,1		b3	54,8	b8	53,1		b3	55,1	b8	54,5	
	b4	51,9	b9	53,1		b4	53,5	b9	52,0		b4	55,9	b9	53,2	
	b5	52,5	-	-		b5	53,6	-	-		b5	54,9	-	-	
PB - PZ I	b1	55,9	b6	53,5	53,1	b1	28,4	b6	27,5	28,5	b1	13,5	b6	11,5	12,6
	b2	52,8	b7	53,6		b2	28,1	b7	25,9		b2	15,7	b7	10,9	
	b3	54,8	b8	50,1		b3	28,1	b8	36,1		b3	12,5	b8	12,5	
	b4	54,5	b9	51,8		b4	27,5	b9	27,1		b4	12,0	b9	11,2	
	b5	51,2	-	-		b5	27,5	-	-		b5	13,5	-	-	
PB - KZ R	b1	50,1	b6	49,5	49,7	b1	49,6	b6	50,9	49,9	b1	51,3	b6	50,6	50,1
	b2	51,5	b7	49,6		b2	51,2	b7	48,1		b2	49,3	b7	49,6	
	b3	50,2	b8	48,6		b3	51,6	b8	49,7		b3	51,2	b8	48,6	
	b4	50,0	b9	48,6		b4	48,6	b9	49,6		b4	50,8	b9	50,1	
	b5	49,6	-	-		b5	50,1	-	-		b5	49,0	-	-	
PB - KZ I	b1	53,6	b6	49,1	50,6	b1	26,5	b6	24,4	23,7	b1	10,1	b6	10,5	10,3
	b2	51,9	b7	48,1		b2	23,6	b7	24,0		b2	11,5	b7	9,4	
	b3	50,9	b8	50,1		b3	25,9	b8	22,1		b3	12,5	b8	9,5	
	b4	52,0	b9	48,5		b4	24,5	b9	20,1		b4	9,5	b9	9,6	
	b5	50,8	-	-		b5	22,6	-	-		b5	10,5	-	-	
CPP - R	b1	41,5	b6	45,6	42,5	b1	43,2	b6	43,5	42,8	b1	43,8	b6	42,8	42,9
	b2	42,5	b7	41,2		b2	45,3	b7	41,6		b2	46,8	b7	41,5	
	b3	48,6	b8	40,6		b3	45,3	b8	41,5		b3	42,8	b8	40,2	
	b4	41,5	b9	40,2		b4	42,5	b9	40,5		b4	42,1	b9	40,5	
	b5	40,9	-	-		b5	42,1	-	-		b5	45,8	-	-	
CPP - I	b1	41,5	b6	39,5	40,2	b1	21,6	b6	19,5	19,5	b1	9,6	b6	8,5	8,5
	b2	40,8	b7	40,2		b2	20,6	b7	18,0		b2	9,0	b7	8,0	
	b3	40,6	b8	39,5		b3	21,3	b8	19,2		b3	9,1	b8	7,9	
	b4	40,7	b9	39,1		b4	18,5	b9	17,6		b4	8,1	b9	8,1	
	b5	40,2	-	-		b5	19,5	-	-		b5	8,0	-	-	
K - R	b1	46,2	b6	46,2	44,1	b1	47,8	b6	45,6	46,2	b1	51,6	b6	46,5	47,0
	b2	43,6	b7	42,5		b2	51,2	b7	42,9		b2	52,6	b7	42,1	
	b3	47,5	b8	40,1		b3	45,6	b8	45,6		b3	47,5	b8	45,6	
	b4	45,2	b9	45,5		b4	43,6	b9	45,2		b4	45,6	b9	46,1	
	b5	40,2	-	-		b5	48,5	-	-		b5	45,6	-	-	
K - I	b1	45,6	b6	45,6	44,7	b1	20,5	b6	20,6	21,0	b1	12,3	b6	10,6	10,4
	b2	48,6	b7	44,8		b2	22,3	b7	19,6		b2	14,6	b7	9,5	
	b3	49,3	b8	41,3		b3	25,5	b8	20,1		b3	12,5	b8	7,4	
	b4	45,2	b9	40,3		b4	20,1	b9	20,1		b4	9,5	b9	9,5	
	b5	41,5	-	-		b5	20,6	-	-		b5	7,5	-	-	

Vysvětlivky pro Tab. 26:

PB – PZ – pórobeton s přesným zděním, PB – KZ – pórobeton s klasickým zděním, CPP – cihla plná pálena, K – cihla pískovcová, R – referenční těleso, I – injektované těleso, b1-9 – bod měření 1-9



Obr. 34 – Schéma vyhodnocení obsahu vlhkosti metodou pevných bodů [18]

Z výsledků je patrné, že u všech čtyř testovaných typů zděných pilířů byla po aplikaci injektážního gelu prokázána existence vodorovné infuzní clony, která výrazně snižuje hodnotu prošlé kapilární vlhkosti skrz zkušební těleso. Největšího procentuálního snížení prošlé kapilární vlhkosti (při porovnání referenčního tělesa s injektovaným tělesem) bylo dosaženo u zděných pilířů pórobetonu s klasickým zděním. U těchto těles došlo po 63 dnech ke snížení o 51,12 % prošlé kapilární vlhkosti. Druhé největší snížení, s hodnotou 48,02 %, nastalo u těles cihly pískovcové. U těles z cihly plné pálené snížení prošlé kapilární vlhkosti dosáhlo 47,37 %. Nejmenší snížení bylo pozorováno u těles pórobetonu s přesným zděním, ale i přesto bylo pozorováno dostatečné snížení prošlé kapilární vlhkosti blížící se k 50 % (přesně o 47,04 %). I při vyhodnocení metody pevných bodů lze zřetelně pozorovat, že se naměřená vlhkost u injektovaných zděných pilířů výrazně snižovala, v porovnání se zděnými pilíři referenčními.

Celkově lze tedy po ověření touto zkouškou hodnotit injektážní gel jako účinný, kdy po jeho aplikaci došlo k vytvoření dodatečné chemické bariéry, která výrazně snížila průchod kapilární vlhkosti skrz zkušební tělesa. K vytvoření této bariéry došlo pomocí hydrofobizace stěn pórů stavebního materiálu.

4.4.5 Ověření účinnosti in-situ

Pro ověření účinnosti injektážního gelu in-situ bylo prvním krokem vyhledání vhodné stavby pro praktické provedení injektáže. Po zvolení vhodné zavlhlé stavební konstrukce došlo k předběžnému vyznačení plánované vodorovné roviny vrtů pro aplikaci injektážního gelu. Nad touto rovinou byla pomocí odporového vlhkoměru změřena vlhkost stavebního materiálu zabudovaného v konstrukci. Aplikace injektážního gelu in-situ proběhla dle pokynů výrobce injektážního prostředku. Jednalo se o beztlakovou injektáž. Průměr vrtů byl zvolen 20 mm a osová vzdálenost středů vrtů 100 mm. Celková tloušťka sanovaného zdiva činila 360 mm, z toho důvodu byla hloubka provedených vrtů cca 310 mm, čili o 50 mm menší než celková tloušťka zdiva.

Obr. 35 – Příprava injektážních vrtů v reálné stavební struktuře

Po ukončení vrtacích prací byly vrty vyčištěny vyfouknutím stlačeným vzduchem. Bylo tak provedeno z důvodu, aby prach, který zůstal po vrtání otvorů, negativně neovlivňoval schopnost penetrace injektážního gelu do pórů testovaného zdiva. Po tomto kroku jsme přistoupili k samotné beztlakové injektáži. Pro zaplnění celého objemu vrtu bylo spotřebováno 320 – 370 ml injektážního gelu. Injektáž byla prováděna v prostředí s relativní vlhkostí 45,5 % a teplotou 17,8 ºC.

Obr. 36 – Vrty injektované hydroizolačním gelem

Ověření účinnosti injektážního gelu při testování in-situ se hodnotí na základě naměřené vlhkosti zdiva před injektáží a po uplynutí 30 dnů od injektáže. Měření bylo provedeno na cihelném zdivu a zdící maltě. U každého materiálu ve třech stejných bodech nad úrovní infuzní clony. Naměřené výsledky jsou uvedeny v Tab. 27.

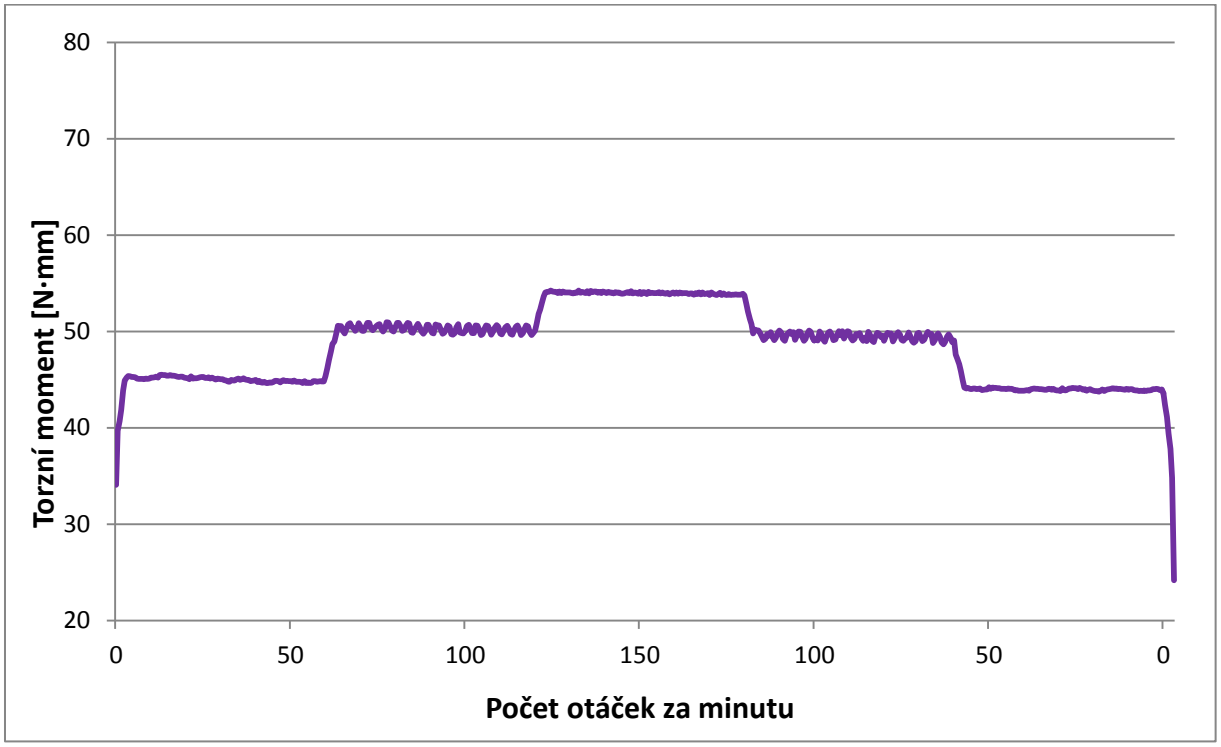
Tab. 27: Výsledky měření vlhkosti zdiva před a po aplikaci infuzní clony

	Vlhkost [%]			
	Cihla	**Cihla - průměr**	**Zdící malta**	**Zdící malta - průměr**
Před aplikací infuzní clony	11,5	**11,2**	7,5	**7,8**
	10,2		8,3	
	11,8		7,7	
Po třiceti dnech od aplikace infuzní clony	5,6	**5,0**	2,5	**2,4**
	4,4		2,7	
	5,0		2,1	

Z výsledků vlhkosti, naměřené u cihly plné pálené a zdící malty, lze již po 30 dnech po aplikaci infuzní clony pozorovat významné snížení vlhkosti. U cihly plné pálené došlo ke snížení o 55 % a u zdící malty dokonce až o 69 %. Hodnoty vlhkosti byly naměřeny odporovým vlhkoměr, tudíž se jedná pouze o hodnoty vlhkosti na povrchu stavebního materiálu. I tak lze ale tuto zkoušku vyhodnotit jako účinnou z hlediska ověření účinnosti injektážního gelu, jelikož prokazatelně došlo k vytvoření infuzní clony v okolí vrtů.

4.5 Shrnutí vlastností zvoleného injektážního gelu

V této kapitole budou přehledně vypsány a znázorněny vlastnosti zvoleného injektážního gelu, které vycházejí z provedených zkoušek v rámci projektu MPO FR-TI4/270. Zvoleným injektážním gelem je gel s označením C. Složení tohoto gelu je následující: triethoxy(octyl)silan, triethoxy(2,4,4-trimethylpentyl)silan, etanol, voda, walocel CRT 10G a 10 % jílových minerálů. Na *Obr. 37* je zobrazen výsledek reologického testu, jenž charakterizuje viskozitu injektážního gelu. Hodnota torzního momentu se pohybuje v optimálním rozmezí 40 – 60 N · mm. Toto rozmezí zaručuje dostatečně snadnou aplikovatelnost injektážního gelu, aniž by docházelo k vytékání injektážního gelu z vrtů, připravených pro chemickou injektáž.



Obr. 37 – Výsledek reologického měření injektážního gelu C

Shrnutí vlastností injektážního gelu C je zpracováno v Tab. 28. Ověření účinnosti injektážního gelu s označením C je zpracováno v Tab. 29. Hodnoty u zkoušky zděných pilířů dle WTA vyjadřují procentuální snížení průchodu kapilární vlhkosti u ošetřených zděných pilířů injektážním gelem vzhledem k referenčnímu zděnému pilíři daného materiálu po 63 dnech. Hodnota u ověření účinnosti in-situ udává procentuální zmenšení povrchové vlhkosti po 30 dnech od aplikace injektážního gelu.

Tab. 28: Shrnutí vlastností injektážního gelu C

Zkouška	Jednotka	CPP	K	PB	ZM1	ZM2
Stanovení povrchové vodotěsnosti	l/m^2	0,21	0,36	0,07	0,03	0,03
Stanovení nasákavosti	%	3,19	4,82	5,46	0,67	0,93
Zkoušky penetrace infuzní clony dle vlhkosti injektovaného materiálu						
– vlhkost 25 %	mm	25	35	29	12	45
– vlhkost 50 %	mm	33	15	35	25	38
– vlhkost 75 %	mm	41	29	38	29	35
– vlhkost 100 %	mm	53	27	61	32	62
Zkoušky penetrace infuzní clony dle teploty injektovaného materiálu						
– teplota 5 ºC	mm	28	21	18	58	19
– teplota 10 ºC	mm	31	27	29	54	25
– teplota 20 ºC	mm	50	27	35	46	51
– teplota 35 ºC	mm	73	29	41	45	39
Stanovení vzlínavosti	$[g \cdot 10^{-2}\ mm^2]$	1,88	1,34	0,57	0,26	1,12

CPP – cihla plná pálena, K – cihla pískovcová, PB – pórobeton, ZM1 – zdící malta 1, ZM2 – zdící malta 2

Tab. 29: Ověření účinnosti injektážního gelu C

Zkouška	Jednotka	CPP	K	PB - PZ	PB - KZ	ZM
Zděné pilíře dle WTA	%	47,37	48,02	47,04	51,12	-
In-situ	%	55,00	-	-	-	69,00

CPP – cihla plná pálena, K – cihla pískovcová, PB – PZ – pórobeton s přesným zděním, PB – KZ – pórobeton s klasickým zděním, ZM – zdící malta

5 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo sestavit metodiku pro testování injektážních gelů, jejíž součástí byl výběr jednoho ideálního injektážního gelu z osmi možných gelů, dodaných firmou Betosan s.r.o. pro výzkum. Dalším cílem diplomové práce bylo vytvoření metodiky testování zděných pilířů pórobetonu pomocí modifikované metody dle WTA. Poslední částí diplomové práce bylo shrnutí vlastností zvoleného injektážního gelu.

V praktické části práce byla vytvořena vlastní jedinečná metodika pro výběr jednoho ideálního injektážního gel a následně byly provedeny zkoušky pro osm různých injektážních gelů dle této metodiky. Tyto injektážní gely byly dodány firmou Betosan s.r.o. v rámci řešení projektu MPO FR-TI4/270. Injektážní gely byly vytvořeny na alkylakoxylanové bázi. Do těchto gelů byly přidány v různých procentuálních množstvích tyto druhotné suroviny: křemičité úlety, metakaoliny, zeolity, bentonity a jílové minerály. Gely s označením E, G a H jsou složeny methylsilikonátu draselného, hydyroxidu draselného, vody, walocelu CRT 10G a druhotné suroviny uvedené níže v daných poměrech. Gely s označením A, B, C, D a F mají složení následující: triethoxy(octyl)silan, triethoxy(2,4,4-trimethylpentyl)silan, etanol, voda, walocel CRT 10G a druhotné suroviny. Přímé složení injektážních gelů podléhá obchodnímu utajení a je uvedeno u výrobce injektážních gelů i u zpracovatele diplomové práce. Detailní složení určitých injektážních gelů bude uvedeno při obhajobě diplomové práce. Jak již bylo zmíněno, do každého z gelů bylo přidáno rozdílné množství druhotných surovin. Do gelu A a C bylo dávkováno shodně 10 % jílových minerálů. Gel B a D shodně obsahuje 3 % metakaolinu, avšak obsah zeolitu je u gelu B 7 % a u gelu D 3 %. Gel E byl připraven s 50% zastoupením bentonitu a 8 % jílových minerálů.

Výrobní směs gelu F obsahovala pouze 5 % bentonitu. Při výrobě gelu G bylo dávkováno 3 % křemičitých úletů a 25 % bentonitu. Posledním testovaným injektážním gelem byl gel H, v jehož složení nalezneme 3 % křemičitých úletů, 3 % metakaolinu a 20 % bentonitu.

Zvolená metodika testování vychází převážně ze zkoušek na zmenšených tělesech, což proces výběru velmi urychlí a také ušetří množství použitého stavebního materiálu. Pro tyto vlastnosti je vytvořená metodika unikátem ve své oblasti a podporuje vývoj testování injektážních hmot. V rámci diplomové práce byly provedeny zkoušky stanovení vzlínavosti, ověření účinnosti pomocí zděných pilířů dle směrnice WTA a ověření účinnosti in-situ.

V první části navržené metodiky byly zkoušky (stanovení nasákavosti a zkouška vodotěsnosti) zvoleny pro své nenáročné provedení a prvotní prokázání účinnosti zkoušených injektážních gelů. Jejich výsledky byly podkladem pro multikriteriální optimalizační výběr tří gelů nejvhodnějších pro chemickou sanaci vlhkého zdiva. Byly jimi injektážní gely s označením B, C a D. Tyto injektážní gely se vyznačují velmi podobným složením. U těchto gelů byly použity jako druhotné suroviny metekaolin, zeolity a jílové minerály (u gelu C pouze jílové minéraly), což nám prokazatelně určilo, že právě tyto druhotné suroviny jsou nejvíce vhodné jako příměsy při výrobě injektážních gelů. Nejlepších výsledků tyto gely dosahují také z důvodu obsahu triethoxy(octyl)silanu a triethoxy(2,4,4-trimethylpentyl)silanu. Tyto dvě složky byly u gelů E, G a H zaměněny za methylsilikonát draselný a hydyroxid draselný, což mělo za následek výrazně horších penetračních vlastností těchto injektážních gelů.

V druhé části navržené metodiky byly zkoušky (stanovení vzlínavosti, stanovení míry penetrace dle rozdílné vlhkosti a stanovení míry penetrace dle rozdílné teploty) zvoleny pro svou korespondenci s principem působení injektážních gelů v praxi. Jejich výsledky byly podkladem pro multikriteriální optimalizační výběr jednoho finálního gelu nejvhodnějšího pro chemickou sanaci vlhkého zdiva. Tímto gelem byl zvolen injektážní gel s označením C, který získal nejvíce preferenčních procent. Gel C dosahuje nejlepších vlastností z důvodu optimálního obsahu složek triethoxy(octyl)silanu a triethoxy(2,4,4-trimethylpentyl)silanu a oproti gelům B a D se vyznačuje nulovým obsahem metakaolinu a zeolitů. Tyto dvě složky byly nahrazeny vyšším obsahem jílových minerálů, konkrétně 10 %, což při testování bylo rozhodujícím faktorem, který dodal tomuto injektážnímu gelu nejoptimálnější vlastnosti pro hydrofobizaci pórů stavebního materiálu. Gel C byl optimalizační metodou vybrán, jelikož u tří z pěti testovaných materiálů vykazoval nejvyšších hodnot průměrné míry penetrace při různých vlhkostech, stejně tak i míry penetrace při různých teplotách. Průměrné hodnoty ze všech zkoušených materiálů u zkoušek míry penetrace byly u vzorků ošetřených gelem C nejvyšší. Tyto výsledky podpořily i výsledky stanovení vzlínavosti, kdy vykazovaly vzorky s gelem C rovněž u tří stavebních materiálů nejnižších průměrných hodnot vzlínavosti.

V třetí části této navržené metodiky byl injektážní gel testován zkouškami pro ověření jeho účinnosti. U ověření účinnosti pomocí zděných pilířů dle směrnice WTA 4-4-04/D došlo po 63 dnech k největšímu snížení prošlé kapilární vlhkosti o 51,12 % a to u zkušebních pilířů pórobetonových s klasickým zděním. Nejmenší snížení bylo pozorováno u těles pórobetonu

s přesným zděním, kdy nastalo snížení prošlé kapilární vlhkosti o 47,04 %. Celkově lze tedy u všech testovaných těles pozorovat podobné výsledky s hranicí snížené prošlé kapilární vlhkosti okolo 50 %. U ověření účinnosti in-situ lze již po 30 dnech po aplikaci infuzní clony pozorovat významné snížení povrchové vlhkosti stavebního materiálu sanovaného objektu. U cihly plné pálené došlo ke snížení o 55 % a u zdící malty dokonce až o 69 %. Tohoto výrazného snížení vlhkosti bylo dosaženo hydrofobizací pórů zdiva v okolí vrtu, čímž došlo k zamezení šíření vlhkosti nad tuto hydrofobizovanou část zdiva. Úbytku vlhkosti v okolí vrtu bylo také dosaženo speciálním navržením báze injektážního gelu tak, aby po aplikaci injektážního gelu do vrtu docházelo ke spotřebovávání vlhkosti ze zdiva. Tento princip působení se při zkouškách osvědčil jako velmi účinný a byla prokázána jeho možnost využití v praxi při chemických sanacích vlhkého zdiva.

V praxi se setkáváme stále více a více s využitím injektážních gelů na pórobetonových stavebních konstrukcích, zasažených vlhkostí. Z tohoto důvodu vyvstal požadavek na vytvoření modifikované metodiky dle směrnice WTA 4-4-04/D pro ověření účinnosti injektážních gelů na pórobetonových zděných pilířích. Poprvé byla unikátně vytvořena modifikovaná metodika testování jak pro pórobetonové zkušební pilíře s přesným zděním, tak i pro pórobetonové zkušební pilíře s klasickým zděním. Tato vytvořená metoda byla shledána jako velmi účinná s transparentními výsledky a je ji možno v budoucnu využívat při testování injektážních gelů na pórobetonových zkušebních tělesech.

Závěrečným cílem a také závěrečnou kapitolou praktické části diplomové práce bylo shrnutí vlastností zvoleného injektážního gelu. Práce byla přínosem pro řešení projektu MPO FR-TI4/270, kdy na základě provedených experimentálních zkoušek byl vybrán injektážní gel s nejvhodnějšími vlastnostmi. Gel C byl připraven z triethoxy(octyl)silanu, triethoxy(2,4,4-trimethylpentyl)silanu, etanolu, vody, walocelu CRT 10G a 10 % jílových minerálů. Viskozita injektážního gelu je u této receptury ideální z hlediska možnosti injektáže horizontálních vrtů (gel nevytéká), ale zároveň nedosahuje tak vysokých hodnot, aby nedocházelo k dostatečné penetraci oblasti kolem injektážního vrtu. Nejvyšší hodnoty povrchové vodotěsnosti byly pozorovány u vzorků obou druhů zdící malty, a to 0,03 l/m^2. Naopak nejvyšší množství vody prošlé povrchovou úpravou po 30 minutách bylo naměřeno u vzorku cihly pískovcové, a to 0,36 l/m^2. Nejnižší nasákavost byla po ošetření vzorků tímto gelem sledována opět u vzorků zdící malty (0,67 %). Nejvyšší nasákavost byla sledována u vzorků pórobetonu s průměrnou hodnotou 5,46 %. Tento trend je způsoben vysokou

pórovitosti pórobetonu. Zkoušky penetrace infuzní clony dle vlhkosti injektovaného materiálu byly stanoveny pro každý testovaný materiál rozdílně, avšak nejlepších výsledků, čili největších průměrů penetrované plochy v okolí vrtu, bylo dosahováno u vzorků maximálně nasáknutých. Tento trend platí pro cihlu plnou pálenou, pórobeton a oba druhy zdících malt. Pouze u vzorku cihly pískovcové byly nejlepší výsledky pozorovány u vzorků s vlhkostí 25 %. U vzorků ošetřených gelem C byla nejvyšší střední hodnota průměru penetrované plochy v okolí vrtu 62 mm a bylo jí dosaženo u vzorků zdící malty 2. U zkoušky penetrace infuzní clony dle teploty injektovaného materiálu byly pozorovány nejvyšší výsledky u teploty 35 ºC a to hned u třech zkoušených materiálů (cihla plná pálená, cihla pískovcová a pórobeton). U zdící malty 1 bylo nejvyšší míry penetrace dosaženo při teplotě 5 °C a u zdící malty 2 při teplotě injektovaného vzorku 20 ºC. Celkově největší průměrná hodnota penetrované plochy v okolí vrtu vyšla 73 mm a bylo tomu tak u vzorku cihly plné pálené při teplotě 35 ºC. Další prováděnou zkouškou bylo stanovení vzlínavosti. Nejnižších hodnot bylo dosaženo u vzorků zdící malty 1, u nichž činila průměrná hodnota vzlínavosti 0,26 g · 10^{-2} mm^2. Naopak nejvyšších hodnot bylo dosaženo u cihly plné pálené a to 1,88 g · 10^{-2} mm^2. Dále byla pro tento gel provedena zkouška ověření jeho účinnosti dle směrnice WTA 4-4-04/D, kdy při testování zděných pilířů bylo u všech zkoušených materiálů pozorováno podobné (cca 50%) snížení prošlé vzlínající vlhkosti. Největšího procentuálního snížení prošlé vzlínající vlhkosti bylo dosaženo u pórobetonových těles s klasickým zděním a to 51,12 % oproti referenčnímu tělesu. Další zkouškou ověření účinnosti injektážního gelu byla zkouška in-situ. Tato zkouška prokázala snížení povrchové vlhkosti cihelného zdiva a zdící malty o více než 50 % po 30 dnech od aplikace infuzní clony. Konkrétní snížení činilo u cihly plné pálené 55 % a u zdící malty dokonce až 69 % oproti původnímu stavu.

Na základě výsledků těchto zkoušek ověření účinnosti lze injektážní gel C na alkylakoxylanové bázi vyhodnotit jako účinný, neboť po jeho aplikaci došlo k jednoznačnému potvrzení účinků tohoto gelu jak při laboratorních zkouškách, tak při zkouškách in-situ. Jeho vysoká účinnost je způsobena vysokou hydrofobizační schopností, a také vysokou mírou penetrace ve vlhkém zdivu. Po aplikaci tohoto injektážního gelu prokazatelně dochází v horizontální linii provedených vrtů ke vzniku infuzní clony, což má za následek snížení vlhkosti stavebního materiálu nad touto dodatečně vytvořenou chemickou bariérou a zdivo již nepropouští další kapilární vlhkost nad tuto bariéru z důvodu dostatečné hydrofobizace pórů.

Uvedená problematika je řešena v rámci projektu ***MPO FR-TI4/270*** *s názvem: Gelový infuzní clonový systém pro dodatečnou hydroizolaci různých druhů zdiva s využitím druhotných surovin.*

Použitá literatura a normy

[1] WITZANY, J., WASSERBAUER, R., ČEJKA, T. ZIGLER, R. *PDR - Poruchy, degradace a rekonstrukce*. 1. vyd. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2010. 458 s. ISBN 978-80-01-04488-9.

[2] GREGEROVÁ, M. *Degradace stavebních materiálů historických památek*. Vyd. 1. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2012, 111 s. ISBN 978-80-7375-684-0.

[3] KLEČKA, T. *Metody průzkumu vlhkých staveb*. Vyd. 1. Praha: Vědeckotechnická společnost pro sanace staveb a péči o památky - WTA CZ, 2007, 124 s. ISBN 978-80-02-01944-2.

[4] SVOBODA, L. *Stavební hmoty*. 3. elektronické vyd. Praha: 2013, 950 s. ISBN 978-80-260-4972-2. Dostupné z: http://people.fsv.cvut.cz/~svobodal/sh/

[5] BALÍK, M. *Odvlhčování staveb*. 1. vyd. Praha: Grada, 2005, 286 s. ISBN 80-247-0765-9.

[6] BALÍK, M. *Vysušování zdiva*. 3., upr. vyd. Praha: Grada, 2002, 73 s. ISBN 80-247-0438-2.

[7] *Sanace vlhkého zdiva budov: 4. symposium s mezinárodní účastí Plzeň, říjen 1990 : sborník přednášek*. Plzeň: Závodní pobočka ČSVTS Stavebního podniku města Plzně, 1990, 284 s.

[8] SOLAŘ, J. *Odstraňování vlhkosti: sanace vlhkého zdiva*. 1. vyd. Praha: Grada, 2013, 101 s. ISBN 978-80-247-4708-8.

[9] VLČEK, M, KLEČKA T. *Sanace vlhkého zdiva*. Vyd. 1. Praha: Česká stavební společnost, 2000, 107 s. ISBN 80-02-01367-0.

[10] BALÍK, M. *Vysušování zdiva II*. Vydání první. Praha: Grada, 1997. ISBN 80-7169-440-1.

[11] DROCHYTKA, R., MATULOVÁ, P. *Lehké stavební látky. Předmět BJ10. Modul M01. Studijní opory*. Brno, 2006. VUT v Brně, fakulta stavební.

[12] DOHNÁLEK, P., BOHUŠ, Š. a kolektiv. *Roční výzkumná zpráva o řešení projektu MPO FR-TI4/270: Gelový infuzní clonový systém pro dodatečnou hydroizolaci různých druhů zdiva s využitím druhotných surovin*. Brno, 2012. VUT v Brně, fakulta stavební.

[13] DOHNÁLEK, P., DROCHYTKA, R. a kolektiv. *Roční výzkumná zpráva o řešení projektu MPO FR-TI4/270: Gelový infuzní clonový systém pro dodatečnou hydroizolaci různých druhů zdiva s využitím druhotných surovin*. Brno, 2013. VUT v Brně, fakulta stavební.

[14] DROCHYTKA, R., DOHNÁLEK, P., BYDŽOVSKÝ, J., MELICHAR, J. *Výzkumná zpráva o řešení projektu MPO FR-TI4/270*: *Gelový infuzní clonový systém pro dodatečnou hydroizolaci různých druhů zdiva s využitím druhotných surovin; Podetapa 8a – Souhrnné vyhodnocení všech laboratorních zkoušek*. Brno, 2013. VUT v Brně, fakulta stavební.

[15] ROVNANÍKOVÁ, P. *Stavební chemie*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005, 48 s. ISBN 80-720-4410-9.

[16] *Anderegg AG Mauerentfeuchtung*, [online]. [cit. 2015-11-26]. Dostupné z: http://www.elektroosmose.ch/16429.html

[17] *Degola, izolace vlhkého zdiva*, [online]. [cit. 2015-11-26]. Dostupné z: http://www.degola.cz/sanace-a-izolace-zdiva-retezovou-pilou.html

[18] WTA směrnice 4-4-04/D: Injektáž zdiva proti kapilární vlhkosti. Praha: Tauris, 2005. ISBN 80-02-01773-0.

[19] WTA směrnice 2-9-04/D Sanační omítkové systémy. Praha: Vědeckotechnická společnost pro sanace staveb a péči o památky – WTA CZ, 2008.

[20] ČSN P 73 0600 Hydroizolace staveb – Základní ustanovení (2000).

[21] ČSN P 73 0610 Hydroizolace staveb – Sanace vlhkého zdiva – Základní ustanovení (2000).

[22] ČSN EN 480-11 Přísady do betonu, malty a injektážní malty - Zkušební metody - Část 11: Stanovení charakteristiky vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu (2006).

[23] ČSN 73 1357: Stanovení kapilárních vlastností pórobetonu.

[24] ČSN EN 772-11: Část 11: Stanovení nasákavosti betonových tvárnic a zdících prvků z umělého a přírodního kamene vlivem kapilarity a počáteční rychlosti nasákavosti pálených zdících prvků.

[25] ČSN 73 2578: Zkouška vodotěsnosti povrchové úpravy stavebních konstrukcí.

Seznam tabulek

Tab. 1: Kategorie a hodnoty informativní návrhové životnosti nosných konstrukcí dle ČSN EN 1990 (2004) [1] 12

Tab. 2: Hydratační tlaky vznikající při rekrystalizaci některých solí [1] 13

Tab. 3: Objemové změny probíhající při hydrataci některých látek [1] 14

Tab. 4: Pevnost cihel, malty a pískovce v závislosti na vlhkosti [5] 24

Tab. 5: Klasifikace vlhkosti zdiva dle ČSN 73 0610 [5] 27

Tab. 6: Běžná vlhkost stavebních materiálů (%) v závislosti na relativní vlhkosti [5] 27

Tab. 7: Přehled druhů injektážních materiálů a jejich působení v pórech zdiva [10] 38

Tab. 8: Požadavky na sanační omítku dle WTA [19] 47

Tab. 9: Opatření v souvislosti se stupněm zasolení [6] 47

Tab. 10: Orientační fyzikální vlastnosti cihelného střepu [4] 48

Tab. 11: Fyzikálně-mechanické vlastnosti pískovce [4] 49

Tab. 12: Hodnoty pevnosti v tlaku v třídách malt [4] 50

Tab. 13: Fyzikálně-mechanické vlastnosti pískových pórobetonových tvárnic [4] 51

Tab. 14: Obecné schéma provádění zkoušky [18] 58

Tab. 15: Výběr kritérií 63

Tab. 16: Výpočet váhy jednotlivých kritérií 64

Tab. 17: Vyčíslení jednotlivých kritérií 64

Tab. 18: Výsledek optimalizace injektážních gelů 65

Tab. 19: Výsledky stanovení vzlínavosti 66

Tab. 20: Výběr kritérií 68

Tab. 21: Výpočet váhy jednotlivých kritérií 69

Tab. 22: Vyčíslení jednotlivých kritérií 69

Tab. 23: Výsledek optimalizace injektážních gelů 70

Tab. 24: Výsledky stanovení obsahu uvolněné vlhkosti prostřednictvím silikagelu 75

Tab. 25: Výsledky zjišťování obsahu vlhkosti metodou pevných bodů 78

Tab. 26: Výsledky měření vlhkosti zdiva před a po aplikaci infuzní clony 81

Tab. 27: Shrnutí vlastností injektážního gelu C 83

Tab. 28: Ověření účinnosti injektážního gelu C 83

Seznam obrázků

Obr. 1 – Vliv relativní vlhkosti vzduchu na rovnovážnou vlhkost stavebního materiálu [3] .. 18

Obr. 2 – Schematické znázornění prostupu vlhkosti kapilárami a dutinami (podle Krischera) [3] 21

Obr. 3 – Rozhraní zvýšené a normální vlhkosti zdiva [3] 22

Obr. 4 – Typické cesty pro průnik vody a vlhkosti do zdiva [7] 23

Obr. 5 – Orientační příčiny vlhnutí na základě měření vlhkosti v průběhu tloušťky zdiva (hodnoty vlhkosti jsou příkladové)[6] 26

Obr. 6 – Způsob vkládání hydroizolace při podsekávání zdiva [9] 30

Obr. 7 – Schéma a foto řetězové pily [9], [17] 30

Obr. 8 – Schéma lanové pily [9] 31

Obr. 9 – Princip zarážení izolačních plechů do zdiva (HW systém)[9] 32

Obr. 10 – Schéma vrtů metody MASSARI prvního a druhého cyklu [9] 33

Obr. 11 – Beztlaková injektáž [17] 35

Obr. 12 – Tlaková injektáž [17] 36

Obr. 13 – Principy působení snižování vlhkosti – schematické zobrazení [13] 37

Obr. 14 – Princip funkce sanační štoly s přívodem a odvodem vzduchu [9] 40

Obr. 15 – Princip soklové provětrávací dutiny [9] 40

Obr. 16 – Princip elektroosmotického jevu [9] 42

Obr. 17 - Schéma aktivní elektroosmózy [16] 43

Obr. 18 – Metodika výběru optimálního injektážního gelu 53

Obr. 19 – Schéma zkušebního tělesa pro beztlakovou injektáž [19] 60

Obr. 20 – Schéma uspořádání zkoušky pro měření odpařené vlhkosti ze zdiva [19] 61

Obr. 21 – Zkušební vzorky smíšeného zdiva 66

Obr. 22 – Grafické vyhodnocení stanovení vzlínavosti 67

Obr. 23 – Výsledky stanovení vzlínavosti smíšeného zdiva 67

Obr. 24 – Zdění zkušebních pilířů dle směrnice WTA 4-4-04/D (postupně: pórobeton přesné zdění, cihla pískovcová, pórobeton klasické zdění, cihla plná pálená) 71

Obr. 25 – Vyzděné zkušební pilíře (postupně zleva: 2x cihla pískovcová, 2x cihla plná pálená, 2x pórobeton klasické zdění) 56

Obr. 26 – Postup vzlínající vlhkosti ve zkušebních pilířích po 24 hodinách (postupně: cihla pískovcová, cihla plná pálená, pórobeton klasické zdění, pórobeton přesné zdění) 72

Obr. 27 – Příprava injektážních vrtů (postupně: cihla pískovcová, cihla plná pálená) 72

Obr. 28 – Injektáž zkušebních pilířů (postupně: cihla pískovcová, cihla plná pálená, pórobeton klasické zdění, pórobeton přesné zdění) 73

Obr. 29 – Zkušební pilíř cihly plné pálené opatřený plastovým „zvonem“ a umístění silikagelu v plastovém „zvonu“ 74

Obr. 30 – Výsledky měření prošlé vlhkosti u injektovaných a referenčních zkušebních pilířů cihly plné pálené 76

Obr. 31 – Výsledky měření prošlé vlhkosti u injektovaných a referenčních zkušebních pilířů cihly pískovcové 76

Obr. 32 – Výsledky měření prošlé vlhkosti u injektovaných a referenčních zkušebních pilířů pórobetonu s klasickým zděním 77

Obr. 33 – Výsledky měření prošlé vlhkosti u injektovaných a referenčních zkušebních pilířů pórobetonu s přesným zděním 77

Obr. 34 – Schéma vyhodnocení obsahu vlhkosti metodou pevných bodů [19] 79

Obr. 35 – Příprava injektážních vrtů v reálné stavební struktuře 80

Obr. 36 – Vrty injektované hydroizolačním gelem 81

Obr. 37 – Výsledek reologického měření injektážního gelu C 82