



POLITECHNIKA POZNAŃSKA
Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu



mgr inż. Bartłomiej Monczyński

Skuteczność wtórnych hydroizolacji poziomych wykonywanych metodą iniekcji chemicznej

Rozprawa doktorska napisana pod kierunkiem
dra hab. inż. Krzysztofa Zielińskiego, prof. PP

Poznań 2021

Żadne wykształcenie nie hańbi!

Z programu *Trąbka dla gubernatora* Kabaretu Potem

Z dedykacją dla mojej Żony, bez której ta praca by nie powstała

Spis treści

Streszczenie	6
Summary	8
Zusammenfassung.....	10
Wykaz najważniejszych oznaczeń	12
Wstęp	14
Wprowadzenie – cel i zakres pracy	16
1 Wilgotność materiałów i przegród budowlanych	19
1.1 Woda – informacje podstawowe i występowanie	19
1.2 Wewnętrzna struktura materiałów budowlanych	22
1.3 Wilgotność materiałów budowlanych.....	23
1.4 Fazowe przemiany wilgoci w materiałach budowlanych	28
1.4.1 Sorpcja	28
1.4.2 Kondensacja objętościowa	30
1.4.3 Dyfuzja pary wodnej w materiałach porowatych.....	31
1.5 Transport wody w postaci ciekłej.....	33
1.5.1 Podciąganie kapilarne	35
1.5.2 Współczynnik absorpcji kapilarnej	42
2 Szkody wilgotnościowe w przyziemnej części budynku	46
2.1 Woda występująca w gruncie.....	46
2.2 Negatywne skutki zawilgocenia budynków.....	48
2.3 Zasolenie budynków.....	57
3 Ochrona budynku przed wilgocią podciąganą z gruntu	63
3.1 Ogólna koncepcja hydroizolacji wtórnych.....	63
3.2 Ochrona budowli przed kapilarnym transportem wilgoci z gruntu	68
3.3 Metody elektrofizyczne	70
3.4 Mechaniczne metody wykonywania wtórnych hydroizolacji poziomej.....	73
4 Wtórne hydroizolacje poziome wykonywane w technologii iniekcji	79
4.1 Początki i rozwój metod iniekcyjnych	79
4.1.1 Metoda Politechniki Krakowskiej	79
4.1.2 Metoda elektroiniekcji (EI)	80
4.1.3 Metoda termoiniekcji	81
4.1.4 Iniekcja krystaliczna.....	83

4.1.5	Parafinowa iniekcja termohermetyczna	84
4.2	Technologia iniekcji – zasada działania	85
4.3	Nieorganiczne i organiczne związki krzemu	87
4.4	Preparaty iniekcyjne na bazie związków krzemu	89
4.5	Pozostałe środki iniekcyjne	94
4.6	Wykonywanie izolacji poziomej metodą iniekcji.....	97
4.7	Stosowane kryteria doboru środków iniekcyjnych	103
4.7.1	Metoda ITB	104
4.7.2	Metoda WTA	105
4.7.3	Metoda BuFAS	109
4.7.4	Metoda BBA.....	110
4.7.5	Metoda TU Delft.....	112
4.7.6	Metoda Dahlberg-Institut Wismar	113
5	Problem badawczy - geneza	116
5.1	Znaczenie hydroizolacji przeciw wilgoci kapilarnej	116
5.2	Ocena skuteczności metod iniekcyjnych	117
5.2.1	Badania BAM	117
5.2.2	Alte Oper we Frankurcie.....	120
5.2.3	Badania Politechniki Krakowskiej	121
5.2.4	Badania IBF	124
5.2.5	Badania Politechniki Lubelskiej	127
5.2.6	Badania Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego	129
5.3	Badania własne autora (badania wstępne).....	130
5.3.1	Penetracja preparatów iniekcyjnych w cegle ceramicznej.....	130
5.3.2	Wpływ środków iniekcyjnych na właściwości zaprawy murarskiej.....	132
5.3.3	Wysychanie muru oraz skuteczność iniekcji	135
6	Metoda badawcza	142
6.1	Cel i przedmiot badań	142
6.2	Metodyka badań	143
6.2.1	Przygotowanie i selekcja próbek	143
6.2.2	Zawilgocenie	144
6.2.3	Wykonanie iniekcji.....	145
6.2.4	Badanie absorpcji kapilarnej	146
6.3	Wyniki badań.....	150

7	Interpretacja wyników badań.....	178
7.1	Dynamika absorpcji kapilarnej i jej redukcja.....	178
7.2	Iniekcja niskociśnieniowa	181
7.3	Krem iniekcyjny (emulsja o/w).....	182
7.4	Krem iniekcyjny (emulsja w/o).....	182
	Podsumowanie i wnioski.....	184
	Bibliografia.....	187
	Spis rysunków.....	199
	Spis fotografii.....	204
	Spis tabel	206
	Spis równań	210

Streszczenie

Skuteczność wtórnych hydroizolacji poziomych wykonywanych metodą iniekcji chemicznej

Z zawilgoceniem ścian przyziemia (a co za tym idzie, ze szkodami przez zawilgocenie powodowanymi) spotyka się częstokroć w budynkach zabytkowych, lecz niestety również w budynkach stosunkowo nowych. Problem ten jest następstwem kapilarnego podciągania wód gruntowych spowodowanego brakiem, uszkodzeniem lub technicznym zużyciem izolacji poziomej muru.

Kapilarna adsorpcja i transport wilgoci determinowane są przez właściwości zwilżające wody w stosunku do materiału oraz przez strukturę i rozkład porów w materiale. Zachodzą one zatem – w przypadku materiałów hydrofilowych (kąt zwilżania przez wodę $< 90^\circ$) – w porach o promieniu od 10^{-7} do 10^{-4} m, nazywanych też porami kapilarnymi.

Na przestrzeni lat wypracowano szereg różnorodnych metod wykonywania tzw. wtórnej izolacji poziomej w murze. W przypadku metod mechanicznych w istniejący mur wprowadza się materiał izolacyjny, dzięki czemu w przekroju muru powstaje całkowicie nieprzepuszczalna dla wody, trwała warstwa, zapewniając tym samym zahamowanie jej kapilarnego transportu. Metody chemiczne (iniekcyjne) bazują na technologii wprowadzania w mur płynu iniekcyjnego, dzięki czemu powstaje blokada oparta na mechanizmie zwężenia światła kapilar, hydrofobizacji, uszczelnienia kapilar lub oddziaływaniu kombinowanym.

Przedmiotem pracy było poznanie zjawiska kapilarnego transportu wilgoci w przegrodach budowlanych oraz sposobów przeciwdziałania temu zjawisku, jak również analiza stosowanych dotychczas w kraju i na świecie metod oceny szeroko rozumianej skuteczności wtórnych izolacji poziomych wykonywanych w technologii iniekcji chemicznej. Z kolei celem pracy stało się zaproponowanie parametru pozwalającego ocenić i porównać skuteczność stosowanych środków iniekcyjnych.

Skuteczność środków iniekcyjnych w oczywisty sposób weryfikowana jest przez zastosowania praktyczne. Kluczową rolę w długofalowej ocenie środków iniekcyjnych mają jednak badania prowadzone zarówno laboratoryjne, jak i in situ (czyli w rzeczywistych warunkach zastosowania). Badania takie prowadzone są niemal od początku stosowania w budownictwie środków iniekcyjnych mających zapobiegać kapilarnemu zawilgacaniu przegród budowlanych. Obserwacji poddawany był wpływ preparatów iniekcyjnych bezpośrednio na stosowane w murach materiały budowlane (cegłę, kamień, zaprawę), na mury referencyjne (o zróżnicowanych rozmiarach), jak również prowadzono badania w warunkach rzeczywistych (na istniejących obiektach). W pracy opisano wybrane, przeprowadzone na przestrzeni kilkudziesięciu lat, w kraju i za granicą, badania dotyczące zastosowania i skuteczności metody odtwarzania poziomej izolacji przeciwwilgociowej muru w technologii iniekcji, w tym również badania własne autora.

W ramach pracy przeprowadzono badania absorpcji kapilarnej na niewielkich murkach referencyjnych, tj. próbkach składających się z sześciu cegieł ceramicznych ułożonych w trzy warstwy (na szerokość jednej cegły w obu kierunkach) i połączonych zaprawą wapienno-cementową. Próbkę podzielono na grupy, a następnie zawilgocono – przy użyciu wody wodociągowej oraz roztworem mieszaniny soli – do dwóch stopni nasycenia ($S=80\%$ oraz 95%) oraz poddano iniekcji – metodą niskociśnieniową (przy zastosowaniu preparatu na bezie krzemianów i metylokrzemianów alkalicznych) oraz w technologii kremów iniekcyjnych (przy zastosowaniu dwóch typów kremu). Badanie absorpcji prowadzono umieszczając próbki w pojemnikach z wodą w taki sposób, aby ciecz przez cały okres badania miała styczność jedynie z dolną powierzchnią oraz rejestrując zmianę masy próbki w czasie 24 godzin od zanurzenia. Po zakończeniu badania dla każdej z próbek obliczono wartości przyrostu masy na jed-

nostkę powierzchni zanurzonej w wodzie (po każdym ważeniu) oraz wykonano wykresy tej wielkości w funkcji pierwiastka z czasu zanurzenia w wodzie. Analogiczne badania wykonano dla dwóch rodzajów próbek referencyjnych, tj. nie poddanych iniekcji oraz zawierających powłokową hydroizolację z mineralnej zaprawy uszczelniającej.

Z uwagi na zróżnicowany kształt wykresów absorpcji kapilarnej badanych próbek, zaproponowano wprowadzenie nowej wielkości, pozwalającej ocenić przebieg procesu absorpcji – współczynnika dynamiki absorpcji kapilarnej (po 24 h od zanurzenia) $d_{wa,24'}$. Natomiast w celu oceny skuteczności środków iniekcyjnych przeciwdziałających podciąganiu kapilarnemu wilgoci, zaproponowano wprowadzenie kolejnej nowej wielkości, czyli stopnia redukcji dynamiki absorpcji kapilarnej R_{ad} , uwzględniającej dwie wartości odniesienia, tj. średnie wartości współczynnika dynamiki absorpcji kapilarnej próbek nie poddanych iniekcji oraz zawierających powłokową izolację mineralną.

Wyniki przeprowadzonych badań potwierdziły postawioną wcześniej tezę – zarówno stosowany środek iniekcyjny i sposób jego aplikacji, jak również stopień zawilgocenia i zasolenia przegrody mają istotny wpływ na skuteczność wykonania wtórnej hydroizolacji poziomej przeciw wilgoci podciąganej kapilarnie. Zaobserwowano również, że istotnym efektem wykonania w murze wtórnej hydroizolacji poziomej metodą iniekcji jest nie tylko ograniczenie absorpcji, ale również zmiana jej dynamiki. W związku z powyższym zaproponowano nową procedurę prowadzącą do ustalenia stopnia redukcji dynamiki absorpcji kapilarnej, jako kryterium pozwalającego klasyfikować środki iniekcyjne pod kątem ich wpływu na zahamowanie kapilarnego transportu wilgoci w przegrodach budowlanych.

Summary

Effectiveness of secondary horizontal waterproofing by chemical injection

Dampness of the ground floor walls (and thus the damage caused by dampness) is often encountered in historic buildings, but unfortunately also in relatively new buildings. This problem is caused by capillary rising of ground water due to lack of, damage or technical wear of the horizontal insulation of the masonry.

Capillary adsorption and moisture transport are determined by the wetting properties of the water in relation to the material and by the pore structure and distribution in the material. In the case of hydrophilic materials (water contact angle $< 90^\circ$) these occur in pores with a radius of 10^{-7} to 10^{-4} m, also called capillary pores.

Over the years a number of different methods have been developed to create the so-called secondary horizontal insulation in masonry. In the case of mechanical methods, an insulating material is introduced into the existing masonry, thanks to which a permanent layer impermeable to water is formed in the cross-section of the wall, ensuring the inhibition of its capillary transport. Chemical (injection) methods are based on the technology of injecting liquid into the masonry, which creates a blockage based on the mechanism of narrowing the capillary lumen, water repellency, capillary sealing or a combined effect.

The subject of the study was to recognize the phenomenon of capillary moisture transport in building partitions and ways to counteract this phenomenon, as well as to analyze methods used so far in Poland and in the world to assess the broadly understood efficiency of secondary horizontal insulation made by chemical injection technology. On the other hand, the aim of this work was to propose a parameter which would allow to evaluate and compare the effectiveness of the applied injecting agents.

The effectiveness of injectables is obviously verified by practical applications. However, a key role in the long-term evaluation of injectives is played by laboratory tests as well as in situ tests (i.e. in real application conditions). Such research has been carried out almost from the beginning of using injections to prevent capillary moisture of building partitions. The influence of injecting preparations directly on building materials used in masonry (brick, stone, mortar), on reference masonry (of various sizes) as well as on real conditions (on existing objects) were observed. The paper describes selected national and international research on the application and effectiveness of the method of reconstruction of horizontal damp-proof insulation of masonry by injection technology, including author's own research.

In this study, capillary absorption tests were conducted on small reference masonry, i.e., samples consisting of six clay bricks arranged in three layers (one brick wide in both directions) and bonded with lime-cement mortar. The samples were divided into groups and then damped - using tap water and a salt mixture solution - to two degrees of saturation ($S=80\%$ and 95%) and injected - using a low-pressure method (using a preparation based on alkali silicates and methylsilicates) and injection cream technology (using two types of cream). The absorption test was carried out by placing the samples in containers with water in such a way that the liquid was in contact only with the bottom surface during the whole period of the test and by recording the change of the sample weight during 24 hours after immersion. At the end of the test, values of the mass increase per unit area immersed in water (after each weighing) were calculated for each of the samples and graphs of this quantity as a function of the element of time of immersion in water were made. Analogous tests were per-

formed for two types of reference specimens, i.e. those that were not injected and those containing a coated mineral mortar waterproofing.

Due to the different shape of the capillary absorption graphs of the tested samples, it was proposed to introduce a new quantity to evaluate the course of the absorption process, i.e. the coefficient of capillary absorption dynamics (after 24 h since immersion) of $d_{wa,24'}$. In order to evaluate the efficiency of injecting agents against capillary moisture transport, it was proposed to introduce another new quantity, i.e. the reduction of capillary absorption dynamics Rad , taking into account two reference values, i.e. the average values of capillary absorption dynamics coefficient of non-injected samples and those containing mineral insulation coating.

The results of the research confirmed the previously stated thesis - both the applied injecting agent and the method of its application as well as the degree of dampness and salinity of the wall have a significant influence on the effectiveness of the secondary horizontal waterproofing against the capillary rising damp. It was also observed that a significant effect of secondary horizontal waterproofing by injection in masonry is not only the reduction of absorption but also a change of its dynamics. Therefore, a new procedure was proposed to determine the degree of reduction of capillary absorption dynamics as a criterion to classify injecting agents in terms of their effect on inhibition of capillary moisture transport in building partitions.

Zusammenfassung

Wirksamkeit der nachträglichen chemischen Horizontalsperren im Injektionsverfahren

Feuchtigkeit in den erdberührten Wänden (und in der Folge Feuchtigkeitsschäden) sind häufig in historischen Gebäuden, aber leider auch in relativ neuen Gebäuden anzutreffen. Das Problem wird durch die Kapillarwirkung des Grundwassers verursacht, die auf das Fehlen, die Beschädigung oder den technischen Verschleiß der Horizontalabdichtung der Wand zurückzuführen ist.

Die Kapillaradsorption und der Feuchtigkeitstransport werden durch die Benetzungseigenschaften des Wassers im Verhältnis zum Material sowie durch die Struktur und Verteilung der Poren im Material bestimmt. Bei hydrophilen Materialien (Wasserkontaktwinkel $< 90^\circ$) geschieht dies in Poren mit einem Radius von 10^{-7} bis 10^{-4} m, die auch als Kapillarporen genannt werden.

Im Laufe der Jahre wurden verschiedene Methoden entwickelt, um eine so genannte nachträgliche Horizontalabdichtung im Mauerwerk zu schaffen. Bei den mechanischen Verfahren wird ein Abdichtungsmaterial in das bestehende Mauerwerk eingebracht, das eine dauerhafte Schicht im Mauerwerk bildet, die völlig wasserundurchlässig ist und somit den Kapillartransport verhindert. Chemische (Injektions-)Verfahren beruhen auf dem Verfahren, bei denen eine Flüssigkeit in das Mauerwerk injiziert wird, die durch den Mechanismus der Kapillarporenverengung, der Poren-Hydrophobierung, der Kapillarporenverstopfung oder einer kombinierten Wirkung eine Verspernung bewirkt.

Das Ziel der Studie war es, das Phänomen des kapillaren Feuchtigkeitstransports in Bauteilen und die Möglichkeiten, diesem Phänomen entgegenzuwirken, zu verstehen sowie die bisher in Polen und weltweit angewandten Methoden zur Bewertung der allgemein verstandenen Effizienz der nachträglichen Horizontalabdichtung mittels chemischen Injektionsverfahrens zu analysieren. Andererseits war es das Ziel der Studie, einen Parameter vorzuschlagen, mit dem die Wirksamkeit der verwendeten Injektionsmittel bewertet und verglichen werden kann.

Die Wirksamkeit von Injektionspräparaten wird eindeutig durch praktische Anwendungen belegt. Allerdings spielen sowohl Laborprüfungen als auch In-situ-Tests (d. h. Prüfungen unter realistischen Einsatzbedingungen) eine wichtige Rolle bei der Langzeitbewertung von Injektionsmitteln. Solche Tests wurden fast seit Beginn der Verwendung von Injektionsmitteln in der Bauindustrie durchgeführt, um die Kapillarfeuchtigkeit von Bauteilen zu verhindern.

Die Beobachtung bezog sich auf den Einfluss der Injektion von Präparaten direkt auf die im Mauerwerk verwendeten Baumaterialien (Ziegel, Stein, Mörtel), sowie auf Referenzmauerwerk (in verschiedenen Größen), und es wurden auch Studien unter realen Bedingungen (an bestehenden Gebäuden) durchgeführt. Der Beitrag beschreibt ausgewählte nationale und internationale Forschungsarbeiten zur Anwendung und Wirksamkeit der Sanierung von horizontalen Abdichtungen im Mauerwerk durch Injektion, einschließlich der eigenen Forschung des Autors.

In dieser Studie wurde die Kapillarabsorption an kleinen Referenzwänden getestet, das heißt an Proben, die aus sechs dreischichtig angeordneten Mauerziegeln (ein Ziegel breit in beiden Richtungen) bestanden und mit Kalk-Zement-Mörtel verbunden waren. Die Proben wurden in Gruppen eingeteilt und anschließend mit Leitungswasser und einer Salzmischlösung bis zu zwei Sättigungsgraden ($S=80\%$ und 95%) befeuchtet und mit einer Niederdruckmethode (mit einem Präparat auf Basis von Silikaten und alkalischen Methylsilikaten) und einer Injektionscremetechnik (mit zwei Cremetypen) injiziert.

Der Absorptionstest wurde durchgeführt, indem die Proben so in Wasserbehälter gelegt wurden, dass die Flüssigkeit während des gesamten Tests nur mit der unteren Oberfläche in Berührung kam,

und die Gewichtsveränderung der Probe 24 Stunden nach dem Eintauchen aufgezeichnet wurde. Am Ende der Prüfung wurden für jede Probe die Werte der Massenzunahme pro in Wasser eingetauchter Flächeneinheit (nach jedem Wiegen) berechnet und Diagramme dieser Größe als Funktion der Wurzel aus der Zeit des Eintauchens in Wasser erstellt. Vergleichbare Tests wurden für zwei Arten von Referenzproben, d. h. für nicht injizierte Proben und Proben mit einer Abdichtungsschicht aus mineralischen Dichtungsmörtel durchgeführt.

Aufgrund der unterschiedlichen Form der Kapillarabsorptionskurven der getesteten Proben wurde vorgeschlagen, eine neue Größe einzuführen, die es ermöglicht, den Verlauf des Absorptionsprozesses zu bewerten, d.h. den Koeffizienten der Kapillarabsorptionsdynamik (24 Stunden nach dem Eintauchen) $d_{wa,24}$. Um die Wirksamkeit von Injektionsmitteln gegen den kapillaren Feuchtetransport zu beurteilen, wurde vorgeschlagen, eine weitere neue Größe einzuführen, nämlich die kapillare Absorptionsminderungsrate R_{ad} , unter Berücksichtigung zweier Referenzwerte, d.h. der Durchschnittswerte der kapillaren Absorptionsrate von nicht injizierten Proben und solchen mit mineralischer Beschichtung.

Die Ergebnisse der Untersuchung bestätigten die bisherige These, dass sowohl das verwendete Injektionsmittel und die Art seiner Anwendung als auch der Durchfeuchtungsgrad und der Salzgehalt des Bauteils einen wesentlichen Einfluss auf die Wirksamkeit der nachträglichen Horizontalabdichtung gegen kapillar aufsteigende Feuchtigkeit haben. Es wurde auch festgestellt, dass eine bedeutende Auswirkung der nachträglichen horizontalen Injektionsabdichtung im Mauerwerk nicht nur die Verringerung der Absorption ist, sondern auch eine Veränderung ihrer Dynamik. Daher wurde ein neues Verfahren vorgeschlagen, um den Verringerungsgrad der Dynamik der Kapillarabsorption als Kriterium für die Klassifizierung von Injektionsmitteln hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Hemmung des kapillaren Feuchtigkeitstransports in Bauteilen zu bestimmen.

Wykaz najważniejszych oznaczeń

Symbol	Jednostka	Nazwa
A	m ²	powierzchnia
a	m/s ²	przyspieszenie
A _w	kg/m ² ·s ^{0,5}	współczynnik absorpcji wody (odniesiony do czasu w sekundach)
a _w	-	współczynnik aktywności wody
C	%	stężenie
c _R	%	współczynnik redukcji absorpcji wody
c _S	%	współczynnik redukcji zawilgocenia muru
d	m	grubość
DP _t	%	postęp wysychania muru poddanego iniekcji (po czasie t)
d _{wa,24'}	kg·h ^{0,5} /m ²	współczynnik dynamiki absorpcji kapilarnej
E	%	skuteczność bariery przeciw transportowi wilgoci
F	N	siła
g	m/s ²	przyspieszenie ziemskie (= 9,80655)
h	m	wysokość
j _d	kg/(m ² ·s)	gęstość dyfuzyjnego strumienia masy
k	m/s	współczynnik wodoprzepuszczalności gruntu
k _B	J/K	stała Boltzmanna (= 1,38064·10 ⁻²³)
k _p		współczynnik rozszerzenia
l, L	m	długość / droga
m	kg	masa
n	-	liczebność
N _A	mol ⁻¹	stała Avogadra (= 6,02214·10 ²³)
p	Pa	ciśnienie
p _k	%	współczynnik wrażliwości
Q _w	%	jakość uszczelnienia muru w strefie iniekcji
R	J/(mol·K)	molowa stała gazowa (= 8,31447)
r, R	m	promień
R _{ad}	-	stopień redukcji dynamiki kapilarnej
R _d	(m ² ·s·Pa)/kg	opór dyfuzyjny
S	%	stopień nasycenia
s _d	m	równowagowy współczynnik oporu dyfuzyjnego
T	K	temperatura
t	s	czas
u	%	wilgotność masowa
u(x)		niepewność standardowa zmiennej x
U(x)		niepewność rozszerzona zmiennej x
V	m ³	objętość
v	m/s	prędkość
w	kg/m ³	masowa zawartość wilgoci na jednostkę objętości
W	J	praca
w(y)		złożona niepewność względna funkcji y
w _w	kg/m ² ·h ^{0,5}	współczynnik absorpcji wody (odniesiony do czasu w godzinach)
x		zmienna lub wartość pomiaru

Symbol	Jednostka	Nazwa
γ	$^{\circ}$	kąt zwilżania materiału przez wodę
δ	$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$	współczynnik przepuszczalności pary wodnej
Δm_{pk}	kg/m^2	pojemność kapilarna
ϵ	-	porowatość efektywna
η	$\text{Pa}\cdot\text{s}$	lepkość dynamiczna cieczy
ϑ	$^{\circ}$	kąt nachylenia
μ	-	współczynnik oporu dyfuzyjnego
ν	kg/m^3	wilgotność objętościowa
ρ	kg/m^3	gęstość
σ	N/m	napięcie powierzchniowe
ϕ	%	wilgotność względna powietrza
χ	%	wilgotność masowa pary wodnej
ψ	%	wilgotność objętościowa

WSTĘP

Rola wody w mechanizmie destrukcji porowatych materiałów budowlanych dostrzegana była już w starożytności [173, 188], a obecność wody w zabytkowych konstrukcjach murowanych jest jednym z najistotniejszych problemów wpływających na dziedzictwo architektoniczne [36]. Negatywne skutki zawilgocenia w budynkach można uznać za zjawisko odczuwalne w większości tych konstrukcji [169], jak również innych budynków wzniesionych przed rokiem 1920, których zniszczenia spowodowane są brakiem, uszkodzeniem lub technicznym zużyciem izolacji [79, 197], choć spotyka się z nim niestety również w budynkach stosunkowo nowych, w których izolacje zostały wykonane w sposób niepoprawny (lub też nie zostały wykonane w ogóle) [155]. W wyniku działania wilgoci na budowlę dochodzi do ich wzmożonej korozji – szacuje się, że 50-60% przypadków korozji związanych jest właśnie z nadmiernym zawilgoceniem [79]. Destrukcyjny wpływ wilgoci ujawnia się w dolnych partiach budynków w postaci szkód mrozowych, wykwitów solnych oraz rozwijających się porostów. Mniej widoczne efekty to pogorzenie właściwości mechanicznych materiałów, redukcja właściwości termoizolacyjnych (czego efektem jest wzrost zapotrzebowania na energię cieplną) oraz pogorszenie się warunków sanitarnych w pomieszczeniach [85, 197].

Jednym z najczęściej powtarzających się zagrożeń dla budynków, w których nie wykonano odpowiedniej hydroizolacji, jest kapilarne podciąganie wód gruntowych w ścianach murowanych [36]. Kapilarny transport wilgoci jest zjawiskiem dobrze znanym – najwcześniejsze obserwacje i eksperymenty dotyczące zjawisk kapilarnych prowadzone były przez Francisca Hauksbee [53, 54] i Jamesa Jurina [72, 73], a dokładniej opisane zostały przez Thomasa Younga [218] i Pierre-Simona Laplace [90] (zjawiskom kapilarnym poświęcona była również pierwsza publikacja Alberta Einsteina [35], choć jego teoria ostatecznie okazała się błędna). Kapilarna adsorpcja i transport wilgoci determinowane są przez właściwości zwilżające wody w stosunku do materiału oraz przez strukturę i rozkład porów w materiale. Zachodzą one w materiałach hydrofilowych (kąt zwilżania materiału przez wodę $\gamma < 90^\circ$), w porach o promieniu efektywnym od 10^{-7} do 10^{-4} m, nazywanych też porami kapilarnymi [197].

Funkcjonuje wiele metod zapobiegania lub ograniczania zawilgocenia murów w strefie przyziemia, nie istnieje jednak metoda, którą można z powodzeniem zastosować w każdej sytuacji [36]. Najbardziej zbliżone do rozwiązań, mających na celu przeciwdziałać kapilarnemu transportowi wilgoci, a stosowanych w budynkach nowo wznoszonych, są metody wykonywania w murze tzw. wtórnej izolacji poziomej. W przypadku metod mechanicznych w istniejący mur wprowadza się materiał izolacyjny, dzięki czemu w przekroju muru powstaje całkowicie nieprzepuszczalna dla wody, trwała warstwa, zapewniając tym samym zahamowanie jej kapilarnego transportu. Metody chemiczne (iniekcyjne) bazują na technologii wprowadzania w mur preparatu iniekcyjnego, dzięki czemu powstaje blokada oparta na mechanizmie zwężenia światła kapilar, hydrofobizacji, uszczelnienia kapilar lub oddziaływaniu kombinowanym.

Choć w przypadku budynków objętych ochroną konserwatorską metody wykonywania izolacji poziomych w istniejącym murze (mechaniczne oraz iniekcyjne) postrzegane są jako nurt tzw. „ciężkiej chirurgii” [156, 157], badania sugerują, że „dzieląc” konstrukcję i przerywając podciąganie wilgoci poprzez wykonanie dodatkowej izolacji, można zachować funkcjonalność i trwałość budynków – usuwanie wilgoci i zasolenia z obiektów zabytkowych można uznać za najważniejsze przy ratowaniu mokrego budynku, gdyż taka interwencja pomoże nie tylko wydłużyć żywotność techniczną budynku, ale również poprawić komfort osób przebywających w takim budynku [169]. Z drugiej strony zaniechanie napraw może prowadzić do dalszej eskalacji destrukcji (poprzez uszkodzanie kolejnych ele-

mentów), a nawet zagrożenia dla stabilności konstrukcji budynku, a tym samym dla życia użytkowników [129].

Skuteczność wykonania wtórnej hydroizolacji poziomej jest nie tylko trudna do jednoznacznej oceny, ale wręcz jest to obszar budownictwa, w którym nastąpiło najprawdopodobniej największe nagromadzenie sprzecznych opinii, a czasami wręcz niezrozumienie zachodzących zjawisk [200]. Choć metoda iniekcji chemicznej przeciw kapilarnemu podciąganiu wilgoci w murach jest znana i z rosnącym powodzeniem stosowana od ponad sześćdziesięciu lat [44, 61], a opracowanie krajowej procedury dopuszczania do stosowania metod oraz środków w zakresie szeroko rozumianego osuszania budynków postulowane było już w latach 90. ubiegłego stulecia [81], wciąż nie doczekała się ona międzynarodowej normy lub chociażby sposobu oceny, który zostałby uznany standard międzynarodowy. Co więcej, przed 1 stycznia 2017 roku produkty te w ogóle nie były wyrobami budowlanymi w myśl Ustawy o wyrobach budowlanych [158].

WPROWADZENIE – CEL I ZAKRES PRACY

Przedmiotem pracy jest poznanie zjawiska kapilarnego transportu wilgoci w przegrodach budowlanych oraz sposobów przeciwdziałania temu zjawisku, jak również analiza stosowanych dotychczas w kraju i na świecie metod oceny szeroko rozumianej skuteczności wtórnych izolacji poziomych wykonywanych w technologii iniekcji chemicznej. Celem pracy natomiast jest zaproponowanie parametru pozwalającego ocenić i porównać skuteczność stosowanych środków iniekcyjnych.

W ramach niniejszej pracy próbie weryfikacji poddana została następująca teza główna:

Na skuteczność zabiegu wykonywania wtórnej izolacji poziomej przeciw wilgoci podciąganej kapilarnie w technologii iniekcji wpływają stosowany środek iniekcyjny oraz jego sposób jego aplikacji, jak również zawilgocenie oraz zasolenie muru.

W celu udowodnienia hipotezy sformułowano trzy, odnoszące się do celu badania, tezy pomocnicze:

- im wyższy stopień zawilgocenia, tym mniejsza skuteczność iniekcji chemicznej,
- zasolenie przegrody obniża skuteczność technologii iniekcji,
- technologie bezciśnieniowe pozwalają na uzyskanie jednorodnej przepony przecinającej podciąganie kapilarne.

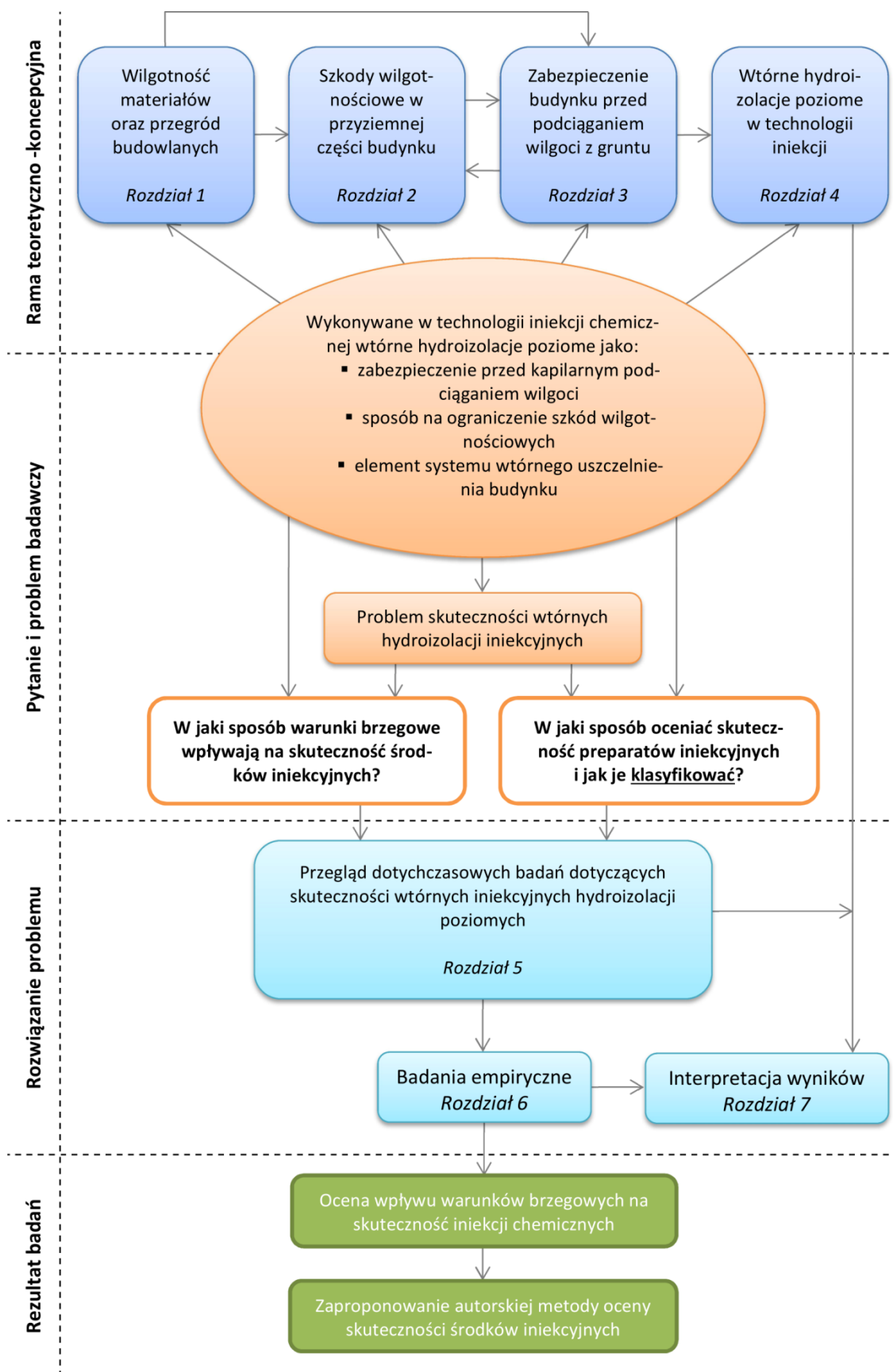
Praca niniejsza ma charakter teoretyczny oraz empiryczny, a jej struktura stanowi odzwierciedlenie przyjętego schematu analitycznego, mającego prowadzić do realizacji celu oraz rozwiązania problemu badawczego (Rys. 0.1) [170]. Składa się ona z siedmiu rozdziałów poprzedzonych wstępem i wprowadzeniem, a podsumowanych zakończeniem. W rozdziale pierwszym opisano specyficzne właściwości fizyko-chemiczne wody, budowę porowatych materiałów budowlanych, a także opisano i usystematyzowano formy występowania wody w ich strukturze. Opisano sposoby transportu wody i wilgoci w materiałach budowlanych, ze szczególnym uwzględnieniem zjawiska kapilarnego podciągania wilgoci.

Rozdział drugi został poświęcony szkodom występującym w przyziemnej części budynku, których przyczyną lub jedną z przyczyn jest nadmierne zawilgocenie przegród budowlanych. Opisano formy występowania wody i wilgoci w gruncie oraz jej wpływ na elementy budynku w nim zagłębione. Przedstawiono formy zawilgoceń struktury budynku oraz najważniejsze – fizyczne, chemiczne oraz biologiczne – rodzaje uszkodzeń substancji budowlanej. Omówione zostały również przyczyny oraz skutki, towarzyszącego nadmiernemu zawilgoceniu, obciążenia konstrukcji budynku szkodliwymi solami budowlanymi.

Rozdział trzeci opisuje zasady ochrony istniejących budynków przed nadmiernym zawilgoceniem. Przedstawia ogólną koncepcję wykonywania systemu hydroizolacji wtórnej z uwzględnieniem występujących warunków gruntowo-wodnych oraz technicznych możliwości wykonania uszczelnienia. Opisuje znaczenie oraz stosowane metody ochrony budowli przed kapilarnym transportem wilgoci, ze szczególnym uwzględnieniem mechanicznych metod odtwarzania hydroizolacji oraz (klasyfikowanych niekiedy jako hydroizolacje poziome) metod elektrofizycznych.

W rozdziale czwartym dokonano szczegółowego opisu metody wykonywania wtórnych hydroizolacji poziomych w technologii iniekcji chemicznej. Opisano rozwój technologii, w tym metody stosowane w przeszłości i obecnie na ziemiach polskich. Przedstawiono zasady działania metody oraz stosowa-

nych preparatów iniekcyjnych, obowiązujące obecnie zasady wykonywania hydroizolacji iniekcyjnych, a także stosowane kryteria doboru środków iniekcyjnych.



Rys. 0.1 Schemat analityczny postępowania badawczego w pracy

Rozdział piąty, opisujący genezę problemu badawczego, stanowi przegląd, prowadzonych w kraju i za granicą, zarówno laboratoryjnych jak i wykonywanych na istniejących obiektach (in situ) badań dotyczących skuteczności wtórnych hydroizolacji poziomych. Przedstawia również wyniki badań prowadzonych dotychczas przez autora (badań wstępnych).

Rozdział szósty zawiera przedstawienie problemu badawczego, opis metodologii oraz wyniki przeprowadzonych badań. Na podstawie studiów literaturowych, dotychczas stosowanych metod oraz badań własnych, autor przedstawił zaproponowaną przez siebie metodykę oceny skuteczności przepony iniekcyjnej wykonanej w technologii iniekcji chemicznej.

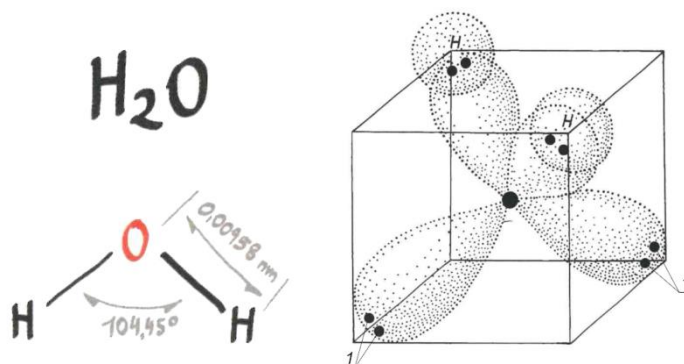
Rozdział siódmy poświęcony został interpretacji uzyskanych wyników. Przedstawiono w nim również dwie nowe wielkości pozwalające ocenić i porównać skuteczność stosowanych środków iniekcyjnych.

Zamieszczone na końcu pracy podsumowanie zawiera syntezę najważniejszych wniosków uzyskanych na podstawie analizy wyników przeprowadzonych badań.

1 WILGOTNOŚĆ MATERIAŁÓW I PRZEGRÓD BUDOWALNYCH+

1.1 Woda – informacje podstawowe i występowanie

Woda to bezwonna, bezsmakowa, przezroczysta i bezbarwna substancja, w stanie standardowym – tj. umownie przyjętych przez Międzynarodową Unię Chemii Czystej i Stosowanej (IUPAC) wartościach ciśnienia ($p=10^5$ Pa) oraz temperatury ($T=25$ °C) stosowanych do ujednoczenia obliczeń fizykochemicznych i pomiarów [101] – występująca w stanie ciekłym. Jest to zarazem najpowszechniej występująca na naszej planecie substancja – szacunkowa ilość zgromadzonej na Ziemi wody wynosi ok. 1,6 bln Mt ($1,6 \cdot 10^{21}$ kg) – pokrywająca 70,6% powierzchni planety (tj. 360 mln km²), z czego 97,2% stanowią morza i oceany, 2,15% lodowce, a wody śródlądowe jedynie 0,63%. Wiele ciał stałych oraz organizmów żywych zawiera znaczne ilości wody w postaci związanej, np. gips (siarczan wapnia) zawiera ok. 21% wody, a ludzkie ciało składa się z wody w 60-70% [22, 38, 55, 92].



Rys. 1.1 Budowa cząsteczki wody (rys.: [49, 55])
promień cząsteczki: $1,38 \cdot 10^{-10}$ m; 1) wolne pary elektronowe

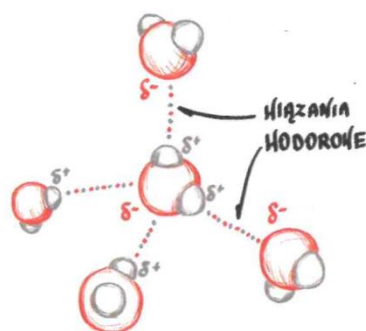
W nomenklaturze chemicznej woda to monotlenek diwodoru lub DHMO (od ang. *dihydrogen monoxide*), czyli związek dwóch atomów wodoru i jednego atomu tlenu (H_2O). Cząsteczka wody ma budowę przestrzenną niesymetryczną (Rys. 1.1) – atom tlenu związany jest z atomami wodoru wiązaniami kowalencyjnymi spolaryzowanymi, obok których występują dwie niezwiązane pary elektronowe („wolne pary elektronowe”) [22, 38, 55, 92]. Cząsteczka wody ma zatem charakter polarny – zachowuje się jak dipol elektryczny z dodatnim (δ^-) oraz ujemnym (δ^-) ładunkiem (Rys. 1.2). Sąsiadujące cząsteczki mogą się zatem wzajemnie przyciągać i odpychać. Dzięki polarności cząsteczek woda wykazuje zdolność do rozpuszczania soli oraz innych związków o budowie polarnej [22]. Spolaryzowany charakter sprawia również, że woda posiada dwoistą charakterystykę wiązania: obok kowalencyjnych wiązań łączących atomy tlenu i wodoru, między poszczególnymi cząsteczkami tworzą się nietrwałe połączenia nazywane wiązaniami wodorowymi (Rys. 1.3). To właśnie wiązania wodorowe odpowiedzialne są za unikalne właściwości wody, takie jak to, że największą gęstość posiada w temperaturze +4 °C (porównaj: Tabela 1.1), a krzepnąc w lód rozszerza się o 1/11 swojej objętości (w temperaturze 0 °C gęstość wody wynosi $0,9998$ kg/dm³, natomiast lodu $0,9167$ kg/dm³) [92]. Istotną właściwością wody jest zjawisko kohezji, którego efektem jest powstawanie napięcia powierzchniowego (zobacz: Rozdział 1.5). Woda posiada największe napięcie powierzchniowe ze wszystkich cieczy nie będących ciekłymi metalami – jest ono tak duże, że drobny element metalowy (szpilka lub spinacz) może być unoszony na powierzchni wody, mimo że jest kilkukrotnie od niej cięższy [38] (Fot. 1.1).

Tabela 1.1 Gęstość czystej (pozbawionej powietrza) wody w kg/m^3 w zakresie temperatury 273÷305 K (w odstępach co 0,1 K) pod normalnym ciśnieniem atmosferycznym [70]

Temperatura		0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
°C	K										
0	273	999,841	999,847	999,854	999,860	999,866	999,872	999,878	999,884	999,889	999,895
1	274	900	905	909	914	918	923	927	930	934	938
2	275	941	944	947	950	953	955	958	960	962	964
3	276	965	967	968	969	970	971	972	972	973	973
4	277	973	973	973	972	972	972	970	969	968	966
5	278	965	963	961	959	957	955	952	950	947	944
6	279	941	938	935	931	927	924	920	916	911	907
7	280	999,902	999,898	999,893	999,888	999,883	999,877	999,872	999,866	999,861	999,855
8	281	849	843	837	830	824	817	810	803	796	789
9	282	781	774	766	758	751	742	734	726	717	709
10	283	700	691	682	673	664	654	645	635	625	615
11	284	605	595	585	574	564	553	542	531	520	509
12	285	498	486	475	463	451	439	427	415	402	390
13	286	377	364	352	339	326	312	299	285	272	258
14	287	244	230	216	202	188	173	159	144	129	114
15	288	099	804	069	054	038	023	007	998,991	998,975	998,959
16	289	998,946	998,926	998,91	998,893	998,877	998,86	998,843	826	809	792
17	290	998,774	998,757	998,739	998,722	998,704	998,686	998,668	998,65	998,632	998,613
18	291	595	576	558	393	520	501	482	463	444	424
19	292	405	385	365	345	325	305	285	265	244	224
20	293	203	183	162	141	120	099	078	056	035	013
21	294	997,992	997,970	997,948	997,926	997,904	997,882	997,86	997,837	997,815	997,792
22	295	770	747	724	701	678	655	632	608	505	561
23	296	538	514	490	466	442	418	394	369	345	320
24	297	296	271	246	221	196	171	146	120	095	069
25	298	044	019	996,992	996,967	996,941	996,914	996,888	996,862	996,836	996,809
26	299	996,783	996,756	729	703	676	649	621	594	567	540
27	300	996,512	996,485	996,457	996,429	996,401	996,373	996,345	996,317	996,289	996,261
28	301	232	204	175	147	118	089	060	031	002	995,973
29	302	995,944	995,914	995,885	995,855	995,826	995,796	995,766	995,736	995,706	676
30	303	646	616	586	555	525	494	464	433	402	371



Rys. 1.2 Dipol elektryczny (rys.: [49])



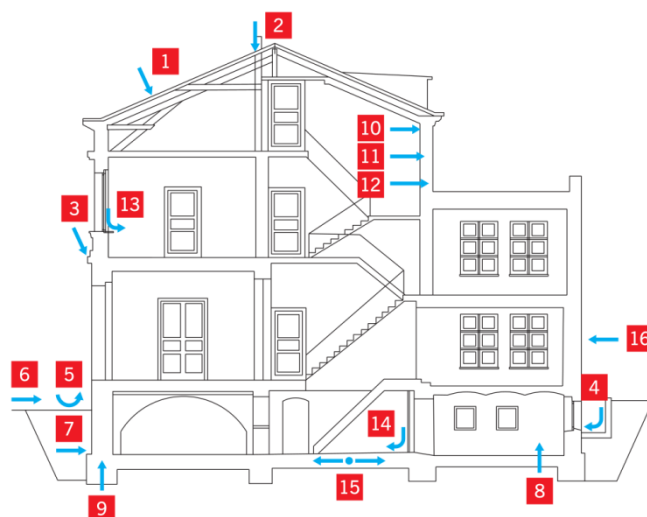
Rys. 1.3 Struktura wody (rys.: [49])

Woda występująca w przyrodzie jest zawsze zanieczyszczona [38, 92]. Woda pochodząca z opadów atmosferycznych (deszczowa oraz śnieg) zawiera tlen, azot, dwutlenek węgla oraz śladowe ilości azotanu amonu, jak również substancje zanieczyszczające atmosferę (kurz, pyły oraz gazy przemysłowe). Wody źródlane rzeczne i gruntowe zawierają od 0,01 do 0,2% substancji rozpuszczonych, takich jak sole wapnia i magnezu. Wody gruntowe, nie pochodzące z głębszych warstw, zawierają ponadto składniki gleb, z którymi się kontaktują, np. sole żelaza i glinu, ale również zanieczyszczenia organiczne.

ne i bakterie. Z kolei wody morskie zawierają średnio ok. 35‰ soli, w tym większość (27‰) stanowi chlorek sodu (zasolenie Bałtyku wynosi 11‰, w tym 8‰ NaCl).



Fot. 1.1 Napięcie powierzchniowe wody (fot.: autor)



Rys. 1.4 Najczęściej występujące źródła zawilgocenia budynku (rys.: autor na podstawie [14, 99, 196, 203])

1) przecieki wód opadowych przez połąć dachu, 2) przecieki wód opadowych przez przewody kominowe, 3) bezpośrednie zawilgacanie wodą opadową, 4) zaleganie wód opadowych w studzienkach okiennych, 5) woda rozbryzgowa, 6) wody powierzchniowe, 7) wilgoć i woda zawarta w gruncie (zobacz: Rozdział 2.1) 8) podtapianie (podnoszenie się wody gruntowej powyżej poziomu posadzki), 9) podciąganie kapilarne w murach przyziemia, 10) kondensacja powierzchniowa pary wodnej, 11) wilgoć higroskopijna: absorpcja, adsorpcja (sorpcja powierzchniowa, adsorpcja kondensacyjna, chemisorpcja), 12) kondensacja węgłbna, 13) kondensacja pary wodnej na stolarce otworowej, 14) kondensacja pary wodnej na instalacjach wodno-kanalizacyjnych, 15) awarie sieci wodno-kanalizacyjnych (zalania), 16) zalania nadzwyczajne (powodziowe, woda gaśnicza, itp.)

Woda stanowi nie tylko podstawę życia. Jest też substancją niezbędną do przeprowadzenia praktycznie wszystkich procesów budowlanych – zarówno do produkcji materiałów, jak i ich wbudowania – ale również do prawidłowej eksploatacji budynku [22, 177]. Jest też wszechobecna w samym budynku oraz w jego otoczeniu – we wszystkich swoich stanach skupienia (stałym, ciekłym i gazowym) oraz pod różnorodnymi postaciami: opadów deszczu i śniegu, mgły, wilgoci i wody zawartej w gruncie, itp. (Rys. 1.4). Z drugiej jednak strony bywa ona groźna nie tylko dla człowieka, lecz również dla budyn-

ków. Uważa się, że to właśnie woda (pod różnymi postaciami) oraz rozpuszczone w niej sole są największym wrogiem materiałów budowlanych i stanowią główny katalizator szkód budowlanych [45, 177].

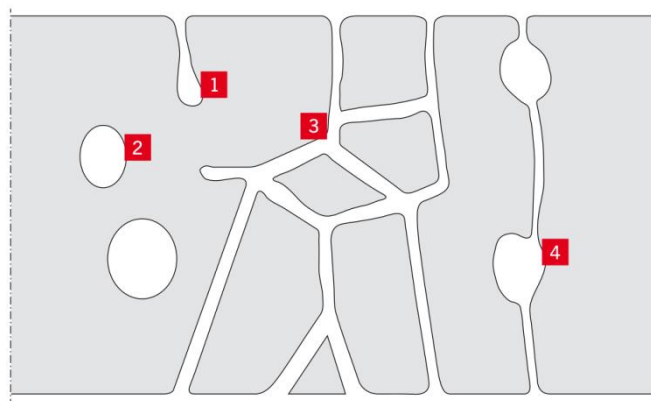
1.2 Wewnętrzna struktura materiałów budowlanych

Zdecydowana większość wyrobów stosowanych w zewnętrznych przegrodach budynków, to materiały, które zawierają znaczna ilość wolnych przestrzeni o wymiarach bardzo małych w porównaniu z wymiarami samego materiału, oraz charakteryzują się dobrze rozwiniętą powierzchnią wewnętrzną. Przestrzeń materiału zajęta przez ciało stałe nazywa się szkieletem, wolne przestrzenie porami – przy czym pory mogą być połączone między sobą systemem kanalików (kapilar) lub też częściowo oddzielone ściankami – a sam materiał ciałem kapilarno-porowatym [88, 149].

Pory występujące w materiałach budowlanych mogą mieć różne rozmiary – średnica najmniejszych jest mierzona w nanometrach, zaś największych w milimetrach. Powszechnie stosowany jest podział podany przez *Międzynarodową Unię Chemii Teoretycznej i Stosowanej* (IUPAC), który w zależności od tzw. promienia efektywnego porów (przyjmując dla uproszczenia ich kulisty kształt) r_{ef} , rozróżnia trzy grupy [164]:

- mikropory: $r_{ef} \leq 2$ nm,
- mezopory: 2 nm $< r_{ef} \leq 50$ nm,
- makropory: $r_{ef} > 50$ nm.

Mikropory wykazują silne właściwości sorpcyjne, mezopory mają duży udział w kapilarnym transporcie wilgoci, natomiast makropory charakteryzuje duża intensywność transportu masy (może się w nich odbywać konwekcyjny ruch masy) [197, 206].



Rys. 1.5 Schematyczne przedstawienie różnych typów porów i kapilar (rys.: [152])

1) kieszenie, 2) pory zamknięte, 3) pory otwarte (ciągłe), 4) pory otwarte, połączone systemem kapilar

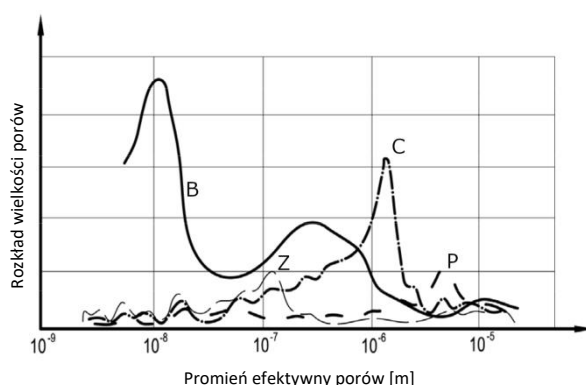
Pory mogą przyjmować różne formy – porów zamkniętych (ślepych) i otwartych (otwartych), porów ciągłych i nieciągłych (tzw. kieszeni) – oraz kształty – cylindryczne, klinowate, szczelinowe, kuliste, beczkowe, butelkowe oraz ich kombinacje. Mogą być też w mniejszym lub większym stopniu wzajemnie połączone – rozróżnia się pory otwarte (ciągłe) z przynajmniej dwoma otworami, kieszenie z przynajmniej jednym otworem oraz pory zamknięte, nie posiadające połączenia z otoczeniem. Można je również różnicować pod kątem ich ukierunkowania i wyróżnić pory ukierunkowane (anizotropowe) lub nieukierunkowane (izotropowe) [45, 88, 152, 206].

Podstawową cechą charakteryzującą materiały porowate – miarą zdolności materiałów porowatych do wchłaniania wilgoci – jest ich porowatość efektywna, czyli stosunek objętości porów otwartych

zawartych w elementarnym (infinitesimalnym) obszarze wypełnionym materiałem porowatym do objętości tego obszaru [88]:

Porowatość efektywna			Równanie 1
$\varepsilon = \frac{V_p}{V}$	symbol	jednostka	Nazwa
	ε	-	porowatość efektywna
	V_p	m^3	objętość porów otwartych
	V	m^3	objętość materiału

Właściwości ciał kapilarno-porowatych zależą nie tylko od całkowitej objętości porów, ale również powierzchni właściwej porów oraz struktury porowatości, czyli rozkładu objętości porów w zależności od ich średnicy (Rys. 1.6). Za transport gazów i cieczy w porowatych materiałach budowlanych odpowiedzialne są przede wszystkim pory ciągłe [152].



Rys. 1.6 Rozkład wielkości porów w wybranych materiałach budowlanych (rys.: [14])
C – cegła ceramiczna, P – piaskowiec, Z – zaprawa, B - beton

Magazynowanie i transport gazów oraz cieczy w porowatych materiałach budowlanych może być zarówno zjawiskiem akceptowanym, jak i niepożądanym. Aby transport zaistniał wymagane jest wystąpienie siły napędowej, czyli czynnika fizycznego lub chemicznego reprezentowanego przez potencjał wynikający z różnicy ciśnienia, stężenia lub napięcia elektrycznego [152]. Transport wody w przegrodach budowlanych może następować w wyniku przenikania wody grawitacyjnej, przenikania pary wodnej, przemieszczania wilgoci z powodu przewodności wilgotnościowej (między miejscami o różnym zawilgoceniu), przewodności ciepło-wilgotnościowej, lub też na skutek podciągania włoskowatego [168].

1.3 Wilgotność materiałów budowlanych

Cząsteczki wody w strukturze materiałów budowlanych mogą występować pod różnymi postaciami, tj. [22, 177]:

- wody związanej chemicznie (krystalizacyjnej), czyli wbudowanej w strukturę materiałów budowlanych w ściśle określonych stosunkach ilościowych, w postaci wody koordynacyjnej, sieciowej, konstytucyjnej bądź śródwęzłowej, którą można oddzielić jedynie przez wyprażenie w odpowiednio wysokiej temperaturze;
- wody związanej fizykochemicznie (wilgoci sorpcyjnej), związanej z istnieniem tzw. sił van der Waalsa (sił bliskiego zasięgu), występującej w strukturze niektórych materiałów na rozwiniętej powierzchni porów,

▪ wody związanej fizykomechanicznie, czyli wody kapilarnej zawartej w mikroporach oraz swobodnej, występującej makroporach, jamach międzyziarnowych oraz na zwilżonych powierzchniach. Terminem *wilgoć* w praktyce budowlanej określa się wodę zawartą w powietrzu, w gruncie lub w materiale budowlanym, która nie wywiera na elementy budynku parcia hydrostatycznego. Wodę wywierającą parcie określa się terminem *woda naporowa* lub po prostu *woda*. Terminy te mają charakter umowny – odnoszą się one do opisu oddziaływania cząsteczek wody ma mikrostrukturę materiału [42]. Z kolei przez *stan wilgotnościowy* przegród budowlanych należy rozumieć aktualny rozkład wilgoci w elemencie budynku jak również tendencje oczekiwanych zmian (wysychanie materiałów bądź okresowe lub postępujące zawilgocenie). Pojęcie to obejmuje całokształt procesów związanych z zawilgacaniem oraz wysychaniem zastosowanych do wzniesienia budynku materiałów w wyniku [177]:

- początkowej (związanej z ich wytwarzaniem) wilgotności materiałów budowlanych,
- przyrostu wilgotności związanej ze sposobem przechowywania oraz transportu materiałów, jak również tzw. mokrymi procesami budowlanymi,
- wysychania przegród do otaczającego powietrza (wewnętrznego i zewnętrznego),
- zwilgocenia w wyniku działania opadów atmosferycznych,
- wzrostu wilgotności w wyniku działania czynników eksploatacyjnych,
- wnikania wilgoci i wody zawartej w gruncie oraz ich dalszego transportu na drodze podciągania kapilarnego.

W literaturze dotyczącej przemian wilgotnościowych w materiałach porowatych spotyka się różne definiowane wielkości opisujące wilgotność materiału, co w konsekwencji prowadzi do różnych postaci równań opisujących to zjawisko [88]. W niniejszej pracy przyjęto oznaczenia i definicje opisane w normie PN-EN ISO 9346:2009, *Ciepłno-wilgotnościowe właściwości użytkowe budynków i materiałów budowlanych – Wielkości fizyczne dotyczące przenoszenia masy – Słownik* [147], a w celu ich usystematyzowania opisano je poniżej, wraz z zależnościami, jakie między nimi występują.

Zawartość pary wodnej w powietrzu wypełniającym pory materiału można opisać, wykorzystując następujące wielkości [88]:

Wilgotność bezwzględna objętościowa			Równanie 2
$v = \frac{m_v}{V_g}$	symbol	jednostka	Nazwa
	v	kg/m ³	wilgotność objętościowa
	m _v	kg	masa pary wodnej
	V _g	m ³	objętość mieszaniny gazów

Wilgotność bezwzględna objętościowa – masa pary wodnej zawartej w obszarze wypełnionym wilgotnym powietrzem podzielona przez objętość mieszaniny gazów. Wilgotność objętościowa jest tożsama z gęstością cząstkową pary wodnej ρ_v. W odniesieniu do stanu nasycenia stosuje się oznaczenia v_{sat} oraz ρ_{v,sat}.

Wilgotność bezwzględna masowa			Równanie 3
$\chi = \frac{m_v}{m_a} = \frac{v}{\rho_{ad}}$	symbol	jednostka	nazwa
	χ	%	wilgotność masowa
	m _v	kg	masa pary wodnej
	m _a	kg	masa suchego powietrza
	v	kg/m ³	wilgotność objętościowa
	ρ _{ad}	kg/m ³	gęstość objętościowa suchego powietrza

Wilgotność bezwzględna masowa – masa pary wodnej podzielona przez masę suchego powietrza. W odniesieniu do stanu nasycenia stosuje się symbol χ_{sat} .

Ciśnienie cząstkowe pary wodnej – ciśnienie cząstkowe (parcjalne) pary wodnej w mieszaninie gazów. W przypadku niewielkich ciśnień cząstkowych pary wodnej obowiązuje równanie stanu gazu doskonałego [2, 37, 92].

Równanie stanu gazu doskonałego			Równanie 4
$pV = nRT = n(N_A \cdot k_B)T$	symbol	jednostka	nazwa
	p	Pa	ciśnienie gazu
	V	m ³	objętość zajmowana przez gaz
	n	mol	liczba moli gazu
	R	J/(mol·K)	molowa stała gazowa (= 8,31447)
	N _A	mol ⁻¹	stała Avogadra (= 6,02214·10 ⁻²³)
	k _B	J/K	stała Boltzmanna (= 1,38064·10 ⁻²³)
	T	K	temperatura gazu

Dla ciśnienia cząstkowego pary wodnej (ciśnienia pary w mieszaninie gazów, jakie para wywierałaby, gdyby sama zajmowała całą objętość mieszaniny [92]) równanie gazów doskonałych przyjmuje postać:

Ciśnienie cząstkowe pary wodnej			Równanie 5
$p_v = \frac{n_v}{V}RT = \nu R_v T$	symbol	jednostka	nazwa
	p _v	Pa	ciśnienie cząstkowe pary wodnej
	n _v	mol	liczba moli pary wodnej
	V	m ³	objętość zajmowana przez parę
	R	J/(mol·K)	molowa stała gazowa
	T	K	temperatura
	ν	kg/m ³	wilgotność objętościowa
	R _v	J/(kg·K)	stała gazowa pary wodnej

W odniesieniu do stanu nasycenia stosuje się oznaczenie p_{v,sat}.

Wilgotność względna powietrza – rzeczywiste ciśnienie pary podzielone przez ciśnienie pary w stanie nasycenia w tej samej temperaturze.

Wilgotność względna powietrza			Równanie 6
$\varphi = \frac{p_v}{p_{v,sat}}$	symbol	jednostka	nazwa
	φ	%	wilgotność względna
	p _v	Pa	ciśnienie cząstkowe pary wodnej
	p _{v,sat}	Pa	ciśnienie cząstkowe pary wodnej nasyconej

Przy założeniu, że para zachowuje się jak gaz doskonały: $\varphi = \nu / \nu_{sat}$.

Tabela 1.2 Współczynniki przeliczeniowe wilgotności powietrza

Wielkości	ν	χ	p _v	φ
ν	1	ρ _{ad}	1/R _v T	ν _{sat}
χ	1/ρ _{ad}	1	1/R _v Tρ _{ad}	ν _{sat} /ρ _{ad}
p _v	R _v T	R _v Tρ _{ad}	1	p _{v,sat}
φ	1/ν _{sat}	ρ _{ad} /ν _{sat}	1/p _{v,sat}	1

Wielkości określone równaniami 2 do 3 oraz 5 do 6 są od siebie zależne – znając wartość jednej z nich można w prosty sposób wyznaczyć pozostałe (Tabela 1.2) [88].

Zawartość wilgoci w materiale porowatym opisują następujące wielkości [88, 105, 107, 144, 145, 212]:

Masowa zawartość wilgoci na jednostkę objętości (gęstość wilgoci) – masa wody, która może wyparować, podzielona przez objętość suchego materiału.

Gęstość wilgoci			Równanie 7
$w = \frac{m_w}{V}$	symbol	jednostka	nazwa
	w	kg/m ³	masowa zawartość wilgoci na jednostkę objętości
	m _w	kg	masa wody
	V	m ³	objętość suchego materiału

Objętościowa zawartość wilgoci na jednostkę objętości (wilgotność objętościowa) – objętość wody, która może wyparować, podzielona przez objętość suchego materiału.

Wilgotność objętościowa			Równanie 8
$\psi = \frac{V_w}{V} = \frac{w}{\rho_w}$	symbol	jednostka	nazwa
	ψ	%	wilgotność objętościowa
	V _w	m ³	objętość wody
	V	m ³	objętość suchego materiału
	w	kg/m ³	masowa zawartość wilgoci na jednostkę objętości
	ρ _w	kg/m ³	gęstość właściwa wody

Masowa zawartość wilgoci na jednostkę masy (wilgotność masowa) – masa wody, która może wyparować, podzielona przez masę suchego materiału.

Wilgotność masowa			Równanie 9
$u = \frac{m_w}{m_s} = \frac{w}{\rho_s}$	symbol	jednostka	nazwa
	u	%	wilgotność masowa
	m _w	kg	masa wody
	m _s	kg	masa suchego materiału
	w	kg/m ³	masowa zawartość wilgoci na jednostkę objętości
	ρ _s	kg/m ³	gęstość objętościowa szkieletu

Równoważna zawartość wilgoci na jednostkę masy (wilgotność równowagowa/higroskopijna) – zawartość wilgoci materiału porowatego w równowadze ze środowiskiem i wilgotności względnej otaczającego powietrza, w określonej temperaturze.

Wilgotność równowagowa			Równanie 10
$u_h = \frac{m_h - m_s}{m_s}$	symbol	jednostka	nazwa
	u _h	%	wilgotność równowagowa
	m _h	kg	masa próbki przechowywanej w określonych warunkach klimatycznych
	m _s	kg	masa suchego materiału

Nasiąkliwość wagowa (zawartość wilgoci swobodnej) – stosunek masy wody wchłoniętej przez materiał do masy materiału w stanie suchym:

Nasiąkliwość wagowa			Równanie 11
$u_f = \frac{m_f - m_s}{m_s}$	symbol	jednostka	nazwa
	u_f	%	nasiąkliwość przy ciśnieniu atmosferycznym
	m_f	kg	masa nasyconego materiału (po zanurzeniu w wodzie i osiągnięciu stałej masy)
	m_s	kg	masa suchego materiału

Nasiąkliwość to parametr określający jaką ilość wody materiał budowlany gdy jest wystawiony na działanie wody bez ciśnienia (przy ciśnieniu atmosferycznym) przez pewien czas. W przypadku materiałów obciążonych wodą pod ciśnieniem lub długotrwale przechowywanych pod wodą dochodzi do całkowitego wypełnienia porów wodą. Materiał, który pochłoniął maksymalną ilość wody osiąga wilgotność w stanie pełnego nasycenia (u_{sat}). Wielkość ta stanowi punkt odniesienia na potrzeby określenia stopnia przesiąknięcia wilgocią oraz higroskopijnego stopnia przesiąknięcia wilgocią.

Stopień nasycenia (stopień przesiąknięcia wilgocią) – masa wody zawarta w ciele porowatym podzielona przez masę wody w stanie nasycenia.

Stopień nasycenia			Równanie 12
$S = \frac{m_w}{m_{w,sat}} = \frac{u}{u_{sat}} = \frac{\psi}{\varepsilon}$	symbol	jednostka	nazwa
	S	%	stopień nasycenia
	m_w	kg	masa wody
	$m_{w,sat}$	kg	masa wody w stanie nasycenia
	u	%	wilgotność masowa
	u_{sat}	%	wilgotność masowa w stanie nasycenia
	ψ	%	wilgotność objętościowa
ε	-	porowatość efektywna	

Stopień nasycenia higroskopijnego (higroskopijny stopień przesiąknięcia wilgocią) – wilgotność równowagowa próbki podzielona przez wilgotność w stanie nasycenia.

Stopień nasycenia higroskopijnego			Równanie 13
$S_h = \frac{u_h}{u_{sat}}$	symbol	jednostka	nazwa
	S	%	stopień nasycenia higroskopijnego
	u_h	%	wilgotność równowagowa
	u_{sat}	%	wilgotność masowa w stanie nasycenia

Jeśli dodatkowo, jako stosunek masy pary wodnej zawartej w elementarnym (infinitesimalnym) obszarze wypełnionym materiałem porowatym do objętości tego materiału, zdefiniujemy gęstość objętościową pary [88]:

Gęstość objętościowa pary			Równanie 14
$\rho_v = \frac{m_v}{V}$	symbol	jednostka	nazwa
	ρ_v	kg/m ³	gęstość objętościowa pary
	m_v	kg	masa pary wodnej
	V	m ³	objętość suchego materiału

Można wykazać, że równania 2 oraz 14 połączone są zależnością, którą można zastosować do przeliczenia zawartości pary wodnej w materiale porowatym na wilgotność powietrza wypełniającego jego pory [88]:

Związek wilgotności objętościowej z zawartością pary wodnej			Równanie 15
$v = \frac{\rho_v}{\varepsilon - \psi}$	symbol	jednostka	nazwa
	v	kg/m ³	wilgotność objętościowa powietrza
	ρ_v	kg/m ³	gęstość objętościowa pary
	ε	-	porowatość efektywna
	ψ	%	wilgotność objętościowa

W ogólnym przypadku przez wilgotność materiału porowatego rozumie się sumaryczną zawartość pary wodnej oraz wody w postaci ciekłej. Jeśli jednak zawartość pary wodnej jest znacznie mniejsza niż zawartość ciekłej wody (a taka sytuacja zazwyczaj występuje w przypadku materiałów budowlanych), tj. gdy $\rho_v \ll w$, przyjmuje się, że wilgotność materiału jest tożsama z zawartością wody w fazie ciekłej [88].

Podobnie jak w przypadku parametrów charakteryzujących zawartość pary wodnej w powietrzu wypełniającym pory, również wielkości opisane wzorami od 7 do 9 oraz 12 są wzajemnie zależne:

Tabela 1.3 Współczynniki przeliczeniowe wilgotności materiału

Wielkości	w	ψ	u	S
w	1	ρ_w	ρ_s	$\rho_w \varepsilon$
ψ	$1/\rho_w$	1	ρ_s/ρ_w	ε
u	$1/\rho_s$	ρ_w/ρ_s	1	$\rho_w \varepsilon/\rho_s$
S	$1/\rho_w \varepsilon$	$1/\varepsilon$	$\rho_s/\rho_w \varepsilon$	1

Choć istnieje wiele kombinacji zmiennych pomocnych przy określaniu stanu wilgotnościowego materiałów porowatych, stosowanych w budownictwie, w praktyce (w literaturze) najczęściej używa się [88]:

- p_v lub φ do określenia wilgotności powietrza zawartego w wewnętrznych strukturach materiału,
- u (rzadziej ψ) w celu określenia wilgotności materiału.

1.4 Fazowe przemiany wilgoci w materiałach budowlanych

1.4.1 Sorpcja

Sorpcja jest zjawiskiem kompleksowym, polegającym na zdolności wchłaniania przez materiały porowate pary wodnej zawartej w powietrzu. Obejmuje ona dwa, trudne do rozgraniczenia procesy fizyczne [34, 75] (Rys. 1.7):

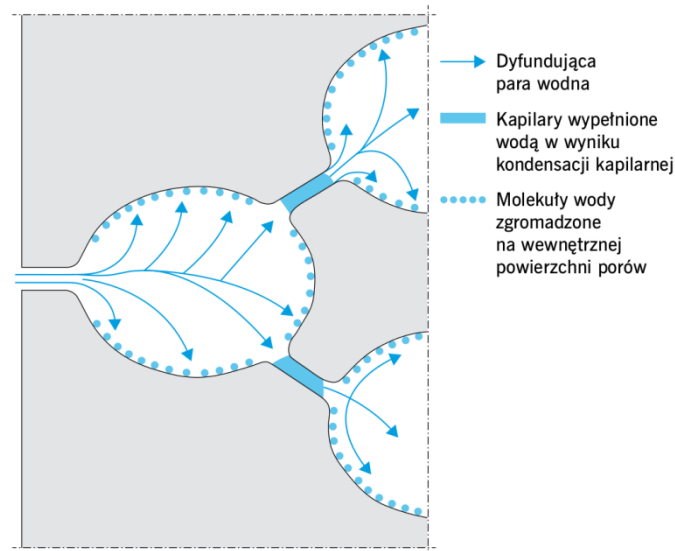
- adsorpcję, czyli zjawisko powierzchniowe występujące na granicy dwóch faz (pary wodnej i ciała stałego), polegające na wiązaniu cząstek pary na powierzchni porów materiału, będące wynikiem działania sił kohezji (spójności) – sił van der Waalsa;
- absorpcję, czyli przenikanie pary wodnej w głąb struktury materiału.

Przebieg zjawiska sorpcji związany jest z jednej strony ze strukturą materiału porowatego, a drugiej zaś z wilgotnością względną powietrza, czyli prężnością pary wodnej.

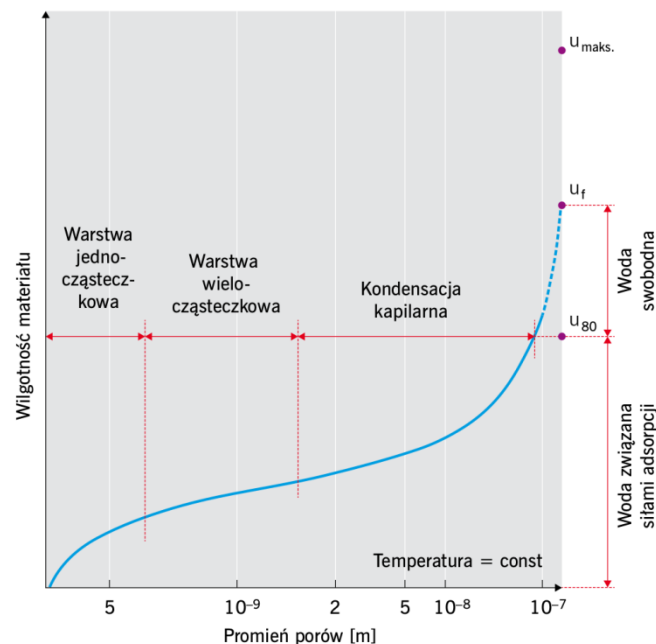
Wyróżnia się trzy etapy przebiegu sorpcji, którym odpowiadają odpowiednie przedziały wilgotności względnej (Rys. 1.8):

- I etap to pochłanianie wilgoci – głównie w wyniku powierzchniowej adsorpcji (początkowo w monomolekularnej warstwie cząsteczek wody na powierzchni przegrody i porów w głębi jej struktury) – oraz początek jej transportu w głąb materiału, zachodzące przy wilgotności względnej ok 15-20%;

- II etap, w którym wilgoć w porach materiału przekształca się w warstewkę polimolekularną oraz następuje dalszy transport wilgoci, zachodzi w zakresie wilgotności względnej ok. 20-80%;
- III etap związany jest z jakościową zmianą przebiegu zjawiska – przy wilgotności względnej ok. 80-100% obok sorpcji odbywa się równoległe kapilarna kondensacja wilgoci, co prowadzi do wypełnienia mikrokapilar wodą swobodną, utrzymywaną w materiale siłami kapilarnymi (różnymi od sił van der Waalsa).



Rys. 1.7 Schematyczne przedstawienie przebiegu sorpcji wilgoci w materiale porowatym (rys.: [133])



Rys. 1.8 Typowy kształt izoterm sorpcji (rys.: [16, 35])

Kondensacja kapilarna zachodzi przy wilgotności względnej powietrza zawartego w porach niższej niż wilgotność nasycenia w otaczającym materiał powietrze. Wartość względnej wilgotności powietrza wypełniającego pory, przy której zachodzi kondensacja kapilarna, określa równanie Kelvina [87, 172]:

Równanie Kelvina		Równanie 16	
	symbol	jednostka	nazwa
$\ln \varphi = -\frac{2\sigma \cos \gamma}{r\rho_w R_V T}$	φ	-	wilgotność względna powietrza
	σ	N/m	napięcie powierzchniowe
	ρ	kg/m ³	gęstość cieczy
	R_V	J/(kg·K)	stała gazowa pary wodnej
	T	K	temperatura
	r	m	promień wewnętrzny kapilary
	γ	°	kąt zwilżania

Z równania 16 wynika, że mikropory zapełniają się wodą przy wilgotności względnej poniżej 60%, mezopory przy wilgotności względnej niższej niż 100%, natomiast makropory przy pełnym nasyceniu powietrza parą wodną [88].

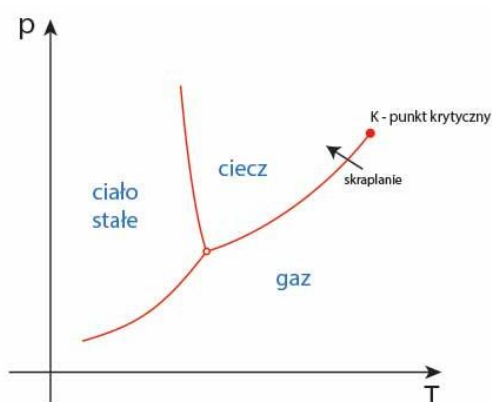
Przy wilgotności względnej wynoszącej 100% (pełne nasycenie powietrza) materiał osiąga pełne nasycenie sorpcyjne, które zazwyczaj jest dużo niższe niż nasiąkliwość maksymalna wynikające z długotrwałego zanurzenia w wodzie [34, 75].

Na wykresach sorpcji poszczególnych materiałów najważniejsze są trzy charakterystyczne punkty, pozwalające zbudować krzywą [34, 75] (Rys. 1.8):

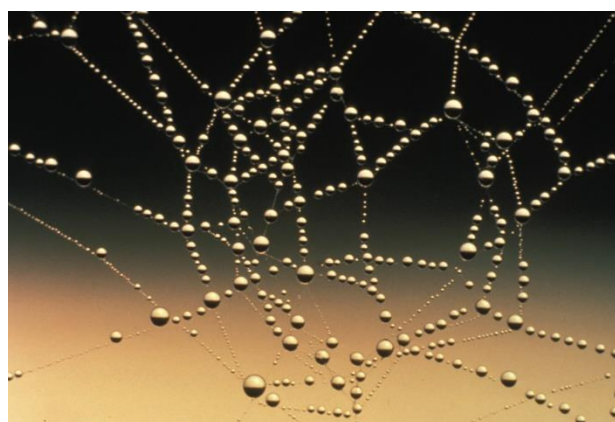
- u_{80} , czyli zawartość wilgoci przy wilgotności względnej powietrza 80% - wartość umownie kończąca II etap sorpcji,
- u_r , czyli stan swobodnego nasycenia, odpowiadający wilgotności względnej 100%,
- maksymalna zawartość wilgoci w materiale u_{max} , charakterystyczna dla danej porowatości materiału.

1.4.2 Kondensacja objętościowa

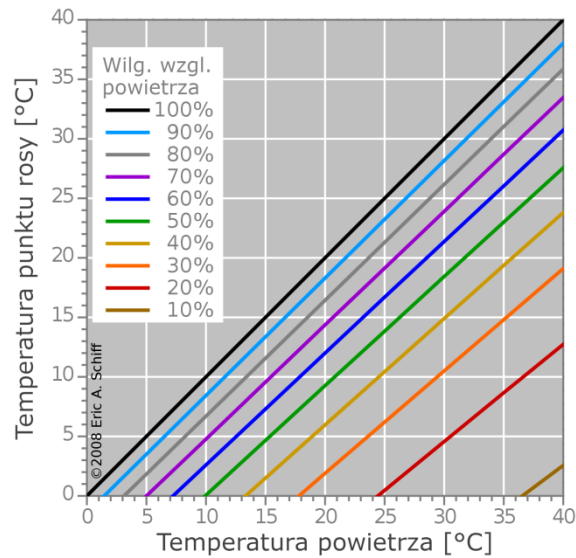
Obok kondensacji kapilarnej, w porach materiału może wystąpić kondensacja objętościowa. Jest to zjawisko polegające na skraplaniu się (Rys. 1.9) pary wodnej zawartej w powietrzu, występujące, gdy powietrze zetknie się z powierzchnią o temperaturze niższej niż temperatura punktu rosy, czyli temperatury, w której, na skutek schładzania, para wodna zawarta w powietrzu osiąga stan nasycenia, a poniżej której staje się przesycona i skrapla się (Fot. 1.2). Wartość temperatury punktu rosy uzależniona zatem jest od wilgotności względnej oraz temperatury powietrza w porach materiału (Rys. 1.10) [75, 88].



Rys. 1.9 Kondensacja (skraplanie) – zjawisko zmiany stanu skupienia, z fazy gazowej w fazę ciekłą (rys.: medianauka.pl)



Fot. 1.2 Woda skroplona w postaci kropli na pajęczynie (fot.: U.S. Fish and Wildlife Service)

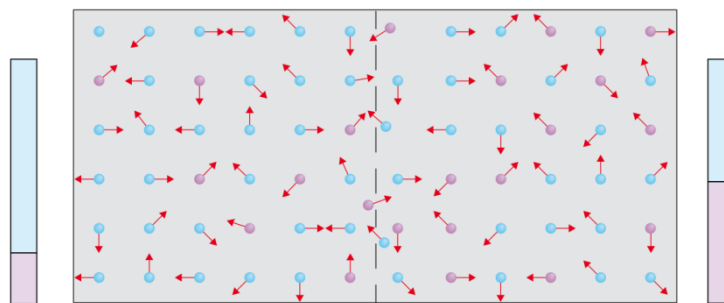


Rys. 1.10 Zależność temperatury punktu rosy od temperatury i wilgotności względnej powietrza (CC BY: Eric A Schiff)

1.4.3 Dyfuzja pary wodnej w materiałach porowatych

Powietrze o danej temperaturze oraz wilgotności charakteryzuje się konkretną wartością ciśnienia cząstkowego pary wodnej. Zewnętrzne przegrody budynku rozdzielają od siebie obszary, które w danym momencie posiadają inną temperaturę oraz wilgotność, z czego wynika że posiadają również różne wartości cząstkowego ciśnienia pary wodnej. W wyniku różnicy ciśnień cząstkowych po obu stronach przegrody dochodzi do transportu pary wodnej przez element budowlany – zjawisko to nosi miano dyfuzji pary wodnej [75].

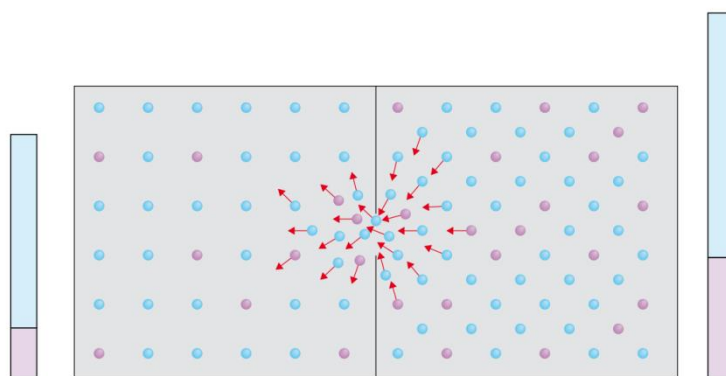
Siłą napędową dyfuzji pary wodnej są molekularne ruchy Browna (Rys. 1.11) [133]. Cząsteczki pary wodnej poruszają się w mieszaninie gazów w sposób chaotyczny. Jeśli napotkają one na przepuszczalny dla pary wodnej otwór w komponencie, wnikają w niego – odbywa się to w zasadzie z obu stron komponentu.



Rys. 1.11 Dyfuzja pary wodnej – kompensacja stężenia pary wodnej poprzez ruch molekularny Browna: ciśnienie powietrza jest takie samo po obu stronach elementu przepuszczalnego dla pary wodnej; ilość pary wodnej jest większa po prawej stronie elementu (rys.: [133])

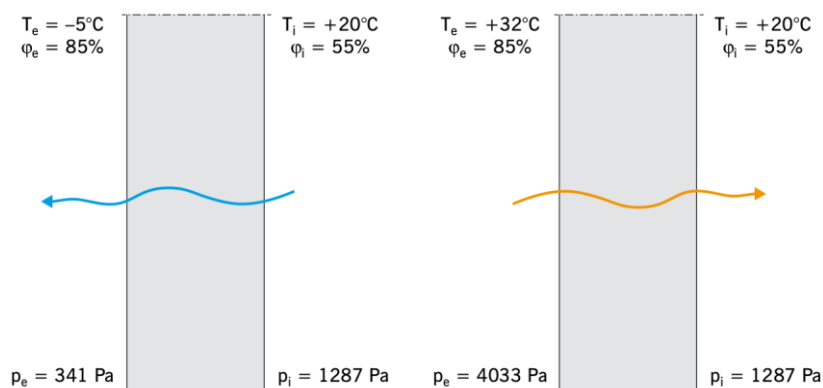
Jeśli po obu stronach elementu budowlanego przepuszczalnego dla pary wodnej występuje takie samo ciśnienie powietrza, lecz po jednej ze stron znajduje się więcej cząsteczek pary wodnej, wówczas prawdopodobieństwo, że po pewnym czasie więcej cząsteczek będzie migrować ze strefy o wyższym stężeniu pary, niż w kierunku przeciwnym, należy uznać za wysokie. W przeciwieństwie do konwekcji pary wodnej, w przypadku której z jednej strony elementu występuje wyższe ciśnienie

całkowite (Rys. 1.12), w przypadku dyfuzji nie dochodzi do przepływu, który mógłby wytworzyć ciśnienie [133].



Rys. 1.12 Konwekcja pary wodnej – kompensacja ciśnienia powietrza przez przepływ powietrza (rys.: [133])

W związku z tym że wilgotność względna powietrza znajdującego się po zewnętrznej stronie przegrody budowlanej jest zazwyczaj wyższa niż w przypadku powietrza wewnętrznego, wartość ciśnienia cząstkowego pary wodnej, a zatem również kierunek jej przepływu na drodze dyfuzji, będą uzależnione przede wszystkim od temperatury powietrza wewnątrz i na zewnątrz budynku. W polskich warunkach klimatycznych oznacza to zazwyczaj dyfuzję na zewnątrz zimą oraz w odwrotnym kierunku latem (Rys. 1.13) [75].



Rys. 1.13 Kierunek dyfuzji pary wodnej w przegrodzie budowlanej w zależności od występujących ciśnień cząstkowych pary wodnej

Dyfundująca przez przegrodę para wodna na styku poszczególnych warstw materiałowych może osiągnąć stan nasycenia, co skutkuje jej skropleniem – zjawisko to określane jest jako kondensacja węgłbna lub międzywarstwowa.

Wielkością charakteryzującą zdolność materiału do przepuszczania pary wodnej jest współczynnik przepuszczalności pary wodnej δ (czyli wielkość analogiczna do współczynnika przewodności cieplnej λ). Wyraża on ilość pary wodnej jaka w ustalonych warunkach dyfunduje w ciągu 1 godziny przez 1 m^2 płaskiej przegrody o długości 1 m, w wyniku różnicy ciśnienia cząstkowego pary wodnej (po obu stronach tej przegrody) wynoszącej 1 Pa [34]. Miara oporu dyfuzyjnego jest $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$. Stosowane jest również pojęcie oporu dyfuzyjnego określone wzorem:

Opór dyfuzyjny			Równanie 17
$R_d = d/\delta$	symbol	jednostka	nazwa
	R_d	$(m^2 \cdot s \cdot Pa)/kg$	opór dyfuzyjny
	d	m	grubość warstwy materiału
	δ	$kg/(m \cdot s \cdot Pa)$	współczynnik przepuszczalności pary wodnej

Obliczenia wilgotnościowe dla przegród budowlanych prowadzi się zazwyczaj stosując w miejsce współczynnika przepuszczalności pary wodnej oraz oporu dyfuzyjnego wielkości porównawcze, powstałe w wyniku porównania charakterystycznych dla materiału parametrów R oraz δ do tych samych właściwości powietrza. Znając wartość współczynnika dyfuzji pary wodnej (paroprzepuszczalności) w powietrzu wynoszącą $\delta_0 = 2 \cdot 10^{-10}$ [kg/m·s·Pa], można dla każdego materiału ustalić współczynnik oporu dyfuzyjnego μ , czyli wartość niemianowaną, wskazujący ile razy opór stawiany dyfuzji pary przez dany materiał jest większy od oporu powietrza [34]:

Współczynnik oporu dyfuzyjnego			Równanie 18
$\mu = \frac{\delta_0}{\delta}$	symbol	jednostka	nazwa
	μ	-	współczynnik oporu dyfuzyjnego
	δ_0	$kg/(m \cdot s \cdot Pa)$	współczynnik przepuszczalności pary wodnej w powietrzu
	δ	$kg/(m \cdot s \cdot Pa)$	współczynnik przepuszczalności pary wodnej

W praktyce najczęściej stosowana jest jednak dyfuzyjnie równoważna grubość warstwy powietrza (równowagowy współczynnik oporu dyfuzyjnego), czyli parametr określający grubość nieruchomej warstwy powietrza, która ma taki sam opór pary wodnej, jak dan warstwa materiału [33]:

Równowagowy współczynnik oporu dyfuzyjnego			Równanie 19
$s_d = \mu \cdot d$	symbol	jednostka	nazwa
	s_d	m	równowagowy współczynnik oporu dyfuzyjnego
	μ	-	współczynnik oporu dyfuzyjnego
	d	m	grubość warstwy materiału

Do opisu zjawiska dyfuzji pary wodnej przyjęto się stosować prawo Ficka, zgodnie z wzorem [75]:

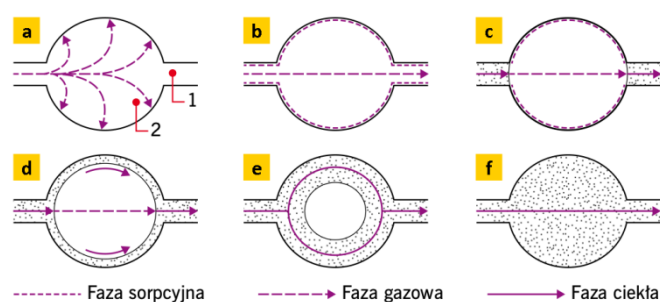
Prawo Ficka			Równanie 20
$j_d = -\frac{\delta_0 \Delta p}{\mu \Delta l} = -\delta_0 \frac{\Delta p}{s_d}$	symbol	jednostka	nazwa
	j_d	$kg/(m^2 \cdot s)$	gęstość dyfuzyjnego strumienia masy
	δ_0	$kg/(m \cdot s \cdot Pa)$	współczynnik przepuszczalności pary wodnej w powietrzu
	μ	-	współczynnik oporu dyfuzyjnego
	p	Pa	ciśnienie cząstkowe pary wodnej
	l	m	odległość od źródła (długość)
	s_d	m	równowagowy współczynnik oporu dyfuzyjnego

Ujemny znak w równaniu wskazuje, że dyfuzja pary następuje w kierunku obszaru o niższej prężności.

1.5 Transport wody w postaci ciekłej

Przyrost zawilgocenia w porowatym materiale można podzielić na sześć etapów, które przedstawiono na rysunku 1.14 – zawartość wody wzrasta zazwyczaj w kolejności a do f [66]. W bardzo

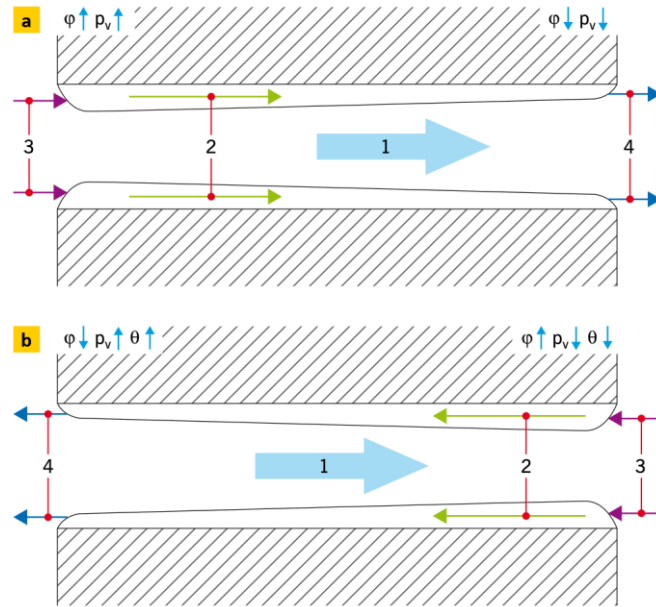
suchym materiale budowlanym (Rys. 1.14a) całość pary wodnej wnikającej do porów w wyniku adsorpcji wiązana jest w cienkiej warstwie molekuł na wewnętrznej powierzchni porów – na tym etapie nie można jeszcze mówić o „transportie”. Dopiero gdy wszystkie ściany porów zostaną pokryte jedną lub kilkoma warstwami molekuł wody (Rys. 1.14b), przestrzeń porów staje się otwarta na dyfuzję pary wodnej. Grubość warstwy molekuł zgromadzonej na wewnętrznej powierzchni porów pozostaje w równowadze z względną wilgotnością powietrza wewnątrz porów. W kolejnym etapie węższe pory w wyniku kondensacji kapilarnej zostają wypełnione wodą w fazie ciekłej (Rys. 1.14c), podczas gdy w większych porach woda nadal występuje jedynie w postaci pary oraz warstwy adsorpcyjnej (która jest na tyle cienka, że transport wody w tych przestrzeniach nadal odbywa się jedynie na drodze dyfuzji). Gdy grubość warstwy adsorpcyjnej staje się odpowiednio duża (Rys. 1.14d), transport wody w fazie ciekłej staje się również możliwy w szerszych porach, przez co wydajność transportu wody wzrasta w porównaniu z samą dyfuzją. Wraz ze wzrostem zawartości wody w fazie ciekłej (Rys. 1.14e) może rozwinąć się efektywny przepływ nienasycony (przepływ kapilarny). Pęcherzyk powietrza w rozszerzeniu porów pozostaje nadal zwarty, ale można go scharakteryzować, jako „swobodnie unoszący się w wodzie”. W końcowym etapie (Rys. 1.14f) przestrzeń porów zostaje całkowicie nasycona wodą, a transport wilgoci jest w pełni zgodny z prawem Darcy’ego [66].



Rys. 1.14 Schematyczne przedstawienie transportu wilgoci w porowatym materiale budowlanym, wraz ze wzrostem zawilgocenia (rys.: [66])

Transport wilgoci w fazie ciekłej poniżej zakresu wilgoci kapilarnej (Rys. 1.14d) powoduje w warunkach izotermicznych zwiększenie się współczynnika transportu pary wodnej. Powodowane jest to przez przyspieszenie całkowitego przepływu masy. W przypadku materiałów budowlanych zdolnych do adsorpcji pary, wzdłuż powierzchni porów równoległych do gradientu ciśnienia pary wodnej wewnątrz przestrzeni porów, występuje również gradient wilgoci sorpcyjnej. Transport wilgoci w fazie ciekłej jest wynikiem ruchu zaadsorbowanej warstewki wody, natomiast potencjałem wymuszającym transport jest wilgotność względna. W warunkach izotermicznych transport w fazie ciekłej nakłada się na strumień dyfuzji, zwiększając całkowity strumień masy (Rys. 1.15a). Jednakże, z uwagi na inne czynniki powodujące dyfuzję pary wodnej (ciśnienie cząstkowe pary) oraz transport fazy ciekłej (wilgotność względna) w warunkach nieizotermicznych dyfuzja może przebiegać w kierunku przeciwnym do transportu warstwy cienkiej zaadsorbowanej wody, co prowadzi do zmniejszenia całkowitego strumienia masy (Rys. 1.15b) [146].

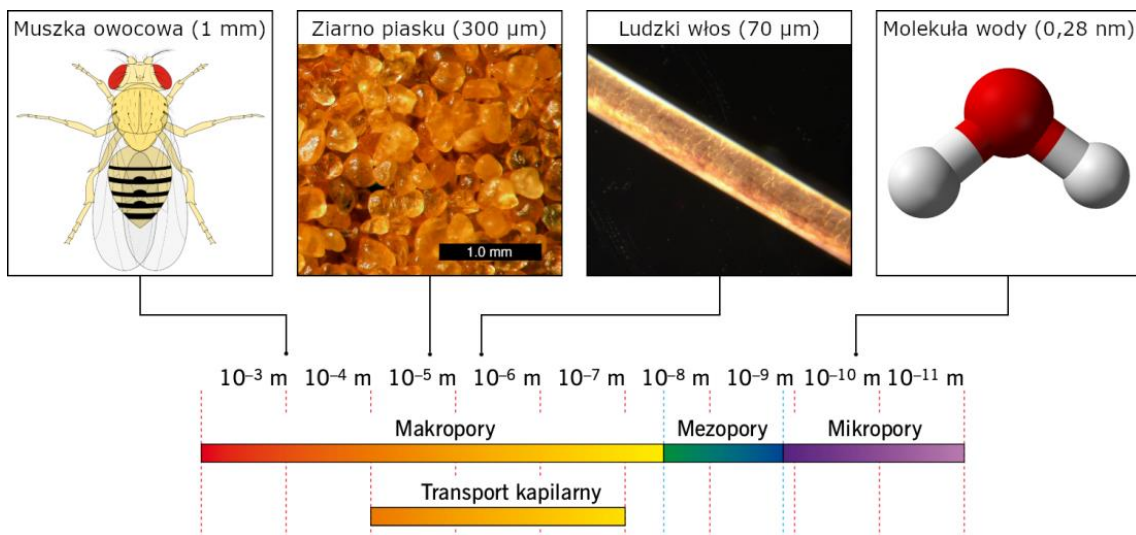
Proces migracji pary wodnej w wyniku dyfuzji zanika w miarę rozszerzania się obszarów zawierających wodę kapilarną (Rys. 1.14e) – pojawia się przepływ kapilarny o bardziej intensywnym charakterze [34].



Rys. 1.15 Wzajemne relacje kierunków dyfuzji, transportu cienkiej warstwy cieczy oraz sorpcji/desorpcji wewnątrz porów materiału (rys.: [146])
 φ – wilgotność względna, p_v – ciśnienie pary wodnej, θ – temperatura, \uparrow - wyższy, \downarrow - niższy, 1 – dyfuzja, 2 – transport cienkiej warstwy cieczy, 3 – sorpcja, 4 - desorpcja

1.5.1 Podciąganie kapilarne

Tendencja cieczy do wznoszenia się w porach o bardzo małej średnicy, tj. w porach o promieniu od 10^{-7} do 10^{-4} m (od 100 nm do 0,1 mm) – nazywanych też porami włoskowatymi lub (od łac. włos – *capillus*) kapilarnymi (Rys. 1.16) – nazywana jest zjawiskiem wzniesienia kapilarnego lub podciąganiem kapilarnym [10, 45, 171], a jego przyczyną jest zjawisko fizyczne określane jako napięcie powierzchniowe.

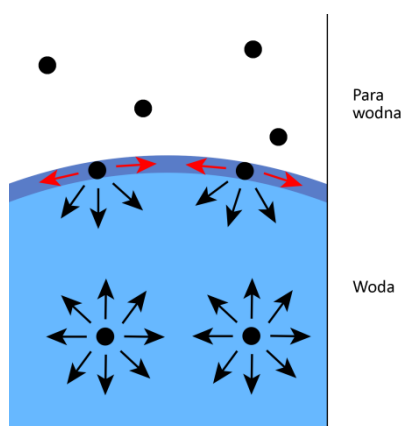


Rys. 1.16 Średnica porów transportujących wilgoć kapilarną

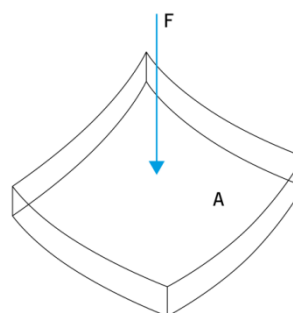
Napięcie powierzchniowe to zjawisko obserwowane na powierzchniach zewnętrznych cieczy, będące następstwem oddziaływań międzycząsteczkowych występujących wewnątrz cieczy. Siły spójności (kohezji) działające na pojedynczą cząsteczkę, znajdującą się z dala od powierzchni zewnętrznej, zno-

szą się wzajemnie. Natomiast cząsteczki znajdujące się na granicy między fazami ciecz-gaz (na powierzchni cieczy) poddawane są oddziaływaniu obu tych ośrodków. Wypadkowa sił spójności skierowana jest do wnętrza cieczy (prostopadle do powierzchni międzyfazowej) – siłę tę równoważy ciśnienie wewnętrzne cieczy (Rys. 1.17) – i nosi nazwę ciśnienia powierzchniowego. Miarą napięcia powierzchniowego jest siła styczna do powierzchni [38]. Ciecze, w tym woda, wykazują naturalną tendencję do przyjmowania kształtu, któremu odpowiada najmniejsza powierzchnia [10]. Ponieważ napięcie powierzchniowe przeciwdziała powiększaniu się powierzchni zewnętrznej cieczy, definiowane jest ono jako praca, wykonana w wyniku działania siły F na powierzchnię A , w celu jej zwiększenia (Rys. 1.18) i wyraża się wzorem [10, 38, 171]:

Napięcie powierzchniowe			Równanie 21
$\sigma = \frac{dW}{dA}$	symbol	jednostka	nazwa
	σ	N/m	napięcie powierzchniowe
	W	J	praca
	A	m^2	powierzchnia



Rys. 1.17 Oddziaływanie sił międzycząsteczkowych na powierzchni i w głębi wody



Rys. 1.18 Napięcie powierzchniowe cieczy (rys.: [66])

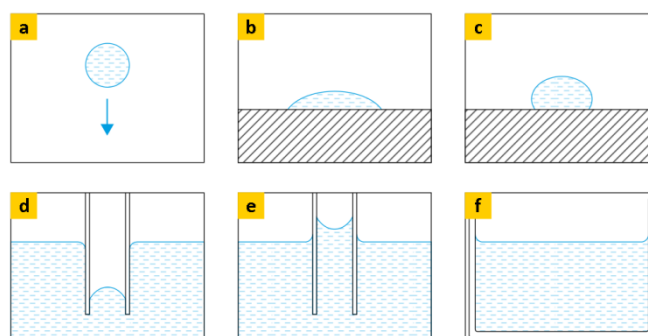
Napięcie powierzchniowe ma wymiar energia/powierzchnia, w związku z czym może być wyrażane w dżulach na metr kwadratowy (J/m^2), jednakże zazwyczaj stosuje się jednostkę N/m ($J/m^2 = (N \cdot m)/m^2 = N/m$) [10].

Tabela 1.4 Napięcie powierzchniowe niektórych cieczy w temperaturze 20 °C [38]

Ciecz	Napięcie powierzchniowe [10^{-2} N/m]
Alkohol etylowy	2,23
Aceton	2,37
Czterochlorek węgla	2,68
Benzen	2,89
Nitrobenzen	4,18
Woda	7,28
Rtęć	42,80

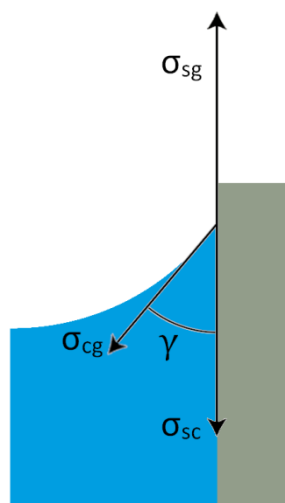
Woda charakteryzuje się jednym z największych napięć powierzchniowych. Większe wartości wykazują jedynie ciecze będące ciekłymi metalami (Tabela 1.4). W wyniku działania napięcia powierzchniowego woda może się zachowywać w różnorodny sposób – można zaobserwować kulisty kształt swo-

bodnie opadającej kropli (Rys. 1.19a), dobre (Rys. 1.19b) i słabe (Rys. 1.19c) zwilżanie powierzchni ciał stałych, opadanie (depresję – Rys. 1.19d) oraz wznoszenie się (podciąganie – Rys. 1.19e) wody w wąskiej rurce, a także tworzenie się menisku na krawędziach powierzchni wody (Rys. 1.19f) [66].



Rys. 1.19 Najczęściej obserwowane efekty napięcia powierzchniowego wody (rys.: [66])

Obok struktury i rozkładu porów w materiale, kapilarny transport wilgoci determinowany jest przez właściwości zwilżające cieczy w stosunku do materiału lub też (ujmując inaczej) przez właściwości materiału w stosunku do wody wnikażącej w kapilary. W wyniku działania sił napięcia powierzchniowego, powierzchnia wody przy kontakcie z ciałem stałym tworzy tzw. kąt zwilżalności czyli kąt pomiędzy powierzchnią ciała stałego i styczną do powierzchni cieczy poprowadzoną w miejscu styku – na granicy trzech faz (Rys. 1.19f).



Rys. 1.20 Równowaga sił prowadząca do powstania kąta zwilżania γ (rys.: [10])

Występowanie kąta zwilżania wynika z równowagi sił w miejscu kontaktu cieczy z ciałem stałym (Rys. 1.20) [10]. Jeśli napięcia powierzchniowe (a dokładniej energię potrzebną do utworzenia powierzchni jednostkowej na każdej z granic faz) na granicy faz ciało stałe/gaz, ciało stałe/ciecz oraz ciecz/gaz oznaczymy odpowiednio przez σ_{sg} , σ_{sc} oraz σ_{cg} , siły pozostawać będą w równowadze jeśli zostanie spełniony warunek:

$$\sigma_{sg} = \sigma_{sc} + \sigma_{cg} \cos \gamma$$

z czego wynika:

$$\cos \gamma = \frac{\sigma_{sg} - \sigma_{sc}}{\sigma_{cg}}$$

Po uwzględnieniu faktu, że praca adhezji cieczy do ciała stałego (na jednostkę powierzchni wzajemnego kontaktu) dana jest wzorem:

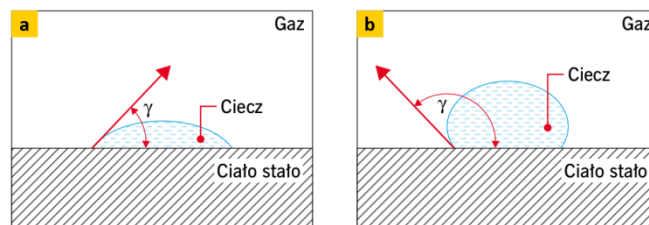
$$W_{ad} = \sigma_{sg} + \sigma_{cg} - \sigma_{sc}$$

Powyższe równanie można zapisać w następującej formie:

Kąt zwilżania	Równanie 22		
$\cos \gamma = \frac{W_{ad}}{\sigma_{cg}} - 1$	symbol	jednostka	nazwa
	γ	$^{\circ}$	kąt zwilżania materiału przez wodę
	W_{ad}	J	praca
	σ_{cg}	N/m	napięcie powierzchniowe

Wartość kąta γ jest zatem miarą zwilżalności:

- gdy siły przylegania (adhezji) przeważają nad siłami spójności (kohezji), kropla cieczy rozpościera się na powierzchni podłoża ($1 < W_{ad}/\sigma_{cg} < 2 \rightarrow 0 < \gamma < \pi/2$) – ciecz zwilża, materiał hydrofilowy (Rys. 1.21a),
- przeważają siły spójności ($0 < W_{ad}/\sigma_{cg} < 1 \rightarrow \pi/2 < \gamma < \pi$) – ciecz nie zwilża, materiał hydrofobowy (Rys. 1.21b).

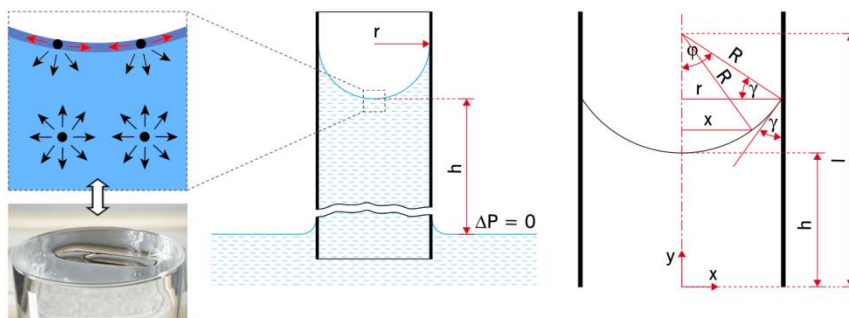


Rys. 1.21 Zetknięcie kropli wody z powierzchnią ciała stałego: a) zwilżanie, b) brak zwilżania (rys.: [66])

W kapilarach ciała o dobrej zwilżalności powierzchnia cieczy tworzy menisk wklęsły – podnosi się nieco przy zetknięciu z ciałem stałym (Rys. 1.19e) – choć dowody eksperymentalne wykazały, że w wielu przypadkach spontaniczna infiltracja nie została osiągnięta nawet wówczas, gdy kąt zwilżania jest mniejszy niż 90° [162]. Natomiast w przypadku ciał o niedostatecznej zwilżalności, powstaje menisk wypukły – ciecz opada (Rys. 1.19d).

Bardzo trudne jest zbudowanie modelu opisującego transport kapilarny wilgoci w materiałach porowatych, głównie z uwagi na złożoność geometrii porów – układ tworzą bowiem pory o różnorodnych kształtach (cylindryczne, klinowate, szczelinowe, kuliste) oraz o różnorodnym systemie połączeń (pory otwarte, kieszeniowe, zamknięte). Również kapilary tworzą systemy nieciągłe oraz o skomplikowanych kształtach [45]. Przybliżoną analizę zjawiska można przeprowadzić, korzystając przy tym z uproszczonego modelu ciała kapilarnego w postaci wiązki równoległych kapilar o niewielkim promieniu (Rys. 1.22), opierając się na równaniu Younga i Laplace’a (określanym również podstawowym równaniem kapilarności) [2]:

Równanie Younga i Laplace’a	Równanie 23		
$\Delta p = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$	symbol	jednostka	nazwa
	Δp	Pa	różnica ciśnień po obu stronach menisku
	σ	N/m	napięcie powierzchniowe
	R_1, R_2	m	promienie krzywizny menisku

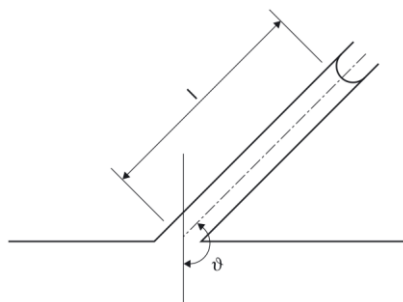


Rys. 1.22 Wznoszenie się cieczy w kapilarze o stałym promieniu (rys.: autor na podstawie [2])

Dla kapilary obrotowo symetrycznej ($R_1 = R_2 = R$) oraz przy uwzględnieniu faktu, że woda nie zwilża doskonale materiału (a zatem kąt zwilżenia między krawędzią menisku a ścianą kapilary $\gamma > 0$), wzór przyjmie postać:

$$\Delta p = \frac{2\sigma \cos \gamma}{r}$$

W przypadku kapilary o promieniu r nachylonej względem pionu (Rys. 1.23), ruch cieczy powstanie pod wpływem różnicy ciśnień Δp równoważonej przez: składową siły grawitacji (Równanie 24), związany z siłą tarcia spadek ciśnienia wynikający z prawa Hagena-Poiseuille'a (Równanie 25) oraz siłę bezwładności (Równanie 26) [148, 171]:



Rys. 1.23 Podciąganie wody ze swobodnej powierzchni cieczy przez pochyłą kapilarę

Składowa siły ciężkości			Równanie 24
$F_C = mg \cos \vartheta = g\rho l \cos \vartheta$	symbol	jednostka	nazwa
	F_C	N	składowa siły ciężkości
	m	kg	masa
	g	m/s^2	przyspieszenie ziemskie
	ϑ	$^\circ$	kąt nachylenia kapilary
	ρ	kg/m^3	gęstość cieczy
	l	m	droga ruchu wody w kapilarze

Prawo Hagena-Poiseuille'a			Równanie 25
$\Delta p_t = -\frac{8\eta l}{r^2} \frac{dl}{dt}$	symbol	jednostka	nazwa
	Δp_t	Pa	spadek ciśnienia
	η	Pa·s	lepkość dynamiczna cieczy
	l	m	droga ruchu wody w kapilarze
	r	m	promień wewnętrzny kapilary
	t	s	czas

Siła bezwładności			Równanie 26
$F_b = ma = \rho l \frac{d^2 l}{dt^2}$	symbol	jednostka	nazwa
	F_b	N	siła bezwładności
	m	kg	masa
	a	m/s^2	przyspieszenie
	ρ	kg/m^3	gęstość cieczy
	l	m	droga ruchu wody w kapilarze
	t	s	czas

Z uwagi na powolność przepływu wartość siły bezwładności jest na tyle mała, że można ją pominąć. Zapis równowagi sił przybierze wówczas postać:

$$\Delta p = \frac{2\sigma \cos \gamma}{r} + g\rho l \cos \vartheta - \frac{8\eta l}{r^2} \frac{dl}{dt} = 0$$

z którego wynika wzór na prędkość ruchu kapilarnego:

Prędkość podciągania kapilarnego			Równanie 27
$v = \frac{dl}{dt} = \frac{r^2}{8\eta l} \left(\frac{2\sigma \cos \gamma}{r} + g\rho l \cos \vartheta \right)$	symbol	jednostka	nazwa
	v	m/s	prędkość podciągania kapilarnego
	l	m	droga ruchu wody w kapilarze
	t	s	czas podciągania
	r	m	promień wewnętrzny kapilary
	η	Pa·s	lepkość dynamiczna cieczy
	σ	N/m	napięcie powierzchniowe
	γ	°	kąt zwilżania materiału przez wodę
	g	m/s^2	przyspieszenie ziemskie
	ρ	kg/m^3	gęstość cieczy
	ϑ	°	kąt nachylenia kapilary

Przy ruchu poziomym $\cos \vartheta = 0$ i wówczas prędkość ruchu kapilarnego staje się równa

$$v = \frac{dl}{dt} = \frac{\sigma r \cos \gamma}{4\eta l}$$

skąd widać, że wraz ze wzrostem drogi l następuje spadek prędkości ruchu kapilarnego, jak również, że zachodzi związek:

$$l \frac{dl}{dt} = \frac{\sigma r \cos \gamma}{4\eta}$$

z którego, po scałkowaniu dla warunków początkowych ($t=0, h=0$), otrzymuje się równanie Washburna [60, 162, 191]:

Równanie Washburna			Równanie 28
$l^2 = \frac{\sigma r \cos \gamma}{2\eta} \cdot t$	symbol	jednostka	nazwa
	l	m	droga ruchu wody w kapilarze
	σ	N/m	napięcie powierzchniowe
	r	m	promień wewnętrzny kapilary
	γ	°	kąt zwilżania materiału przez wodę
	η	Pa·s	lepkość dynamiczna cieczy
	t	s	czas podciągania

Do równania Washburna stosuje się kilka uproszczeń, tj. [60, 162]:

- przepływ laminarny w stanie ustalonym,
- brak poślizgu – zerowa prędkość cieczy na granicy faz ciało stałe/ciecz,

- brak ciśnienia przyłożonego z zewnątrz, oraz
- nieistotne różnice grawitacyjne.

Po przekształceniu równania 28 otrzymamy z kolei:

Czas przepływu cieczy według ruchu kapilarnego			Równanie 29
$t = \frac{2l^2\eta}{\sigma r \cos \gamma}$	symbol	jednostka	nazwa
	t	s	czas podciągania
	l	m	droga ruchu wody w kapilarze
	η	Pa·s	lepkość dynamiczna cieczy
	σ	N/m	napięcie powierzchniowe
	r	m	promień wewnętrzny kapilary
	γ	°	kąt zwilżania materiału przez wodę

Jeżeli natomiast transport zachodzi w kierunku pionowym, $\cos \vartheta = -1$, a wówczas prędkość podciągania kapilarnego wyrażona wzorem 27 staje się równa:

$$v = \frac{dl}{dt} = \frac{r^2}{8\eta l} \left(\frac{2\sigma \cos \gamma}{r} - g\rho l \right)$$

z czego wynika, że dla określonej wysokości słupka wody w kapilarze prędkość staje się równa zero. Stąd maksymalna wysokość podciągania kapilarnego określona jest zgodnie z prawem Jurina [24]:

Prawo Jurina			Równanie 30
$h = l_{max} = \frac{2\sigma}{g\rho r} \cdot \cos \gamma$	symbol	jednostka	nazwa
	h	m	wysokość podciągania
	l	m	droga ruchu wody w kapilarze
	σ	N/m	napięcie powierzchniowe
	ρ	kg/m ³	gęstość cieczy
	g	m/s ²	przyspieszenie ziemskie
	r	m	promień wewnętrzny kapilary
γ	°	kąt zwilżania materiału przez wodę	

Wzory 27 oraz 30 wyrażają dwa podstawowe prawa opisujące kapilarny transport wilgoci. Wynika z nich, że szybkość podciągania kapilarnego jest większa w materiałach o *grubych* kapilarach, niż materiałach o cienkich naczyniach włosowatych. Natomiast w materiałach o cienkich kapilarach wysokość podnoszenia jest znacznie większa. Przy bardzo małym lub bardzo dużym promieniu kapilary prędkość oraz maksymalna wysokość podnoszenia redukują się do zera (inaczej ujmując, transport kapilarny nie zachodzi). W rzeczywistości, choć materiały kapilarno-porowate mają budowę znacznie bardziej złożoną, niż opisuje to model wiązki jednakowych równoległych kapilar [149], w przypadku kapilar o promieniu mniejszym niż 0,1 μm prędkość absorpcji zanika, natomiast w przypadku kapilar o promieniu przekraczającym 100 μm maksymalna możliwa wysokość wznoszenia spada do zera.

Z równania Równanie 27 można ponadto otrzymać:

$$d\tau = \frac{8\eta l dl}{2\sigma \cos \gamma - g r^2 \rho l}$$

a po scałkowaniu:

$$\tau = \frac{16\eta\sigma \cos \gamma}{r(r\rho g)^2} \left[-\frac{r\rho g l}{2\sigma \cos \gamma} - \ln \left(1 - \frac{r\rho g l}{2\sigma \cos \gamma} \right) \right]$$

Wstawiając do powyższego wyrażenia maksymalną wysokość podciągania kapilarnego określoną wzorem 30 otrzymamy zmodyfikowaną postać równania Washburna [3, 148]:

$$\tau = \frac{8\eta h}{r^2 \rho g} \left[\ln \frac{h}{h-l} - \frac{l}{h} \right]$$

Można zauważyć, że dla małych wartości l/h wyrażenie powyższe staje się tożsame ze wzorem 29, z czego można wywnioskować, że przy małej, w porównaniu z maksymalną wysokością podciągania, wysokości słupa cieczy w kapilarze, wpływ sił grawitacji jest niewielki w porównaniu z siłami lepkości oraz że prędkość podciągania kapilarnego jest jednakowa, niezależnie od kąta nachylenia kapilary [148].

Ze wzorów 28 oraz 29 wynika ponadto, że w początkowym okresie (dla małych wartości l/h), wysokość słupka wody w kapilarze, a tym samym masa zaabsorbowanej wody, jest proporcjonalna do pierwiastka kwadratowego z czasu liczonego od momentu zetknięcia z powierzchnią wody [148].

1.5.2 Współczynnik absorpcji kapilarnej

Kiedy porowate, zwilżalne materiały budowlane wchodzi w kontakt z wodą, ciśnienie kapilarne generowane na meniskach wciąga ją w pory. Wraz ze wzrostem wysokości podciągania zwiększa się opór przepływu wody. Dlatego też głębokość wnikania wody h z czasem rośnie coraz wolniej, co potwierdzają obliczenia oparte na równaniu Washburna (Równanie 28) oraz liczne eksperymenty [66]. Głębokość penetracji rośnie wraz z pierwiastkiem kwadratowym z czasu:

$$h = w'_w \cdot \sqrt{t}$$

Wyrażenie przed pierwiastkiem określa się współczynnikiem kapilarnej absorpcji wody w_w . Liczne eksperymenty na materiałach budowlanych potwierdziły teoretycznie przewidywane paraboliczne prawo czasu wnikania wody w chłonne materiały budowlane. Na tym opiera się następująca metoda badawcza opisująca chłonność kapilarną powierzchni materiałów budowlanych.

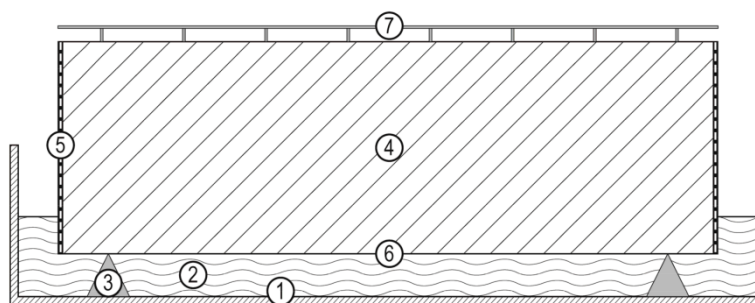
Badaną próbkę materiału budowlanego zanurza się na kilka milimetrów w kąpeli wodnej, miarodajną powierzchnią skierowaną w dół. Poprzez regularną obserwację próbki materiału budowlanego można określić przebieg głębokości wnikania wody w czasie. Jeśli głębokość penetracji jako funkcję czasu zanurzenia nanieść na wykresie, otrzyma się oczekiwaną parabolę. Bardziej celowe jest jednak obliczenie głębokości wnikania jako funkcji pierwiastka czasu – na wykresie uzyskuje się wówczas linię prostą.

Ta sama prawidłowość odnosi się do wielkości, którą o można określić o wiele łatwiej i dokładniej niż głębokość wnikania, czyli masy wody, pochłoniętej przez jednostkę powierzchni w funkcji czasu, i dlatego to ona jest preferowana do charakteryzowania kapilarnej absorpcji wody przez materiały budowlane [14, 66]. Analogicznie do równania powyżej współczynnik absorpcji wody definiowany jest następującą zależnością [66, 146, 147]:

Współczynnik sorpcji wody			Równanie 31
$m_s = A_w \cdot \sqrt{t}$	symbol	jednostka	nazwa
	A_w	$\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$	współczynnik absorpcji wody
	m_s	kg	masa wilgoci zaabsorbowanej z powierzchni styku z wodą, podzielona przez pole tej powierzchni
	t	s	czas

Współczynnik absorpcji wody odniesiony do konkretnego czasu t wyrażonego w sekundach zapisuje się jako A_{wt} . Szeroko stosowana jest jednak alternatywna definicja z odniesieniem do czasu wyrażonego w godzinach – współczynnik absorpcji kapilarnej oznaczany jest wówczas jako w_w (a w odniesieniu do konkretnego czasu jako w_{wt}) [146]. Metodyka pomiaru współczynnika absorpcji sposobem tradycyjnym polega na zetknięciu jednej z powierzchni badanej próbki z lustrem wody (Rys. 1.24), a następnie rejestracji tempa zachodzącego w niej procesu niestacjonarnego [47, 52]. Oznaczenie wartości współczynnika sprowadza się w takim wypadku do pomiaru masy wody wchłoniętej przez próbkę w jednostce czasu – w ogólnym przypadku oblicza się go ze wzoru [66, 140, 143]:

Wartość współczynnika absorpcji wody			Równanie 32
$w_w = \frac{\Delta m}{A \cdot \sqrt{t}} = \frac{m_t - m_i}{A \cdot \sqrt{t}}$	symbol	jednostka	nazwa
	w_w	$\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$	współczynnik absorpcji wody
	Δm	kg	przyrost masy po nasączeniu w czasie t
	m_t	kg	masa próbki po czasie t
	m_i	kg	masa początkowa próbki
	A	m^2	powierzchnia czołowa
t	h	czas nasycania	



Rys. 1.24 Schemat stanowiska badawczego do określania absorpcji kapilarnej materiałów budowlanych; tzw. test nasiąkliwości (rys.: [66])

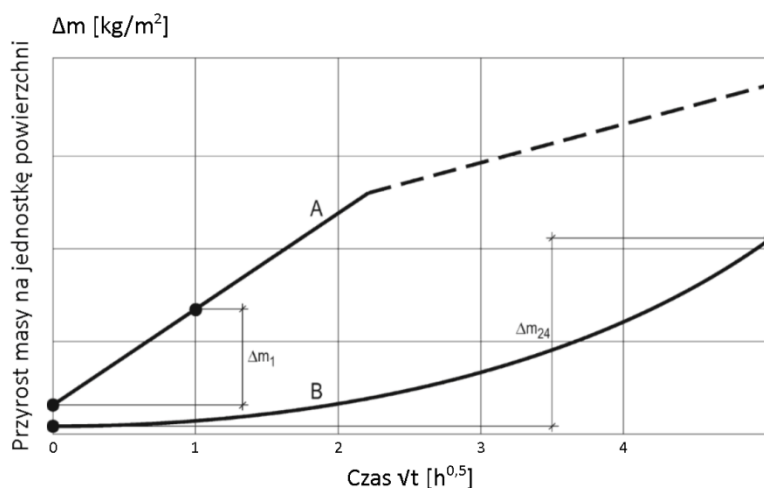
- 1) naczynie na wodę, 2) woda, 3) podparcie punktowe, 4) badana próbka, 5) uszczelnienie powierzchni bocznych, 6) powierzchnia kontaktu z wodą, 7) siatka obciążająca

Zgodnie z normą PN-EN ISO 15148 [146], zaabsorbowaną masę wody Δm_t , przypadającą na jednostkę pola powierzchni, oblicza się jako różnicę masy po zanurzeniu w wodzie oraz masy początkowej:

Przyrost masy na jednostkę powierzchni zanurzonej w wodzie			Równanie 33
$\Delta m_t = \frac{m_t - m_i}{A}$	symbol	jednostka	nazwa
	Δm_t	kg/m^2	przyrost masy na jednostkę powierzchni czołowej, po czasie t
	m_t	kg	masa próbki po czasie t
	m_i	kg	masa początkowa próbki
	A	m^2	powierzchnia czołowa

I sporządza się jej wykres w funkcji pierwiastka kwadratowego z czasu \sqrt{t} . Wykres ten może przebiegać na dwa sposoby. Zazwyczaj, po krótkiej początkowej fazie stabilizacji, absorpcja wody w funkcji pierwiastka czasu, określona przez powtarzane ważenia, może być przedstawiona w postaci linii prostej (Rys. 1.25, wykres A) – linię taką należy przedłużyć do przecięcia w punkcie $\Delta m'_0$ z pionową osią zerowego czasu. Zgodnie z normą PN-EN 15148 [146], współczynnik absorpcji wody oblicza się wg wzoru:

Wartość współczynnika absorpcji wody (typ A) wg PN-EN 15148			Równanie 34
	symbol	jednostka	nazwa
$w_w = \frac{\Delta m'_{t_f} - \Delta m'_0}{\sqrt{t_f}}$	w_w	$\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$	współczynnik absorpcji wody
	$\Delta m'_{t_f}$	kg/m_2	wartość Δm odczytana z linii prostej dla czasu t_f
	$\Delta m'_0$	kg/m_2	wartość Δm odczytana z linii prostej dla czasu $t=0$
	t_f	h	czas badania (zwykle jeden dzień)



Rys. 1.25 Typowy przebieg absorpcji wody w funkcji pierwiastka z czasu (rys.: [66])

Z kolei normy PN-EN 15801 [139] (dla porowatych materiałów nieorganicznych), PN-EN 772-11 [143] (w przypadku elementów murowych z kamienia naturalnego) jak również PN-EN 1015-18 [138] (w przypadku zapraw innych niż zaprawy przeznaczone do renowacji) definiują współczynnik absorpcji jako nachylenie, obliczonej metodą regresji liniowej, krzywej $\Delta m_t(\sqrt{t})$ nad początkową częścią wykresu.

Przyrost masy wynikający z kapilarnego podciągania wilgoci może mieć również inny przebieg. Jeżeli otrzymany wykres ma postać linii prostej z nagłym spadkiem kąta nachylenia, oznacza to, że (w przypadku próbki jednorodnej) woda w postaci ciekłej pojawiła się na górnej powierzchni próbki. Wypłaszczenie krzywej związane jest z redystrybucją wody z porów grubych do drobniejszych oraz wolniejszym przebiegiem absorpcji [66] – wilgotność osiągniętą przez materiał w pierwszym, szybkim okresie podciągania kapilarnego (absorpcji początkowej [9]) określa się jako pojemność kapilarną materiału [78, 217]. W przypadku osiągnięcia pojemności kapilarnej można obliczyć wartość współczynnika absorpcji przyjmując wartość t_f mniejszą niż jeden dzień [146].

W przypadku niektórych materiałów budowlanych, np. wyrobów z domieszką tworzyw sztucznych lub produktów hydrofobowych, wykres jednostkowego przyrostu masy w funkcji pierwiastka czasu może nie być linią prostą, lecz pewną krzywą (Rys. 1.25, wykres B) [66]. W takim wypadku za wartość Δm_t po 24 godzinach należy przyjąć Δm_{24} (Rys. 1.25), a współczynnik absorpcji obliczyć ze wzoru 35 [146]. Jeżeli przed upływem 24 godzin na górnej powierzchni próbki pojawi się woda, nie oblicza się wartości współczynnika absorpcji (należy jednak odnotować czas pojawienia się wody) [146].

Chłonność kapilarna materiałów budowlanych klasyfikowana jest na podstawie wartości współczynnika, zgodnie z podziałem przedstawionym w tabeli 1.5 (porównaj również: Tabela 1.6).

Współczynnik absorpcji wody po 24 h od zanurzenia			Równanie 35
$w_{24} = \frac{\Delta m_{24}}{\sqrt{24h}}$	symbol	jednostka	nazwa
	w_{24}	$\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$	współczynnik absorpcji wody po 24 h
	Δm_{24}	kg/m^2	przyrost masy na jednostkę powierzchni czołowej, po 24 h

Tabela 1.5 Podział materiałów budowlanych na podstawie współczynnika absorpcji kapilarnej [14, 66]

Klasyfikacja	Współczynnik absorpcji kapilarnej [$\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$]
materiał silnie chłonny	$w > 2$
materiał o obniżonej chłonności	$0,5 < w \leq 2$
materiał wodoodporny	$0,001 < w \leq 0,5$
materiał wodoszczelny	$w \leq 0,001$

Tabela 1.6 Współczynnik absorpcji kapilarnej wybranych materiałów budowlanych [66]

Materiał	Współczynnik absorpcji kapilarnej [$\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$]
Klinkier	0,5÷5
Cegła formowana ręcznie	5÷25
Cegła kratówka	5÷10
Cegła licówka	5÷10
Piaskowiec	2,5÷10
Beton komórkowy	2÷8
Gips, zaprawa gipsowa	20÷70
Tynk wapienny	7÷15
Tynk cementowo-wapienny	0,5÷4
Tynk cementowy	0,1÷2,0
Hydroizolacja z dyspersji polimerowej	0,05÷0,2
2-komponentowa hydroizolacja polimerowa	< 0,01
Zaimpregnowane silikonami materiały mineralne	0,01÷0,1

2 SZKODY WILGOTNOŚCIOWE W PRZYZIEMNEJ CZĘŚCI BUDYNKU

2.1 Woda występująca w gruncie

Woda w gruncie może występować w różnych formach: pod postacią wody włoskowatej (wilgotności gruntu), przesiąkającej (wodą nie wywierającej ciśnienia hydrostatycznego), zaskórnej oraz gruntowej (w obu przypadkach działającej pod ciśnieniem) [23]. Prawidłowe zabezpieczenie budynków i budowli przed jej destrukcyjnym wpływem budynku w pierwszym rzędzie wymaga zatem zdefiniowania rodzaju obciążenia wodą. Podstawowe rodzaje obciążenia wywieranego przez wilgoć i wodę zawartą w gruncie na zagłębione w nim elementy budynków i budowli oraz powszechnie przyjęte działania ochronne przedstawiono w tabeli:

Tabela 2.1 Klasyfikacja izolacji na podstawie warunków gruntowo-wodnych [28]

Rodzaj obciążenia	Sytuacja zabudowy		Wymagane uszczelnienie
Wilgotność gruntu oraz niesiętrzająca się woda infiltracyjna	$k > 10^{-4}$ m/s		izolacja przeciwwilgociowa
Spiętrzająca się woda infiltracyjna	$k \leq 10^{-4}$ m/s	z drenażem	
Spiętrzająca się woda infiltracyjna Woda gruntowa Woda powodziowa	$k \leq 10^{-4}$ m/s - dowolna	bez drenażu	izolacja wodochronna

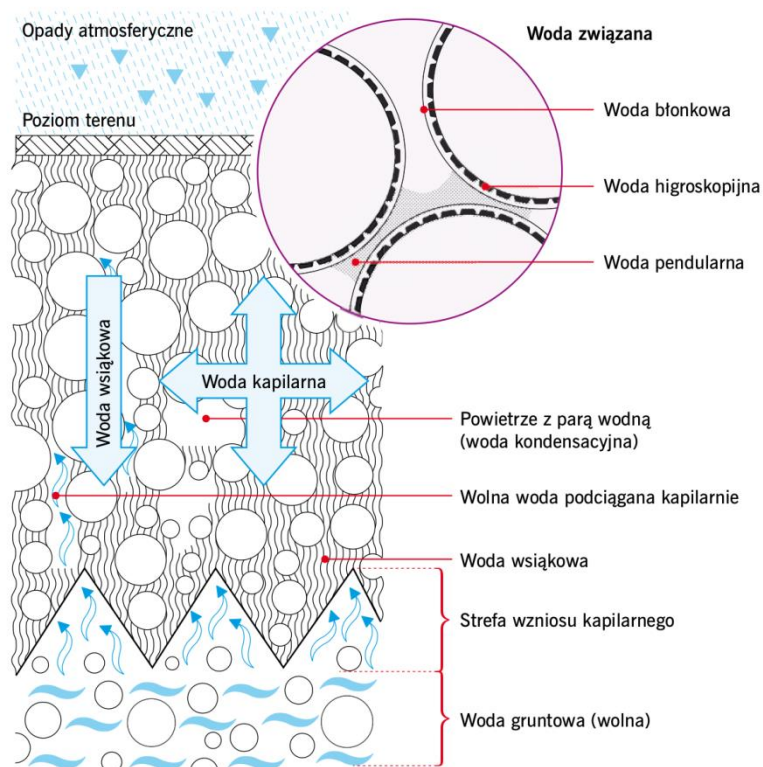
Zgodnie z powyższym należy na początku rozróżnić dwie sytuacje – gdy konstrukcja (lub jej część) jest czasowo lub na stałe zanurzona w wodzie (w strefie saturacji, czyli nasycenia wodą [135]) lub też posadowiona jest powyżej najwyższego przewidywanego poziomu zwierciadła wód gruntowych. Powyżej zwierciadła wód gruntowych (w strefie aeracji, czyli napowietrzenia [135]) można oczekiwać niewielkiego obciążenia wodą (tj. nie wywierającą ciśnienia hydrostatycznego), o ile grunt rodzimy oraz zasypka charakteryzują się odpowiednią przepuszczalnością lub (w przypadku gruntów słabo przepuszczalnych) zainstalowany został sprawny system drenażu. W przeciwnym przypadku dla gruntu słabo przepuszczalnego należy przewidzieć obciążenia wodą spiętrzoną.

Tabela 2.2 Klasyfikacja wodoprzepuszczalności gruntu na podstawie współczynnika wodoprzepuszczalności k [26, 28, 194]

Współczynnik k [m/s]	Klasyfikacja wg DIN 18130	Klasyfikacja wg DIN 18533	Rodzaje gruntu
$> 10^{-2}$	bardzo silnie przepuszczalny	przepuszczalny	drobny żwir
10^{-2} 10^{-3}	silnie przepuszczalny		piasek grubo- i średnioziarnisty
10^{-3} 10^{-4}		przepuszczalny	piasek drobnoziarnisty
10^{-4} 10^{-5}	słabo przepuszczalny		piasek pylasty, less o strukturze nie nienaruszonej
10^{-5} 10^{-6}		bardzo słabo przepuszczalny	pyły
10^{-6} 10^{-7}	gliny		less o strukturze prze-robionej
10^{-7} 10^{-8}		gliny	gliny zwięzłe
10^{-8} 10^{-9}	gliny		
10^{-9} 10^{-10}		gliny	
10^{-10} 10^{-11}	gliny		
10^{-11} 10^{-12}		ity	

Dla sprecyzowania klasy oddziaływania wody na elementy znajdujące się powyżej wód gruntowych istotna jest wodoprzepuszczalność gruntu budowlanego – jako wartość graniczną między gruntem dobrze przepuszczalnym a gruntami o słabszej wodoprzepuszczalności uznawana jest wartość współczynnika wodoprzepuszczalności $k = 10^{-4}$ m/s (Tabela 2.2) [29, 154].

Szczególnie istotne jest zatem prawidłowe określenie występujących warunków gruntowo-wodnych. W tym celu wymagane jest zazwyczaj przeprowadzenie badań geotechnicznych. Od wymogu tego można odstąpić jedynie w przypadku, gdy projekt hydroizolacji wykonany zostanie dla najbardziej niekorzystnego wariantu obciążania wodą pod ciśnieniem.



Rys. 2.1 Główne rodzaje wody w gruncie (rys.: [133, 154])

Błędy związane z nieprawidłowym doбором hydroizolacji do występujących warunków gruntowo-wodnych mogą być związane nie tylko z nieuwzględnieniem występowania wody napierającej, ale być konsekwencją niewystarczającej wiedzy o stanie wilgotnościowym gruntu powyżej występowania wód gruntowych (Rys. 2.1).

W strefie aeracji należy się spodziewać dwóch wzgl. trzech rodzajów wody [133, 135]:

- wody związanej, która przylega do cząstek gruntu, względnie utrzymywana jest w strefie wzajemnego kontaktu cząstek w postaci wody pendularnej;
- wody kapilarnej (którą można uważać za stan przejściowy między wodą wolną, a związaną), transportowanej w gruncie pod wpływem kapilarności. przeciwnie do zwrotu działania siły ciężkości, ale również zgodnie z nim oraz w kierunkach poprzecznych.

Wymienione rodzaje wody charakteryzują się tym, że nie da się ich odprowadzić przy pomocy drenażu – stąd zdążają się sytuacje stosowania drenażu, w sytuacji gdy jest to bezcelowe.

Posadzki budynków posadowionych powyżej zwierciadła wód gruntowych podlegają zasadniczo jedynie tym dwóm rodzajom obciążenia wodą. W przypadku ścian należy ponadto uwzględnić wodę

wsiąkową, tj. wodę pochodzącą z opadów atmosferycznych, która infiltruje w gruncie bez wywierania ciśnienia na powierzchnię ścian (porównaj: Tabela 3.1).

2.2 Negatywne skutki zawilgocenia budynków

Zdecydowana większość materiałów budowlanych stosowanych do wykonywania części budynku stykających się z gruntem to ciała kapilarno-porowate. Materiały te charakteryzują się m.in. tym, że nawet w stanie, który sklasyfikowalibyśmy jako *suchy*, zawierają pewną ilość wilgoci, określanej mianem wilgoci higroskopijnej. Ilość wilgoci higroskopijnej nie jest wartością stałą – uzależniona jest od warunków otoczenia, takich jak ekspozycja słoneczna, warunki użytkowania czy też zawartość soli lub innych związków higroskopijnych – natomiast w określonych warunkach wilgotnościowych ustala się stan równowagi (określany stanem powietrzno-suchym) [85]. Z reguły też wilgoć higroskopijna nie stanowi zagrożenia dla substancji budynku.

Budynki są postrzegane jako zbyt wilgotne wówczas, gdy w piwnicach albo pomieszczeniach mieszkalnych pojawia się zapach stęchlizny lub też stwierdza się szkody powstałe po wewnętrznej lub zewnętrznej stronie przegrody [45]. W literaturze polskiej jako mury o dopuszczalnej wilgotności klasyfikowane są te przegrody, których wilgotność masowa nie przekracza 3% (Tabela 2.3) [1, 58, 68, 155]. Jednakże ocena stanu wilgotnościowego muru na podstawie wilgotności masowej może być niemiarodajna, bowiem uzyskanie takich samych wyników wilgotności masowej dla dwóch materiałów o różnej gęstości nie oznacza takiej samej zawartości (ilości) wody w obu materiałach [46, 176].

Tabela 2.3 Stopnie zawilgocenia murów w zależności od wartości wilgotności masowej [1, 58, 68, 155]

Stopień	Wilgotność masowa u	Klasyfikacja zawilgocenia
I	0÷3%	mur o dopuszczalnej wilgotności
II	3÷5%	mur o podwyższonej wilgotności
III	5÷8%	mur średnio zawilgocony
IV	8÷12%	mur mocno zawilgocony
V	> 12%	mur mokry

W praktyce ocena zawilgocenia materiałów budowlanych w obszarze higroskopijnym (tj. przy wilgotności, przy której nie zachodzi dystrybucja wody w materiale na drodze podciągania kapilarnego) opiera się na wilgotności równowagowej (przy wilgotności względnej powietrza w zakresie od 0% do ok. 95%), tj. na izotermach sorpcji badanego materiału (porównaj: Rys. 1.8) [107, 212]. Najczęściej do oceny stanu materiałów stosowana jest wilgotność równowagowa materiału przy wilgotności względnej 80%, tj. wilgotność higroskopijna u_{80} . Ta referencyjna wartość opiera się na doświadczeniach, które wskazują, że przy wilgotności względnej poniżej 80% najczęściej nie należy się spodziewać szkód spowodowanych zawilgoceniem, np. przez grzyby pleśniowe. Wielkość ta określana była w przeszłości „praktyczną wilgotnością” materiału – przy prawidłowej wentylacji pomieszczeń z prawdopodobieństwem 90% nie dochodzi do jej przekroczenia. W praktyce gdy wilgotność pobranej próbki jest wyższa od wilgotności równowagowej u_{80} , oznacza to, że wilgotność materiału jest niedopuszczalnie wysoka i należy się spodziewać wystąpienia szkód powodowanych przez nadmierne zawilgocenie. W obszarze nadhigroskopijnym najczęściej wykorzystywanym parametrem jest stopień przesiąknięcia wilgocią S (Tabela 2.4). Pozwala on na przykład sprawdzić, czy możliwe jest wykonanie impregnacji hydrofobizującej lub czy i które środki iniekcyjne są odpowiednie do wytworzenia wtórnej hydroizolacji poziomej przeciw podciąganiu kapilarnemu wilgoci w murze [107].

Tabela 2.4 Klasyfikacja zawilgocenia muru na podstawie stopnia przesiąknięcia wilgocią [192]

Stopień	Stopień przesiąknięcia wilgocią <i>S</i>	Klasyfikacja zawilgocenia
I	< 20%	zaniedbywalne
II	20÷40%	niskie
III	40÷60%	średnie do wysokiego
IV	60÷75%	bardzo wysokie
V	> 75%	ekstremalne

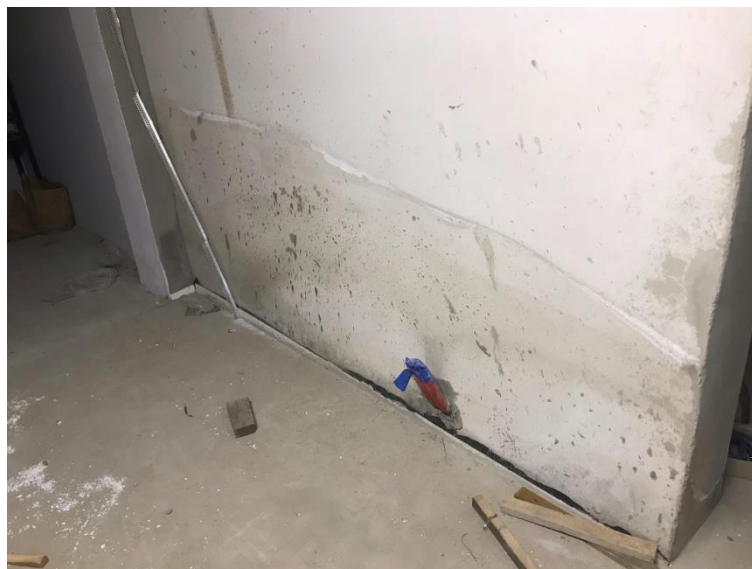


Fot. 2.1 Szkody spowodowane zawilgoceniem zabytkowego (1685 r.) spichlerza w Stargardzie Szczecińskim (fot.: autor)

Problem zawilgacania przegród budowlanych dotyczy głównie obiektów zabytkowych oraz innych budynków budowanych przed rokiem 1920 (Fot. 2.1), jako że dopiero w latach dwudziestych XX wieku zaczęto stosować na terenie naszego kraju typowe (w rozumieniu współczesnym) pionowe hydroizolacje muru [59, 68]. Zawilgocenia budynków wzniesionych w późniejszym okresie powodowane są brakiem, uszkodzeniem lub technicznym zużyciem izolacji [79, 197]. Niestety, z problemem tym spotkać się można również w budynkach stosunkowo nowych, w których izolacje zostały wykonane w sposób niepoprawny, lub też nie zostały wykonane w ogóle (Fot. 2.2) [155]. Prowadzące do destrukcji budynków i ich elementów procesy korozyjne rozpoczynają oraz intensyfikują się w wyniku znacznego zawilgocenia i towarzyszącemu mu zasolenia [68]. Szacuje się, że 50-60% przypadków korozji związanych jest właśnie z nadmiernym zawilgoceniem [79]. Jako główne źródła zawilgacania obiektów budowlanych wskazać należy oddziaływanie wód opadowych oraz wody występującej (pod różnymi postaciami) w gruncie, oddziaływanie wody i wilgoci pochodzącej z instalacji wodociągowych i kanalizacyjnych, higroskopijny pobór wilgoci a także wilgoć pochodzenia kondensacyjnego (Rys. 1.4). Szczególnie narażonymi elementami budynków są te, które bezpośrednio stykają się z gruntem (znajdują się poniżej jego poziomu) oraz występują w jego sąsiedztwie (cokół) – tzw. przyziemna strefa budynku [117]. Zawilgocenia przegród budowlanych w tym obszarze, ze względu na ich źródła oraz sposób przebiegu zawilgacania, można podzielić na [155]:

- zawilgocenia strukturalne
 - ze zwierciadła wody gruntowej,
 - z tzw. wody rozproszonej;
- zawilgocenia powierzchniowe:

- na skutek kondensacji pary wodnej,
- na skutek higroskopijnego poboru wilgoci.



Fot. 2.2 Zawilgocenie ścian wewnętrznych nowo wznoszonego budynku, powstałe na skutek nieprawidłowego wykonania hydroizolacji poziomej (fot.: autor)

Tabela 2.5 Uszkodzenia substancji budowlanej (współ-)spowodowane przez wodę [45]

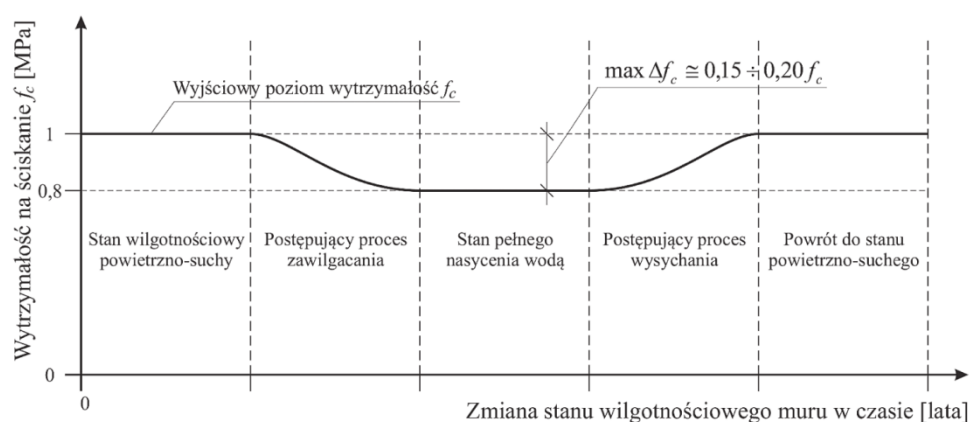
Fizyczne	Chemiczne	Biologiczne
<p>Zjawiska higroskopijne, termiczne i statyczne</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ ruchy podłoża ▪ uszkodzenia wywołane przez mróz ▪ zmiany temperatury ▪ utrata ciepła ▪ rysy skurczowe powstające na skutek pęcznienia ▪ zmiany materiałowe ▪ przemoknięcia ścian 	<p>Reakcje spoiwa, zanieczyszczenia, szkody spowodowane przez sól</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ wykwity solne ▪ rozsadzanie na skutek pęcznienia ▪ szkody spowodowane przez mróz i sól używaną do topienia pokrywy śnieżnej i lodowej ▪ zmiany struktury ▪ przemiany/reakcje spoiwa ▪ wypłukiwanie wapna ▪ plamy rdzy ▪ korozja chemiczna 	<p>Zjawiska higroskopijne, termiczne i statyczne</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ mikroorganizmy ▪ naloty glonów ▪ porost mchu ▪ obrośnięcie porostami ▪ nalot biocydów ▪ zgrzybienie ▪ porost pleśni ▪ zanieczyszczenia

Jednoznaczne określenie przyczyn wysokiej zawartości wilgoci nie jest rzeczą prostą, m.in. z uwagi na fakt, iż praktycznie w każdym przypadku współistnieją obok siebie co najmniej dwa źródła zawilgocenia. Dużo łatwiej jest zdiagnozować jego skutki. Woda pod każdą ze swoich postaci może wpływać na strukturę materiałów kapilarno-porowatych (takich jak kamień, cegła, zaprawy murarskie oraz tynkarskie), prowadząc do ich destrukcji [57]. Destrukcyjny wpływ wilgoci ujawnia się w dolnych partiach budynków w postaci widocznych mankamentów: plam wilgoci, szkód mrozowych, wykwitów solnych oraz rozwijających się porostów. Mniej widoczne efekty to pogorzenie właściwości mechanicznych materiałów, redukcja właściwości termoizolacyjnych (czego efektem jest wzrost zapotrzebowania na energię cieplną) oraz pogorszenie się warunków sanitarnych w pomieszczeniach [85, 197]. Rodzaje

uszkodzeń występujących w budynkach, których przyczyną (lub współprzyczyną) jest woda, przedstawiono w tabeli powyżej (Tabela 2.5).

Problemem podstawowym jest degradacja materiałów wykończeniowych: tynków, powłok malarskich, różnego rodzaju materiałów okładzinowych jak również elementów drewnianych i drewnopochodnych [177]. Z uwagi na niewielką odporność tych materiałów na zawilgocenie bardzo szybko dochodzi do ich nieodwracalnych uszkodzeń. Zniszczenia te są łatwe do zaobserwowania, jednakże niemniej istotne (choć mniej widoczne) są związane z nadmiernym zawilgoceniem uszkodzenia materiałów konstrukcyjnych.

Istotnym skutkiem nadmiernego zawilgocenia jest obniżenie parametrów wytrzymałościowych przegród murowanych. Dotyczy to zarówno cegły jak i zaprawy, jednakże w największym stopniu zapraw na spoiwie „powietrznym” (tj. nie hydraulicznym), czyli zapraw wapiennych. Na skutek częściowego rozpuszczenia więzi między kryształkami sieci strukturalnej, a w dalszym etapie wytrącenia rozpuszczonych związków w porach materiału, następuje (mimo że masa materiału nie zmienia się) spadek wytrzymałości na ściskanie (Rys. 2.2), a tym samym utrata właściwości konstrukcyjnych. Zjawisko to jest częściowo odwracalne, jednakże powrót po wyschnięciu do wyjściowej wytrzymałości zaprawy możliwy jest jedynie wówczas, gdy nie doszło do destrukcji związanej z korozją mrozową. Wynikający z zawilgocenia spadek wytrzymałości na ściskanie charakteryzowany jest przez współczynnik rozmiękania, tj. stosunek wytrzymałości materiału na ściskanie w stanie pełnego nasycenia wodą do wytrzymałości w stanie suchym. W przypadku większości materiałów kapilarno-porowatych wartość współczynnika rozmiękania waha się między 0,6 a 0,9 [59].



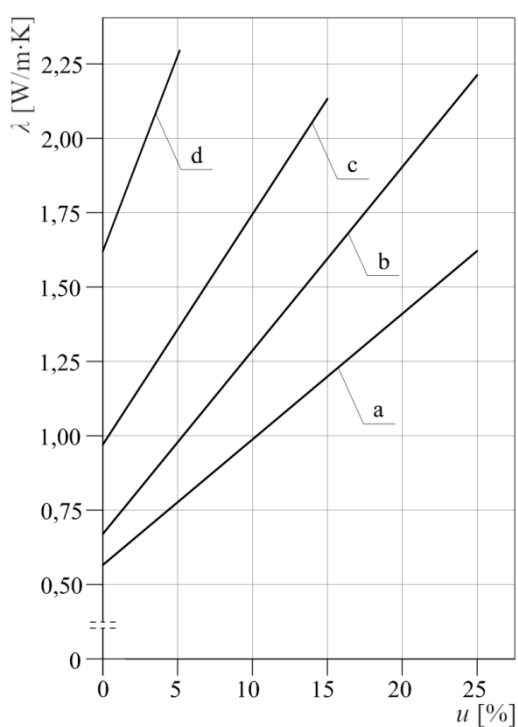
Rys. 2.2 Schemat ilustrujący stopniową zmianę wytrzymałości na ściskanie muru wskutek zmiany w czasie jego stanu wilgotnościowego (rys.: [57])

Mocno zwilgocone mury oraz mury mokre narażone są na przyspieszone przyspieszona korozje mrozową. Zawarta w porach materiału woda w momencie zmiany stanu skupienia z płynnego na stały zwiększa swoją objętość, co powoduje naprężenia, które z kolei prowadzą do uszkodzenia struktury materiału. Zjawisko to dotyczy w największym stopniu zewnętrznej, przypowierzchniowej (najbardziej wyeksponowanej na wahania temperatury) strefy przegrody (Fot. 2.3) i jest szczególnie niebezpieczne z uwagi na fakt, iż w polskich warunkach klimatycznych może dochodzić do nawet stu „przejść przez zero” w ciągu roku.



Fot. 2.3 Uszkodzenia konstrukcji murowej spowodowane destrukcyjnym działaniem mrozu (fot.: autor)

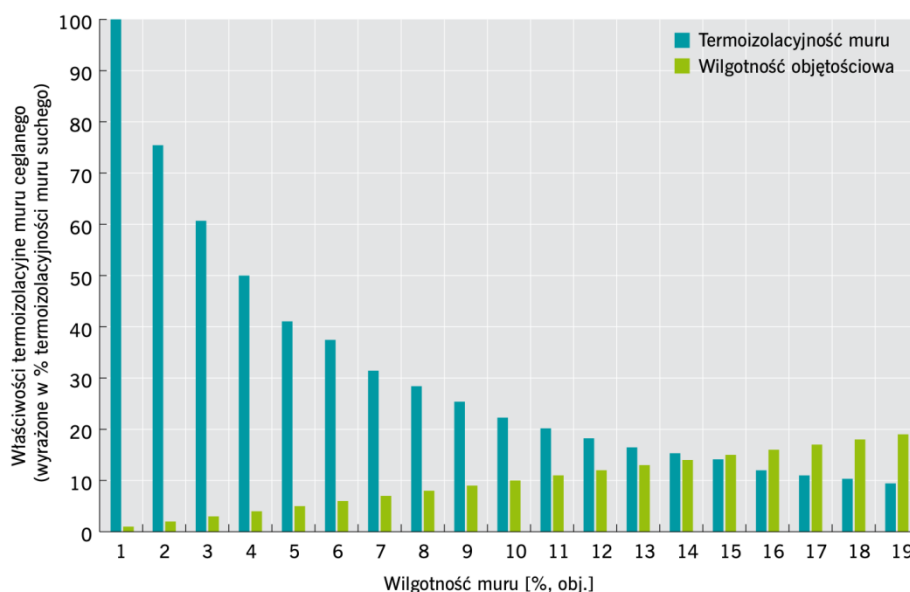
Zbyt szybkie osuszanie murów również może okazać się dla nich niebezpieczne. Podczas wysychania następuje bowiem stopniowa dehydratacja poszczególnych jego składników, wynikiem której jest zjawisko skurczu. Towarzyszące mu naprężenia prowadzą do powstawania pęknięć i rozwarstwień, jak również łuszczenia się i odpadania tynków i polichromii [59, 156].



Rys. 2.3 Wpływ zawilgocenia na przewodność cieplną wybranych materiałów budowlanych (rys: [59])
 a) cegła ceramiczna o gęstości 1694 kg/m³, b) cegła ceramiczna o gęstości 1807 kg/m³, c) wapień o gęstości 1942 kg/m³,
 d) cegła klinkierowa

Nadmierne zawilgocenie przegród budowlanych powoduje również pogorszenie właściwości termicznych – zwiększenie przewodności cieplnej [59, 117]. Związane jest to z powstawaniem mostków cieplnych w wyniku wypełnienia porów materiałów budowlanych wodą. Współczynnik przewodzenia statycznego powietrza wynosi 0,026 W/m·K, natomiast w przypadku suchego powietrza zawartego

w porach materiału, jego wartość związana jest z wielkością porów i rośnie wraz ze wzrostem ich średnicy – np. w temperaturze 0 °C w porach o średnicy 0,1 mm wynosi on 0,025 W/m·K, a w porach o średnicy 2,0 mm odpowiednio 0,031 W/m·K. Zatem w przypadku wypełnienia porów wodą o współczynniku λ wynoszącym 0,60 W/m·K następuje około dwudziestokrotny wzrost współczynnika przewodzenia ciepła [46, 59, 117, 137]. Wzrost współczynnika przewodzenia ciepła oznacza zmniejszenie izolacyjności termicznej materiału (Rys. 2.3), a tym samym samej przegrody. Jeśli pory zostaną wypełnione wodą mur ceglany traci swe właściwości termoizolacyjne – przyrost wilgotności o 4% powoduje spadek izolacyjności cieplnej o połowę, a wilgotność na poziomie 10% o ponad trzy czwarte (Rys. 2.4) [65].



Rys. 2.4 Właściwości termoizolacyjne muru ceglanego (wyrażone w % termoizolacyjności muru suchego) w zależności od jego wilgotności objętościowej [%] (rys.: [45])

Dodatkowym aspektem związanym z obniżeniem izolacyjności cieplnej zawilgoconej przegrody jest powstawanie dalszych szkód związanych z kondensacją pary wodnej, do której dochodzi najczęściej w pomieszczeniach ze zbyt wysoką wilgotnością powietrza (nieodpowiednio wentylowanych), z niezabezpieczonymi lub zabezpieczonymi niewystarczająco przed stratami ciepła („zimnymi”) ścianami zewnętrznymi [177].

Podwyższona wilgotność przegród budowlanych prowadzi często do powstania korozji biologicznej, czyli destrukcyjnych procesów powodowanych głównie przez grzyby pleśniowe, ale również grzyby domowe (to właśnie te dwie grupy postrzegane są jako najważniejsze szkodniki materiałów budowlanych [220]), owady szkodniki drewna oraz glony, mchy, porosty i bakterie (Fot. 2.4) [1, 50, 58, 134, 156, 176].

Zjawisko związane z zasiedleniem przez grzyby strzępkowe (nazywane również grzybami mikroskopowymi lub pleśniowymi – a potocznie pleśnią) powierzchni przegród i elementów budynków określane jest jako biodeterioracja – pod terminem tym należy rozumieć utratę właściwości użytkowych obiektu budowlanego w wyniku aktywności czynników biologicznych, a także emisji do powietrza zarodników, fragmentów grzybni oraz produktów metabolizmu grzybów, czyli mikotoksyn oraz związków lotnych. Porażenie budynku grzybami pleśniowymi niesie zatem za sobą nie tylko degradację budynku, ale przede wszystkim czynnik zagrożenia dla przebywających w nim ludzi, podrażniając drogi oddechowe, wywołując alergię, a nawet działając rakotwórczo [50, 136, 156].

O rozwoju (lub jego braku) grzybów pleśniowych w budynku decydują takie czynniki jak zakres temperatury, odczyn pH podłoża oraz odporność na substancje chemiczne, zapotrzebowanie na substancje odżywcze, czy stosunek do tlenu, jednakże kluczowym elementem determinującym rozwój grzybów pleśniowych w budynkach jest zawartość wody w środowisku (wilgotność podłoża). Przy czym decydującym czynnikiem jest nie tyle całkowita wilgotność materiału, co woda „swobodnie dostępna dla pleśni”. Jest to woda zawarta w porach oraz na powierzchni elementu, która nie jest związana przez (np. sole) [46]. Dla tej wody swobodnej mikrobiolodzy posługują się pojęciem aktywności wody, wyrażanym przez współczynnik a_w , definiowany jako iloraz ciśnienia pary wodnej w lub na materiale stanowiącym pożywkę grzybów pleśniowych oraz ciśnienia nasyconej pary wodnej w tej samej temperaturze [46, 50]:

Współczynnik aktywności wody			Równanie 36
$a_w = \frac{p_D}{p_s}$	symbol	jednostka	nazwa
	a_w	-	współczynnik aktywności wody
	p_D	Pa	ciśnienie pary wodnej w lub na materiale stanowiącym pożywkę grzybów pleśniowych
	p_s	Pa	ciśnienie nasyconej pary wodnej w tej samej temperaturze



Fot. 2.4 Porażenie mykologiczne zawilgoconej przegrody (fot.: autor)

W stanie równowagi aktywność wody można wyrazić poprzez wilgotność względną. Jednakże w przeciwieństwie do wilgotności względnej, która wyrażana jest w procentach, wartość współczynnika a_w odnosić się do stanu nasycenia (wartości równej 1). Na przykład wartość $a_w = 0,80$ – odpowiadająca wilgotności względnej 80% – jest jedynie miarą tworzenia się warstewki wilgoci na lub bezpośrednio nad powierzchnią elementu [46].

Choć większość grzybów pleśniowych preferuje podłoża o wartości a_w od 0,80 do 0,89 (Tabela 2.6), występują również tzw. pleśnie ekstremalnie kserofilne, które mogą rozwijać się na bardziej suchych podłożach o wartości $a_w \leq 0,70$, a nawet takie (np. *Eurotium echinulatum*), które rozwijają się na substratach o wartości a_w na poziomie 0,64. Rozwój pleśni na tak suchych powierzchniach wymaga jednak, aby na substracie (podłożu) utworzył się hydrofilowy biofilm, który wiąże wilgoć i w ten sposób odpowiednio zasila zarodniki pleśni. Wymóg ten nie musi być spełniony w przypadku *Penicillium*

chrysogenum i *Aspergillus restrictus*. Pleśnie hydrofilowe, takie jak *Stachybotrys chartarum*, rozwijają się na podłożach o wysokiej aktywności wody od 0,90 do 0,95 [46, 50].

Tabela 2.6 Podział grzybów pleśniowych ze względu na minimalną aktywność wody [50, 136]

Grupa	Gatunek	Minimalna a_w w 25 °C
Kserofile ekstremalne $a_w < 0,75$	<i>Aspergillus penicillioides</i>	0,73÷0,77
	<i>Aspergillus restrictus</i>	0,71÷0,75
	<i>Aspergillus wentii</i>	0,73÷0,75
	<i>Eurotium amstelodami</i>	0,71÷0,76
	<i>Eurotium echinulatum</i>	0,64
	<i>Eurotium repens</i>	0,72÷0,74
	<i>Wallemia sebi</i>	0,69÷0,75
Kserofile umiarkowane $a_w = 0,75-0,79$	<i>Aspergillus flavus</i>	0,78÷0,80
	<i>Aspergillus sydowii</i>	0,78÷0,81
	<i>Aspergillus terreus</i>	0,78
	<i>Aspergillus versicolor</i>	0,75 (0,74)÷0,79
	<i>Paecilomyces variotii</i>	0,70÷0,84
	<i>Penicillium chrysogenum</i>	0,78÷0,81 (0,85)
	<i>Penicillium brevicompactum</i>	0,78÷0,82
Kserofile słabe $a_w = 0,80-0,89$	<i>Alternaria alternata</i>	0,85÷0,88
	<i>Absidia corymbifera</i>	0,88÷0,89
	<i>Aspergillus fumigatus</i>	0,85÷0,94
	<i>Aureobasidium pullulans</i>	0,87÷0,89
	<i>Cladosporium cladosporioides</i>	0,86÷0,88 (0,83÷0,84)
	<i>Cladosporium herbarum</i>	0,85÷0,88
	<i>Epicoccum nigrum</i>	0,86÷0,90
	<i>Fusarium moniliforme</i>	0,89÷0,91
	<i>Mucor plumbeus</i>	0,87÷0,93
	<i>Penicillium citrinum</i>	0,80÷0,82
	<i>Penicillium expansum</i>	0,82÷0,85
	<i>Penicillium viridicatum</i>	0,81
	<i>Ulocladium chartarum</i>	0,89
Hydrofile $a_w > 0,90$	<i>Botrytis cinerea</i>	0,93÷0,95
	<i>Geomyces pannorum</i>	0,92
	<i>Neosartoria fisheri</i>	0,93
	<i>Rhizopus stolonifer</i>	0,93
	<i>Stachybotrys chartarum</i>	0,94 (0,91÷0,93)
	<i>Sisitotrema brinkmannii</i>	0,96÷0,97
	<i>Verticillium lecanii</i>	0,95
	<i>Acremonium murorum</i>	0,96

Na podstawie minimalnych oraz maksymalnych wartości aktywności wody a_w , (w powiązaniu z wilgotnością względną φ) grzyby pleśniowe można również sklasyfikować pod względem ich sukcesji, wprowadzając podział na kolonizatorów pierwszo-, drugo- oraz trzeciorzędowych (Tabela 2.7). Podział ten należy jednak traktować jako umowny, bowiem materiał zawilgocony w bardzo dużym stopniu ($a_w > 0,90$) zostanie skolonizowany w pierwszej kolejności przez hydrofilne gatunki zaliczane do kolonizatorów trzeciorzędowych [50, 136].

Obok zawartości wilgoci w podłożu kluczowym parametrem decydującym o warunkach wzrostu grzybów pleśniowych jest wilgotność względna otaczającego powietrza. Tabela 2.8 przedstawia parametry

try wilgotnościowe – zarówno w odniesieniu do materiału, jak i otaczającego powietrza – oraz spektrum temperatury sprzyjające rozwojowi grzybów pleśniowych oraz innych czynników biologicznych w budynku [50]. Względna wilgotność powietrza, w połączeniu z temperaturą powietrza oraz przegrody, w znaczący sposób wpływa na zawilgocenie podłoża poprzez kondensację pary wodnej [118].

Tabela 2.7 Sukcesja grzybów pleśniowych w budynku [136]

Zawartość wilgoci w materiale	Kategoria
Niska ($a_w < 0,80$, $\varphi < 80\%$)	Pierwszorzędowi kolonizatorzy <i>Aspergillus versicolor</i> (w 25 °C) <i>Aspergillus niger</i> <i>Aspergillus sydowii</i> <i>Penicillium brevicompactum</i> <i>Penicillium chrysogenum</i> <i>Penicillium viridicatum</i> <i>Eurotium sp.</i>
Średnia ($a_w = 0,80-0,90$, $\varphi = 80-90\%$)	Drugorzędowi kolonizatorzy <i>Absidia corymbifera</i> <i>Cladosporium cladosporioides</i> <i>Cladosporium sphaerospermum</i> <i>Aureobasidium pullulans</i> <i>Mucor circinelloides</i> <i>Epicoccum nigrum</i> <i>Fusarium culmorum</i> <i>Aspergillus versicolor</i> (w 12 °C)
Wysoka ($a_w > 0,90$, $\varphi > 90\%$)	Trzeciorzędowi kolonizatorzy <i>Mucor plumbeus</i> <i>Aspergillus fumigatus</i> <i>Alternaria alternata</i> <i>Acremonium sp.</i> <i>Stachybotrys atra</i> <i>Ulocladium consortiale</i> <i>Trichoderma viride</i>

Tabela 2.8 Wymagania klimatyczne organizmów w budynku [50]

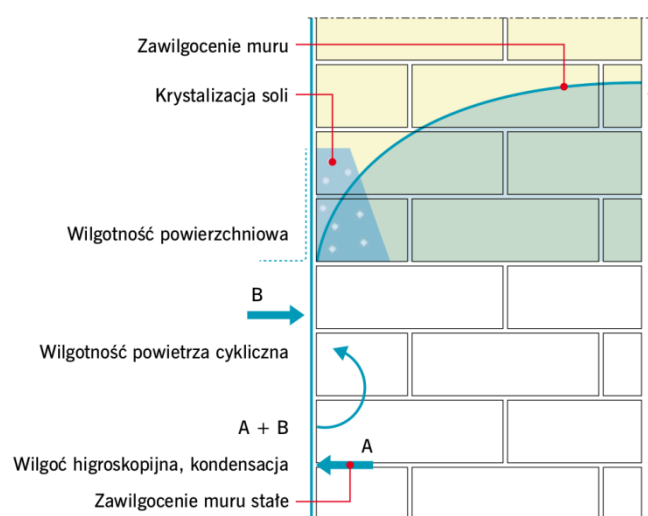
Rodzaj organizmów	Warunki wzrostu		
	Wilgotność materiału	Wilgotność względna powietrza	Temperatura
Bakterie	Materiały mokre $a_w = 0,95 \div 0,99$	> 97%	-5 ÷ 60 °C
Grzyby pleśniowe	Średnia wilgotność materiału zależna od czasu, temperatury i gatunku $a_w = 0,75 \div 0,90$	> 65 ÷ 70%	0-50 °C
Grzyby domowe	> 25 ÷ 60% wilgotności masowej w zależności czasu, temperatury, masy i gatunku $a_w = 0,95 \div 0,97$	> 96%	3-40 °C w zależności od gatunku
Głony	Materiały mokre	brak danych	0-45 °C

Zwiększone występowanie niektórych rodzajów pleśni może być również wykorzystywane do oceny stanu zawilgocenia obiektu. Zarodniki konidialne gatunków *Aspergillus* i *Penicillium* mogą przez lata

pozostawać żywotne w stanie suchym. Z kolei zarodniki gatunku *Mucor* są znacznie bardziej wrażliwe na zmiany wilgotności. W przypadku pleśni mezofilnych, tworzenie się wilgoci kondensacyjnej przez trzy do czterech kolejnych dni jest zwykle wystarczające, aby kiełkować i ponownie utworzyć grzybnię. W oparciu o zależność między wzrostem a tworzeniem zarodników pleśni z jednej i ocenie aktywności wody podłoża z drugiej, określenie rodzaju pleśni wykorzystywane jest we współczesnej diagnostyce jako wskaźnik zawilgocenia. Obecność pleśni o szczególnie wysokim zapotrzebowaniu na wilgoć stanowi bowiem indykatorem ukrytych uszkodzeń spowodowanych wilgocią. Wymaga to jednak wysokiego poziomu wiedzy [46].

2.3 Zasolenie budynków

Jako drugi obok wody, a jednocześnie nierozrywany z nią związany, główny czynnik wpływający na obniżenie trwałości murów postrzegane są tzw. szkodliwe sole budowlane [19, 108]. Są to związki chemiczne, najczęściej dobrze rozpuszczalne, głównie o charakterze organicznym, które w formie rozpuszczonej (jonów) lub krystalicznej występują w strukturze porowatych materiałów budowlanych. W zmiennych warunkach cieplno-wilgotnościowych (Rys. 2.5), w wyniku zmiany stanu skupienia lub zmiany objętości (spowodowanej magazynowaniem lub uwalnianiem wody hydratacyjnej) wywołują mechaniczne naprężenia w strukturze materiału, które z kolei mogą prowadzić do jej uszkodzenia [209], co stanowi jedno z najbardziej niekorzystnych zjawisk związanych z obecnością soli i wilgoci w układzie porów materiałów budowlanych [82, 108]. Procesy niszczenia materiału są tym intensywniejsze, im dłużej trwa zawilgacanie muru na skutek kapilarnego podciągania wilgoci, a tym samym dłużej trwa gromadzenie się soli [57, 68].



Rys. 2.5 Transport wilgoci oraz soli w murze (rys.: [46])

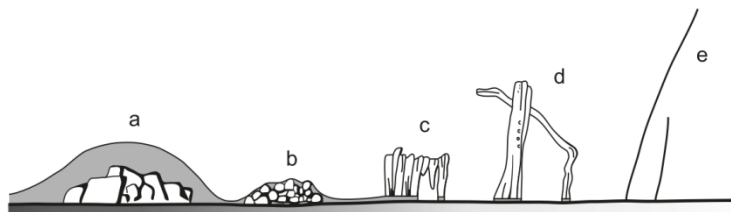
Sole mogą stanowić naturalny składnik materiałów, użytych do wzniesienia muru lub też wniknąć do ściany wraz z wilgocią (w postaci wodnego roztworu) ze środowiska zewnętrznego. Najbardziej destrukcyjne, a tym samym niebezpieczne dla struktury ścian, są trzy grupy soli: chlorki, azotany oraz siarczany [19]. Obecność chlorków w środowisku zewnętrznym, co za tym idzie również w strukturze muru, związane jest najczęściej ze środkami stosowanymi w okresie zimowym do odładzania jezdni oraz chodników. Azotany stanowią produkt utleniania związków organicznych lub pochodzą z nawozów. Również siarczany mogą pochodzić z nawozów, choć zazwyczaj ich obecność związana jest

z zanieczyszczeniem powietrza dwutlenkiem siarki (kwaśne deszcze). Wszystkie wymienione powyżej związki występują również w wodach gruntowych [19].

Wysokość [m]		Nazwa zwyczajowa	Związek chemiczny	Rozpuszczalność w 100 ml wody
0,50		saletra wapniowa	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	226
		saletra sodowa	NaNO_3	92
		chlorek wapnia	CaCl_2	75
		sól kamienna	NaCl	36
		sylwin	KCl	34
0,20		sól Glauberska	Na_2SO_4	28
		sól gorzka	MgSO_4	33
		saletra potasowa	KNO_3	13
0,00		gips	$\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	0,24

Rys. 2.6 Rozkład soli wpływającej na destrukcję cokołowej strefy budynku (rys.: [108])

Rozmieszczenie soli na wysokości muru uzależnione jest od ich składu chemicznego (Rys. 2.6) [25]. Na poziomie gruntu gromadzą się zazwyczaj siarczany wapnia (gips) oraz sole węglanowe. Na wysokości do 0,5 m obserwuje się obecność siarczanów magnezu i sodu oraz azotanu potasu. Powyżej tej wysokości gromadzą się natomiast związki chloru oraz azotany. Szkodliwe sole, a szczególnie azotany, wykazują silne właściwości higroskopijne, co przekłada się wzmoczoną chłonnością wody zawartej w powietrzu, a tym samym powstaje kolejna droga dostawania się wilgoci do struktury muru. Wysokość elewacji, na której do uszkodzeń w wyniku działania szkodliwych soli budowlanych, nie przekracza z reguły 0,5 m [19].



Rys. 2.7 Związek pomiędzy morfologią kryształów a wilgotnością podłoża z materiału porowatego (rys.: [8])

a) duże kryształy, wykazujące swoiste formy równowagowe, wyrastają na mokrym podłożu całkowicie zanurzone w błonie roztworu, b) ziarnista skorupa, złożona z mniejszych i izometrycznych kryształów (pokrytych minimalną warstwą roztworu), wyrasta na mokrym podłożu, c) włóknista skorupa wyrasta w powietrzu z powierzchni podłoża pokrytej cienką warstwą roztworu, d) kolumnowe i grube nitkowe kryształy wyrastają z lekko wilgotnego podłoża - film roztworu nadal tworzy niewielkie plamki na powierzchni podłoża, e) bardzo cienkie nitkowe kryształy (wąsy) wyrastają w otaczającym powietrzu z niemal suchej powierzchni, z miejscowym doprowadzeniem roztworu.

Z punktu widzenia budownictwa największe zagrożenie stanowią sole łatwo rozpuszczalne w wodzie, tj. takie, w których w łatwy sposób dochodzi do rozpadu na jony. Wynika to przede wszystkim z faktu, że sole jako ciała stałe nie przemieszczają się samoczynnie w materiałach budowlanych – substancją warunkującą ich szkodliwe działanie jest woda, wraz z którą (w postaci roztworu) przemieszczają się w przegrodach budowlanych, a ich kumulacja następuje tam, gdzie woda odparowuje [5]. Sposób zachowania się soli w porowatej strukturze muru oraz ich oddziaływanie na przegrodę zależy przede wszystkim od ich stężenia w murze, rozpuszczalności, jak również od temperatury i wilgotności otoczenia [19]. Najczęściej obserwowanym efektem zasolenia muru są wykwitki pojawiające się na jego powierzchni (zarówno wewnątrz, jak i na zewnątrz budynków) – zjawisko to dotyczy przede wszyst-

kim soli charakteryzujących się bardzo dobrą rozpuszczalnością. Na powierzchni materiału sole mogą krystalizować w postaci plam, zacieków, wykwitów, puszystych nalotów oraz szklistych powłok (Rys. 2.7, Fot. 2.5). Forma wykwitów zależy z jednej strony od rodzaju i ilości soli, z drugiej od warunków, w jakich przebiegała krystalizacja [8, 175, 207].



Fot. 2.5 Wykwity solne na powierzchni muru (fot.: autor)

W przypadku gdy prędkość dostarczania roztworu jest mniejsza niż szybkość odparowywania wody z muru, zmiana stanu skupienia wody następuje w głębi muru – tam również dochodzi do krystalizacji [175]. Efektem krystalizacji wewnątrz przypowierzchniowych warstw muru jest destrukcja (łuszczenie się i odspojenia) zarówno tynków jak i głębszych warstw przegrody (Fot. 2.6, Fot. 2.7). Zjawisko to związane jest z występowaniem dodatkowych naprężeń, związanych z procesem krystalizacji soli w porach materiału, z którego wykonano przegrodę [19]. Do krystalizacji dochodzi w momencie, gdy wraz ze wzrostem stężenia soli roztwór staje się przesycony. Proces ten nie ustaje w momencie wypełnienia porów kryształami, lecz postępuje dalej, w wyniku czego dochodzi do narastania ciśnienia na ścianki porów, a po przekroczeniu wytrzymałości na rozciąganie materiału, dochodzi do trwałego uszkodzenia struktury (Rys. 2.8) [8, 57, 207]. Wartość ciśnienia krystalizacyjnego zależy w głównej mierze od molowej objętości soli, stosunku stężenia soli w stanie przesyconia do stężenia soli w stanie nasycenia, oraz temperatury i można ją wyrazić wzorem [165]:

Ciśnienie krystalizacji soli			Równanie 37
$p_k = \frac{RT}{V} \cdot \ln \frac{C}{C_s}$	symbol	jednostka	nazwa
	p_k	MPa	ciśnienie krystalizacyjne
	R	J/mol·K	stała gazowa
	T	K	temperatura
	V	cm ³ /mol	molowa objętość soli
C/C_s	-	stosunek stężenia soli w stanie przesyconia do stężenia soli w stanie nasycenia	

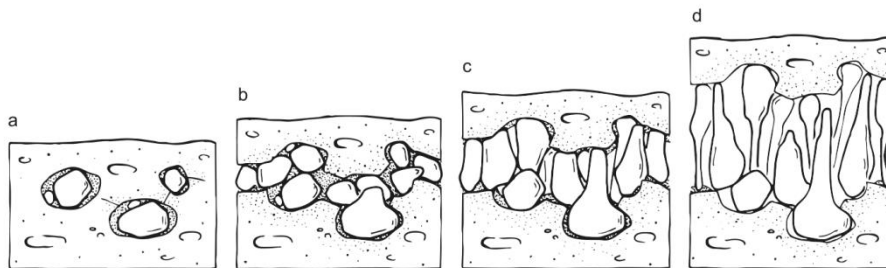
Wartość naprężeń wynikających z krystalizacji soli może wielokrotnie przekraczać maksymalną dla cegły ceramicznej (ok. 4 MPa) czy zaprawy wapiennej (ok. 1 MPa) wytrzymałość na rozciąganie [57] (porównaj: Tabela 2.9).



Fot. 2.6 Odspojenia warstw muru w wyniku krystalizacji soli w głębi muru (fot.: autor)



Fot. 2.7 Wykwity solne na wewnętrznej powierzchni odspojonego fragmentu cegły (fot.: autor)



Rys. 2.8 Model niszczącego działania procesu krystalizacji soli (azotanu sodu) (rys.: [8])

Tabela 2.9 Wartości ciśnienia krystalizacyjnego dla wybranych soli rozpuszczalnych w wodzie [46]

Sól	Molowa objętość soli [cm ³ /mol]	Ciśnienie krystalizacyjne [MPa]			
		C/C _s = 2		C/C _s = 10	
		0 °C	20 °C	0 °C	20 °C
CaSO ₄ · ½H ₂ O	46	33,5	39,8	112,0	132,5
CaSO ₄ · 2H ₂ O	55	28,2	33,4	93,8	111,0
MgSO ₄ · 7H ₂ O	147	10,5	12,5	35,0	41,5
MgSO ₄ · 6H ₂ O	130	11,8	14,1	39,5	49,5
MgSO ₄ · 1H ₂ O	57	27,2	32,4	91,0	107,9
Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O	220	7,2	8,3	23,4	27,7
Na ₂ SO ₄	53	29,2	34,5	97,0	115,0
NaCl	28	55,4	65,4	184,5	219,0
Na ₂ CO ₃ · 10H ₂ O	199	7,8	9,2	25,9	30,8
Na ₂ CO ₃ · 7H ₂ O	154	10,0	11,9	33,4	36,5
Na ₂ CO ₃ · 1H ₂ O	55	28,0	33,9	93,5	110,9

Zawartość soli w murze ma również wpływ na właściwości absorpcji wody. Część szkodliwych soli budowlanych wykazuje właściwości higroskopijne, a zatem do ponownego rozpuszczenia (po skryształizowaniu) nie potrzebuje wody w postaci płynnej, lecz pobierają ją z otaczającego, wilgotnego powietrza [19, 68]. Skutkiem zwiększonej zdolności higroskopijnego wchłaniania wilgoci z otaczającego powietrza są lokalne zawilgocenia pojawiające się na murach oraz tynkach, najczęściej w postaci ciemnych plam (Fot. 2.8) [175]. Ilość wody wnikałej w ten sposób w strukturę przegrody uzależniona jest od stężenia soli w murze oraz wilgotności względnej powietrza, a w przypadku mocno zasolo-

nych murów wzrost zawilgocenia w wyniku sorpcji może być porównywalny z zawilgoceniem spowodowanym innymi przyczynami [59, 68], w efekcie czego mocno zasolone mury szczególnie wolno wysychają [19].



Fot. 2.8 Plamy wilgoci i wysolenia na murach zamku w Malborku (fot.: autor)

Tabela 2.10 Stopnie obciążenia solami na podstawie [45]

Stopień I	0 do 2,5 mmol/kg materiału budowlanego	Konstrukcja ścian wykazuje jedynie śladowe ilości soli – powstawanie widocznych uszkodzeń można z reguły wykluczyć.
Stopień II	2,5 do 8 mmol/kg materiału budowlanego	Obciążenie konstrukcji ścian solami jest niewielkie – przy sprzyjających temu warunkach może dojść do powstania widocznych uszkodzeń.
Stopień III	8 do 25 mmol/kg materiału budowlanego	Obciążenie konstrukcji ścian solami można określić jako występujące w stopniu średnim – odpowiednio do higroskopijności i rozpuszczalności dochodzi do absorpcji i gromadzenia się wilgoci materiału budowlanego. Funkcje tynków i powłok malarskich ulegają ograniczeniu.
Stopień IV	25 do 80 mmol/kg materiału budowlanego	Obciążenie konstrukcji ścian solami można określić jako występujące w stopniu wysokim – funkcje tynków i powłok malarskich stają się znacznie ograniczone. Całkowite osuszenie ścian może nie być możliwe, również w przypadku wykonania pionowych i poziomych izolacji wtórnych. Prawdopodobieństwo pojawienia się widocznych mokrych plam jest wysokie.
Stopień V	ponad 80 mmol/kg materiału budowlanego	Ekstremalne obciążenie solami – występuje poważne ryzyko nawrotów uszkodzeń oraz zawilgocenia higroskopijnego.

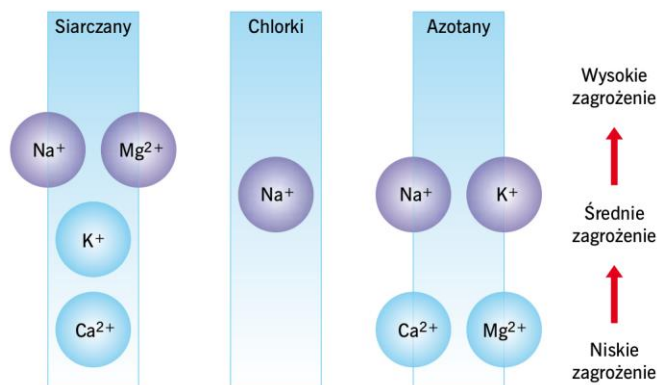
Z uwagi na różnorodność wpływów wywieranych na materiały budowlane jak również na liczne kombinacje soli, nie można podać dolnej granicy zasolenia, poniżej której nie będzie ono stanowić zagrożenia dla budynku. Niemniej jednak, na podstawie praktycznych doświadczeń i eksperymentów można wyprowadzić przybliżone rzędy wielkości zawartości jonów, w przypadku których można oczekiwać pewnego poziomu zagrożenia. Tabela 2.10 przyporządkowuje ilości soli (stężenia oznaczone ilo-

ściowo, względnie półilościowo) do poszczególnych stopni obciążenia. Wyszczególnione w tabeli stopniowanie przeprowadzone zostało w myśl zasady, że jako określony stopień obciążenia każdorazowo definiowane są ilości jonów różnych soli [45]. Tabela 2.11 z kolei pozwala sklasyfikować obciążenie na podstawie stężenia poszczególnych anionów: chlorków (Cl^-), azotanów (NO_3^-) oraz siarczanów (SO_4^{2-}). Realistyczna ocena rzeczywistego ryzyka możliwa jest jednak jedynie w połączeniu ze znajomością zawartości nie tylko anionów, ale również kationów. Kationy najczęściej brane pod uwagę to kationy wapnia (Ca^{2+}), magnezu (Mg^{2+}), sodu (Na^+) i potasu (K^+). Kombinacje anionów i kationów, które tworzą sole prowadzące do uszkodzeń elementów budowli przedstawia rysunek 2.9. Poziom ryzyka narażenia na szkodliwe działanie soli uzależniony jest od dominującego anionu i odpowiedniego kationu. Intensywność barwy jonów wskazuje na potencjalne zagrożenie (na przykład siarczany są istotne dla uszkodzeń w stężeniach, które podaje tablica 2.11, jednakże w większym stopniu w połączeniu z sodem lub magnezem, a w mniejszym z wapniem). W pojedynczych przypadkach występują również inne jony, takie jak anion węglanowy (CO_3^{2-}) czy kation amonowy (NH_4^+).

Tabela 2.11 Ocena ryzyka związanego z różnymi stężeniami anionów szkodliwych soli budowlanych [209]

Klasyfikacja obciążenia	Siarczany [%, mas.]	Chlorki [%, mas.]	Azotany [%, mas.]	Podstawa
Brak obciążenia (poziom 0)	< 0,02	< 0,01	< 0,02	[7]
Niskie (poziom I)	< 0,10	< 0,03	< 0,05	[7]
Niski poziom zasolenia	< 0,50	< 0,20	< 0,10	[208] ¹⁾
	< 0,10	< 0,05	< 0,03	[208] ²⁾
Działania naprawcze niewymagane	< 0,10	< 0,03	< 0,05	[131]
Średnie (poziom II)	0,10-0,20	0,03-0,10	0,05-0,20	[7]
Średni poziom zasolenia	0,50-1,50	0,20-0,50	0,10-0,30	[7]
	0,10-0,50	0,05-0,20	0,03-0,10	[208] ¹⁾
Działania naprawcze wymagane w niektórych przypadkach	0,10-0,25	0,03-0,10	0,05-0,15	[208] ²⁾
Wysokie (poziom III)	0,20-0,80	0,10-0,30	0,20-0,50	[7]
Wysoki poziom zasolenia	> 1,50	> 0,50	> 0,30	[7]
	> 0,50	> 0,20	> 0,10	[208] ¹⁾
Wymagane działania naprawcze	> 0,25	> 0,10	> 0,15	[208] ²⁾
Ekstremalne (poziom IV)	> 0,80	> 0,30	> 0,50	[7]

¹⁾ W przypadku tynku lub ściany nieotynkowanej; ²⁾ W przypadku ściany, z której usunięto tynk



Rys. 2.9 Orientacyjna ocena zagrożenia uszkodzeniami spowodowanymi przez szkodliwe sole budowlane (rys.: [209])

3 OCHRONA BUDYNKU PRZED WILGOCIĄ PODCIĄGANĄ Z GRUNTU

3.1 Ogólna koncepcja hydroizolacji wtórnych

Podstawowym zadaniem w przypadku renowacji zawilgoconych budynków jest ich osuszenie, rozumiane jako skoordynowany zespół działań technicznych i technologicznych, który ma na celu trwałe obniżenie poziomu zawilgocenia (zazwyczaj do poziomu 3-6% wilgotności masowej), co z kolei umożliwi prowadzenie dalszych prac budowlanych i/lub konserwatorskich, a po ich zakończeniu użytkowanie budynku zgodnie z przewidzianym przeznaczeniem [97]. Kluczowym elementem procesu osuszania budynku jest z kolei usunięcie źródła zawilgocenia poprzez wykonanie wtórnych izolacji przeciwwilgociowych i/lub wodochronnych. Zasady wykonywania hydroizolacji wtórnych opisane zostały m.in. w instrukcji WTA nr 4-6-14/D: Wtórne hydroizolacje przyziemnych części budynków [214].

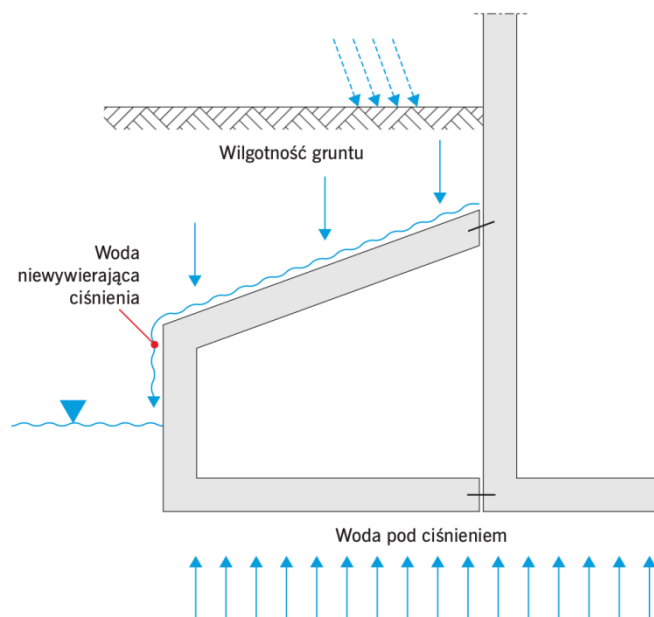
Wtórny hydroizolację przyziemnej części budynku należy w odpowiedni sposób zaplanować. Niezbędnymi elementami procesu planowania są:

- badania diagnostyczne / analiza przyczyn zawilgocenia,
- określenie celów prac uszczelniających,
- wybór technologii prac uszczelniających,
- opis występujących zagrożeń,
- oszacowanie czasu niezbędnego do uzyskania skutków prac uszczelniających.

Pierwszym etapem planowania są badania diagnostyczne, których głównym celem jest określenie przyczyny oraz zakresu występujących uszkodzeń [109]. Jeśli to konieczne należy wykonać odpowiednie odkrywki. Przed zaplanowaniem wtórnych hydroizolacji należy upewnić się czy zawilgocenie budynku częściowo lub w całości nie wynika z fizyki budowli (np. kondensacji), defektów instalacji budynku, czy też ze specyfiki jego użytkowania. Na etapie diagnostyki należy m.in. zebrać informacje na temat konstrukcji budynku (jeśli to możliwe, należy dotrzeć do dokumentacji projektowej) – wymiarów, zastosowanych materiałów, struktury uszkodzonych przez wilgoć elementów oraz ewentualnych istniejących uszczelnień. Dostępną dokumentację należy sprawdzić pod kątem zgodności ze stanem faktycznym.

Należy również ocenić występujące warunki gruntowo-wodne, tj. rodzaj właściwości występującego gruntu oraz występujące w nim obciążenie wodą (w tym również możliwość zmiany istniejących warunków). Obciążenie wodą w gruncie może przyjmować jedną z następujących form (Rys. 3.1) [27, 28, 153]:

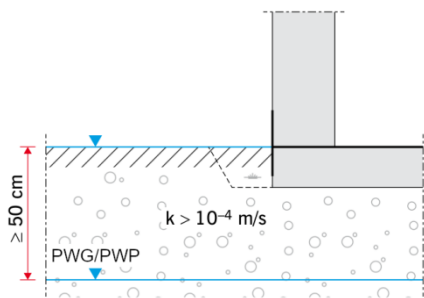
- wilgoci gruntowej – wody występującej w gruncie, związanej kapilarnie i transportowanej siłą wiązania kapilarnego, również w kierunku odwrotnym do działania siły ciężkości,
- niespiętrzającej się wody infiltracyjnej – wody przesączającej się, która nawet w czasie silnych opadów nie tworzy zastojów (sytuacją taką mamy do czynienia, gdy zarówno grunt rodzimy powyżej oraz poniżej poziomu posadowienia fundamentów jak i obsyбка stanowią grunty dobrze przepuszczalne, tj. o współczynniku przepuszczalności $k > 10^{-4}$ m/s),
- spiętrzającej się wody infiltracyjnej – obciążenie to występuje gdy grunt rodzimy jest gruntem słabo przepuszczalnym (o współczynniku $k \leq 10^{-4}$ m/s), natomiast najwyższy poziom wód gruntowych występuje poniżej poziomu posadowienia,
- wody wywierającej ciśnienie – wody gruntowej, której poziom występuje okresowo lub na stałe powyżej poziomu posadowienia budynku (obciążenie wodą wywierającą parcie hydrostatyczne występuje niezależnie od głębokości posadowienia oraz rodzaju gruntu).



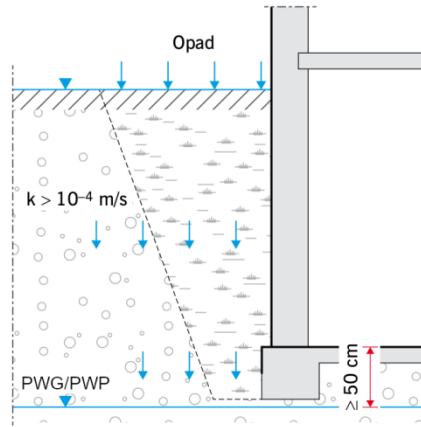
Rys. 3.1 Rodzaje obciążenia wodą, działające na przyziemne elementy budynku (rys.: [104])

Tabela 3.1 Dobór izolacji na podstawie warunków gruntowo-wodnych [27, 28, 153]

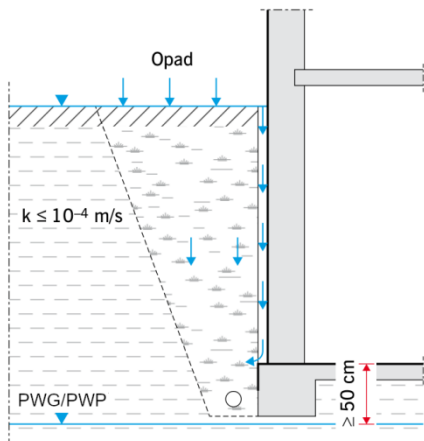
Rodzaj elementu budowli	Rodzaj wody	Sytuacja zabudowy		Rodzaj oddziaływania wody	Rodzaj wymaganego uszczelnienia
Stykające się z gruntem ściany i płyty fundamentowe powyżej ustalonego poziomu wody gruntowej	woda kapilarna	grunt dobrze przepuszczalny $k > 10^{-4}$ m/s		Rys. 3.2 Rys. 3.3	izolacja przeciwwilgociowa
	woda błonkowa	Grunt słabo przepuszczalny $k \leq 10^{-4}$ m/s	z drenażem	Rys. 3.4	
	woda infiltracyjna		bez drenażu	Rys. 3.5	izolacja przeciwwodna
Poziome i nachylone powierzchnie na wolnym powietrzu i w gruncie	woda rozbryzgowa woda infiltracyjna nawodnienie spiętrzone	użytkowane powierzchnie stropowe/dachowe intensywnie zazielenione dachy/stropy	Rys. 3.6	woda nie wywierająca ciśnienia, duże obciążenie	izolacja przeciwwilgociowa
Stykające się z gruntem ściany podłogi i stropy poniżej zmierzzonego poziomu wody gruntowej	woda gruntowa woda powodziowa	każdy rodzaj gruntu, rodzaj budynku i sposób budowania	Rys. 3.7	woda działająca pod ciśnieniem z zewnątrz	izolacja przeciwwodna



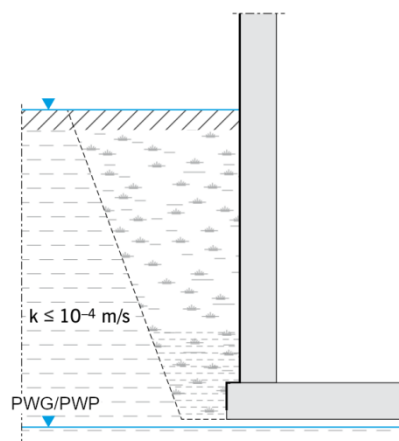
Rys. 3.2 Wilgotność gruntu działająca na płytę fundamentową (rys.: [28, 153])



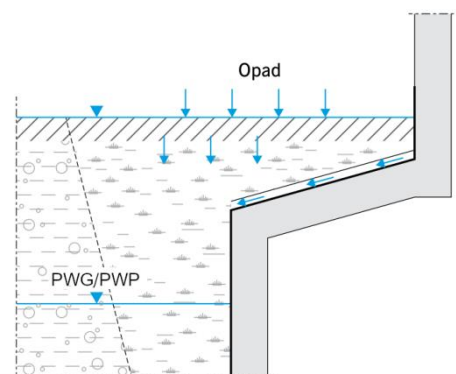
Rys. 3.3 Wilgotność gruntu i woda bez ciśnienia działająca na ściany stykające się z gruntem i płytą fundamentową (rys.: [28, 153])



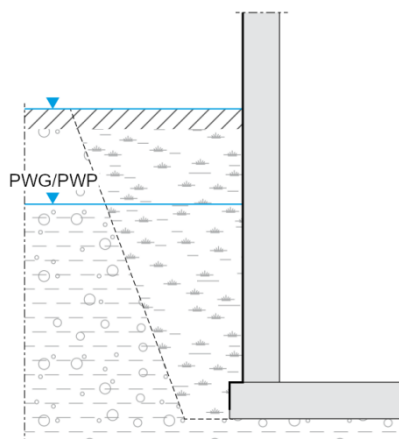
Rys. 3.4 Woda bez ciśnienia działająca na ściany stykające się z gruntem i płytą fundamentową (rys.: [28, 153])



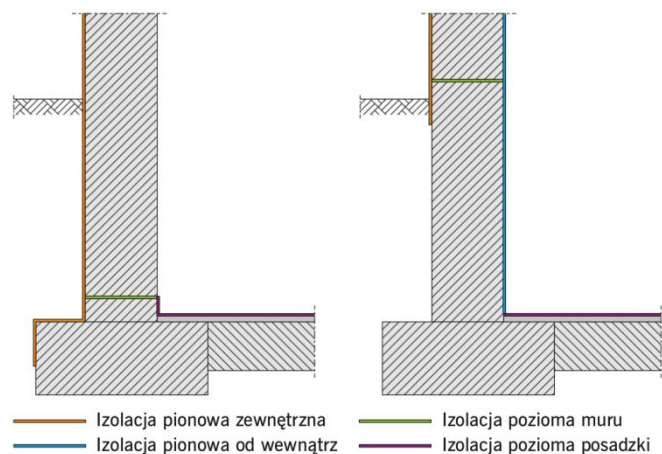
Rys. 3.5 Umiarkowane oddziaływanie wody pod ciśnieniem (woda spiętrzona) (rys.: [28, 153])



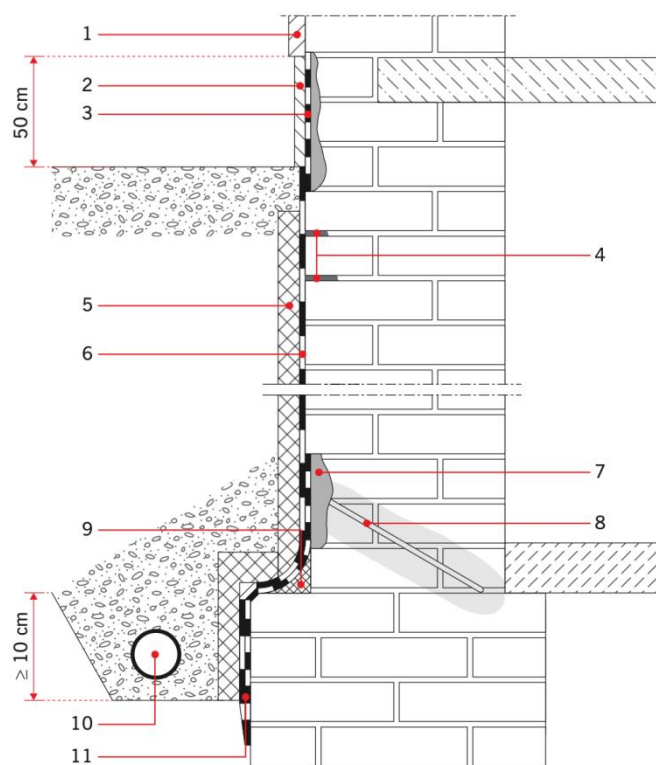
Rys. 3.6 Woda bez ciśnienia na stropach pokrytych gruntem (rys.: [28, 153])



Rys. 3.7 Umiarkowane oddziaływanie wody pod ciśnieniem (woda gruntowa) (rys.: [28, 153])



Rys. 3.8 Dwa sposoby wykonania wtórnej hydroizolacji przyziemnej części budynku (rys.: [110])

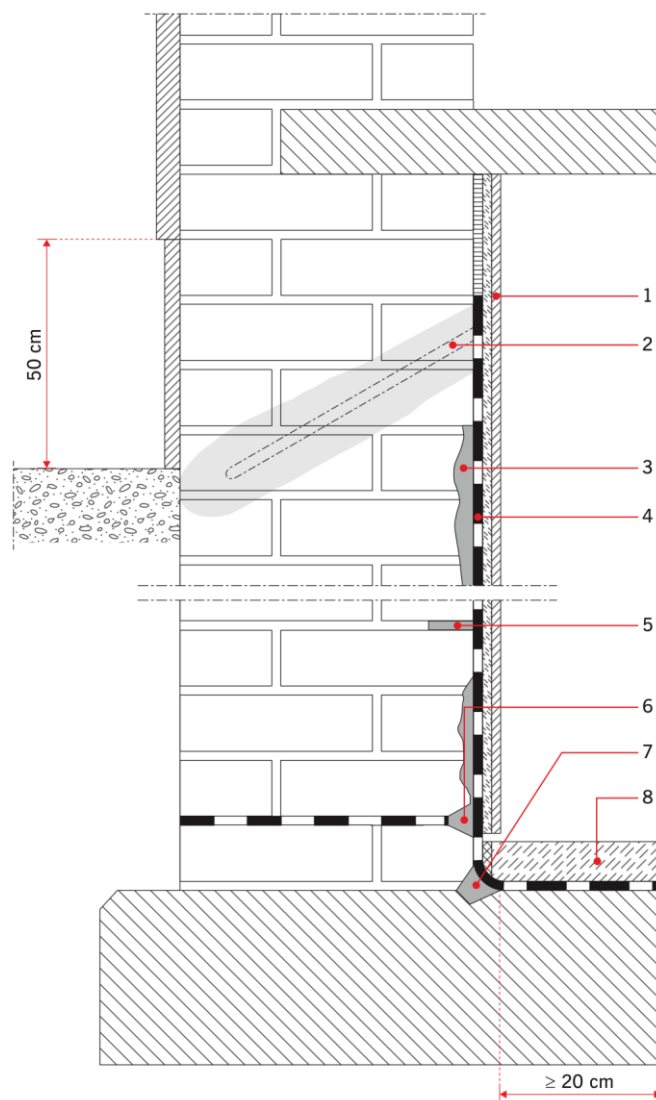


Rys. 3.9 Ogólny schemat wykonania wtórnej hydroizolacji zewnętrznej w przypadku obciążenia wilgocią gruntu lub wodą nie wywierającą ciśnienia (rys.: [111, 214])

1) tynk zewnętrzny, 2) tynk cokołu, 3) uszczelnienie strefy cokołowej (MDS lub FPD), 4) uzupełnienie zmurszałych spoin (opcjonalnie), 5) warstwa ochronna, względnie izolacja perymetryczna, względnie warstwa drenażowa, 6) wtórna hydroizolacja pionowa (np. KMB lub FPD), 7) warstwa wyrównująca, 8) wtórna izolacja pozioma, 9) mineralna faseta uszczelniająca, 10) drenaż, 11) mineralny szlam uszczelniający (MDS)

W oparciu o informacje uzyskane w procesie diagnostyki budowli projektant systemu wtórnej hydroizolacji budynku tworzy koncepcję uszczelnienia (Tabela 3.1) – w razie potrzeby należy opracować rozwiązania alternatywne. Proces projektowania musi prowadzić do stworzenia ciągłego i szczelnego systemu hydroizolacji o układzie „wanny”, który całkowicie oddzieli budynek lub jego część od wody (Rys. 3.8) [110]. Hydroizolację pionową przyziemnej części istniejącego budynku (hydroizolację wtórną), o ile jest to możliwe, należy wykonywać od zewnątrz, to jest w taki sposób, aby całkowicie unie-

możliwić wnikanie wody oraz wilgoci w strukturę przegród zagłębionych w gruncie (Rys. 3.9) [111, 214]. W pewnych sytuacjach uszczelnienie od zewnątrz może się okazać (w całości lub częściowo) technicznie i/lub ekonomicznie niewskazane – w takim wypadku konstrukcję należy uszczelnić od wewnątrz (Rys. 3.10) [112, 214].



Rys. 3.10 Ogólny schemat wykonania wtórnej hydroizolacji od wewnątrz (rys.: [112, 214])

1) np. tynk renowacyjny, 2) wtórna hydroizolacja pozioma, 3) warstwa wyrównawcza, 4) mineralny szlam uszczelniający, 5) uzupełnienie spoin oczyszczonych ze zmuszanej spoiny (opcjonalnie), 6) bruzda w miejscu istniejącej hydroizolacji poziomej uzupełniona zaprawą wodoszczelną, 7) bruzda w miejscu styku ściany z posadzką uzupełniona zaprawą wodoszczelną, uformowana w kształt fasety, 8) jastrych (w paśmie skrajnym)

W razie konieczności należy wykonać wtórne izolacje poziome (połączone w sposób ciągły z izolacjami pionowymi) i/lub zastosować tzw. działania flankujące (np. tynki renowacyjne). W procesie projektowania należy również uwzględnić wymagania w zakresie ochrony środowiska, ochrony zabytków oraz efektywności ekonomicznej (choć w tym ostatnim przypadku najbardziej opłacalne rozwiązanie nie zawsze jest najbardziej ekonomiczne).

W zależności od oczekiwanych rezultatów, rozwiązania wymienione powyżej należy stosować pojedynczo lub w połączeniu (Tabela 3.2) [214].

Tabela 3.2 Sposób wykonania hydroizolacji wtórnych w zależności od występującego obciążenia wodą [214]

Obciążenie wodą	Hydroizolacja od zewnątrz	Hydroizolacja od wewnątrz	Hydroizolacja pozioma muru
Wilgotność gruntu i niespiętrzająca się woda infiltracyjna	x ⁽¹⁾	x ⁽⁶⁾	x
Woda nie wywierająca ciśnienia	x		x
Spiętrzająca się woda infiltracyjna, woda pod ciśnieniem	x ^{(2),(3)}	x ^{(2),(3),(6)}	x ^{(2),(3)}
Wilgoć higroskopijna (na skutek obecności soli higroskopijnych)	– ⁽⁴⁾	– ⁽⁴⁾	–
Wilgoć kondensacyjna	– ⁽⁵⁾	– ⁽⁵⁾	– ⁽⁵⁾

⁽¹⁾ Jeśli grunt jest słabo przepuszczalny ($k \leq 10^{-4}$ m/s, należy wykonać drenaż – w przeciwnym wypadku należy wykonać izolację przeciwwodną.

⁽²⁾ Tylko w przypadku szczelnego połączenia z sąsiadującymi elementami nie przepuszczalnymi dla wody (np. betonową płytą fundamentową).

⁽³⁾ Stabilność konstrukcji oraz podłoża pod hydroizolacje musi zostać potwierdzona lub skontrolowana.

⁽⁴⁾ Jeśli absorpcja higroskopijna jest jedynym źródłem zawilgocenia, najlepszym rozwiązaniem jest zastosowanie tynków renowacyjnych.

⁽⁵⁾ W zależności od sposobu użytkowania może być wymagana izolacja termiczna.

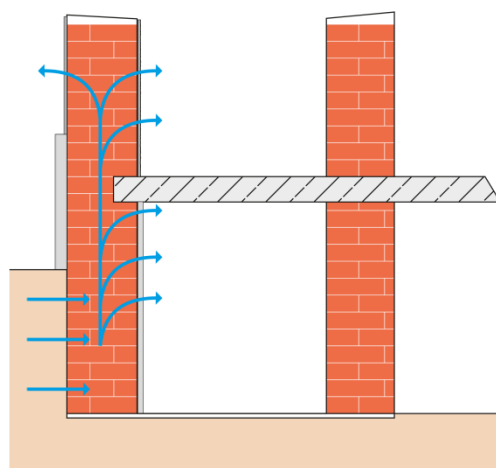
⁽⁶⁾ Możliwy jedynie w przypadku certyfikowanych systemów

3.2 Ochrona budowli przed kapilarnym transportem wilgoci z gruntu

Kapilarne podciąganie wilgoci w murze może i często stanowi jedno z wielu źródeł zawilgocenia budynku. Odpowiada ono jednak również za transport wilgoci z elementów budynku ulegających bezpośredniemu zawilgacaniu (tj. najczęściej tych bezpośrednio stykających się z gruntem) do wyżej położonych stref, w wyniku czego nierzadko dochodzi do zawilgacania obszarów położonych nawet do kilku metrów powyżej poziomu terenu (Fot. 3.1, Rys. 3.11).



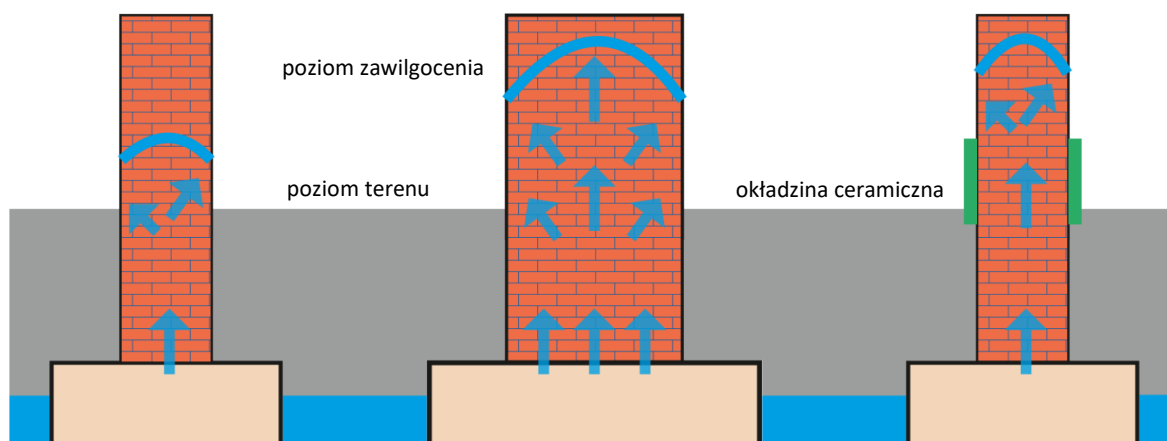
Fot. 3.1 Zawilgocenie ścian zewnętrznych na skutek kapilarnego podciągania wilgoci z gruntu (fot.: autor)



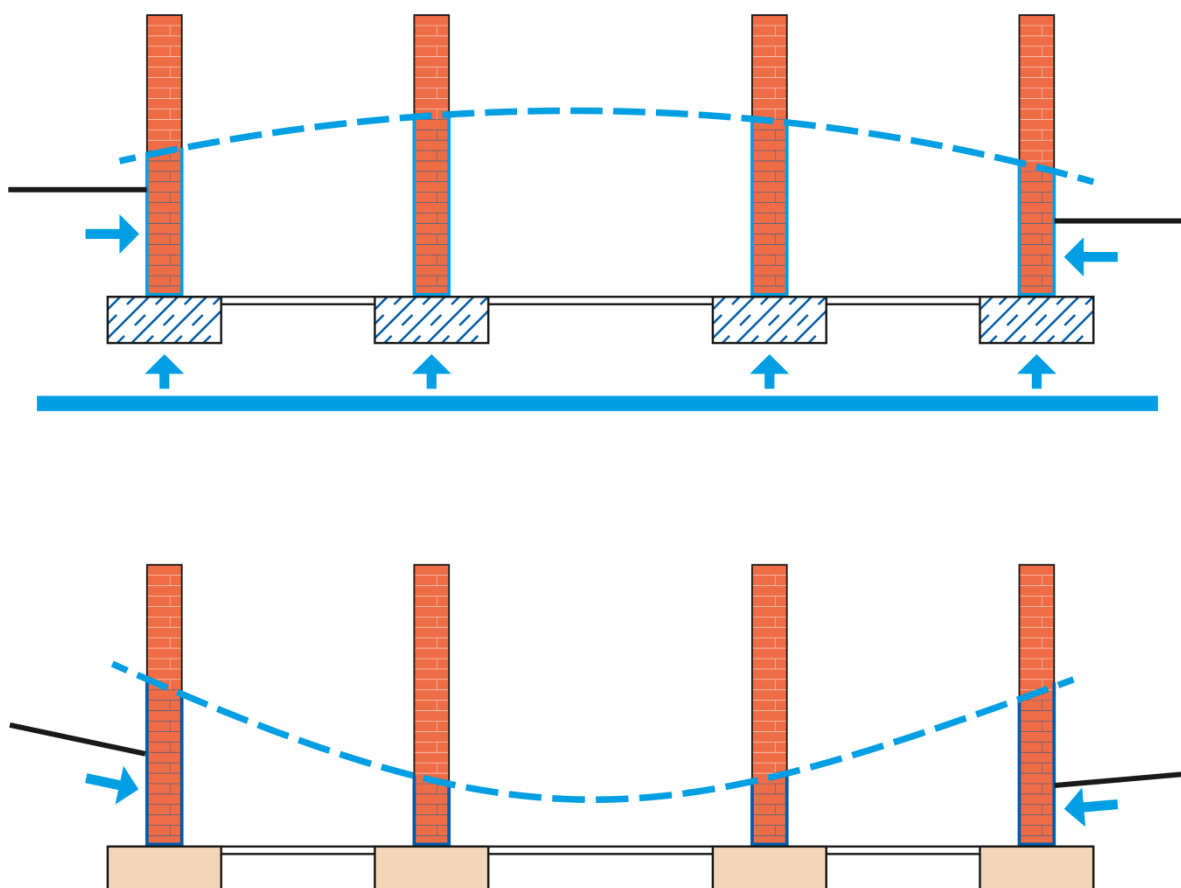
Rys. 3.11 Schematyczne przedstawienie transportu wilgoci w ścianie zewnętrznej – zastosowanie szczelnego tynku w strefie cokołowej powoduje powstanie tzw. komina kapilarnego i zwiększenie wysokości kapilarnego podciągania (rys.: [89])

W przypadku muru zawilgacanego na skutek kapilarnego transportu wody można wprowadzić umowny podział na trzy strefy: poboru wody, zawilgacania oraz odparowywania [177]. Jeśli mur znajduje się w stanie równowagi (zawilgocenie nie ulega zmianie) wydajność pochłaniania wody (tj. ilość dostarczanej wody) równoważona jest przez wydajność dyfuzyjnego parowania (ilość wody odparowującej). Dlatego też w murach o większej grubości, gdzie powierzchnia odparowywania musi

równoważyć większą powierzchnię napływu, wysokość podciągania z reguły jest większa niż w murze o niewielkiej grubości (Rys. 3.12). Również ograniczenie strefy parowania, np. przez zastosowanie szczelnej okładziny muru, np. tynku cementowy, lub płytek ceramicznych powoduje podwyższenie poziomu podciągania kapilarnego – zjawisko to potocznie określane jest „kominem kapilarnym” (Rys. 3.11, Rys. 3.12).



Rys. 3.12 Schematyczne przedstawienie wysokości zawilgocenia od grubości i sposobu wykończenia muru (rys.: [155, 177])

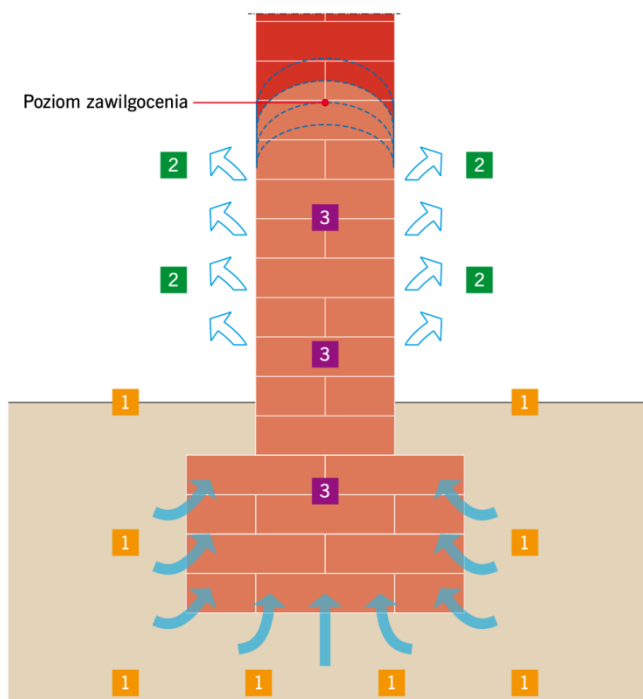


Rys. 3.13 Poziom podciągania w ścianach budynku przy zawilgoceniu kapilarnym oraz oddziaływaniu wody rozproszonej (rys.: [155, 177])

W przypadku zawilgocenia na skutek podciągania kapilarnego w ścianach wewnętrznych obserwowany jest z reguły wyższy poziom zawilgocenia niż w przypadku murów zewnętrznych. Zgoda od-

mienna sytuacja ma miejsce w przypadku zawilgacania konstrukcji wodą rozproszoną, np. pochodzącą z opadów atmosferycznych. W takim wypadku zawilgocenie ścian zewnętrznych będzie zazwyczaj wyższe niż przegród znajdujących się wewnątrz budynku (Rys. 3.13).

Maksymalna wysokość podciągania wilgoci w murze jest zatem wypadkową trzech czynników: zaopatrzenia w wodę, zdolności odparowania oraz właściwości muru (jego struktury) i materiałów, z których został wykonany (ilości i wielkości porów, ich krętości, wzajemnych połączeń, itp.) (Rys. 3.14) [43]. Modyfikacja nawet jednego z tych czynników może mieć zatem wpływ na ograniczenie negatywnych skutków omawianego zjawiska.

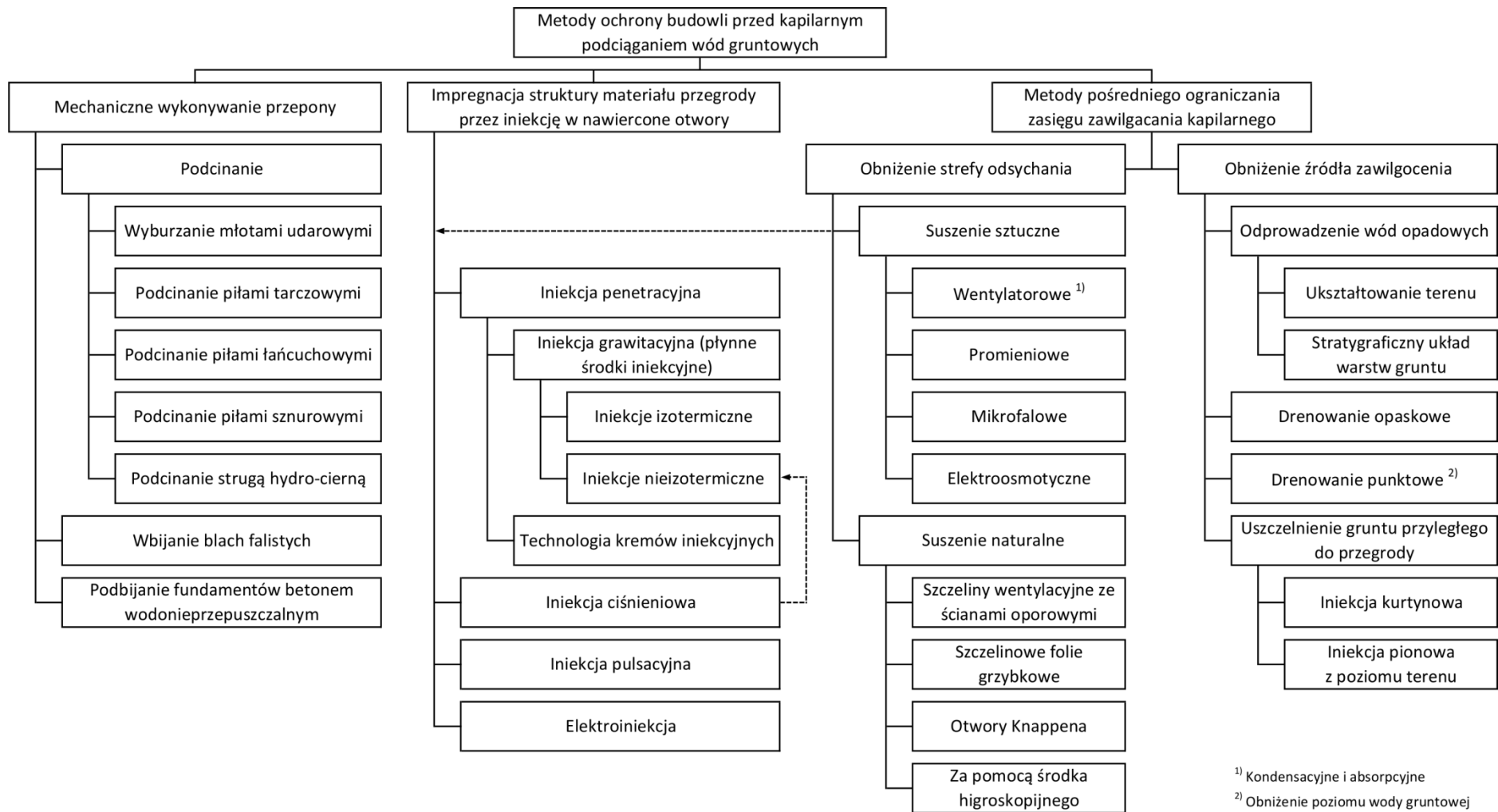


Rys. 3.14 Dynamika podciągania kapilarnego wilgoci w murze oraz schematyczne przedstawienie trzech czynników determinujących maksymalną wysokość zawilgocenia (rys.: [43])
1) zaopatrzenie w wodę, 2) właściwości materiałów oraz struktura muru, 3) parowanie

Na rysunku 3.15 przedstawiono wykaz metod stosowanych w celu ograniczenia zawilgocenia (jak również związanych z nim szkód) wynikającego z kapilarnego podciągania wilgoci z gruntu. Obok metod odtwarzania poziomej hydroizolacji przeciwwilgociowej *sensu stricto*, na schemacie znaleźć można metody pośredniego ograniczania podciągania kapilarnego. Choć z jednej z strony postrzegane są one jako „techniki zastępcze”, które nie mogą zagwarantować trwałego i w pełni skutecznego zabezpieczenia przegród budowlanych [196], z drugiej – szczególnie w przypadku budynków zabytkowych – metody mechaniczne oraz iniekcyjne postrzegane są jako nurt „ciężkiej chirurgii”, które należy traktować nie jako standard, ale jako rozwiązanie dopuszczalne w sytuacjach wyjątkowych (absolutną ostateczność) [130, 156, 157].

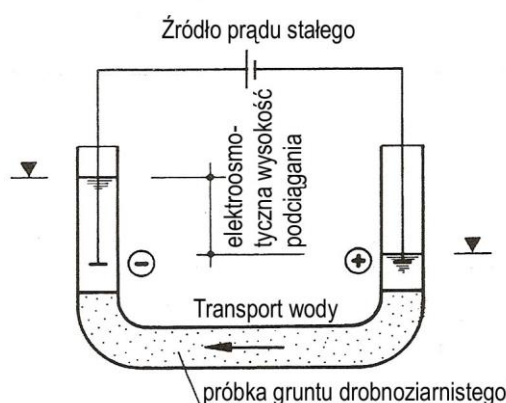
3.3 Metody elektrofizyczne

Jako jedna z metod wykonywania wtórnej izolacji poziomej klasyfikowane są niekiedy metody elektrofizyczne [45, 79] – podejście takie (jak i same metody) budzi jednak wśród inżynierów budownictwa spore kontrowersje [198, 203, 211, 214].



Rys. 3.15 Metody ochrony budowli przed podciąganiem wilgoci z gruntu (opracowanie autora na podstawie [14, 18, 30, 36, 79, 96, 156, 193, 196])

Podstawy metody, bazującej na zjawisku elektroosmozy, zostały opracowane na początku XIX wieku przez niemieckiego naukowca F. F. Reuss'a, który odkrył, że cząsteczki wody poruszają się w naturalnym albo sztucznym polu w kierunku bieguna przeciwnie naładowanego w stosunku do ich ładunku (Rys. 3.16) [45]. Celem osuszania elektroosmotycznego jest zmiana istniejących potencjałów, która spowoduje, że na określonej wysokości muru zostanie wymuszony ruch wilgoci przeciwny do przewodnictwa kapilarnego (czyli w kierunku gruntu). W ten sposób następuje zahamowanie transportu kapilarnego [76]. Wśród elektrofizycznych metod osuszania murów rozróżnia się metody pasywne, w których przepływ prądu wywoływany był przez materiały (metale) wykorzystywane przy wykonywaniu przegród, oraz rozwinięte w późniejszym okresie metody aktywne, w których przepływ prądu wywoływany był przez przyłożenie napięcia [45].



Rys. 3.16 Zasada działania zjawiska elektroosmozy (rys.: [17])

Wśród wad metod elektroosmotycznych wymienia się przede wszystkim [30]:

- elektrolizę soli zawartych w przegrodzie, której produkty (kwasy) działają destrukcyjnie na materiał, z którego przegrodę wykonano,
- korozję elektrod umieszczanych w przegrodzie, co również wpływa niekorzystnie na materiały budowlane oraz zwiększa koszty instalacji.

Mimo zadawalającej skuteczności osuszania zawilgoconych przegród metodą elektroosmozy, wiązała się ona ze znacznymi kosztami (m.in. wymiany szybko korodujących elektrod), obecnie praktycznie zaniechano jej zastosowania [76].

W miejsce pierwotnie stosowanych metod elektroosmotycznych, pojawiły się metody, których działanie ma być podobne, choć bez stosowania elektrod [76]. Metody te, w których kapilarność w murze ma zostać przerwana na skutek wysyłania fal elektromagnetycznych przez urządzenie zasilane elektrycznie, a nawet nie wymagające dostarczania energii z zewnątrz (źródłem emitowanych fal mają być wibracje, magnetokineza itp.) [102, 203, 211, 214], zyskały sporą popularność, wynikającą ze stosunkowo niskiej ceny oraz braku konieczności ingerencji w strukturę muru. Niewiele jednak wiadomo na temat praktycznej użyteczności tych rozwiązań – nie są znane żadne badania, które w jednoznaczny sposób rozróżniałyby ich wpływ na efekt suszarniczy od skutków działań osłonowych. Dostępne są spełniające kryteria naukowe wyniki badań laboratoryjnych, jednak możliwość ich „transferu” do praktyki budowlanej jest kwestionowana przez samych autorów badań [211, 214].

O ile stosowanie metod wykorzystujących elektrody umieszczone w strukturze przegrody nie jest zalecane ze względów ekonomicznych, to skuteczność oraz szanse powodzenia tak zwanych metod bezinwazyjnych są negowane w środowiskach naukowych i inżynierskich a same urządzenia (określane często mianem „magicznych skrzynek” [211, 214]) postrzegane są jako nieskuteczne.

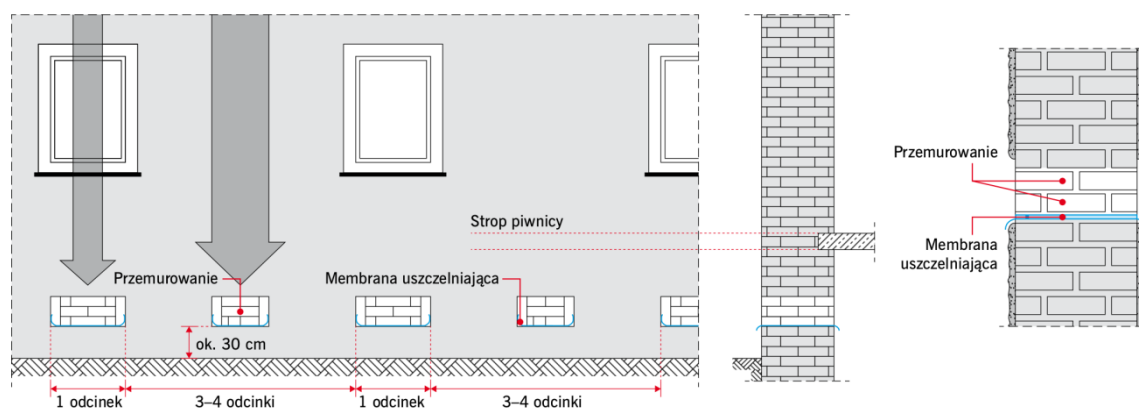
3.4 Mechaniczne metody wykonywania wtórnych hydroizolacji poziomej

Mechaniczna hydroizolacja jest za każdym razem wykonywana poprzez rozdzielenie muru i musi składać się z co najmniej jednej ciągłej szczeliny przerywającej system kapilarny [215]. Izolacja może wprowadzona na jeden z dwóch sposobów (jedno- lub dwuetapowo): w pierwszym przypadku najpierw wykonuje się wolną przestrzeń, w którą następnie wprowadza się materiał przerywający kapilarny transport wilgoci, w drugim rozdzielenie muru oraz wprowadzenie uszczelnienia jest jedną czynnością [14]. Mechaniczna bariera pozioma musi zostać zaplanowana i wykonana z uwzględnieniem indywidualnych parametrów konstrukcyjnych budynku, fizyki budowli, wymagań technicznych oraz związanych z użytkowaniem obiektu, ale również efektywności ekonomicznej, ochrony środowiska oraz ochrony zabytków. Szczególną uwagę należy zwrócić na zaplanowanie połączenia poszczególnych rodzajów hydroizolacji. Z uwagi na ingerencję w konstrukcję budynku, zastosowanie metody mechanicznej powinno być ona poprzedzone analizą statyku budynku [215].

Do metod mechanicznych wykonania wtórnej izolacji poziomej zalicza się technologię wymiany muru, wciskanie nierdzewnej blachy ze stali szlachetnej, metodę podcinania muru oraz metodę rdzeni wiertniczych (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 Przegląd mechanicznych metod wykonania wtórnej izolacji poziomej [215]

Cel:	renowacja lub wykonanie hydroizolacji poziomej w istniejącym murze			
Zasada działania:	zablokowanie kapilarnego transportu wilgoci			
Warianty:	technologia wymiany muru	wciskanie blachy ze stali szlachetnej	metoda podcinania muru	metoda rdzeni wiertniczych



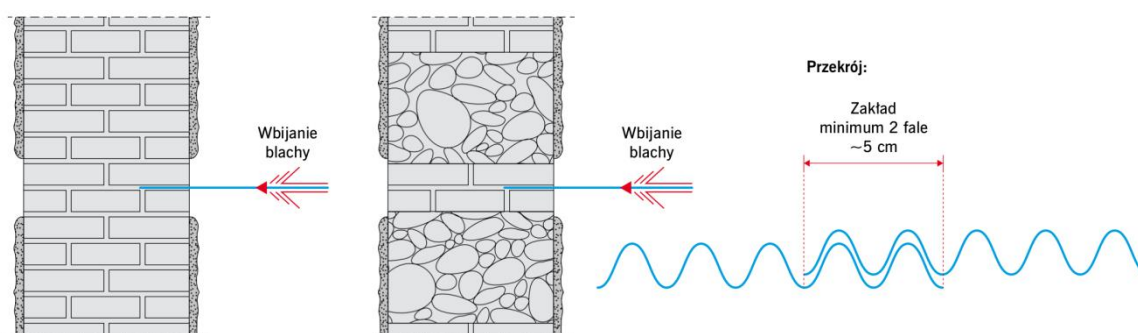
Rys. 3.17 Technologia wymiany muru (rys.: [14])

Najstarszą metodą wykonywania hydroizolacji poziomej w istniejącym murze jest technologia wymiany muru [14, 45, 196]. Zasadą jej działania jest odcinkowe usunięcie starego muru, wprowadzenie materiału izolacyjnego oraz uzupełnienie muru. W trakcie wykonywania prac należy zwrócić uwagę na następujące aspekty [14]:

- długość odcinków roboczych należy dobierać na podstawie wymagań statycznych – im większe obciążenie danego odcinka ściany, tym krótszy odcinek roboczy (Rys. 3.17);
- membrany uszczelniające układać na zakład ok. 20 cm;
- stosować niewielką wysokość spoin – w miarę możliwości używać zaprawy o ograniczonym skurczu;

- zastosowanie tej metody staje się problematyczne w przypadku murów warstwowych. Z uwagi na pojawiające się często problemy ze statyką budowli, metoda ta nie znajduje obecnie zwolenników i posiada praktycznie jedynie znaczenie historyczne [14, 102].

Metoda wciskania nierdzewnej blachy metalowej, zwana również krócej (od nazwisk wynalazców – Haböcka i Weinzierla) technologią HW, jest metodą jednoetapową, co oznacza rozdzielenie muru i uszczelnienie poziome stanowią jedną operację [17, 45, 196]. Blachy wbijane są w spoinę poziomą muru odpowiednim młotem pneumatycznym z częstotliwością od 1100 do 1500 uderzeń na minutę. Należy zapewnić odpowiednie połączenie (funkcja zamka) poszczególnych paneli (Rys. 3.18, Fot. 3.2). Warunkiem zastosowania tej metody jest istnienie ciągłej spoiny poziomej o grubości min. 6 mm. Zaprawa murarska nie powinna się ponadto charakteryzować zbyt wysoką wytrzymałością (problemów nie należy się spodziewać przy wytrzymałości do $1,5 \text{ N/mm}^2$). W murze nie mogą ponadto występować instalacje (np. rury) poprzeczne w stosunku do wykonywanej bariery. Metoda ta cieszy się (obok podcinania muru) największą popularnością wśród metod mechanicznych, wymaga jednak bacznej analizy wpływu obciążeń dynamicznych, jakie jej towarzyszą, na konstrukcje budynku. Wadą tej metody jest bowiem znaczne prawdopodobieństwo wystąpienia pęknięć muru związanych z wibracjami – ryzyko to można ograniczyć stosując np. blachy o profilu grotu strzały (Rys. 3.18). Problematyczne może się również okazać szczelne połączenie tak wykonanej przepony poziomej z innymi rodzajami uszczelnienia.



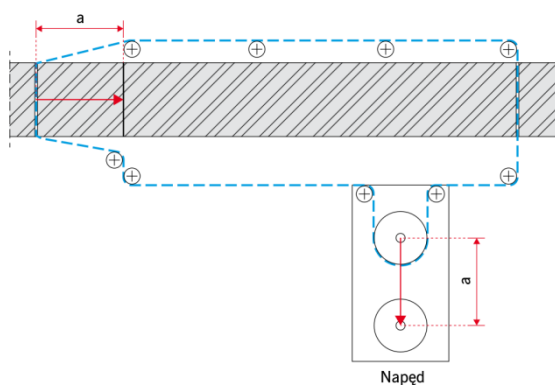
Rys. 3.18 Metoda wciskania blachy ze stali szlachetnej (rys: [14])



Fot. 3.2 Wciskanie blachy ze stali szlachetnej (fot.: Wikimedia Commons)

Metoda podcinania muru, która postrzegana jest jako rozwinięcie technologii wymiany muru, jest najpowszechniej stosowaną metodą mechanicznego odtwarzania izolacji poziomej [14, 102]. Technologia ta sprawdza się szczególnie dobrze, gdy mur posiada ciągłą spoinę poziomą. W dwuetapowym procesie najpierw podcina się mur (również odcinkowo). Mur jest rozdzielany przez cięcie na sucho lub na mokro, za pomocą pił tarczowych, sznurowych (diamentowych) lub łańcuchowych (Rys. 3.19, Fot. 3.3). Praktycznie nie występują ograniczenia dotyczące rodzaju i przekroju muru, natomiast maksymalna grubość uzależniona jest od rodzaju zastosowanej piły (dla pił tarczowych max. 1 m, ale w przypadku pił sznurowych grubość muru może wynosić nawet 6 m [14]). W przypadku murów wielowarstwowych mogą być wymagane działania dodatkowe (np. wypełnienie wolnych przestrzeni). W wykonaną w pierwszym etapie szczelinę (tzw. rżaz) wprowadza się materiał izolacyjny o wysokiej wytrzymałości – najbardziej rozpowszechnione są płyty z tworzywa sztucznego wzmocnione włóknem szklanym (Fot. 3.4). W końcowym etapie prac należy wypełnić pozostałą w murze szczelinie na jeden z trzech sposobów [215]:

- w szczelinę wbija się w równych odstępach kliny z tworzywa sztucznego, a pozostałe puste przestrzenie uzupełnia zaprawą o zredukowanym skurczu – podczas wbijania klinów należy zwrócić szczególną uwagę na to, aby nie uszkodzić membrany;
- szczelinę wypełnia się na całej grubości muru zaczynem cementowym z dodatkiem środków spęczniających, aplikowanym metodą ciśnieniową;
- w szczelinę prowadzi się na całym przekroju muru kliny z tworzywa sztucznego, w dwóch warstwach – pod ułożoną górną warstwę wbija się warstwę dolną.



Rys. 3.19 Schemat sposobu podcinania muru piłami sznurowymi (rys.: [14])

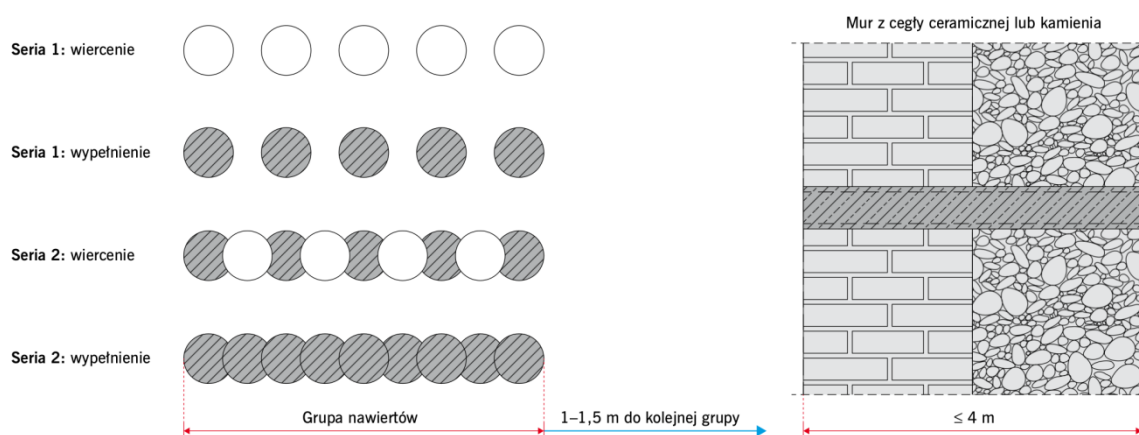


Fot. 3.3 Podcinanie muru piłą tarczową (fot.: autor)



Fot. 3.4 Membrana hydroizolacyjna umieszczona w nacięciu muru (fot.: autor)

Metoda rdzeni wiertniczych, nazwana od nazwiska twórcy metodą Massari lub metodą izoborowania (niem. *Isobohrverfahren*) [45]. W tej metodzie w murze wykonuje się rząd 4 do 5 poziomych otworów ok. \varnothing 120 mm, w rozstawie ok. 100 mm, na całą głębokość muru, które po oczyszczeniu wypełnia się niekurczliwą, mineralną zaprawą uszczelniającą, tworzywem sztucznym lub betonem wodoszczelnym. Po stwardnieniu zaprawy (po 10 do 14 godzin) pomiędzy już wykonanymi rdzeniami nawierca się kolejne otwory oraz analogicznie wypełnia je materiałem przecinającym transport kapilarny wody (Rys. 3.20). Prace prowadzi się do momentu, gdy powstanie ciągła przegroda na całym przekroju i długości. Metoda ta może być stosowana praktycznie we wszystkich rodzajach muru, ograniczenie stanowi jednak grubość ściany, która na powinna przekraczać 4 m [14]. Jednakże z uwagi na znaczne nakłady obecnie nieznaną są jej praktyczne zastosowania i ją również, obok technologii wymiany muru, należy traktować jako historyczną [14, 45].



Rys. 3.20 Schemat wykonywania bariery przeciwwilgociowej metodą rdzeni wiertniczych (rys.: [14])

Wybór materiałów budowlanych, jakie zostaną zastosowane przy wykonywaniu bariery przeciw kapilarnemu podciąganiu wody uzależniony jest z jednej strony od wyniku badań diagnostycznych, z drugiej zaś od wybranej metody wykonania izolacji wtórnej. Bez względu na wybór technologii, materiały te powinny być trwale odporne na działanie wody oraz wodoszczelne, odporne na działania chemiczne oraz mechaniczne, jak również spełniać następujące warunki:

- kompatybilność z materiałami budowlanymi oraz innymi elementami znajdującymi się w murze,
- kompatybilność z materiałami, które zostaną zastosowane w kolejnych etapach prac (np. hydroizolacjami bitumicznymi, tynkiem renowacyjnym, itp.),
- odporność na temperaturę otoczenia (w trakcie wbudowywania oraz w trakcie eksploatacji),
- odpowiednia wytrzymałość mechaniczna (zdolność przenoszenia obciążeń występujących w trakcie wbudowywania oraz w trakcie eksploatacji).

W trakcie wbudowywania warstw uszczelniających należy zwrócić szczególną uwagę na ich odpowiednie ułożenie (aby uniknąć dodatkowych obciążeń punktowych), jak również na wodoszczelne połączenie bariery poziomej z innymi elementami systemu uszczelnienia (ciągłość izolacji).

Zaprawy stosowane w ramach metod mechanicznego odtwarzania izolacji poziomych, nawet jeśli nie stanowią właściwego uszczelnienia, muszą być materiałem nie transportującym wilgoci kapilarnie.

Stal nierdzewna może być stosowana w formie blachy gładkiej lub profilowanej. Najczęściej stosowane gatunki to stal chromowa, stal chromowo-niklowa oraz stal chromowo-niklowo-molibdenowa, które są trwale odporne na normalnie występujące w gruncie oraz murze nisko stężone substancje, takie jak siarczany, chlorki, azotany, węglany, kwasy organiczne oraz związki zawierające pierwiastki z gru-

py halogenków (fluor, chrom, brom, jod). Wybór odpowiedniego rodzaju stali zależy przede wszystkim od prawidłowego rozpoznania warunków, w jakich stal będzie funkcjonować. Oprócz stężenia substancji szkodliwych, odporność stali zależy od wielu innych czynników – w szczególnych przypadkach odporność materiału należy udowodnić za pomocą specjalnych (czasochłonnych) testów laboratoryjnych lub długoterminowych testów w miejscu największej kumulacji mediów [215].

Płyty ze stali nierdzewnej należy ciąć specjalnymi tarczami do cięcia i szlifowania, zwracając uwagę na temperaturę osiągniętą w obszarze cięcia. Jeśli dopuszczalna temperatura zostanie przekroczona (następuje wyżarzanie stali na czerwono), w tym obszarze powstają niebieskie linie podziału i zadziory, które nie są już odporne na korozję i muszą być starannie zeszlifowane. W metodzie podcinania muru stosowana jest zazwyczaj stal w formie płaskich blach – muszą się one jednak charakteryzować wystarczającą wytrzymałością na ścinanie. W technologii wciskania blachy ze stali szlachetnej zwykle stosuje się blachy faliste z uwagi na ich odporność na uszkodzenia, jakie mogą wystąpić w procesie wbijania, jak i ich ogólną wytrzymałość mechaniczną.

Płyty z tworzywa sztucznego muszą posiadać odpowiednią wytrzymałość mechaniczną, w tym w szczególności wystarczającą (pod kątem przewidzianych obciążeń) wytrzymałość na przebicie, ścinanie, zginanie oraz rozciąganie. Wolna przestrzeń w murze pozostająca po wprowadzeniu płyt z tworzywa, musi zostać całkowicie wypełniona.

Parametry mechaniczne membran uszczelniających należy ocenić z uwzględnieniem planowanego sposobu wbudowania oraz temperatury konstrukcji. Przede wszystkim należy uwzględnić możliwość wystąpienia pełzania przy długotrwałym obciążeniu. Możliwość zastosowania membrany należy również sprawdzić pod kątem działania sił ścinających. Bitumiczne membrany uszczelniające (papy) powinny mieć grubość nie mniejszą niż 4 mm. W przypadku membran z tworzyw sztucznych (folii) winna ona wynosić co najmniej 2 mm. Membrany uszczelniające należy układać całopowierzchniowo, bez zmarszczek, a zakład poszczególnych pasm powinien wynosić min. 5 cm. Jeśli zakład jest mniejszy niż 5 cm, łączone pasma należy wzajemnie skleić.

Tabela 3.4 Wymagania dotyczące wykonania wtórnych hydroizolacji poziomych metodami mechanicznymi [215]

Metoda	Przestrzeń robocza i obszar dostępu		Min. wysokość nad podłożem	Zabezpieczenie bariery w strefie połączeń	Materiał wypełniający
	Przód (strona „robocza”)*	Tył			
Technologia wymiany muru	≥ 80 cm	przy pracy z obu stron muru ≥ 80 cm	brak ograniczeń	min. 5 cm zakładu	niekurczliwa zaprawa cementowa
Wciskanie blachy ze stali szlachetnej	grubość muru + długość urządzenia	umożliwiająca ew. kontrolę	uzależniona od urządzenia	min. 2 cm zakładu	nie dotyczy
Metoda podcinania muru	rozmiar urządzenia, min. 80 cm	uzależniona od urządzenia, umożliwiająca ew. kontrolę	uzależniona od urządzenia	min. 5 cm zakładu	niekurczliwa i odporna na pełzanie zaprawa uszczelniająca
Metoda rdzeni wiertniczych	głębokość wiercenia + długość wiertnicy	umożliwiająca ew. kontrolę	uzależniona od urządzenia	rdzenie muszą na siebie nachodzić	niekurczliwa i odporna na pełzanie zaprawa uszczelniająca

*zazwyczaj miejsce ustawienia urządzenia

Wymagania dotyczące wykonania metodami mechanicznymi wtórnych hydroizolacji poziomych przeciw kapilarnemu podciąganiu wilgoci zestawiono w tabeli powyżej (Tabela 3.4). Należy zwrócić uwagę, czy jest dostępna przestrzeń wystarczająca nie tylko do ustawienia sprzętu, ale również przechowywania materiału. Mechaniczna bariera pozioma powinna znajdować się co najmniej 300 mm powyżej najwyższego przewidywanego poziomu zwierciadła wód gruntowych. W przypadku wybranych materiałów uszczelniających szczególną uwagę należy zwrócić na sposób szczelnego (ciągłego) połączenia z innymi elementami hydroizolacji (zarówno poziomej, jak i pionowej) oraz przebiciami przez warstwy uszczelniające (w postaci rur, przewodów, itp.). Jeżeli z uwagi na warunki specyficzne dla danego obiektu (np. dom na skarpie) hydroizolacja pozioma zostanie wykonana w różnych płaszczyznach, należy je wzajemnie połączyć.

Hydroizolacja pozioma uznawana jest za skuteczną, jeśli kapilarny transport wilgoci w murze został zahamowany. Do oceny skuteczności może posłużyć parametr E, określony na podstawie wzoru (przy niskiej poziomie zasolenia można przyjąć wartość $u_h=0$) [215]:

Skuteczność hydroizolacji poziomej wykonanej metodą mechaniczną			Równanie 38
	symbol	jednostka	nazwa
$E = \frac{u_v - u_n}{u_v - u_h}$	E	%	skuteczność bariery przeciw kapilarnemu transportowi wilgoci
	u_v	%	wilgotność masowa przed wykonaniem prac
	u_n	%	wilgotność masowa po wykonaniu prac
	u_h	%	oczekiwana wilgotność równowagowa po wykonaniu prac

Działania prowadzące do zahamowania lub ograniczenia kapilarnego podciągania wilgoci w murze jedną z metod mechanicznych można uznać za skuteczne, w przypadku gdy [215]:

- skuteczność E wynosi $\geq 70\%$, lub
- na podstawie kolejnych pomiarów prognozowane jest osiągnięcie w określonym czasie (o ile nie uzgodniono inaczej, obowiązuje okres dwóch lat) skuteczności $\geq 70\%$, przy czym wartość ostatniego pomiaru musi wynosić co najmniej połowę wartości prognozowanej;
- stopień przesiąknięcia wilgocią powyżej przepony wynosi mniej niż 20%.

Metody mechaniczne odtwarzania przepon poziomych w murze, choć stosowane zdecydowanie rzadziej, są sprawdzone w praktyce od dziesięcioleci [215] i stanowią najpewniejszy sposób zahamowania kapilarnego podciągania wilgoci – przy założeniu, że prace zostaną bezbłędnie zaplanowane i wykonane, w przekroju muru powstanie całkowicie nieprzepuszczalna dla wody, trwała warstwa (w wielu przypadkach „jak w nowym budynku” [45], zapewniając tym samym zahamowanie jej kapilarnego transportu [102, 113]. Opisaną wzorem 38 skuteczność hydroizolacji poziomej wykonanej metodą mechaniczną należy zatem rozumieć nie w kontekście właściwości materiału hydroizolacyjnego (jego właściwości uszczelniające winny być określone w ramach oddzielnej procedury), a raczej jako ocenę jakości wykonanych prac.

Wadą tej metody jest fakt, że jej zastosowanie każdorazowo wymaga poważnej ingerencji w strukturę konstrukcji muru oraz wiąże się zazwyczaj z wprowadzeniem dodatkowych obciążeń [14].

4 WTÓRNE HYDROIZOLACJE POZIOME WYKONYWANE W TECHNOLOGII INIEKCJI

4.1 Początki i rozwój metod iniekcyjnych

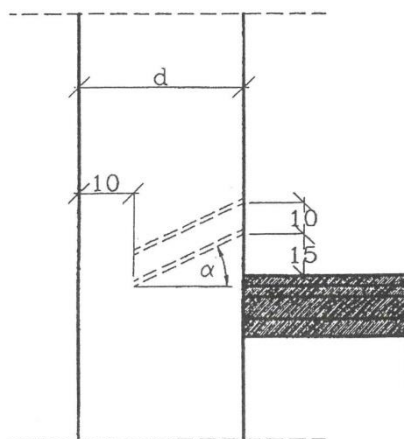
Pod pojęciem iniekcji, technologii iniekcji, lub też iniekcji chemicznej należy rozumieć wprowadzenie środka iniekcyjnego w strukturę muru w taki sposób, aby zapewniać jego rozłożenie (rozprowadzenie) w całym przekroju przegrody. Mimo iż to metody mechaniczne pozwalają stworzyć ciągłą i całkowicie nieprzepuszczalną dla wilgoci barierę w murze, szacuje się, że ich udział w rynku wtórnych izolacji poziomych kształtuje się na poziomie jedynie 10 do 15% [46]. Przez wiele lat przyczynę tego zjawiska upatrywano w tym, że w przypadku porównania nakładów finansowych, metody chemiczne posiadały znaczną przewagę nad metodami alternatywnymi [45], która jednak idzie w parze z łatwością stosowania oraz dobrą skutecznością [77].

Początki stosowania iniekcji chemicznej w celu wykonywania wtórnych izolacji poziomej w istniejących murach sięgają lat 50. ubiegłego wieku [44, 61], w Polsce zaś na większą skalę zaczęto stosować iniekcje w latach 80 [177]. Choć wiele z odmian metody iniekcyjnej okazało się (mimo poprawnych założeń teoretycznych) nieskutecznymi w praktyce [177], w ostatnich dziesięcioleciach prowadzono intensywne badania podstaw ich zastosowania oraz zdefiniowano obszary graniczne [45]. Również na terenie naszego kraju prowadzono badania, opracowywano i stosowano pewne modyfikacje metod iniekcyjnych.

4.1.1 Metoda Politechniki Krakowskiej

Metoda Politechniki Krakowskiej była metoda uszczelniającą i hydrofobizującą. Jako preparat iniekcyjny uszczelniający stosowano szkło wodne sodowe z wodą w stosunku od 1:1 do 1:0,5 oraz dodatkiem fluorokrzemianu sodu w ilości 5 do 15% w stosunku do szkła wodnego, natomiast w celu uzyskania hydrofobizacji stosowano żywicę metylosilikonową w ilości 10-15%, alkohol etylowy w ilości 50-60% oraz rozpuszczalnik organiczny (zazwyczaj benzynę lakową) w ilości 30-35%.

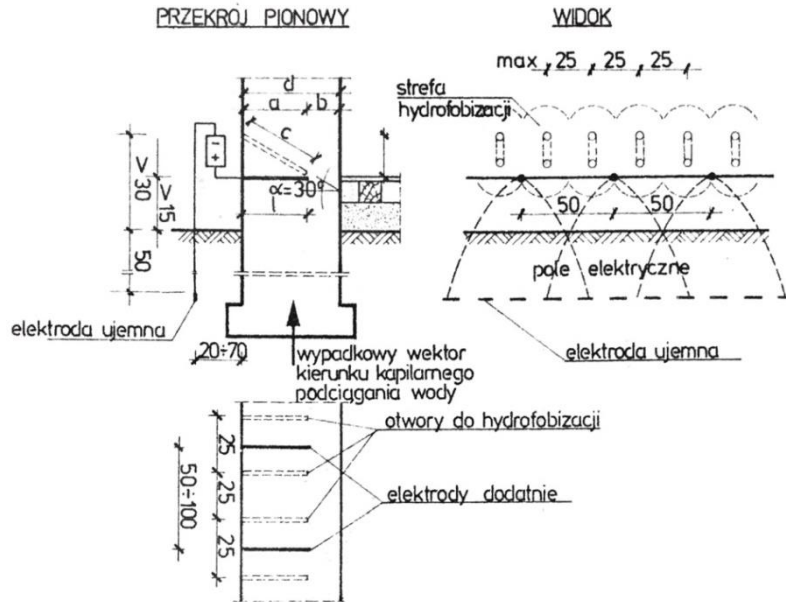
Otwory iniekcyjne o średnicy 20 mm wiercono dwurzędowo, w rozstawie co 25 cm. Poziomy rozstaw otworów (w rzędach) wynosił 10 cm, a nawierty w poszczególnych rzędach były przesunięte względem siebie o połowę (Rys. 4.1). Preparat iniekcyjny wprowadzano pod ciśnieniem 0,4 MPa (zwiększając je w razie potrzeby), przy czym najpierw wprowadzano środek uszczelniający, a dopiero po nim preparat hydrofobizujący. Rolą fluorokrzemianu było przyspieszanie twardnienia. W wyniku odciągania wody od szkła wodnego przez alkohol następowała krystalizacja krzemianu sodowego [84].



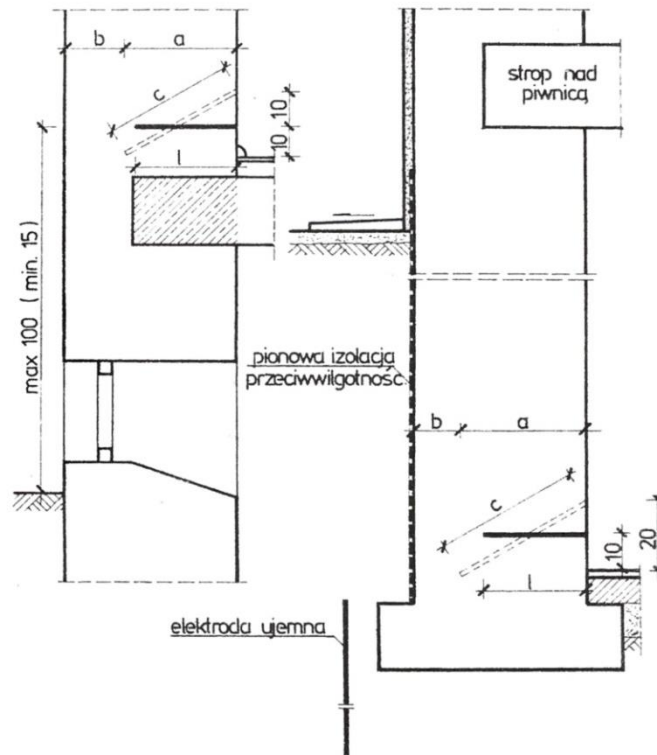
Rys. 4.1 Metoda Politechniki Krakowskiej (rys.: [84])

4.1.2 Metoda elektroiniekcji (EI)

Metoda elektroiniekcji wykorzystywała zjawisko elektroosmozy, poprzez założenie w murze instalacji elektroiniekcyjnej. Instalacja składała się z wykonanych z mas przewodzących elektrod dodatnich, osadzonych punktowo w murze i połączonych izolowanym przewodem, oraz wykonanych z ocynkowanego płaskownika elektrod ujemnych (tzw. otokowych). Elektrody ujemne umieszczone były w gruncie, na głębokości ok. 0,5 m (Rys. 4.2, Rys. 4.3).



Rys. 4.2 Schemat instalacji elektroiniekcyjnej (od zewnątrz) w budynku niepodpiwniczonym (rys.: [132])
($b = \max. 15 \text{ cm}$; $l = 2/3 d$)



Rys. 4.3 Schemat instalacji elektroiniekcyjnej w budynkach podpiwniczonych (rys.: [132])
($b = \max. 15 \text{ cm}$; $l = 2/3 d$)

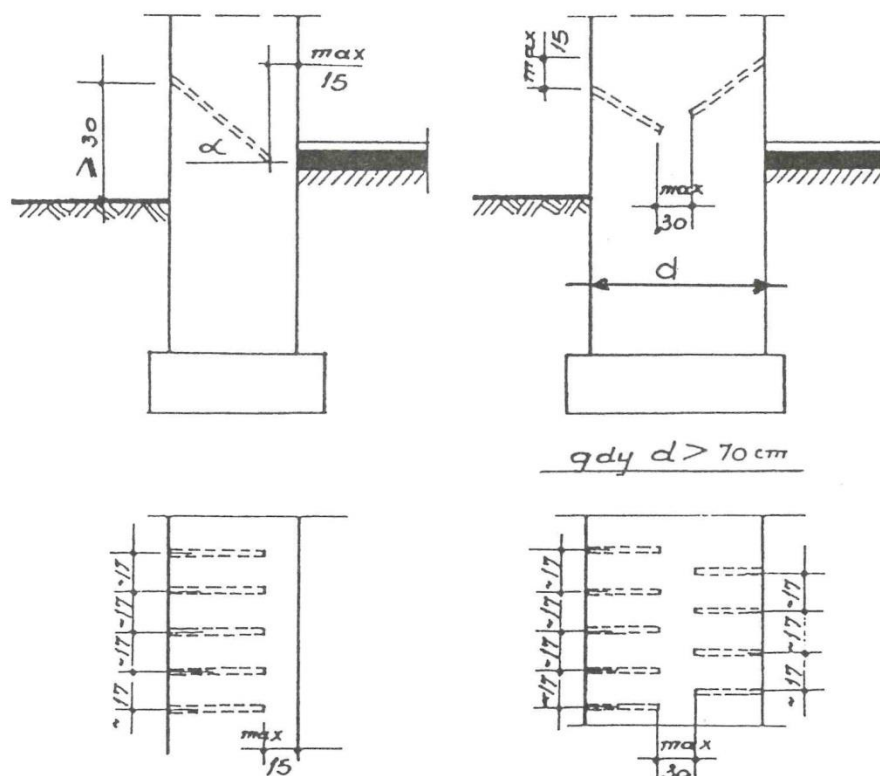
Instalację zasilano prądem stałym o gęstości 10 mA/m^2 i napięciu równym 24 V [30, 79]. W pierwszym etapie (trwającym od 1 do 6 miesięcy) następowało obniżenie wilgotności muru do poziomu poniżej 10% wilgotności masowej. To pozwalało w kolejnym kroku – wykorzystując instalacje elektroosmotyczną jako działanie wspomagające – wprowadzić w strukturę muru hydrofobizujący środek iniekcyjny [132].

Otwory iniekcyjne o promieniu 20-26 mm wiercono w maksymalnym rozstawie co 25 cm i kącie nachylenia do poziomu $15\text{-}45^\circ$ (Rys. 4.2, Rys. 4.3). W przypadku murów o podwyższonej wilgotności zalecano zwiększać zagęszczenie nawiertów lub stosować dwa rzędy otworów (mijankowo). W przypadku murów o znacznej grubości instalację oraz nawierty wykonywano z obu stron muru.

Opróżnienie wolnych przestrzeni w murze (szczególnie mikrokapilar) z wody pozwalało wprowadzić preparat iniekcyjny metoda grawitacyjną (wspomagana instalacja EI), choć dopuszczano stosowanie iniekcji ciśnieniowej. Po zakończeniu procesu nasączenia przegrody instalacja elektroiniekcyjna stawała się zbędna – blokadą przeciwwilgociową stawała się warstwa zahydrofobizowanego muru [132].

4.1.3 Metoda termoiniekcji

W metodzie termoiniekcji, podobnie jak w przypadku elektroiniekcji, pierwszym etapem prac było osuszenie strefy iniekcji do poziomu poniżej 10% wilgotności masowej. Jednakże w tym wypadku osuszanie prowadzono umieszczając w nawierconych uprzednio otworach urządzenia osuszające termodyfuzjnie mur [74]. Otwory średnicy 20 mm nawiercano w maksymalnym odstępie co 20 cm w postaci jednej lub dwóch siatek, przy czym drugi rząd z przesunięciem o połowę rozstawu otworów (Rys. 4.4).



Rys. 4.4 Schemat usytuowania odwiertów w metodzie termoiniekcji (rys.: [84])

Pierwszy rząd nawiercano na głębokość muru pomniejszoną o 15 cm, drugi do głębokości 25 cm [30]. W pierwszy rząd otworów wprowadzano urządzenie termowentylacyjne, które składało się z ułożo-

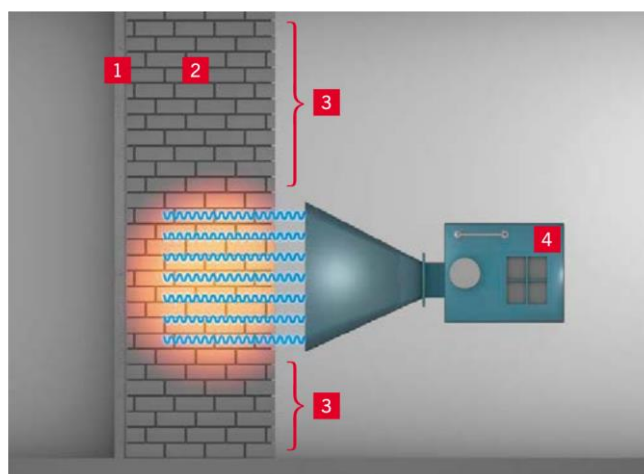
nych w grupy i podłączonych do transformatora zasilającego elementów grzejnych, na które z kolei składały się grzałki oraz rurki, przez które w wprowadzano w nawierty gorące powietrze [74]. Ogrzanie muru w strefie iniekcji powodowało dodatkowo zmniejszenie lepkości preparatu iniekcyjnego [84].

W kolejnym etapie w nawiercone otwory wprowadzano w sposób grawitacyjny lub ciśnieniowy środek hydrofobizujący. W celu ułatwienia penetracji preparatu iniekcyjnego, nawierty wykonywano pod kątem. Do hydrofobizacji stosowano pierwotnie preparat z żywic silikonowych rozcieńczonych w rozpuszczalnikach na bazie węglowodorów aromatycznych lub alifatycznych. Po ok 24 h od wykonania hydrofobizacji w otworach ponownie umieszczano urządzenia termodyfuzyjne, co pozwalało na przyspieszenie odparowania rozpuszczalników oraz utwardzenie substancji hydrofobizujących w osuszonym murze [74, 79].

Metoda termoiniekcji postrzegana była jako korzystniejsza od metody elektroiniekcji, głównie z uwagi na następujące aspekty [84]:

- brak konieczności stosowania kosztownej instalacji elektrycznej (elektrod, przewodów i urządzeń zasilających,
- zmniejszenie o 1/3 ilości wykonywanych nawiertów,
- brak konieczności wykonywania bruzd,
- zwiększony promień penetracji preparatu uzyskany dzięki obniżeniu jego lepkości,
- wielokrotne wykorzystywanie urządzenia termowentylacyjnego,
- prowadzenie prac w sposób ciągły.

Metoda termoiniekcji została udoskonalona w roku 2015 [76]. W przypadku jej zmodyfikowanej wersji, sposób osuszania i zabezpieczania murów przed ponownym zawilgoceniem polega na wykonaniu w murze otworów, usytuowanych poziomo do podłoża. W otwory te wprowadza się urządzenia termowentylacyjne (różnica w budowie urządzenia grzewczego, w porównaniu do pierwotnej metody, polega na tym, że grzałki objętościowe zastąpiono grzałkami liniowymi) i osusza aż do osiągnięcia wilgotności w otoczeniu otworów poniżej 4%. W wysuszonych otworach montuje się iniektory, za pomocą których wtłacza się pod ciśnieniem mikroemulsję silikonową dozowaną z pompy. Sposób jest realizowany bez konieczności powtórnej osuszania [74].



Rys. 4.5 Osuszanie muru w strefie iniekcji metoda mikrofalową (rys.: [114])
1) tynk, 2) zawilgocony mur, 3) dyfuzja pary wodnej, 4) generator

Pewną odmianą termoiniekcji jest iniekcja z mikrofalowym osuszeniem wstępnym. W tym wypadku w celu wstępnego osuszenia muru w strefie iniekcji wykorzystywane jest zjawisko zamiany pola elektromagnetycznego w zakresie promieniowania mikrofalowego na energię cieplną. Znajdujące się

w silnym polu elektromagnetycznym molekuly zaczynają drgać z tą samą częstotliwością. Na skutek drgań następuje wydzielanie się ciepła w ilości proporcjonalnej do współczynnika strat dielektrycznych suszonego materiału. Koncentracja absorbowanej energii zależy także od pojemności cieplnej i stałej dielektrycznej materiałów. Suszarki mikrofalowe działają na częstotliwości około 2,45 GHz, dzięki czemu możliwe jest wnikanie fal w materiał i transport niezbędnej ilości energii. Przenikające przez suszony materiał mikrofałe są stosunkowo słabo tłumione i silnie pochłaniane przez wodę, w której następuje szybki wzrost temperatury. Odpowiednio zbudowany emitor fal elektromagnetycznych powoduje, że rozkład temperatury w przekroju muru sprzyja transportowi wilgoci od środka do powierzchni suszonej przegrody (Rys. 4.5). Ważną cechą emisji mikrofalowej jest możliwość termicznego niszczenia występujących w strefie iniekcji czynników biologicznych (np. grzybów pleśniowych) [96].

4.1.4 Iniekcja krystaliczna

Opracowana pod koniec lat osiemdziesiątych ubiegłego wieku metoda iniekcji krystalicznej wykorzystuje tzw. „moką ścieżkę” oraz zjawisko samoorganizacji kryształów w postaci współcentrycznych pierścieni (Fot. 4.1). Metoda ta nie przewiduje wstępnego osuszania ani odsalania murów – zakłada wręcz wykorzystanie cieczy kapilarnych jako drogi do penetracji, a w dalszej kolejności do uszczelnienia porów i kapilar materiału budowlanego. Otwory iniekcyjne, najkorzystniej o średnicy 20 mm i długości równej grubości muru pomniejszonej o 5-10 cm, wierci się w odstępach co 10 do 15 cm, poziomo lub pod kątem 15-30°. Następnie w nawiercone otwory wlewa się, w zależności od grubości muru, po ok. 0,25-0,50 litra wody w celu lepszego zwilżenia muru w strefie iniekcji oraz usunięcia (wyplukania) pozostałości zwiercin. Następnie grawitacyjnie wprowadzony zostaje wodny roztwór cementu portlandzkiego z 15% dodatkiem opracowanego specjalnie aktywatora krzemianowego. Powoduje to penetrację do kapilar zasilanych wodą związków typu polikrzemianu wapniowego oraz ich stopniową krystalizację [127, 128].



Fot. 4.1 Efekt iniekcji krystalicznej – współcentryczne pierścienie (fot.: [128])

Metoda iniekcji krystalicznej jest prawdopodobnie najczęściej krytykowaną metodą iniekcji w środowiskach naukowych i inżynierskich. Przede wszystkim negatywna ocenie poddawane jest wprowadzanie w strukturę przegrody wraz z roztworem iniekcyjnym szkodliwych soli rozpuszczalnych, co stanowi dodatkowe zagrożenie dla budynku [156]. Negowana jest również zasada działania przepony poprzez tworzenie się w murze cylindrów z nierozpuszczalnych kryształów – cylindry te bowiem musiałyby być ustawione prostopadle do gruntu, a tym samym wilgoć mogłaby wnikać do wnętrza cylindrów [77].

Obserwacje budynków, w których wykonano iniekcję tą metodą nie potwierdziły jej skuteczności, natomiast badania prowadzone na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika w Toruniu, Politechnice Krakowskiej, Politechnice Warszawskiej oraz Akademii Rolniczo-Technicznej w Olsztynie wykazały brak odpowiedniej penetracji preparatu iniekcyjnego (co uniemożliwia powstanie bariery przecinającej kapilarny transport wilgoci) oraz brak obniżenia wilgotności cegieł zabezpieczonych metodą iniekcji krystalicznej. Z drugiej strony odnotowano intensywną korozję zainiektowanego materiału oraz wydatny wzrost obecności szkodliwych soli budowlanych (porównaj: Fot. 4.2) [30, 77, 156, 195]. Podobnie jak w przypadku metod magnetokinetycznych, podstawy teoretyczne, wyniki badań laboratoryjnych oraz praktyczne zastosowania w budynkach nie pozwalają potwierdzić słuszności przyjmowanych założeń teoretycznych, a przede wszystkim nie są skuteczne, czyli nie prowadzą do obniżenia zawilgocenia murów [77].



Fot. 4.2 Stan przegrody po dwóch latach od wykonania iniekcji krystalicznej (fot.: [156])

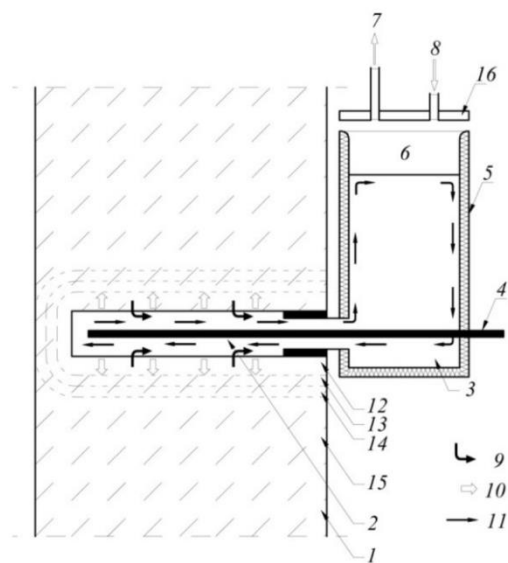
4.1.5 Parafinowa iniekcja termohermetyczna

Drugą, obok termoiniekcji, nieizotermiczną metodą iniekcyjną jest opatentowana w roku 2007 metoda parafinowej iniekcji termohermetycznej [197–199]. Inspiracją dla opracowania technologii były stosowane już w Starożytnym Rzymie rozwiązania polegające na impregnacji termicznej rzymskich akweduktów przy zastosowaniu naturalnych cerezyn oraz ozokerytu. Metoda iniekcji termohermetycznej łączy obróbkę cieplną z impregnacją. W wykonane w zawilgoconym murze otwory wiertnicze wprowadzony zostaje termoplastyczny kompozyt wosków naftowych. Po wstępnym nagrzaniu muru następuje, w układzie hermetycznym, sterowane rozprężenie parowo-powietrznej mieszanki oraz rozpoczyna się nasączenie przegrody. Środek iniekcyjny po schłodzeniu przechodzi w stan stały, tworząc nieprzepuszczalną przeponę strukturalną charakteryzującą się dodatkowo właściwościami hydrofobowymi. W metodzie tej wykorzystuje się specjalnie zaprojektowane urządzenie, tzw.

termopaker (Fot. 4.3). Pełni ono funkcję grzewczą oraz służy jako hermetyczny zasobnik podawczy i wentyl do regulacji ciśnienia (Rys. 4.6).



Fot. 4.3 Termopakery (fot.: R. Wójcik)



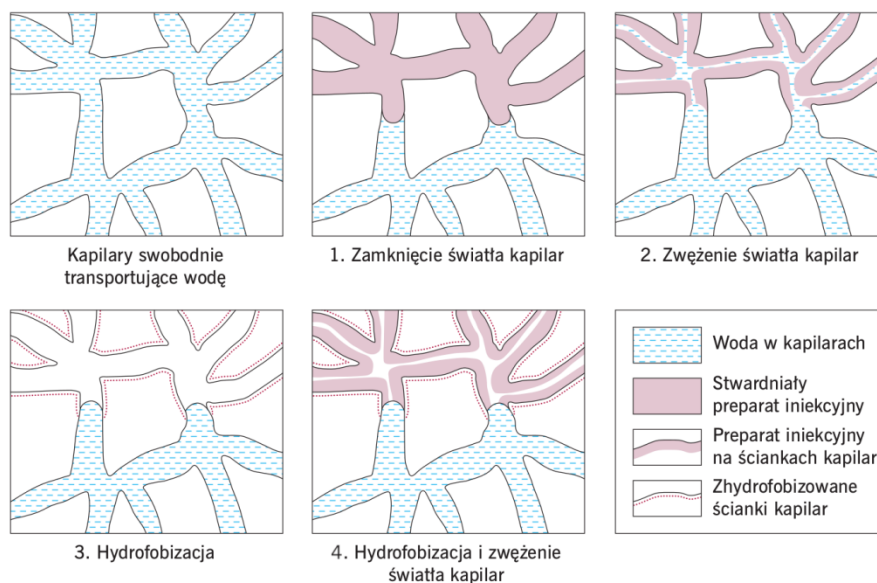
Rys. 4.6 Schemat technologii odtwarzania izolacji strukturalnych metodą iniekcji termohermetycznej (rys.: [201])
 1) mur, 2) otwór wiertniczy, 3) termoplastyczny iniekt, 4) element grzewczy, 5) termoizolacja zasobnika, 6) zasobnik, 7) odprowadzenie pary wodnej wypływającej przeciwnie do kierunku przepływu, 8) króciec doprowadzający sprężone powietrze oraz podciśnienie, 9) transport pary wodnej, 10) transport iniektu, 11) cyrkulacja iniektu, 12) strefa konwekcji iniektu, 13) strefa dyspersji iniektu, 14) strefa kondensacji pary wodnej (korek wodny) strefa nienasycenia wodą, 15) szczelinowe przepływy pary wodnej, 16) pokrywa hermetyczna zasobnika z zaworem bezpieczeństwa

4.2 Technologia iniekcji – zasada działania

Aplikacja preparatu iniecyjnego może być prowadzona na trzy sposoby: penetracyjny, ciśnieniowy i pulsacyjny w postaci aerozolu [193, 197]. Technologia iniekcji najczęściej stosowana jest do wykonywania w murach wtórnych hydroizolacji poziomych przeciw wilgoci podciąganej kapilarnie. Rzadziej stosowana jest w celu odtwarzania izolacji pionowych (iniekcja strukturalna oraz kurtynowa) czy też uszczelniania rys oraz złączy [115, 122, 123, 214, 216].

Aktualny stan technologii odtwarzania izolacji poziomych opisuje znowelizowana w 2015 roku instrukcja nr 4-10-15/D [211] (wcześniej 4-4-04/D) niemieckiej organizacji WTA czyli Naukowo-Technicznego Stowarzyszenia na rzecz Konserwacji Budynków oraz Ochrony Zabytków (niem. *Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege*). Zasadą działania iniekcji chemicznej jest w tym wypadku stworzenie ciągłej warstwy przerywanej podciąganie kapilarne, oraz uzyskanie w strefie muru nad przeponą (po pewnym czasie – dzięki wymianie wilgoci z otaczającym otoczeniem) obszaru o normalnej wilgotności (wilgotności równowagowej) [45, 211]. Aby osiągnąć stan wilgotności równowagowej nie jest jednak konieczne całkowite zahamowanie podciągania kapilarnego wilgoci w murze [211]. Należy również zwrócić uwagę na fakt, że wtórna izolacja pozioma wykonana tą metodą, nie stanowi bariery przeciw wodzie napierającej (działającej

pod ciśnieniem). Przepona powinna być zatem wykonana co najmniej 30 cm powyżej poziomu terenu lub najwyższego poziomu wód gruntowych.



Rys. 4.7 Schematyczne przedstawienie zasady działania środków iniekcyjnych wg WTA 4-10-15/D (rys.: [211])

Bez względu na sposób stosowanej technologii wyróżnia się cztery różne zasady działania iniekcyjnych środków chemicznych [193, 197, 211] (porównaj: Rys. 4.7):

- zamknięcie (zatkanie) światła kapilar – substancje czynne osadzają się w układzie porów częściowo wypełnionych wodą w taki sposób, że pory zostają całkowicie zablokowane, uniemożliwiając tym samym kapilarny transport wilgoci;
- zwężenie światła kapilar – substancje czynne osadzają się w układzie porów w taki sposób, aby zredukować promień ich przekroju. Środek ten ma na celu przekształcenie porów w mniejsze od porów określanych jako kapilarne lub włosowate, czyli o promieniu mniejszym od 10^{-7} m, które nie są dostępne dla wody kapilarnej lub w których prędkość podciągania zbliża się do „zera”;
- hydrofobizację – substancje czynne (tzw. środki hydrofobowe) osadzają się na ścianach naczyń włosowatych i w połączeniu z materiałem budowlanym tworzą niezwilżalną (wodoodporną) warstwę (kąt zwilżania $\theta \geq 90^\circ$), w wyniku czego transport kapilarny wody zostaje uniemożliwiony;
- połączenie zwężenia naczyń włosowatych i hydrofobizacji, względnie zamknięcia światła kapilar z ich jednoczesną hydrofobizacją.

Aby utworzyć funkcjonalną przeponę przerywającą podciąganie kapilarne, preparaty iniekcyjne muszą nie tylko zostać równomiernie rozprowadzone w całym przekroju iniektowanej przegrody, ale również dotrzeć do wszystkich porów dostępnych dla wody. Z tego powodu muszą one wykazywać następujące cechy [193]:

- niską lepkość,
- niską masę cząsteczkową,
- kompatybilność z wodą,
- kompatybilność z solami,
- rozmiar cząstek $< 10^{-7}$ m.

Do wykonywania izolacji poziomymi metodami iniekcyjnymi były i/lub są stosowane preparaty o różnorodnym składzie chemicznym. Przy czym najpowszechniej stosowane są obecnie środki iniekcyjne oparte na nieorganicznych i organicznych związkach krzemu, takie jak:

- krzemiany alkaliczne,
- metylokrzemiany alkaliczne,
- żywice metasilikonowe,
- silany/siloksany,
- mikroemulsje silikonowe (SMK),
- kremy iniekcyjne.

Spośród innych środków iniekcyjnych wymienić należy

- żywice epoksydowe,
- żywice poliuretanowe,
- polimetaakrylany metylu
- parafiny i kompozyty wosków naftowych,
- emulsje bitumiczne,
- suspensje cementowe.

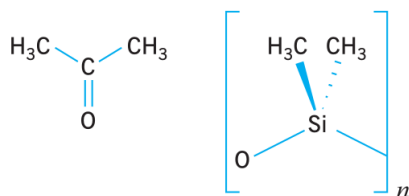
4.3 Nieorganiczne i organiczne związki krzemu

Krzem to drugi po tlenie najczęściej występujący pierwiastek na Ziemi (16,3% atomów) – w postaci związków chemicznych (głównie tlenków oraz krzemianów) wchodzi on w skład niemal wszystkich rodzajów skał oraz produktów ich wietrzenia (niemal 90% skorupy ziemskiej) [92]. W wysokiej temperaturze krzem reaguje z wodorem tworząc tlenek krzemu (IV) SiO_2 . Dwutlenek krzemu, krzemionka, jest szeroko rozpowszechnionym związkiem w przyrodzie – uwzględniając minerały, w których występuje on w formie związanej (krzemianów i glinokrzemianów), jego zawartość w skorupie ziemskiej wynosi niemal 52%, przy czym najbardziej rozpowszechnioną formą jest kwarc, rzadziej występują trydymit oraz krystobalit. Stopianie dwutlenku krzemu z wodorotlenkami oraz węglanami sodu lub potasu prowadzi do powstawania rozpuszczalnych w wodzie krzemianów alkalicznych – przez stopienie krzemionki z węglanem sodu (Na_2CO_3) otrzymuje się będący stopem krzemionki i krzemianów sodowych produkt nazywany szkłem sodowym. Ogrzewanie tego rodzaju szkła z wodą pod zwiększonym ciśnieniem pozwala uzyskać syropowaty roztwór określany potocznie szkłem wodnym sodowym. Stapiając krzemionkę analogicznie z solami potasowymi uzyskuje się szkło wodne potasowe [95].

Związki krzemoorganiczne, to związki chemiczne zawierające w swej cząsteczce atom krzemu czterowartościowego związany z atomami wodoru, węgla, fluorowca, tlenu lub azotu [177]. Krzem jako sąsiadujący w układzie okresowym z węglem, jest najbardziej do niego podobny spośród wszystkich innych pierwiastków. Podobieństwo to jest szczególnie widoczne w połączeniu z rodnikami organicznymi. Związki zawierające wiązanie krzem-węgiel, wykazują właściwości fizyczne oraz chemiczne zbliżone do związków z łańcuchem węglowym [69, 95].

Podstawowym związkiem krzemoorganicznym jest małowartościowy silan – krzemowy analog metanu. Największą rolę w praktyce odgrywają pochodne silanu o wzorze ogólnym $\text{R}_n\text{SiX}_{4-n}$, w którym R oznacza atom wodoru, grupę alkilową lub aryłową, X natomiast atom chlorowca lub grupę alkoksylową [21]. Bardziej rozbudowane związki krzemoorganiczne – polimery krzemoorganiczne określane mianem silikonów – zawierają jednocześnie charakterystyczne dla krzemu wiązania siloksanowe oraz wiązania związków organicznych typu węglowodorów, związane z atomami krzemu [16, 55]. Ich bu-

dowa chemiczna – dobrym przykładem jest podobieństwo w budowie ketonu metylowego oraz meru polidimetylosiloksanu (Rys. 4.8) [55] – oraz właściwości nadają im charakter pośredni między substancjami organicznymi a nieorganicznymi, przez co określane są polimerami półorganicznymi lub nieorganiczno-organicznymi [16, 159, 174].



Rys. 4.8 Podobieństwo w budowie ketonu metylowego (z lewej) oraz meru polidimetylosiloksanu (z prawej)

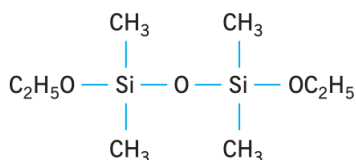
Podstawą nomenklatury związków krzemooorganicznych są nazwy odpowiednich krzemowodorów, zwanych silanami, z uwzględnieniem numeracji atomów krzemu [69, 95]:

SiH_4	silan
$\text{H}_3\text{Si-SiH}_3$	disilan
$\text{H}_3\text{Si-SiH}_2\text{-SiH}_3$	trisilan
$\text{H}_3\text{Si-SiH}_2\text{-SiH}_2\text{-SiH}_3$	tetrasilan, itd.

Obecność w związku krzemooorganicznym grupy hydroksylowej oznacza się przy użyciu końcówki -ol, np.: 2-metylodisilan-1-ol – $\text{CH}_3\text{HSi-SiH}_2\text{OH}$.

Obecność grup aminowej, nitrowej lub alkoksyłowej zaznacza się przy użyciu przedrostków amino-, nitro- oraz alkoksy-, przed którymi należy podać liczbę grup a także numery atomów krzemu, przy których znajdują się podstawniki, np.: tetraetoksysilan – $(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_4\text{Si}$

łańcuchowe oraz pierścieniowe związki krzemooorganiczne, zbudowane naprzemiennie z atomów krzemu oraz tlenu nazywa się siloksanami, np.: 1,2-dietoksy-1,1,2,2-tetrametylodisiloksan

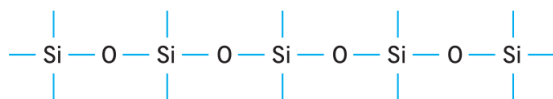


Związki krzemooorganiczne dzieli się najczęściej na dwie grupy [69, 95]:

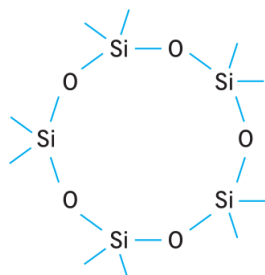
- 1) Monomery, tj. związki zawierające w cząsteczce jeden atom krzemu:
 - a) Związki zawierające wiązanie Si-C
 - i) alkilo- i arylosilany o wzorze ogólnym $\text{R}_n\text{SiH}_{4-n}$, np. metylosilan – CH_3SiH_3
 - ii) alkilo- i arylochlorosilany o wzorze ogólnym $\text{R}_n\text{SiCl}_{4-n}$, np. dimetylodichlorosilan – $(\text{CH}_3)_2\text{SiCl}_2$
 - iii) alkilo- i arylosilanole o wzorze ogólnym $\text{R}_n\text{Si}(\text{OH})_{4-n}$, np. trimetylosilanol – $(\text{CH}_3)_3\text{SiOH}$
 - b) Związki zawierające wiązanie Si-O-C
 - i) alkoksy- i aryloksysilany o wzorze ogólnym RO_4Si , np. tetrametoksysilan – $(\text{CH}_3\text{O})_4\text{Si}$
 - ii) alkoksy- i aryloksychlorosilany o wzorze ogólnym $(\text{RO})_n\text{SiCl}_{4-n}$, np. dietoksychlorosilan – $(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_2\text{SiCl}_2$
 - iii) alkoksy- i aryloksysilanole o wzorze ogólnym $(\text{RO})_n\text{Si}(\text{OH})_{4-n}$, np. trietoksysilanol – $(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_3\text{SiOH}$
- 2) Oligomery i polimery, tj. związki zawierające dwa lub więcej atomów krzemu
 - a) Związki o wiązaniu Si-Si, np. trisilan – $\text{H}_3\text{Si-SiH}_2\text{-SiH}_3$

b) Związki o wiązaniu Si-O-Si, czyli siloksany

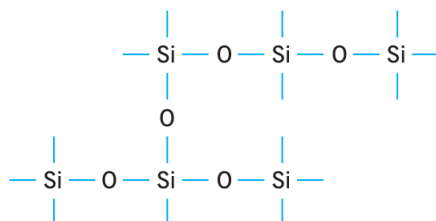
i) siloksany łańcuchowe



ii) siloksany pierścieniowe

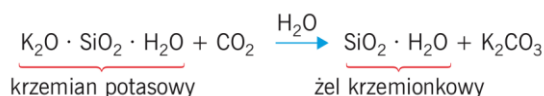


iii) siloksany rozgałęzione

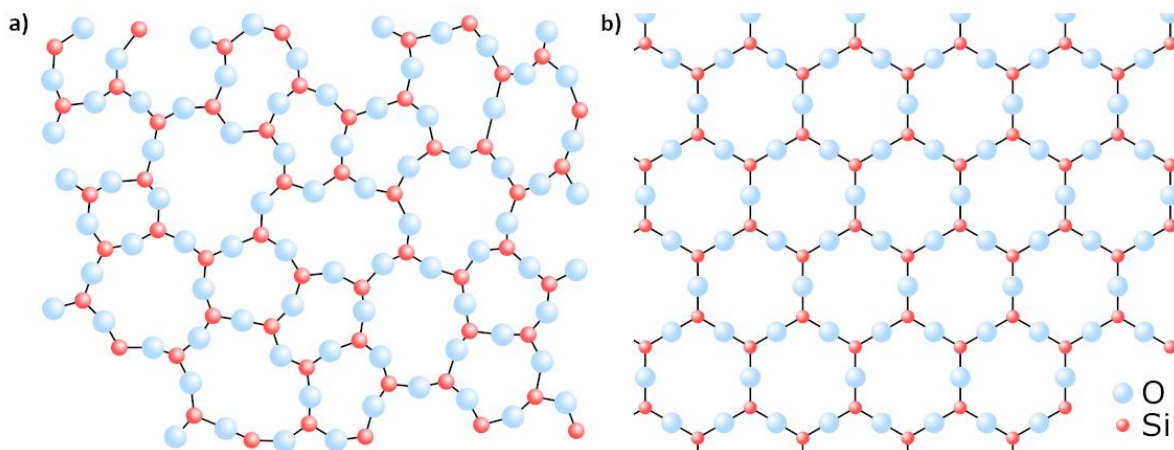


4.4 Preparaty iniecyjne na bazie związków krzemu

Krzemiany alkaliczne (alkalisilikaty), czyli szkła wodne sodowe, potasowe lub litowe stosowane są z różnym powodzeniem od lat pięćdziesiątych ubiegłego wieku, aż do dzisiaj. Mimo swoich ograniczeń wciąż pozostają w użyciu dzięki dostępności oraz stosunkowo niskiej cenie. O ile w przeszłości stosowano głównie środki na bazie sodu, obecnie, nawet jeśli rzadko, stosuje się krzemiany potasu lub szkło wodne potasowe [193]. Alkalisilikaty w wyniku reakcji z dwutlenkiem węgla zawartym w powietrzu przeobrażają się w amorficzny żel krzemionkowy (porównaj: Rys. 4.9). Proces wytrącania żelu krzemionkowego z roztworu szkła wodnego nosi nazwę koagukacji [95] – w przypadku szkła wodnego potasowego reakcja ta przebiega następująco [196]:

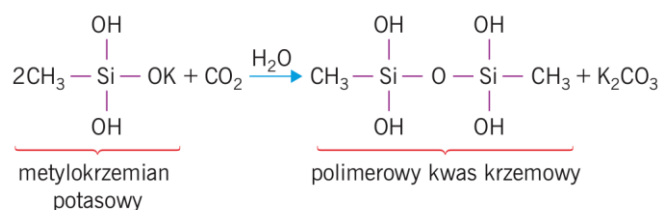


Poprzez odkładanie się żelu krzemionkowego w porach i kapilarach dochodzi do ich zwężenia, a w sprzyjających warunkach nawet do ich zatkania [211]. Problematyczne w przypadku zastosowania szkła wodnego jest zapewnienie dostępu dwutlenku węgla, szczególnie w przypadku stosunkowo często spotykanych w starszych budynkach ścianach o znacznej grubości oraz wysokim stopniu przesiąknięcia wilgocią. Warunkiem trwałości przepony wykonanej przy zastosowaniu alkalisilikatów jest stały dostęp wilgoci, bez którego dochodzi do skurczu żelu krzemionkowego i powstawiania tzw. wtórnych kapilar. Dodatkową wadą tego typu środków jest fakt, iż w produkcie ubocznym powyższej reakcji chemicznej jest sól łatwo rozpuszczalna w wodzie, węglan potasu. W związku z wysokim stężeniem w powietrzu innych tlenków kwasowych mogą tworzyć się również siarczany i azotany, które mogą krystalizować w porach prowadząc do destrukcji muru, jak również prowadzić do higroskopijnego zawilgacania przegrody [95].



Rys. 4.9 Amorficzna budowa żelu krzemionkowego (a) i krystaliczna budowa krzemionki (b) (rys.: [80, 95])

Metylokrzemiany alkaliczne (alkalimetylosilikonaty) – to rozpuszczalne w wodzie sole kwasu alkilkrzemowego, przy czym najczęściej stosowanym jest kwas metylokrzemowy. Środki te, również w wyniku reakcji z dwutlenkiem węgla, prowadzą do powstania polimetylowego kwasu krzemowego oraz węglanów, wg reakcji:



Polimetylowy kwas krzemowy prowadzi do hydrofobizacji światła kapilar. Podobnie jak w przypadku krzemianów alkalicznych problematyczne jest zapewnienie dostępu dwutlenku węgla oraz powstawanie szkodliwych soli budowlanych. Z tego powodu nie zaleca się stosowania w metylokrzemianów alkalicznych w grubych murach o wysokim poziomie zawilgocenia. Wadą tego typu środków są również ich silne właściwości żrące – produkty oferowane w handlu wykazują działanie żrące porównywalne do 20% ługu potasowego [45].

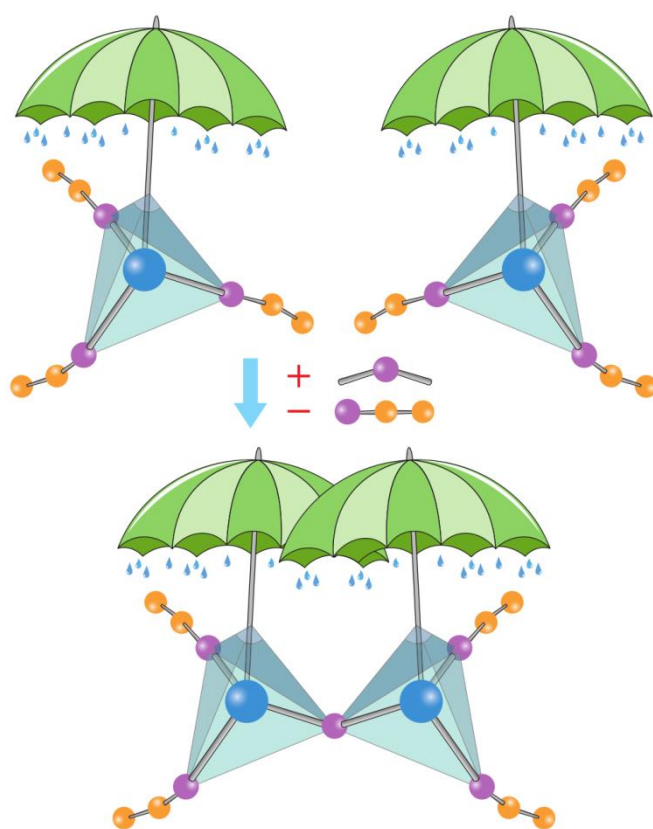
Rozwiązaniem, które również wykorzystuje działanie kwasu polimetylokrzemowego polega na zastosowaniu w miejsce metylokrzemianów alkalicznych związków propylu. W tym wypadku do powstania kwasu polimetylokrzemowego, a tym samym do hydrofobizacji muru, dochodzi bez udziału dwutlenku węgla. Dzięki temu iniekcję można prowadzić również w grubych murach o znacznym zawilgoceniu. Wadą tych produktów jest powstawanie ubocznych produktów reakcji w postaci szkodliwych soli budowlanych oraz szybki przebieg reakcji. Choć w pewnych sytuacjach szybki mechanizm działania może być postrzegany jako zaleta, to z drugiej strony stanowi poważne zagrożenie dla całkowitego rozprowadzenia się iniektu w murze (skutkuje ograniczoną penetracją).

Kombinacja krzemianów oraz metylokrzemianów alkalicznych – połączenie obu wyżej wymienionych środków prowadzi do zwężenia światła kapilar przy ich jednoczesnej hydrofobizacji. W pierwszym etapie działania takiej mieszanki dochodzi do odłożenia się w kapilarach żelu krzemionkowego, co prowadzi do ich zwężenia, a następnie do odsychania strefy muru położonej powyżej utworzonej przepony. Spadek wilgotności powoduje z kolei uaktywnienie hydrofobizujących właściwości metylokrzemianu. Hydrofobizacja pozwala zapewnić działanie przepony również w przypadku skurczu żelu

krzemionkowego, który w przypadku zastosowania wyłącznie krzemianów, niweczy efekt osuszenia muru.

Żywice metasilikonowe były jednym z najpopularniejszych środków iniekcyjnych w Polsce pod koniec XX w. (porównaj: Rozdział 4.1) [76]. Środki te powodują hydrofobizację światła kapilar i nie wymagają dostępu dwutlenku węgla. Dzięki temu mogą być z powodzeniem stosowane również w przypadku murów o dużej grubości. Jednakże w przypadku murów o bardzo wysokim stopniu przesiąknięcia wilgocią zaleca się kombinację ze środkiem iniekcyjnym zewężającym lub zamykającym światło kapilar, ponieważ w takim przypadku wytworzenie skutecznej przepony w jedynie w wyniku hydrofobizacji jest trudne do osiągnięcia [193].

Silany/siloksany – to rozpuszczalne w węglowodorach związki atomów krzemu i wodoru, stosowane jako środki hydrofobizujące. Dzięki specyficznej strukturze silany w znacznym stopniu poprawiają przyczepność między materiałami organicznymi i nieorganicznymi, zapewniając ochronę przed przenikaniem wody. Niewielki rozmiar cząstek pozwala również na dobrą penetrację w materiałach budowlanych [193]. Wadę tych środków stanowi fakt, że substancje aktywne reagują z wodą, więc początkowo stosowano je wyłącznie w produktach bezwodnych, zawierających rozpuszczalniki organiczne, które mogą być szkodliwe dla zdrowia i/lub środowiska, przez co wymagają zastosowania zwiększonych środków ochronnych podczas aplikacji. Wraz ze wzrostem świadomości ekologicznej w latach 70 i 80 XX w. dążono do zastąpienia rozpuszczalników organicznych mniej niebezpiecznymi substancjami, co udało się dzięki stabilizacji substancji aktywnych w roztworze wodnym za pomocą emulgatorów [167].

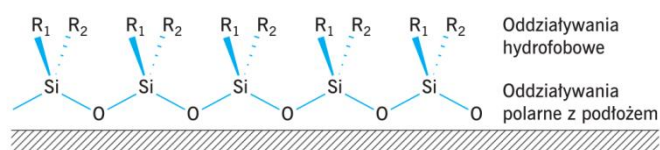


Rys. 4.10 Powstawanie siloksanu (wiązania Si-O-Si) z silanów (rys.: [167])

Powszechnym produktem końcowym tych substancji po utwardzeniu jest pokrywająca pory powłoka z żywicy silikonowej. Reakcja powstawania żywicy silikonowej może wyglądać następująco [98]:

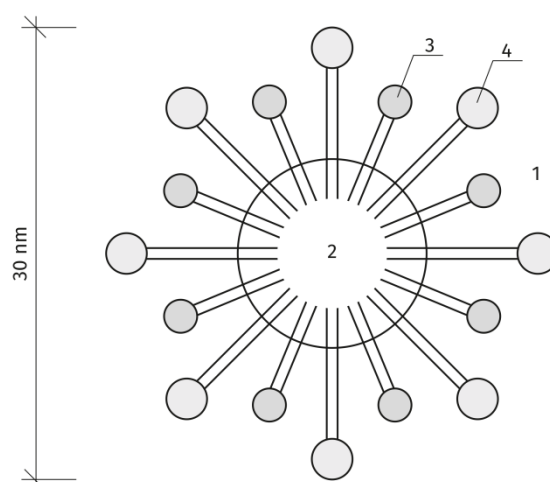


Bez względu na rodzaj zastosowanej substancji czynnej – siloksany stanowią bowiem jedynie większą „akumulację” silanów (Rys. 4.10) [167] – silny efekt hydrofobizacji wynika z faktu, że powstający polisiloksan wiąże się z podłożem w taki sposób, że grupy alkilowe, są od niego skierowane jak najdalej (Rys. 4.11) [21].



Rys. 4.11 Efekt tzw. hydrofobowej szczotki molekularnej (rys.: [21])

W latach 90 XX w. opracowane zostały koncentraty mikroemulsji silikonowych (określane również jako SMK, od ang. *Silicone Mikroemulsion Concentrates*) [64]. Podobnie jak silany i siloksany wykazujące działanie hydrofobizujące [46]. Są to czyste silany lub modyfikowane związki siloksanów dostarczane w formie koncentratu. Podobnie jak klasyczne emulsje SMK stanowią układ dwufazowy typu olej w wodzie [21]. SMK nie zawierają rozpuszczalników organicznych ani alkaliów oraz charakteryzują się niską lepkością. Są to płyny bezwonne i przezroczyste – średnica cząstek zemułgowanych (ok. 10^{-9} do 10^{-10} m; Rys. 4.12) jest bowiem nawet o dwa rzędy mniejsza niż w emulsjach silikonowych (ok. 10^{-8} do 10^{-9} m) i w odróżnieniu od nich, w mikroemulsjach nie zachodzi rozpraszanie światła [21]. Po dodaniu do wody tworzą one stabilne drobnocząsteczkowe mikroemulsje silikonowe. Wielkość cząsteczek pozostaje niezmienna również wówczas, gdy koncentrat zostanie wymieszany z wodą [46]. Mikroemulsje silikonowe są układami nietrwałymi – w obecności wody zachodzą reakcje hydrolyzy oraz polikondensacji, co prowadzi do powstawania coraz większych cząsteczek. Natomiast szybkość tych reakcji jest na tyle mała, że mikroemulsje mogą być używane przez minimum 24 godziny [21].



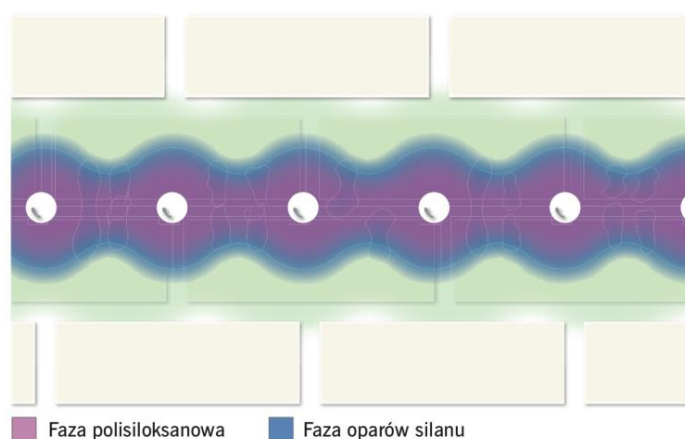
Rys. 4.12 Pojedynczy agregat mikroemulsji silikonowej (rys.: [196])
1) woda, 2) silan/siloksan/polisiloksan, 3) silan/siloksan, 4) funkcyjny polisiloksan

Mikroemulsje silikonowe nie prowadzą również do powstawiania szkodliwych soli budowlanych. Ich wadą jest natomiast konieczność zapewnienia alkalicznego otoczenia w trakcie prowadzenia iniekcji. Ponieważ w przypadku starego budownictwa nie zawsze jest to możliwe, wymagane może być dodatkowe zastosowanie materiału alkalicznego. W takim wypadku należy przeprowadzić iniekcję wielostopniową (zobacz: Rozdział 4.6) [193].



Rys. 4.13 Główne okresy stosowania hydrofobizujących preparatów iniekcyjnych (rys.: [64])

Opracowane na przełomie wieków kremy iniekcyjne to efekt dalszego rozwoju produktów na bazie silanów/siloksanów, nie zawierających rozpuszczalników organicznych (Rys. 4.13) [64]. Produkty te posiadają niską lepkość oraz charakterystyczną konsystencję gęstego kremu. Dzięki tym właściwościom środek iniekcyjny bardzo wolno wnika w strukturę iniektowanej przegrody, przez co uzyskuje się wyraźnie lepszą penetrację. W odróżnieniu od płynów iniekcyjnych, substancja czynna preparatów o konsystencji kremu rozchodzi się w murze na dwa sposoby: na drodze dyfuzji (wyrównania koncentracji) oraz ewaporacji (parowania) – transport zachodzi zatem zarówno w zawartej w porach materiale wody, jak i powietrza (Rys. 4.14).



Rys. 4.14 Penetracja środka iniekcyjnego w postaci kremu (rys.: [64])

Za sprawą wysokiej zawartości substancji czynnej (powyżej 65%) produkt ten może być stosowany w przegrodach o stopniu zawilgocenia zbliżonym do stanu pełnego nasycenia wodą. Natomiast dzięki tiksotropowej konsystencji kremy iniekcyjne mogą być aplikowane w nawierty wykonane poziomo

(lub pod jedynie niewielkim nachyleniem) bez ryzyka wyciekania środka iniekcyjnego (Fot. 4.4) jak również stosowane w murach zawierających rysy i/lub wolne przestrzenie bez konieczności wstępnej iniekcji (wypełnienia pustek) suspensją cementową. Ponadto środki te mogą być stosowane w materiałach o neutralnym pH [46].



Fot. 4.4 Aplikacja kremu iniekcyjnego (fot.: autor)

Jako wada kremów iniekcyjnych może być postrzegana wysoka zawartość substancji czynnej (silanów/siloksanów), która w pewnych sytuacjach może wpływać niekorzystnie na niektóre materiały, takie jak tworzywa sztuczne czy masy bitumiczne. Ponadto, z uwagi na fakt, iż kremy iniekcyjne zdecydowanie lepiej rozprzestrzeniają się w murach o wysokim stopniu zawilgocenia, iniekcja w przegrodach o niewielkiej wilgotności może nie przynieść oczekiwanego efektu. W takim wypadku otwory iniekcyjne należy wstępnie napełnić wodą.

W ostatnich latach na rynku pojawiły się kremy iniekcyjne nowej generacji, które charakteryzują się tzw. odwróconą recepturą – tj. w odróżnieniu od dotychczas stosowanych kremów charakteryzują się układem emulsji W/O (woda w oleju). Krem taki charakteryzuje się mniejszą zawartością substancji czynnej, a specyfika emulsji pozwala na uzyskanie szybszej penetracji preparatu w impregnowanej przegrodzie.

4.5 Pozostałe środki iniekcyjne

Żywice epoksydowe – są to dwukomponentowe żywice organiczne, wprowadzane w mur pod ciśnieniem w celu zamknięcia światła kapilar. Po wymieszaniu komponentów (żywicy i utwardzacza) środek wprowadzany jest w formie płynnej w mur, gdzie w czasie od kilku minut do wielu tygodni (w zależności od składu chemicznego oraz temperatury) dochodzi do twardnienia żywicy na skutek polimeryzacji lub poliaddycji. Żywice epoksydowe charakteryzują się niskim skurczem, dzięki czemu zapewniają trwałe uszczelnienie kapilar. Jednakże ich wadę stanowią stosunkowo wysoka lepkość oraz wrażliwość na działanie pary wodnej, co utrudnia równomierne rozprowadzenie iniektu w strukturze wilgotnego materiału.

Żywice poliuretanowe – podobnie jak epoksydowe, żywice poliuretanowe to produkty dwukomponentowe, wprowadzane w strukturę muru pod ciśnieniem, celem zamknięcia światła kapilar. Nie-

mniej charakteryzują się one niższą lepkością oraz wyższą odpornością na działanie pary wodnej. Mimo tego, w odróżnieniu od innych środków iniekcyjnych, równomierne rozprowadzenie środka w murze jest trudne do zagwarantowania. Z tego powodu produkty te stosowane są reguły jedynie do uszczelniania rys [122, 123].

Polimetaakrylan metylu – materiałem wyjściowym w tym wypadku jest kwas metakrylowy, który na drodze estryfikacji tworzy estry kwasu metakrylowego, reagujące z kolei przyspieszaczami i inicjatorami, tworząc zwężające lub zatykające światło kapilar polimery. Polimetaakrylany posiadają ograniczoną odporność na alkalia i podobnie jak żel krzemionkowy przy braku kontaktu z wilgocią ulegają znacznemu kurczeniu. Z tego powodu produkty te powinny być stosowane wyłącznie w tych przegrodach, które mają stały kontakt z wilgocią. Ponieważ w przypadku hydroizolacji poziomych stanem docelowym jest efekt osuszenia muru, polimetaakrylany raczej rzadko znajdują zastosowania w przypadku izolacji przeciw kapilarnemu podciąganiu wody – częściej jako uzupełnienie izolacji pionowej elementów stykających się z gruntem.

Parafiny (alkany) – nasycone węglowodory, które po wprowadzeniu w strukturę muru zastygają zamykając tym samym światło kapilar. Utrudnienie w prawidłowym przeprowadzeniu procesu iniekcji stanowi konieczność utrzymywania temperatury nie mniejszej niż 80 °C w całym przekroju muru [193], co szczególnie w przypadku murów grubych wymaga znacznych nakładów pracy oraz energii, jak również skrupulatnej kontroli. Materiał ten wykorzystywany jest obecnie w metodzie parafinowej iniekcji termohermetycznej (porównaj: Rozdział 4.1.5) [197–199].

Emulsje bitumiczne – środki te wprowadzane były pod ciśnieniem w strukturę muru w celu uszczelnienia (zamknięcia) światła kapilar. O ile zastosowanie emulsji bitumicznych pozwala na stworzenie całkowicie nieprzepuszczalnej przegrody bez powstawania szkodliwych soli budowlanych, to problemem jest zapewnienie równomiernego rozprowadzenia emulsji w całym przekroju muru. W wyniku wielokrotnych niepowodzeń od wielu lat nie stosuje się już emulsji bitumicznych w celu wykonania tego typu izolacji [193].

Suspensje cementowe – jest to drobnoporowy materiał stosowany do zwężania światła kapilar. Z uwagi na wielkość cząstek oraz lepkość, które uniemożliwiają jego rozprowadzenie w powszechnie stosowanych materiałach budowlanych odnotowywano znaczne trudności z równomiernym rozprowadzeniem suspensji w strukturze iniektowanego muru – jedynie w odwiertach występuje rodzaj „wodoodpornego korkowania” [45]. Dlatego też materiał ten nie jest już stosowany w praktyce jako wyrób uszczelniający. Obecnie znajduje on zastosowanie w przypadku konieczności wykonania wstępnej iniekcji w murze zawierającym rysy oraz wolne przestrzenie, jak również do wypełnienia otworów iniekcyjnych po zakończeniu impregnacji.

W tabeli 4.1 przedstawiono charakterystykę i ograniczenia środków iniekcyjnych sklasyfikowanych w instrukcji WTA nr 4-10-15/D [211]. W praktyce budowlanej najczęściej stosowanymi środkami do wykonywania wtórnej izolacji poziomej murów metoda iniekcji chemicznej są wyroby będące kombinacją krzemianów oraz metylokrzemianów alkalicznych a także kremy iniekcyjne [124]. Kremy iniekcyjne zyskują na popularności głównie z uwagi na aplikację nie wymagającą specjalistycznego sprzętu. Coraz rzadziej stosowane są mikroemulsje silikonowe a także parafiny czy żywice. Pozostałe opisane środki nie odgrywają większej roli w praktycznych zastosowaniach.

Tabela 4.1 Charakterystyka i ograniczenia środków iniekcyjnych [193, 211]

Materiał	Zasada działania	Metoda aplikacji	Mechanizm reakcji	Wiązanie/Wysychanie	Granice zastosowania¹⁾
Krzemiany alkaliczne	zwężenie kapilar	penetracyjna ciśnieniowa	reakcja z CO ₂ twardnienie przez kondensację	sole specyficzne dla produktu	S ²⁾ ≤ 60%, cienkie przegrody
Metylokrzemiany alkaliczne	zwężenie kapilar hydrofobizacja	penetracyjna ciśnieniowa	reakcja z CO ₂ twardnienie przez kondensację	sole specyficzne dla produktu	S ≤ 60%, cienkie przegrody
Parafina	zamknięcie kapilar hydrofobizacja (opcjonalnie)	penetracyjna	krzepnięcie	brak szkodliwych dla budowli i środowiska produktów ubocznych	wymagane osuszenie i ogrzewanie przegrody
Żywice epoksydowe	zamknięcie kapilar	ciśnieniowa	poliaddycja	brak szkodliwych dla budowli i środowiska produktów ubocznych	S ≤ 45%
Żywice poliuretanowe	zamknięcie kapilar	ciśnieniowa	poliaddycja	usieciowany polimer, uwalnianie rozpuszczalników organicznych	S ≤ 75%, wymagane ciśnienie iniekcji powyżej 5 bar
Polimetakrylan metylu	zamknięcie kapilar	ciśnieniowa	polimeryzacja	brak szkodliwych dla budowli i środowiska produktów ubocznych	
Mikroemulsje silikonowe	hydrofobizacja	penetracyjna ciśnieniowa	polimeryzacja z wilgocią	brak szkodliwych dla budowli i środowiska produktów ubocznych	S ≤ 60% przy aplikacji grawitacyjnej, oraz S ≤ 75% przy ciśnieniowej, alkaliczne otoczenie
Kremy iniekcyjne	hydrofobizacja	penetracyjna	polikondensacja z wilgocią	brak szkodliwych dla budowli i środowiska produktów ubocznych	

¹⁾ Na podstawie praktyki budowlanej wg [193]; ²⁾ S – stopień przesiąknięcia wilgocią

4.6 Wykonywanie izolacji poziomej metodą iniekcji

Aby zapewnić skuteczność iniekcji, zabieg ów winien być zaplanowany oraz wykonany zgodnie z najnowszym stanem wiedzy, jak również zaleceniami producenta preparatu iniekcyjnego. Na etapie planowania należy uwzględnić m.in. jaki wpływ technologia iniekcji (średnica i rozstaw otworów oraz ew. ciśnienie aplikacji) może mieć na statykę budynku lub jego części. Aby odpowiednio dobrać środek iniekcyjny oraz sposób jego aplikacji należy ponadto uwzględnić następujące czynniki [193, 211]:

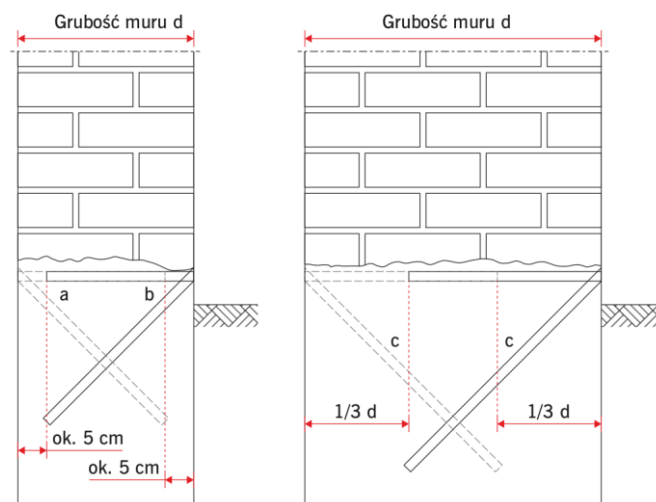
- Wpływ wody w postaci płynnej na konstrukcję
Ponieważ wtórna izolacja pozioma wykonana metodą iniekcji chemicznej nie stanowi bariery przeciw wodzie napierającej (działającej pod ciśnieniem), przepona powinna być wykonana co najmniej 30 cm powyżej poziomu terenu lub najwyższego poziomu wód gruntowych.
- Wpływ wody w postaci płynnej na konstrukcję
Ponieważ wtórna izolacja pozioma wykonana metodą iniekcji chemicznej nie stanowi bariery przeciw wodzie napierającej (działającej pod ciśnieniem), przepona powinna być wykonana co najmniej 30 cm powyżej poziomu terenu lub najwyższego poziomu wód gruntowych.
- Stopień przesiąknięcia wilgocią przegrody oraz rozkład zawilgocenia w strefie iniekcji
Przy wysokim stopniu wysycenia porów wodą odpowiednie rozprowadzenie środka iniekcyjnego w strukturze przegrody może być znacząco utrudnione (porównaj: Tabela 4.1). Na podstawie oceny stopnia zawilgocenia w strefie iniekcji należy określić rozstaw otworów, podjąć decyzję czy prowadzić iniekcję metodą grawitacyjną czy też niskociśnieniową, oraz czy wymagane jest wstępne suszenie strefy iniekcji. Przy bardzo wysokim stopniu zawilgocenia należałoby również zaplanować osuszanie końcowe [114]. W przypadku mocno zawilgoconych murów (80-95%) doskonale sprawdzają się środki iniekcyjne w konsystencji kremu (z kolei brakuje badań i certyfikatów potwierdzających ich skuteczność poniżej stopnia przesiąknięcia wynoszącego 80% [193]).
- Stopień zasolenia przegrody oraz higroskopijny stopień przesiąknięcia wilgocią
Przy wysokim stopniu zasolenia może dochodzić do zawilgocenia przegrody powyżej wykonanej przepony na skutek higroskopijnego poboru wody. W indywidualnych przypadkach, jeśli higroskopijny pobór wilgoci jest równy lub przewyższa pochłanianie kapilarne, wykonanie wtórnej hydroizolacji poziomej może wręcz okazać się bezcelowe. Wysychanie muru powyżej pasa iniekcji może ponadto powodować krystalizację szkodliwych soli, co z kolei może skutkować uszkodzeniem przegrody i/lub jej okładziny. W takim wypadku należy nie tylko zaplanować odpowiednie działania ostonowe (np. system tynków renowacyjnych [119]), ale również zastosować taki preparat iniekcyjny, który nie spowoduje wprowadzenia do przegrody dodatkowych (specyficznych dla produktu) soli.
- Struktura ściany (wolne przestrzenie, rysy, szczeliny, niejednorodność)
Na etapie diagnostyki budowli należy ustalić na ile jednorodna jest przegroda w strefie iniekcji. W przypadku występowania rys, kawern czy też warstwowej struktury muru, aby nie dopuścić do niekontrolowanych wycieków środka iniekcyjnego, konieczne może się okazać wstępne wypełnienie wolnych przestrzeni suspensją cementową lub przeprowadzenie iniekcji wielostopniowej przy zastosowaniu mikroemulsji silikonowych (SMK), względnie zastosować kremy iniekcyjne na bazie silanów lub siloksanów. Alternatywnie można zastosować metody „mostkujące” wolne przestrzenie (np. specjalne lance iniekcyjne).
- Właściwości materiału budowlanego (rodzaj, wytrzymałość, struktura porów)
Na podstawie parametrów wytrzymałościowych oraz struktury (wielkości, geometrii oraz rozkładu) porów należy określić rozstaw otworów iniekcyjnych oraz kąt ich nachylenia, jak również

określić, czy dany środek iniekcyjny ma być wprowadzony do elementu grawitacyjnie czy też pod ciśnieniem.

W ramach planowania prac iniekcyjnych należy określić co najmniej rodzaj stosowanego środka iniekcyjnego (o skuteczności potwierdzonej Krajową Oceną Techniczną lub certyfikatem WTA [106]) oraz jego zakładane zużycie, promień, rozstaw i rozmieszczenie otworów iniekcyjnych, metodę oraz czas trwania aplikacji iniektu, jak również wszelkie inne warunki brzegowe. Weryfikację założeń projektowych należy przeprowadzić wykonując iniekcję próbną na reprezentatywnym odcinku muru. Po zakończeniu iniekcji próbnej należy również – na rozłomie próbki o niewielkiej średnicy, pobranej ze strefy iniekcji (najlepiej między otworami iniekcyjnymi) – skontrolować rozchodzenie się środka iniekcyjnego w murze.

Stare, zniszczone i zasolone tynki należy usunąć do wysokości około 80 cm powyżej najwyższej widocznej lub ustalonej badaniami linii zasolenia i/lub zawilgocenia. Zabieg ten ma na celu zapewnienie odpowiednich warunków suszenia po odtworzeniu hydroizolacji budynku, niemniej można go wykonać przed lub po przeprowadzeniu iniekcji.

Do wykonywania otworów wiertniczych zaleca się stosowanie urządzeń o możliwie niskiej wibracji. Nawierty należy prowadzić w taki sposób, aby zapewnić przewidziane nachylenie oraz odległość otworów na całej grubości muru. Pył wiertniczy należy usuwać poprzez odsysanie lub przedmuchanie (niezaolejonym) sprężonym powietrzem.



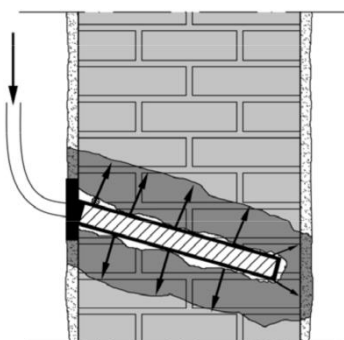
Rys. 4.15 Schemat rozmieszczenia łańcucha nawiertów w przypadku iniekcji grawitacyjnej (rys.: [211])

Do wykonywania iniekcji penetracyjnej (określanej również jako grawitacyjna lub bezciśnieniowa) stosowane są takie materiały jak krzemiany, silany, mikroemulsje silikonowe, kremy iniekcyjne, jak również odpowiednio ogrzane parafiny. Rozprowadzenie środka iniekcyjnego w murze następuje na skutek działania sił kapilarnych oraz grawitacji. Należy zwrócić uwagę na jednorodne rozprowadzenie iniektu w przegrodzie. Zużycie materiału zależy przede wszystkim od rozkładu i objętości porów w materiałach, z których wykonano mur (cegły, kamieniu i zaprawie) oraz charakteru konstrukcji murowej. Środek iniekcyjny powinien być podawany w sposób ciągły (nie wolno dopuścić do całkowitego opróżnienia zasobników), aż do momentu całkowitego wysycenia muru w strefie iniekcji, co ma zapewnić równomierne rozprowadzenie w przegrodzie oraz uzyskanie jednolitej przepony przecinającej podciąganie kapilarne wilgoci. Czas niezbędny do uzyskania pełnego wysycenia uzależniony jest od stopnia chłonności muru oraz jego wilgotności i wynosi przeciętnie od 24 do 48 godzin, a w szcze-

gólnych przypadkach do 78 godzin (Tabela 4.4). Po zakończeniu iniekcji otwory należy wypełnić (zasklepić) systemową suspensją cementową, wskazaną przez producenta.

Maksymalny (osiowy) rozstaw otworów powinien być dostosowany do chłonności muru i powinien wynosić od 10 cm do 12,5 cm. Średnica nawiertu uzależniona jest od konkretnej stosowanej metody aplikacji środka iniekcyjnego, lecz zwykle wynosi 20-30 mm. Nawiernty wykonuje się z nachyleniem uzależnionym od struktury muru oraz metody aplikacji, zazwyczaj wynoszącym 30° do 45°. Wiercenie należy jednak prowadzić w taki sposób, aby przeciąć co najmniej jedną spoinę, zaś w murach grubych (ponad 30 cm) co najmniej dwie spoiny wsporne. Głębokość wiercenia (mierzona w poziomie) powinna być o ok. 5 cm mniejsza od całkowitej grubości muru. W przypadku ścian o grubości przekraczającej 0,6 m zaleca się wiercenie z obu jej stron – głębokość nawiertu wynosi wówczas ok. 2/3 grubości muru (Rys. 4.15).

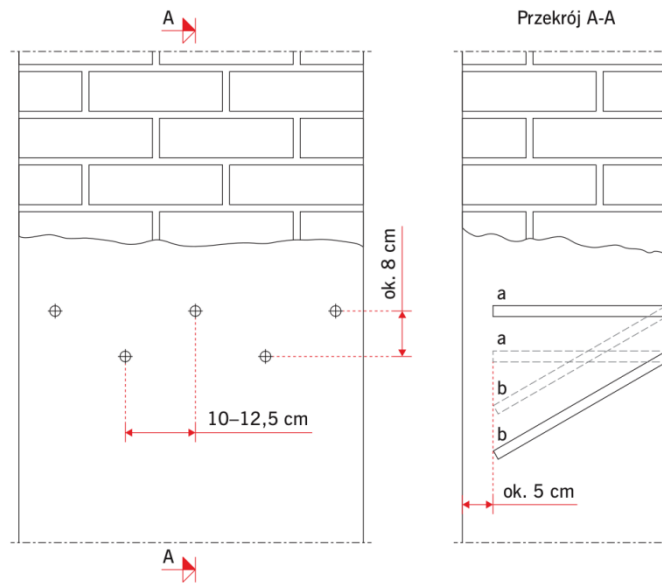
Pewną odmianą iniekcji penetracyjnej jest tzw. metoda rurki infuzyjnej (określana również metodą wałków dozujących) [14]. W metodzie tej w nawierconym otworze umieszcza się rurki infuzyjne (wałki) wykonane z materiałów kapilarnie chłonnych, które są następnie nasączone preparatem iniekcyjnym. W wyniku działania niewielkiego nadciśnienia preparat iniekcyjny wykrapla się na powierzchni rurki, a następnie jest absorbowany przez materiał budowlany. Absorpcja preparatu przez mur może również następować bezpośrednio z materiału wałka (w miejscu styku rurki z materiałem budowlanym) dzięki czemu preparat iniekcyjny. Metoda rurki infuzyjnej pozwala prowadzić iniekcję grawitacyjną w murach zawierających wolne przestrzenie, bez konieczności wcześniejszego uzupełnienia ich suspensją cementową (Rys. 4.16).



Rys. 4.16 Metoda rurki infuzyjnej (rys.: [14])

W przypadku iniekcji ciśnieniowej (niskociśnieniowej) materiał aplikowany jest przy użyciu specjalnych pomp, których zadaniem jest wytworzenie ciśnienia w celu równomiernego rozprowadzenia środka iniekcyjnego w materiale budowlanym. Średnica wykonywanych otworów powinna być dopasowana do stosowanych pakierów iniekcyjnych i wynosi zazwyczaj do 10 mm do 18 mm. Średnicę oraz usytuowanie otworów można dostosować do spoin w taki sposób, aby nie „kaleczyć” lica muru. Nawiernty mogą być wykonywane poziomo (co ułatwia wykonanie przepony i połączenie jej z innymi izolacjami) lub pod kątem do 30° (lub też innym, dostosowanym do sposobu iniekcji). Otwory przy iniekcji ciśnieniowej można wiercić jedno- lub dwurzędowo (w tym drugim przypadku odległość między rzędami otworów powinna wynosić ok. 8 cm). Osiowy rozstaw nawierntów dobierany jest na podstawie oczekiwanej minimalnej głębokości penetracji środka iniekcyjnego, powinien się jednak mieścić w zakresie między 10 cm a 12,5 cm (odejście od tej zasady wskazane jest jedynie wypadku, gdy skuteczność impregnacji została potwierdzona podczas iniekcji próbnej). Głębokość wiercenia (mie-

rzona w poziomie) powinna wynosić ok. 5 cm mniej niż całkowita grubość muru (Rys. 4.17, Tabela 4.2).



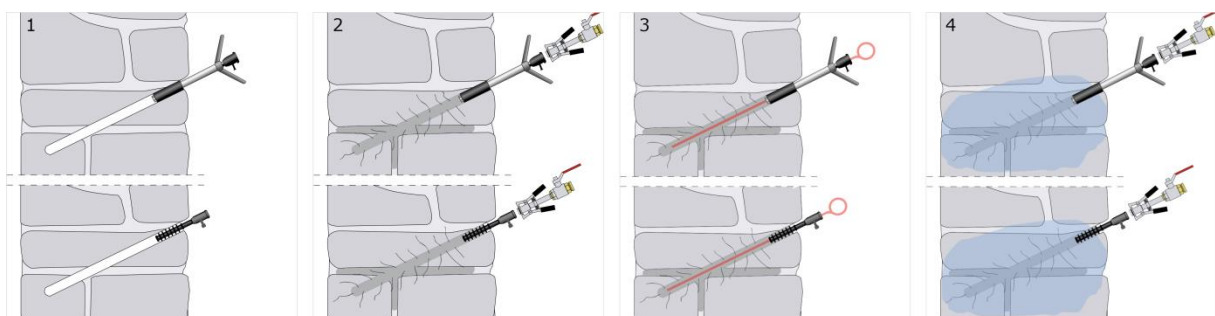
Rys. 4.17 Schemat rozmieszczenia łańcucha nawiertów w przypadku iniekcji ciśnieniowej (rys.: [211])

Tabela 4.2 Wybór sposobu wykonywania nawiertów w przypadku iniekcji ciśnieniowej [211]

Wykonywanie nawiertów	poziomo	pod kątem
Jednorzędowo (w kamieniu)	-	+
Dwurzędowo (w kamieniu)	+ (a) lub	+ (b)
Dwurzędowo (w spoinie)	+ (a)	-

Aplikacja ciśnieniowa powinna być prowadzona w sposób ciągły, a ciśnienie dopasowane do wytrzymałości konstrukcji murowej. W przypadku iniekcji dwurzędowej najpierw należy wypełnić dolny łańcuch otworów. Ciśnienie iniekcji należy utrzymywać na stałym poziomie do momentu, aż zapewnione zostanie wystarczające rozprowadzenie środka iniekcyjnego. Należy przy tym zadbać o to, aby rozkład środka iniekcyjnego w murze był na tyle, na ile to możliwe, równomierny.

Wariantami iniekcji ciśnieniowej są iniekcja wielostopniowa oraz iniekcja impulsowa – obie stosowane przy zastosowaniu koncentratów mikroemulsji silikonowych (SMK) [193].



Rys. 4.18 Iniekcja wielostopniowa (rys.: desoi.de)

1) osadzenie pakerów, 2) iniekcja suspensji cementowej (1 etap), 3) wykonanie kanału dla iniekcji mikroemulsją silikonową (tzw. łańcą testową), 4) iniekcja mikroemulsji silikonowej (2 etap)

Na iniekcję wielostopniową składają się z trzy różne etapy, stosowane w kombinacji, w zależności od rodzaju i struktury muru [14, 155, 193]:

1 etap – iniekcja suspensji cementowej w celu wypełnienia rys i wolnych przestrzeni

2 etap – iniekcja mikroemulsji silikonowej (koncentrat rozcieńczony wodą w stosunku 1:10-1:15)

3 etap – iniekcja aktywizatora alkalicznego

Należy przeprowadzić bądź etapy 1 i 2 (Rys. 4.18), bądź 2 oraz 3. Jeśli wymagane jest wstępne wypełnienie rys i pustek w murze, można zrezygnować z zastosowania aktywizatora, ponieważ wymagane środowisko alkaliczne zostanie zapewnione dzięki zawiesinie cementowej. W takim wypadku po upływie 30 do 60 minut od wprowadzenia suspensji należy przeprowadzić iniekcję mikroemulsji. W przypadku murów, w których nie stwierdzono rys i wolnych przestrzeni, nie później niż 24 godziny od iniekcji mikroemulsji silikonowej należy w te same otwory iniekcyjne zaaplikować aktywator.

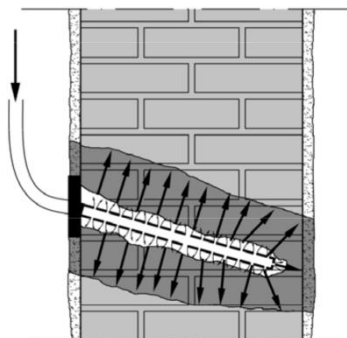
Ciśnienie iniekcji uzależnione jest przede wszystkim od wytrzymałości muru – przy wypełnianiu pustek stosuje się zazwyczaj ciśnienie rzędu 2-3 barów, natomiast mikroemulsja silikonowa podawana jest pod ciśnieniem od 3 do 6 barów. Aby zapewnić prawidłowe rozprowadzenie preparatu iniekcyjnego (mikroemulsji) w systemie kapilar, iniekcja powinna być prowadzona przez okres 10-20 minut [155].

Tabela 4.3 Przebieg iniekcji impulsowej (nastawy czasowe) [155]

Materiał	Możliwość penetracji	Faza iniekcji	Czas iniekcji [min]	Liczba impulsów	Czas przerwy [min]
Cegła	Bardzo chłonny	Wstępna	10	5	2
		Faza I	60	20	3
		Faza II	120	30	4
		Faza III	180	30	6
	Chłonny	Wstępna	15	5	3
		Faza I	60	15	4
		Faza II	150	30	5
		Faza III	210	30	7
	Mało chłonny	Wstępna	20	5	4
		Faza I	75	15	5
		Faza II	175	25	7
		Faza III	240	30	8
Kamień naturalny	Bardzo chłonny	Wstępna	18	6	3
		Faza I	60	15	4
		Faza II	150	30	5
		Faza III	180	30	6
	Chłonny	Wstępna	20	5	4
		Faza I	60	12	5
		Faza II	180	30	6
		Faza III	210	30	7
	Mało chłonny	Wstępna	25	5	5
		Faza I	90	15	6
		Faza II	210	30	7
		Faza III	240	30	8

W przypadku iniekcji metodą impulsową (pulsacyjną) środek iniekcyjny wprowadzany jest w takim wypadku do muru przez sterowane elektronicznie urządzenie impulsywne (wytwarzające ciśnienie cyklicznie), za pośrednictwem perforowanej lancy (średnica otworów perforacyjnych nie przekracza

zazwyczaj 1 mm), którą zostaje rozprowadzony w murze. Metoda ta pozwala na wykonanie iniekcji w murach zawierających szczeliny, puste przestrzenia a także w murach warstwowych bez konieczności uprzedniego ich wypełniania suspensją cementową (Rys. 4.19) [14, 45, 155].



Rys. 4.19 Iniekcja impulsowa (rys.: [14])

Zasadą działania iniekcji impulsowej jest zróżnicowanie czasu trwania impulsów i długości przerw od fazy iniekcji – czas impulsu wynosi zwykle od 0,5 do 2,5 sekundy, natomiast przerwy między nimi od 0,5 do 5 minut. W fazie początkowej stosuje się dłuższy czas trwania impulsów przy krótszych przerwach pomiędzy nimi, natomiast w dalszych etapach proporcje te ulegają odwróceniu (Tabela 4.3). Czas trwania iniekcji dla odcinka obsługiwane przez pompę (do 64 otworów iniekcyjnych) wynosi najczęściej od 5 do 10 godzin [155].

Iniekcję należy prowadzić za pomocą odpowiednich urządzeń:

- w przypadku iniekcji penetracyjnej: zasobników (Fot. 4.5, Fot. 4.6) – metoda bezpośredniego wypełniania otworów iniekcyjnych (nalewania) nie znajduje obecnie praktycznego zastosowania;
- w technologii kremów iniekcyjnych: pistoletów do mas, względnie ręcznych lub pneumatycznych pomp (Fot. 4.4) wyposażonych w lancę do podawania kremu;
- a w przypadku iniekcji ciśnieniowej: zbiorników ciśnieniowych, pomp membranowych, tłokowych lub pneumatycznych oraz odpowiednich akcesoriów, np. węży, pakerów i lanc iniekcyjnych, manometrów.



Fot. 4.5 W handlu dostępne są różnego rodzaju zasobniki wykorzystujące siłę ciężkości, ale również takie, które wykorzystują siły spójności (syfon) [171] (fot.: [193])



Fot. 4.6 W praktyce często wykorzystywane są dozowniki wykonane „metodą chatupniczą” (fot.: [126])

Należy zapewnić kompatybilność wszystkich materiałów stosowanych w procesie wykonywania wtórnej hydroizolacji poziomej, uwzględniając przewidywany sposób użytkowania obiektu – w indywidualnych przypadkach mogą być konieczne dodatkowe analizy.

Stopień przesiąknięcia wilgocią muru, wszelkie działania przygotowawcze, oczekiwane oraz rzeczywiste zużycie środka iniekcyjnego, czas iniekcji, temperatura środka iniekcyjnego, temperatura oraz wilgotność powietrza, jak również wszystkie inne warunki brzegowe powinny na bieżąco dokumentowane (zazwyczaj na odpowiednim formularzu). Porównanie powyższych parametrów z założeniami przyjętymi na etapie planowania oraz iniekcji próbnej pozwala na bieżącą kontrolę jakości prac (w trakcie ich prowadzenia).

W zależności od specyficznych warunków wykonywania prac iniekcyjnych mogą być wymagane działania towarzyszące, np.:

- wtórne izolacje pionowe – aby całkowicie oddzielić budynek od wody, obok bariery przeciw kapilarnemu podciąganiu wody, zazwyczaj należy również wykonać uszczelnienie pionowe – zewnętrzne lub od wewnątrz [110–112];
- tynki renowacyjne – zastosowanie tynków renowacyjnych umożliwia z jednej strony wysychanie ściany powyżej przepony iniekcyjnej, z drugiej akumulację szkodliwych soli budowlanych w strukturze tynku [119].

Po zakończeniu prac iniekcyjnych należy zapewnić odpowiednie warunki do osuszenia muru powyżej wykonanej przepony. Z reguły uzyskanie oczekiwanego poziomu wilgotności muru (z reguły 3-6%) następuje po upływie ok. 2 lat. W razie potrzeby należy zaplanować i przeprowadzić odpowiednia działania dodatkowe (np. metody sztucznego osuszania ścian). Kontrola skuteczności wykonanej hydroizolacji wtórnej polega zazwyczaj na wykonywaniu porównawczych pomiarów wilgotności [105] lub parametrów przegrody w strefie iniekcji [125]. Całość wdrożonych środków uznawana jest za skuteczną, jeśli uzyskanie nad przeponą muru o normalnej wilgotności dojdzie do skutku w określonym czasie (o ile nie uzgodniono inaczej, przyjmuje się okres dwóch lat).

Tabela 4.4 Porównanie iniekcji grawitacyjnej oraz ciśnieniowej [193]

Parametr	Iniekcja penetracyjna		Iniekcja niskociśnieniowa
	płynne środki iniekcyjne	kremy iniekcyjne	
Mechanizm działania	siła ciężkości, transport kapilarny, parowanie	wyrównanie koncentracji, transport kapilarny, parowanie	transport kapilarny pod ciśnieniem, parowanie
Wypełniane pory	pory kapilarne	pory kapilarne	pory kapilarne, pory powietrzne
Maksymalny stopień zawilgocenia	ok. 50%	od 75% do 100%	od 50% do ok. 80%
Czas iniekcji (na odwiert)	ok. 3 dni	ok. 3-5 min	ok. 5-10 min
Użycie sprzętu	niskie	niskie	wysokie
Możliwość kontroli	raczej niska	raczej niska	raczej wysoka

4.7 Stosowane kryteria doboru środków iniekcyjnych

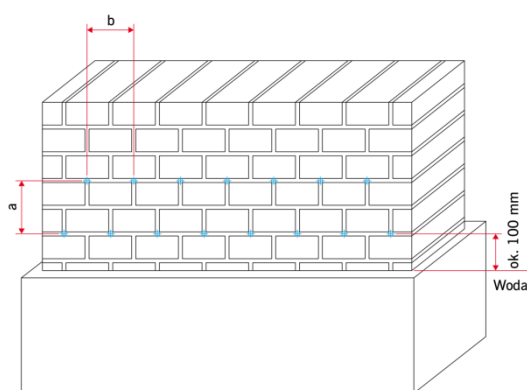
Ponieważ powodzenie zabiegów prowadzących do wykonania wtórnej hydroizolacji poziomej uzależnione jest nie tylko od właściwości samego preparatu iniekcyjnego, ale również od parametrów przegrody oraz sposobu („prawidłowości”) prowadzenia prac, porównywanie poszczególnych preparatów między sobą, jak i ich dobór do specyficznych warunków danego zastosowania, powinny być prowadzone na podstawie wyników badań wykonanych w z góry określonych warunkach. Choć metoda iniekcji chemicznej przeciw kapilarnemu podciąganiu wilgoci w murach jest znana i z rosnącym

powodzeniem stosowana od ponad sześćdziesięciu lat [44, 61], wciąż nie doczekała się międzynarodowej normy lub chociażby sposobu oceny, który zostałby uznany standard międzynarodowy. Co więcej, przed 1 stycznia 2017 roku produkty te w ogóle nie były wyrobami budowlanymi w myśl Ustawy o wyrobach budowlanych [158].

Wśród metod oceny skuteczności środków iniekcyjnych stosowanych do wykonywania wtórnych hydroizolacji poziomych w murze najpopularniejsze są metoda Instytutu Techniki Budowlanej (ITB) – niegdyś stanowiąca podstawę do wydania Rekomendacji Technicznej ITB [40], obecnie Krajowej Oceny Technicznej – oraz opisana w instrukcji Naukowo-Technicznego Stowarzyszenia na rzecz Konserwacji Budynków oraz Ochrony Zabytków (WTA - niem. *Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege*) nr 4-10-15/D [211].

4.7.1 Metoda ITB

W metodzie ITB mur doświadczalny wykonywany jest z cegły ceramicznej klasy 150 murowanej na zaprawie cementowo wapiennej. Proporcje wagowe składników zaprawy murarskiej wynoszą 1 : 1 : 6 (cement portlandzki : wapno hydratyzowane : piasek). Mur grubości jednej cegły, długości ok. 1,03 m (porównaj: Rys. 4.20 oraz Fot. 4.7) po wymurowaniu należy poddać sezonowaniu przez okres jednego miesiąca.



Rys. 4.20 Mur doświadczalny wg ITB (rys.: [40])
a) odstęp między rzędami nawiertów, b) osiowy rozstaw otworów



Fot. 4.7 Mury badawcze przygotowane do iniekcji w metodzie ITB (fot.: autor)

Zawilgocenie muru należy prowadzić przez ok. 28 dni poprzez zanurzenie muru w wodzie, której poziom należy ustabilizować na poziomie ok 30 cm od spodniej płaszczyzny poziomej muru. Proces ten należy prowadzić aż do uzyskania stanu pełnego nasycenia, przy czym, z uwagi na sposób zawilgacania muru, należy przyjąć iż chodzi tu o maksymalną wilgotność, jaką materiał może uzyskać w wyniku kapilarnego wysycenia wodą. Poziom zanurzenia muru w wodzie należy utrzymywać nie tylko w okresie zawilgacania, ale przez cały okres trwania badania.

Iniekcję prowadzi się według zaleceń zleceniodawcy badań. Zalecenia te winny obejmować przed wszystkim sposób aplikacji (grawitacyjna lub ciśnieniowa) oraz sposób nawiercania otworów (iniekcja jedno- lub dwurzędowa). Dolny rząd otworów należy wykonać na wysokości ok. 100 mm powyżej poziomu wody. Odstęp między rzędami nawiertów („a” - Rys. 4.20; w przypadku iniekcji jednorzędowej przyjąć $a = 0$), osiowy rozstaw otworów („b” - Rys. 4.20), ciśnienie aplikacji (w przypadku iniekcji ciśnieniowej), czas trwania aplikacji, sposób napełniania oraz zamykania otworów powinny odpowiadać zaleceniom producenta środka iniekcyjnego.

Ocena działania efektywności przepony prowadzona jest na podstawie zmian wilgotności muru będących efektem wykonania iniekcji, w stosunku do wilgotności w stanie kapilarnego wysycenia przed wykonaniem wtórnej izolacji poziomej. Wilgotność muru w każdym punkcie pomiarowym należy określić metodą wagowo-suszarkową. Próbki do badania wilgotności pobierane są z muru obok otworów iniekcyjnych:

- przed wykonaniem iniekcji, lecz po całkowitym nasyceniu wodą (Fot. 4.8),
- kolejno po 30, 60 oraz 90 dniach od daty wykonania iniekcji.



Fot. 4.8 Pobieranie zwiercin na potrzeby badania wilgotności muru przed wykonaniem iniekcji (fot.: autor)

Ocena efektywności przeprowadzonej iniekcji wyrażona jest przez średnią wartość spadku zawilgocenia w poszczególnych poziomach badawczych po kolejnych okresach badawczych (30, 60, 90 dni od daty przeprowadzenia iniekcji), w porównaniu do średniej wartości zawilgocenia muru w stanie pełnego wysycenia, tj. bezpośrednio przed wykonaniem przepony.

Dodatkowym kryterium oceny skuteczności iniekcji według Instytutu Techniki Budowlanej jest obserwacja rozchodzenia się preparatu w murze. Obserwację należy przeprowadzić w trakcie wykonywania iniekcji (wstępnie) oraz po okresie jednego miesiąca od jej zakończenia. Ocena polega na ustaleniu czy poszczególne obszary dystrybucji preparatu wokół otworów iniekcyjnych nachodzą na siebie oraz czy nasycenie preparatem nastąpiło na całej grubości muru, co przejawia się poprzez wystąpienie śladów preparatu po stronie muru przeciwnej do tej, po której nawiercono otwory.

4.7.2 Metoda WTA

Metoda WTA przewiduje wykonanie dwóch rodzajów muru doświadczalnego. Mur doświadczalny „mały” może być stosowany w przypadku iniekcji grawitacyjnej, natomiast mur doświadczalny „duży” może być używany zarówno w przypadku sprawdzania skuteczności iniekcji ciśnieniowej, jak i bezciśnieniowej. Do pojedynczego badania należy przygotować trzy mury. Do wznoszenia murów należy używać cegły pochodzącej od jednego producenta, o parametrach podanych w tabeli 4.5. Przed przystąpieniem do murowania cegłę należy zwilżyć. Rodzaj i proporcje zaprawy uzależnione są od typu muru badawczego (zobacz: Tabela 4.6). Konsystencja zaprawy powinna umożliwiać aplikację kielnią.

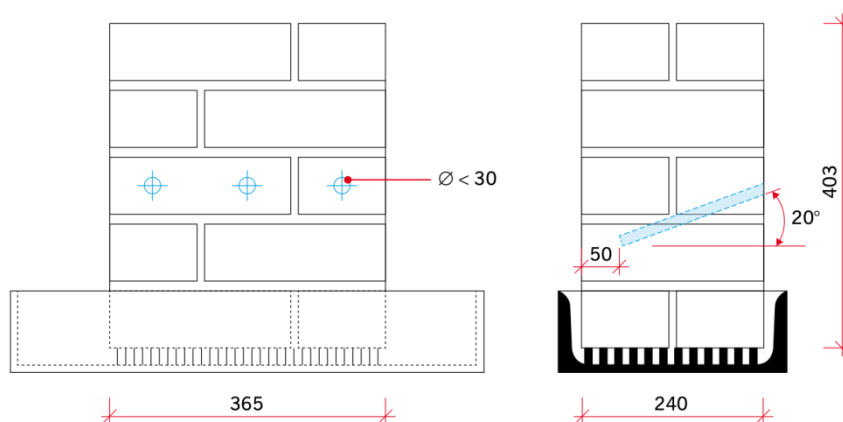
Tabela 4.5 Właściwości cegły do wznoszenia murów doświadczalnych w metodzie WTA 4-10-15 [211]

Parametr	Wartość
Wymiary	240 x 115 x 71 mm
Gęstość objętościowa	ok. 1,65 g/cm ³
Wytrzymałość na ściskanie	ok. 30 N/mm ²
Nasiąkliwość maksymalna (przy ciśnieniu atmosferycznym)	ok. 11%
Porowatość	ok. 30%
Współczynnik absorpcji wody	ok. 10 kg/m ² h ^{-0,5}

Tabela 4.6 Proporcje objętościowe zaprawy do wznoszenia murów doświadczalnych w metodzie WTA [211]

Rodzaj muru	Materiał	Proporcje
Mały	Wapno hydratyzowane	1
	Piasek zgodny z EN 196-1 [141]	4
Duży	Wapno hydratyzowane	2
	Cement wg EN 197-1 [142]	0,5
	Piasek zgodny z EN 196-1 [141]	8

Mały mur doświadczalny składa się z pięciu warstw cegieł i należy go wykonać wg schematu przedstawionego poniżej (Rys. 4.21). Spoiny wsporne powinny mieć grubość ok. 12 mm, spoiny pionowe ok. 10 mm. Jeżeli mur ma być transportowany, należy go odpowiednio zabezpieczyć.

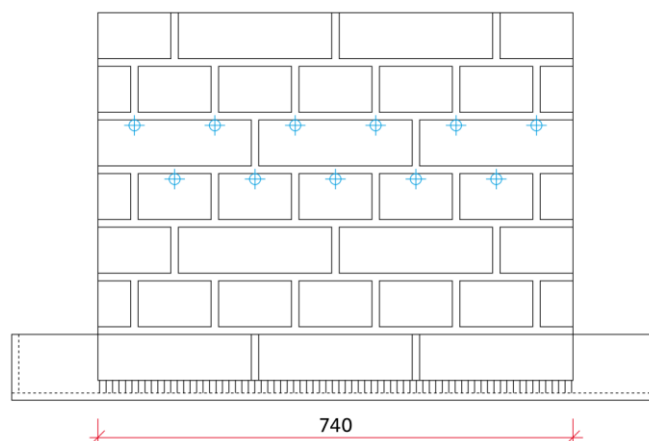


Rys. 4.21 Schemat muru badawczego dla iniekcji grawitacyjnej w metodzie WTA (rys.: [211])

Duży mur doświadczalny składa się z siedmiu warstw cegły układanych (na grubość jednej cegły) w wiązaniu łączonym (pospolitym), według schematu jaki przedstawia rysunek 4.22. Spoiny wsporne oraz poziome powinny mieć grubość odpowiednio 12 mm oraz 10 mm. W celu umożliwienia transportu dolna warstwa cegieł powinna być umieszczona na ruszcie stalowym w dopasowanym profilu U.

Oba rodzaje muru należy przechowywać przez okres 28 dni w temperaturze ok. 23 °C i wilgotności względnej powietrza ok. 50%. Po tym okresie, a jeszcze przed przystąpieniem do zawilgocenia, należy wykonać otwory iniekcyjne. Otwory należy nawiercać pod kątem nie przekraczającym 45° w osiowym rozstawie 10-12,5 cm. W przypadku dużego muru dopuszczone jest nawiercanie dwurzędowe. Na-

wierty nie mogą naruszać najniższej oraz najwyższej warstwy cegieł, a ich średnica nie może być większa niż 30 mm. Zwierciny należy usuwać przedmuchując otwory niezaolejanym powietrzem.



Rys. 4.22 Schemat muru badawczego dla iniekcji ciśnieniowej w metodzie WTA (rys.: [211])

Z uwagi na zróżnicowane właściwości dostępnych na rynku środków iniekcyjnych, instrukcja WTA umożliwia przeprowadzenie badań w trzech stopniach zawilgocenia: 60% (S_{60}), 80% (S_{80}) oraz 95% (S_{95}). Mury przeznaczone do badania przy stopniu zawilgocenia 60% oraz 80% należy osuszyć w temperaturze 60 °C aż do uzyskania stałej masy, a następnie schłodzić do temperatury pokojowej. Następnie wszystkie mury należy doprowadzić do stanu pełnego nasycenia, po czym próbki S_{95} zabezpieczyć przed wysychaniem (np. owijając folią), a pozostałe próbki osuszyć do wymaganego stopnia zawilgocenia i również zabezpieczyć przed wysychaniem. Tak zabezpieczone mury należy przechowywać przez okres 28 do 56 dni.

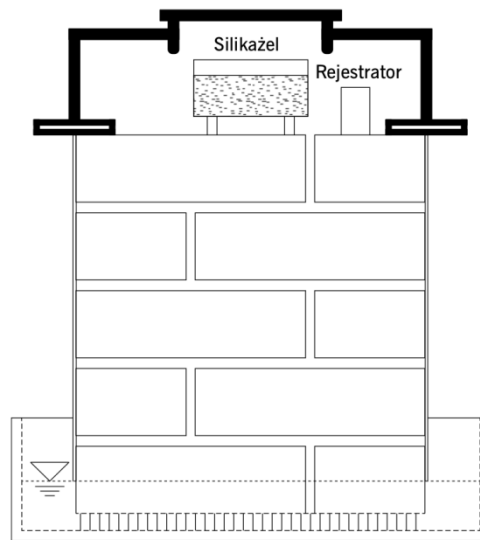
Iniekcję obu rodzajów muru badawczego należy prowadzić zgodnie z wytycznymi producenta preparatu iniekcyjnego. Wszelkie parametry iniekcji, takiej jak ciśnienie, zużycie, itp. Powinny być odnotowywane w protokole iniekcji. Bezpośrednio po przeprowadzeniu iniekcji boczne i tylne części muru należy zabezpieczyć powłoką paroszczelną lub folią. Ta strona muru, od której prowadzono iniekcję pozostaje niezabezpieczona. Przed przystąpieniem do badania skuteczności iniekcji mury badawcze należy przechowywać przez okres 28 dni w temperaturze pokojowej przy czym próbki S_{95} (w tym również próbki referencyjne) należy zanurzyć w wodzie na głębokość połowy grubości pierwszej warstwy. W przypadku próbek S_{60} oraz S_{80} ustawienie w wodzie nie jest wymagane.

Efektywność działania wtórnej izolacji poziomej można wg wytycznych WTA ocenić na trzy sposoby: przez pomiar parowania, metodą mikrofalową oraz poprzez próbę wodoprzepuszczalności.

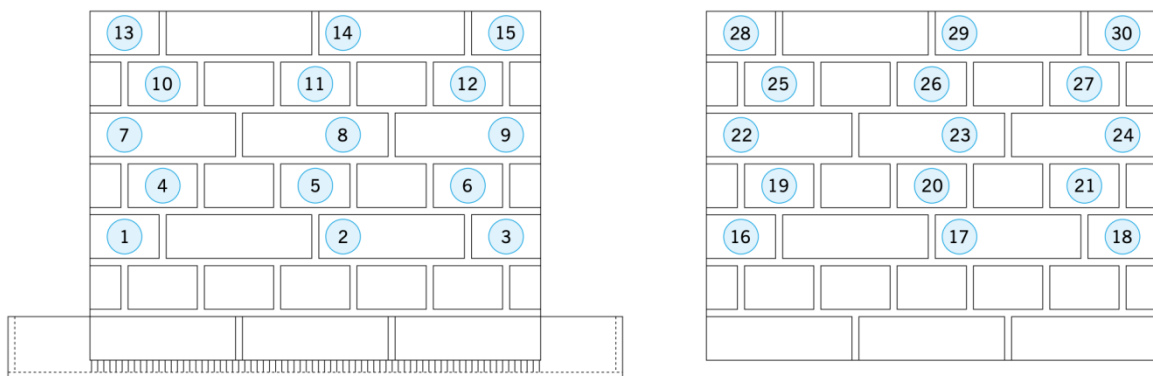
Pomiar parowania prowadzi się po umieszczeniu na górnej powierzchni muru badawczego specjalnego klosza („dzwonu”), tworzącego zamkniętą, szczelną przestrzeń, dzięki czemu wilgoć może się do niej dostać wyłącznie z górnej powierzchni próbki (Rys. 4.23). Kontrolę ilości wilgoci, jaka wyparowuje z muru, prowadzi się umieszczając po kloszem pojemnik z substancją posiadającą zdolność do pobierania wilgoci z otoczenia (np. żel krzemionkowy, określanym potocznie jako silikażel lub silica gel) i regularne ważenie zasobnika. Dodatkowo, w celu monitorowania i zapisu warunków klimatycznych, pod kloszem umieszcza się również specjalny rejestrator.

W przypadku metody mikrofalowej wykonuje się pomiary wilgotności muru przy użyciu wilgotnościomierza elektronicznego. Aby pomiary wykonywane były zawsze w tym samym miejscu, jeszcze

przed rozpoczęciem badania na murze doświadczalnym należy oznaczyć trzydzieści (po piętnaście na każdej stronie) punktów pomiarowych zgodnie ze schematem jaki przedstawia rysunek poniżej (Rys. 4.24). Wynik badania stanowi średnia z dziesięciu pojedynczych pomiarów wykonanych w każdym z punktów kontrolnych. Pomiar zawilgocenia należy prowadzić w tym samym czasie na murach podanych iniekcji oraz próbce referencyjnej. Przed przystąpieniem do kolejnej serii pomiarów należy przeprowadzić kalibrację na próbce z trzech warstw cegieł, grubości i szerokości jednej cegły, której faktyczną wilgotność należy określić metodą wagowo-suszarkową.



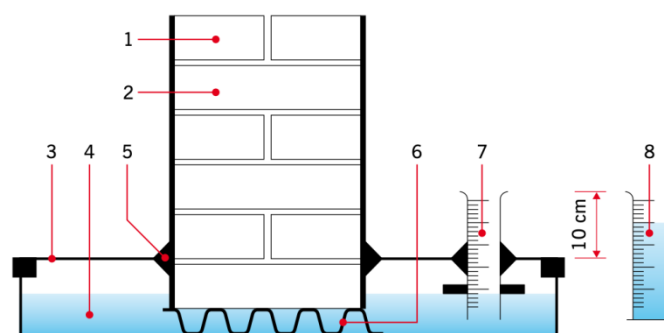
Rys. 4.23 Schemat stanowiska badawczego przy pomiarze parowania (rys.: [211])



Rys. 4.24 Rozmieszczenie punktów kontrolnych przy nieniszczącym badaniu wilgotności (rys.: [211])

Próba wodoprzepuszczalności, określana również jako pomiar objętościowy lub metoda WDL (od niem. *Wasserdurchlassenversuch*), bazuje na rejestracji ilości wody jaka odparowuje z przekroju muru w jednostce czasu. Schemat działania metody obrazuje rysunek poniżej (Rys. 4.25). Pomiarom podlega tu ilość wody (w litrach lub mililitrach) jaka dyfunduje w ciągu doby z jednego metra kwadratowego horyzontalnego przekroju muru. Aby uwzględnić parowanie swobodne z lustra wody w cylindrze pomiarowym, rejestruje się również parowanie wody w cylindrze referencyjnym, o takich samych wymiarach co cylinder wchodzący w skład stanowiska (Rys. 4.25).

Ocenę skuteczności danego środka iniekcyjnego prowadzi się poprzez porównanie parametrów murów poddanych iniekcji oraz muru referencyjnego, przy czym parametr muru referencyjnego określa się po 60 dniach od rozpoczęcia badania.



Rys. 4.25 Schemat badania skuteczności przepływu iniekcyjnej metodą próby wod szczelności (rys.: [211])

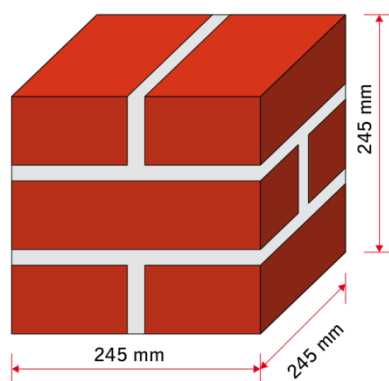
Bez względu na który z trzech sposobów prowadzona będzie ocena funkcjonowania wtórnej izolacji poziomej potwierdzenie skuteczności środka iniekcyjnego zgodnie z możliwe będzie dopiero wówczas, gdy spełnione będą następujące kryteria:

- ilość odparowanej wody, wilgotność (średnia z 30 punktów pomiarowych) lub wodoprzepuszczalność muru poddanego iniekcji musi zostać zredukowana co najmniej o 50% w stosunku do próbki referencyjnej (należy podać okres spełnienia kryterium skuteczności);
- ilość odparowanej wody, wilgotność lub wodoprzepuszczalność muru poddanego iniekcji w czasie prowadzenia badań nie może wzrastać w stosunku do próbki referencyjnej.

4.7.3 Metoda BuFAS

Alternatywę dla metody WTA mogą stanowić wytyczne BuFAS-IM-01/2009 [20], opracowane przez inną niemiecką organizację, czyli Krajowe Zrzeszenie ds. Zawilgocenia i Renowacji Starego Budownictwa (niem. *Bundesverband Feuchte & Altbausanierung*). Wytyczne BuFAS, w odróżnieniu od metod ITB oraz WTA, przewidują badania na elementach o niewielkich rozmiarach. Do badań należy przygotować dwanaście próbek składających się z sześciu cegieł połączonych zaprawą (zobacz: Rys. 4.26), tak aby na każde cztery próbki można było uzyskać co najmniej trzy punkty badawcze. Wytyczne nie precyzują jakiego rodzaju cegieł oraz zaprawy należy użyć, natomiast jak podaje publikacja poprzedzająca wydanie wytycznych [186], stosowano dostępne w handlu cegły o porowatości 12,5-13,0% oraz zaprawy cementowo-wapiennej klasy 2,5 MN/m². Po wymurowaniu próbki przechowywane są przez okres czterech tygodni w temperaturze pokojowej (20 °C, ok. 50% wilgotności powietrza), a następnie suszone przez 48 godzin w temperaturze 35 °C do 40 °C. Kolejnym krokiem jest określenie współczynnika absorpcji wody próbek niezaimpregnowanych zgodnie z normą PN-EN ISO 15148 [146].

Badania prowadzi się dla trzech różnych stopni zawilgocenia równocześnie. Po określeniu wilgotności w stanie pełnego nasycenia próbki dzieli się na trzy grupy, aby następnie doprowadzić je do stopnia zawilgocenia odpowiednio 60(± 5)%, 80(± 5)% oraz 95(± 5)%. Tak przygotowane próbki należy zabezpieczyć przed wysychaniem (owinąć folią) i pozostawić na 7 do 14 dni w celu uzyskania jednolitego rozkładu wilgoci w próbce. Proces iniekcji należy prowadzić według zaleceń producenta preparatu. Zlecający badania musi jednak określić, czy aplikacja ma być prowadzona grawitacyjnie czy pod ciśnieniem, a w przypadku iniekcji ciśnieniowej należy określić czas i warunki prowadzenia iniekcji. Po upływie czterech do pięciu tygodni od wykonania iniekcji można przystąpić do wykonania badań.



Rys. 4.26 Budowa próbki do badań wg wytycznych BuFAS (rys.: [20])

W ramach badań ocenie poddane zostają zmniejszenie absorpcji wody przez zaimpregnowaną próbkę oraz stopień rozchodzenia się preparatu w murze. W przypadku hydrofobizujących środków iniekcyjnych sprawdza się również stopień hydrofobizacji (tzw. testem kropli) oraz mierzy kąt zwilżalności. Sposób, w jaki przeprowadzona iniekcja wpłynęła na zdolność absorpcji wody przez mur, pozwala ocenić wartość określona jako współczynnik redukcji. Aby go wyznaczyć należy zbadać współczynnik absorpcji wody zaimpregnowanej próbki, a współczynnik redukcji obliczyć wg wzoru:

Współczynnik redukcji absorpcji wody			Równanie 39
	symbol	jednostka	nazwa
$C_R = \frac{w_{24} - w_{24}'}{w_{24}}$	C_R	%	współczynnik redukcji absorpcji wody
	w_{24}	$\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$	współczynnik absorpcji wody próbki przed wykonaniem iniekcji
	w_{24}'	$\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$	współczynnik absorpcji wody próbki po przeprowadzeniu iniekcji

W celu oceny stopnia rozchodzenia się preparatu w murze, próbkę należy rozdzielić mechanicznie w taki sposób, aby uzyskać przekrój przez jeden z nawiertów iniekcyjnych. Promień penetracji środka iniekcyjnego w murze należy ocenić wizualnie w minimum sześciu miejscach przetomu. Jako wynik badania podaje się wartość uśrednioną ze wszystkich sześciu pomiarów.

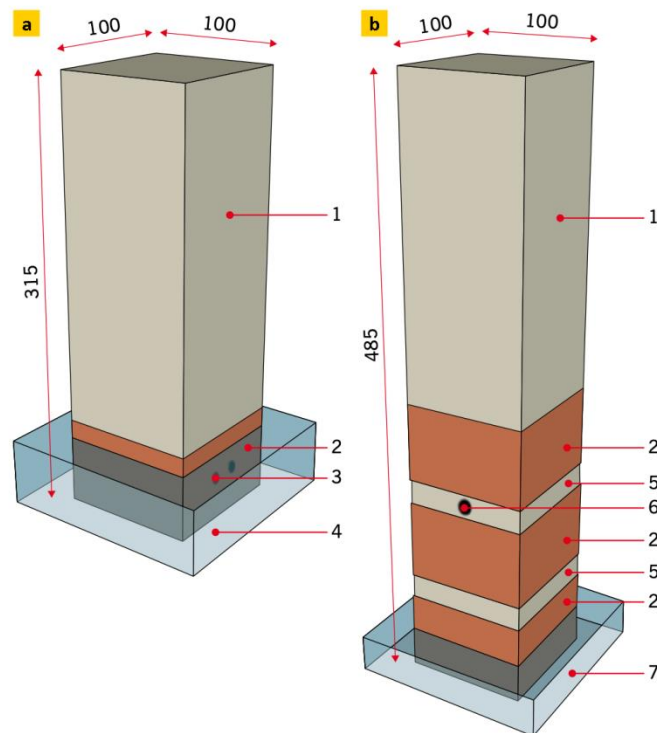
Jeżeli stosowany środek iniekcyjny jest środkiem hydrofobizującym, stopień penetracji, a dokładniej rzecz ujmując to, jaka część próbki uległa hydrofobizacji, można dodatkowo określić przy pomocy tzw. testu kropli. W tym celu w różnych miejscach przetomu nanosi się tej samej wielkości krople wody. W miejscach gdzie uzyskano efekt hydrofobizacji tworzą się kształtne sferyczne krople, a kąt zwilżania jest większy niż 90°.

4.7.4 Metoda BBA

Inną metodą bazującą na filarach testowych o niewielkich rozmiarach jest procedura opracowana przez Brytyjską Komisję Aprobacyjną (*British Board of Agreement – BBA*) [100]. W metodzie tej sześcian porowatego wapienia, o wymiarach 100x100x250 mm, ustawia się na elemencie ceramicznym o wymiarach 100x100x65 mm, w którym uprzednio wykonano dwa otwory iniekcyjne (Rys. 4.27a). W celu zapewnienia dobrego kontaktu obu materiałów powierzchnie styczne należy przeszlifować, względnie zastosować przekładkę z gazy bawełnianej. Zbiornik, w którym ustawiony jest filar wypełnia się wodą demineralizowaną na głębokość 5 cm – poziom ten należy utrzymywać aż do mo-

mentu ustabilizowania się wilgotności pryzmy wapiennej. Poziom zawilgocenia bloku wapiennego kontrolowany jest przez codzienne ważenie oraz zmianę jego położenia. Następnie wykonuje się iniekcję w wykonanych wcześniej otworach. W czasie wykonywania iniekcji, jak również 48 godzin po jej zakończeniu, w celu uniknięcia przeniknięcia środka iniekcyjnego w strukturę bloku kamiennego, ten umieszcza się na innym elemencie ceramicznym. Skuteczność iniekcji wyrażania jest postępowaniem suszenia elementu wapiennego (przez cały okres badania ceramiczna „podstawa” pozostaje zanurzona w wodzie) w porównaniu do punktów odniesienia, jakie stanowią filar, w którym nie wykonano iniekcji, jak również taki, w którym pomiędzy elementem ceramicznym a kamiennym umieszczono fizyczną membranę.

Metoda BBA przewiduje inny typ filaru badawczego dla środków iniekcyjnych w postaci zapraw. W tym wypadku podstawę dla bloku kamiennego stanowi element o wymiarach 100x100x235 mm, murowany z trzech bloczków ceramicznych na zaprawie wapiennej (Rys. 4.27b). Procedura badawcza jest bardzo podobna, z tą różnicą, że otwór iniekcyjny wykonuje się w warstwie zaprawy, poziom zanurzenia w wodzie ustalony jest na 30 mm, a po zakończeniu iniekcji przez okres 3 tygodni filar pozostaje niezanurzony w wodzie.



Rys. 4.27 Filary testowe wg wytycznych BBA [100]: a) dla płynów iniekcyjnych, b) dla zapraw iniekcyjnych (rys.: [44])
 1) blok wapienny 100×100×250 mm, 2) cegła, 3) otwory iniekcyjne, 4) woda demineralizowana (wysokość 55 mm),
 5) zaprawa wapienna, 6) otwór iniekcyjny \varnothing 15 mm, $l = 75$ mm, 7) woda demineralizowana (wysokość 30 mm)

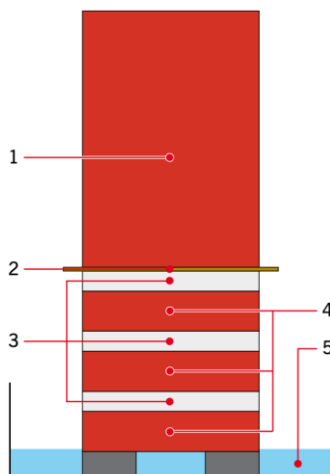
Jako słabe punkty metody BBA, należy uznać brak możliwości oceny, jak na proces wysychania bloku kamiennego wpływa przerywanie kapilarnego transportu wilgoci podczas codziennego ważenia [44]. Trudno również stwierdzić jak na skuteczność wykonania iniekcji wpływa stan całkowitego wysycenia elementu w trakcie jej wykonywania z jednej, oraz usunięcie źródła zawilgocenia na okres trzech tygodni (w przypadku filaru testowego dla zapraw iniekcyjnych) z drugiej.

4.7.5 Metoda TU Delft

Metodę oceny skuteczności iniekcji opartą na ocenie właściwości przegrody w strefie iniekcji po jej zakończeniu zaproponowali van Hees, Lubelli i Hacquebord [182]. Metoda ta zakłada sprawdzenie parametrów muru przy stałym dopływie wody. W tym celu z pasa iniekcji pobiera się rdzenie wiertniczne o średnicy 10 cm (wiercenie wykonuje się w takim samym nachyleniu, w jakim wykonany otwory iniekcyjne). Dodatkowo ze strefy muru nie poddanej iniekcji należy pobrać tą samą metodą materiał referencyjny. Następnie z pobranych rdzeni wycina się plastry o długości ok. 80 cm. Aby zapewnić stały dopływ wilgoci do tak przygotowanych próbek, przygotowuje się ceramiczne/gliniane „wieże” o następującej strukturze (Rys. 4.28):

- wieża składa się z 1, 2 lub 3 warstw cegieł/kaolinu (w zależności od wymaganego zaopatrzenia w wilgoć, niezbędnego do utrzymania poziomu nasycenia rdzeni referencyjnych);
- sproszkowany kaolin miesza się z wodą w stosunku wagowym 60 : 40 (kaolin : woda);
- „wieża” z cegły/kaolinu jest umieszczona na ruszcie (wysokość: 5 mm);
- filtr z tkaniny zapobiega zanieczyszczeniu rdzenia cegły mieszanką kaolin/woda.

Aby odparowywanie wilgoci z rdzeni następowało jedynie przez górną powierzchnię, ich ściany należy odpowiednio uszczelnić.



Rys. 4.28 Model wieży z cegły/gliny stosowany do utrzymania stałego dopływu wody do badanych próbek (rys.: [182])
1) badany rdzeń, 2) tkanina, 3) kaolin, 4) cegły, 5) naczynie z wodą

Podczas badania należy monitorować masę rdzeni, a zawilgocenie próbek referencyjnych utrzymywać na możliwie stałym poziomie, dodając lub usuwając warstwy cegły i kaolinu. Przyjęto następujące kryterium oceny skuteczności środka iniekcyjnego: iniekcje uznaje się za skuteczną, jeśli pod koniec badania (po ok. 4 tygodniach) wilgotność masowa zaimpregnowanych rdzeni jest niższa niż wilgotność rdzeni referencyjnych, co oznacza, że preparat iniekcyjny może reagować w warunkach wilgotnych, dzięki czemu kapilarny transport wilgoci zostaje ograniczony. Nie określono natomiast o ile powinna spaść wilgotność badanych próbek.

Autorzy metody zaproponowali również dodatkowy test do oceny obecności i rozprzestrzeniania się środków iniekcyjnych w murze, w przypadku, gdy środki te działają poprzez hydrofobizację materiału przegrody. Test ten – tak zwany „test kropli” – polega na ocenie (za pomocą kropli wody) hydrofobowości pobranych z muru zwiercin. Wykonuje się go obserwując kształt kropli wody nałożonych na wysuszone próbki sproszkowanego materiału, pobranego z poddanego iniekcji obszaru ściany. Jeśli

pobrana próbka wykazuje właściwości hydrofobowe, kropla jest odpychana i przyjmuje kształt kulisty lub eliptyczny, natomiast przy braku hydrofobizacji kropla jest absorbowana (Tabela 4.7).

Tabela 4.7 Kryteria oceny skuteczności hydrofobizacji na podstawie testu kropli [182]

Ocena	Opis
--	Brak właściwości hydrofobowych: woda jest natychmiast wchłaniana przez materiał
-	Słabe właściwości hydrofobowe: materiał wchłania wodę po kilku sekundach
+ -	Średnie właściwości hydrofobowe: woda nie jest wchłaniana (krople pozostają na swoim miejscu)
+	Silne właściwości hydrofobowe: widoczny efekt perlenia (krople są odpychane lub pozostają na swoim miejscu)
++	Bardzo silne właściwości hydrofobowe: wyraźnie widoczny efekt perlenia (krople są natychmiast odpychane)

Autorzy zastrzegają jednak, że test kropli pozwala jedynie orientacyjnie ocenić rozprzestrzenianie się produktu hydrofobizującego oraz jego potencjalną skuteczność.

4.7.6 Metoda Dahlberg-Institut Wismar

Venzmer, Lesnych, Koss oraz Shchukina [184] zaproponowali dwa parametry pozwalające ocenić skuteczność wykonanej iniekcji: jakość uszczelnienia oraz postęp wysychania. Pierwszy z nich odnosi się do zmiany właściwości muru w strefie iniekcji, drugi do zmian zawilgocenia przegrody powyżej strefy iniekcji.

Określenie jakości uszczelnienia jest wynikiem badań niszczących, którym głównym celem jest kontrola spełnienia jednego z podstawowych czynników powodzenia iniekcji chemicznej, czyli równomiernej dystrybucji preparatu iniekcyjnego, a tym samym powstania ciągłej i funkcjonalnej przepony przerywającej kapilarny transport wilgoci. W tym celu dokonuje się porównania wartości współczynnika absorpcji kapilarnej w strefie wykonanej iniekcji w_{wi} oraz poza nią (wartością referencyjną współczynnika w_{wr}). W celu określenia obu wielkości pobiera się rdzenie wiertnicze. Rdzenie należy pobierać w taki sposób i w takiej ilości aby w jak najwierniejszy sposób oddawały strukturę muru. Ich nachylenie w strefie iniekcji powinno być dopasowane do nachylenia wykonywanych nawiertów iniekcyjnych. Obie wartości oblicza się wg wzorów:

Referencyjny współczynnik absorpcji kapilarnej muru	Równanie 40		
$\overline{w_{wr}} = \sum_{j=1}^n \frac{l_j \cdot w_{wr,j}}{L}$	symbol	jednostka	nazwa
	w_{wr}	$\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$	referencyjny współczynnik absorpcji kapilarnej muru (w strefie nie poddanej iniekcji)
	l	m	długość badanej próbki
	L	m	całkowita długość pobranego rdzenia

Współczynnik absorpcji kapilarnej muru w strefie iniekcji	Równanie 41		
$\overline{w_{wi}} = \sum_{j=1}^n \frac{l_j \cdot w_{wi,j}}{L}$	symbol	jednostka	nazwa
	w_{wi}	$\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$	współczynnik absorpcji kapilarnej muru w strefie iniekcji
	l	m	długość badanej próbki
	L	m	całkowita długość pobranego rdzenia

Aby uzyskania w wyniku przeprowadzonej iniekcji jakość uszczelnienia mogła być oceniona w sposób ilościowy, należy określić na ile wartość współczynnika w zbliżyła się do granicy, po przekroczeniu której materiał określany jest jako nienasiąkliwy, tj. $0,5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$ (porównaj: Tabela 1.5). W tym celu oblicza się – analogicznie do wzoru 39 – współczynniki redukcji:

- osiągnięty, tj. wskazujący w jakim stopniu został on ograniczony w rzeczywistości (Równanie 42), oraz
- maksymalny (docelowy), wskazujący w jakim stopniu powinna być ograniczona absorpcja kapilarna (Równanie 43).

Porównanie obu współczynników pozwala obliczyć jakość uszczelnienia muru w strefie iniekcji według wzoru 44.

Wartość $Q_w = 100\%$ w praktyce jest bardzo trudna do osiągnięcia. W związku z tym autorzy metody proponują aby uszczelnienie było uznawane jest jako funkcjonalne, jeśli wartość jakości uszczelnienia Q_w będzie nie mniejsza niż 90%.

Współczynnik redukcji absorpcji wody muru w strefie iniekcji			Równanie 42
$C_{R,i} = \frac{\overline{W_{wr}} - \overline{W_{wi}}}{\overline{W_{wr}}} = 1 - \frac{\overline{W_{wi}}}{\overline{W_{wr}}}$	symbol	jednostka	nazwa
	$C_{R,i}$	%	współczynnik redukcji absorpcji wody w strefie iniekcji
	W_{wr}	$\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$	referencyjny współczynnik absorpcji kapilarnej muru (w strefie nie poddanej iniekcji)
	W_{wi}	$\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$	współczynnik absorpcji kapilarnej muru w strefie iniekcji

Docelowy współczynnik redukcji absorpcji wody muru w strefie iniekcji			Równanie 43
$C_{R,max} = \frac{\overline{W_{wr}} - 0,5}{\overline{W_{wr}}} = 1 - \frac{0,5}{\overline{W_{wr}}}$	symbol	jednostka	nazwa
	$C_{R,max}$	%	maksymalny (docelowy) współczynnik redukcji absorpcji wody w strefie iniekcji
W_{wr}	$\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$	referencyjny współczynnik absorpcji kapilarnej muru (w strefie nie poddanej iniekcji)	

Jakość uszczelnienia muru w strefie iniekcji			Równanie 44
$Q_w = \frac{C_{R,i}}{C_{R,max}} = \frac{\overline{W_{wr}} - \overline{W_{wi}}}{\overline{W_{wr}} - 0,5}$	symbol	jednostka	nazwa
	Q_w	%	jakość uszczelnienia muru w strefie iniekcji
	$C_{R,i}$	%	współczynnik redukcji absorpcji wody w strefie iniekcji
	$C_{R,max}$	%	maksymalny (docelowy) współczynnik redukcji absorpcji wody w strefie iniekcji
	W_{wr}	$\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$	referencyjny współczynnik absorpcji kapilarnej muru (w strefie nie poddanej iniekcji)
W_{wi}	$\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$	współczynnik absorpcji kapilarnej muru w strefie iniekcji	

W celu obserwacji postępu wysychania przegrody poddanej iniekcji chemicznej cyklicznie prowadzone są nieniszczące pomiary wilgotności muru, zarówno powyżej jak i poniżej wtórnej izolacji poziomej. Na początku procesu pobierane są rdzenie wiertnicze w celu określenia aktualnej wilgotności muru oraz referencyjnego stopnia przesiąknięcia wilgocią S_r , jak również kalibracji (o ile jest wymagana) urządzenia pomiarowego. Pomiary wilgotności prowadzi się przy użyciu metody pozwalającej na

określenie rozkładu zawilgocenia zarówno na wysokości, jak i głębokości przegrody, np. metody tomograficznej, elektrycznej lub mikrofalowej [105, 107]. Na ich podstawie określany jest stopień przesiąknięcia wilgocią S_t powyżej wykonanej przepony iniekcyjnej, gdzie t oznacza czas, jaki upłynął od momentu wykonania iniekcji, np. 6, 12 i 24 miesiące (lub inne wybrane punkty w czasie).

Analogicznie do jakości uszczelnienia, na podstawie średnich wartości S_r oraz S_t obliczane są współczynniki redukcji:

- osiągnięty, wg Równanie 45, oraz
- maksymalny (docelowy), zgodnie z Równanie 46.

Przy czym wartością odniesienia dla tego drugiego jest wartość S określana jako zaniedbywalna, czyli 20% (zobacz: Tabela 2.4).

Postęp wysychania wyrażony jest stosunkiem obu współczynników redukcji w danym punkcie czasu t (np. dla $t = 6, 12$ oraz 24 miesiące) i obliczany wg wzoru 47.

Współczynnik redukcji zawilgocenia muru			Równanie 45
$c_S = \frac{\bar{S}_r - \bar{S}_t}{\bar{S}_t} = 1 - \frac{\bar{S}_t}{\bar{S}_r}$	symbol	jednostka	nazwa
	c_S	%	współczynnik redukcji zawilgocenia muru
	S_r	%	referencyjny (początkowy) stopień zawilgocenia muru
	S_t	%	stopień zawilgocenia muru po czasie t

Docelowy współczynnik redukcji zawilgocenia muru			Równanie 46
$c_{S,max} = \frac{\bar{S}_r - 20}{\bar{S}_r} = 1 - \frac{20}{\bar{S}_r}$	symbol	jednostka	nazwa
	$c_{S,max}$	%	maksymalny (docelowy) współczynnik redukcji zawilgocenia muru
	S_r	%	referencyjny (początkowy) stopień zawilgocenia muru

Postęp wysychania muru poddanego iniekcji			Równanie 47
$DP_t = \frac{c_S}{c_{S,max}} = \frac{\bar{S}_r - \bar{S}_t}{\bar{S}_r - 20}$	symbol	jednostka	nazwa
	DP_t	%	postęp wysychania muru poddanego iniekcji (po czasie t)
	c_S	%	współczynnik redukcji zawilgocenia muru
	$c_{S,max}$	%	maksymalny (docelowy) współczynnik redukcji zawilgocenia muru
	S_r	%	referencyjny (początkowy) stopień zawilgocenia muru
	S_t	%	stopień zawilgocenia muru po czasie t

Wartość DP pozwala określić procentowy postęp procesu wysychania przegrody powyżej strefy iniekcji, prowadzący do osiągnięcia muru o normalnej wilgotności (o zaniedbywalnym stopniu przesiąknięcia wilgocią). Ponieważ na zawilgocenie muru wpływa wiele czynników, osiągnięcie wartości DP na poziomie 100% jest bardzo trudne do uzyskania w praktyce. Również w tym wypadku zdaniem autorów metody przekroczenie granicy $DP = 90\%$ pozwala uznać uszczelnienie iniekcyjne za w pełni funkcjonalne.

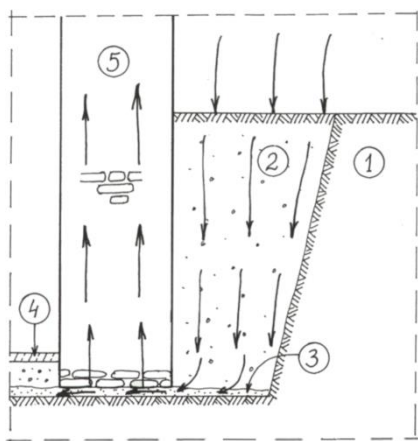
5 PROBLEM BADAWCZY - GENEZA

5.1 Znaczenie hydroizolacji przeciw wilgoci kapilarnej

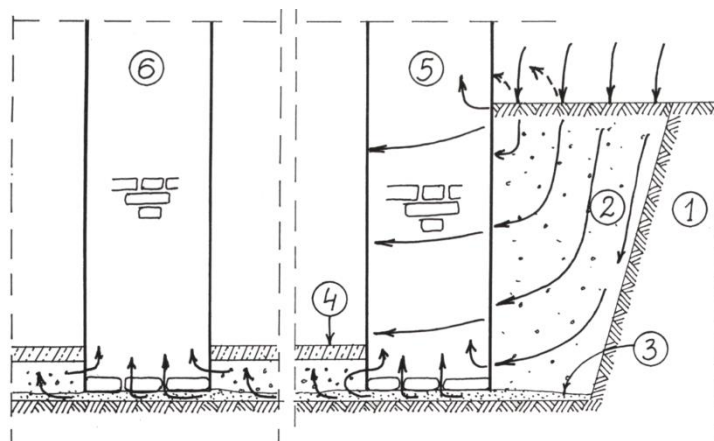
Jednym z kluczowych elementów szeroko rozumianych robot osuszeniowych jest wtórna izolacja pozioma. Skuteczność jej wykonania jest nie tylko trudna do jednoznacznej oceny, ale wręcz jest to obszar budownictwa, w którym nastąpiło najprawdopodobniej największe nagromadzenie sprzecznych opinii, a czasami wręcz niezrozumienie zachodzących zjawisk [200].

Iniekcyjne metody odtwarzania w murach izolacji poziomych przeciw wilgoci podciąganej kapilarnie, w odróżnieniu od metod mechanicznych nie mają za zadanie stworzyć całkowicie nieprzepuszczalnej dla wody bariery. Za wystarczający uznaje się efekt w postaci stworzenia ciągłej warstwy redukującej podciąganie kapilarne do tego stopnia, aby po pewnym czasie (dzięki wymianie wilgoci z otaczającym otoczeniem) osiągnąć główny (długoterminowy) cel wykonywania hydroizolacji wtórnych, tj. aby w strefie muru nad przeponą powstał obszar o normalnej wilgotności (wilgotności równowagowej) [45, 200, 211]. Wadą takiego podejścia jest ograniczona możliwość kontroli skuteczności zabiegu na etapie jego wykonywania. Z tego powodu szczególnie istotne jest zachowanie tzw. reżimu technologicznego z jednej strony, z drugiej stosowania środków iniekcyjnych o potwierdzonej skuteczności [120].

Jako że maksymalna wysokość podciągania wilgoci w murze jest wypadkową trzech czynników (porównaj: Rys. 3.14), a modyfikacja już jednego z nich może mieć wpływ na ograniczenie poziomu zawilgocenia, samo obniżenie wilgotności muru (w myśl zasady *post hoc ergo propter hoc*) nie może być traktowane jako jednoznaczne kryterium skuteczności metod iniekcyjnych (porównaj: Rys. 5.1 oraz Rys. 5.2). Należy również mieć na względzie, że hydroizolacje wtórne, o ile to tylko możliwe (czyli technicznie wykonalne), powinny stanowić układ ciągły i szczelny, całkowicie zabezpieczający budynek od destrukcyjnego działania wody pod wszelkimi jej postaciami [41].



Rys. 5.1 Zawilgacanie muru zewnętrznego piwnic bez izolacji przeciwwilgociowych jako proces podciągania kapilarnego wód od stopy fundamentowej — błędna interpretacja, zrównująca metody ograniczenia podciągania kapilarnego z osuszeniem budynku (rys.: [81])



Rys. 5.2 Mechanizm zawilgacania murów piwnicznych bez izolacji przeciwwilgociowych w danym układzie warunków gruntowo-wodnych (rys.: [81])

1) grunt rodzimy, 2) grunt nasypowy wykopu, 3) podsypka piaskowa) warstwa wyrównawcza pod stopą fundamentową, 4) posadzka piwnicy, 5) ściana zewnętrzna, 6) ściana wewnętrzna

Jakie kroki należy zatem podjąć, aby mieć pewność, że izolacja wtórna, wykonana metoda iniekcji ostatecznie okaże się skuteczna? Z jednej strony należy stosować środki iniekcyjne, których skuteczność została potwierdzona odpowiednimi certyfikatami lub potwierdzona badaniami (laboratoryjny-

mi lub na istniejących obiektach). Z drugiej zaś należy podjąć działania kontrolne – oceniające prawidłowość prac na etapie ich prowadzenia oraz skuteczność podjętych działań, po ich zakończeniu.

5.2 Ocena skuteczności metod iniekcyjnych

Skuteczność środków iniekcyjnych w oczywisty sposób weryfikowana jest przez zastosowania praktyczne. Kluczową rolę w długofalowej ocenie środków iniekcyjnych mają jednak badania prowadzone zarówno laboratoryjne, jak i *in situ* (czyli w rzeczywistych warunkach zastosowania). Warto zauważyć, że badania takie prowadzone są niemal od początku stosowania w budownictwie środków iniekcyjnych mających zapobiegać kapilarnemu zawilgacaniu przegród budowlanych [121].

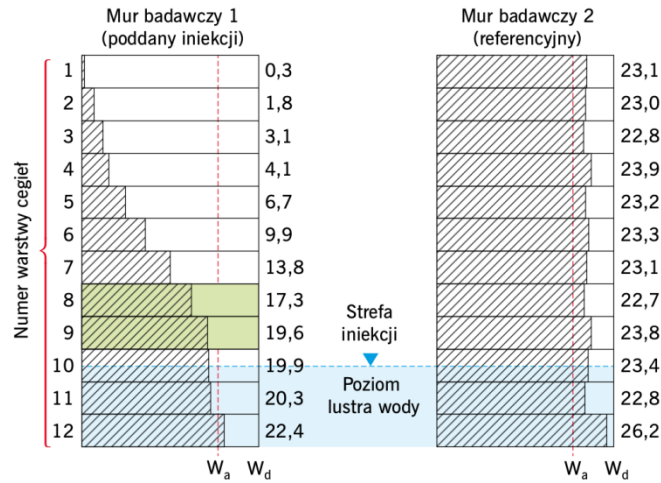
Wpływ preparatów iniekcyjnych bezpośrednio na stosowane w murach materiały budowlane (cegłę, kamień, zaprawę), względnie na niewielkie próbki stanowiące kombinację cegły i zaprawy (tzw. próbki typu „burgers”) badali m.in. Rob i in. [180], Mao i Kagi [98], Wójcik [195, 197], Królak i Pieniążek [84], Balak [11, 12], Vanhellemont i in. [183], Trochonowicz [177–179], Lubelli i in. [94], Hacquebord i in. [51], Drochytka i in. [31], Wójcik i in. [204, 205], Körber [83] oraz Venzmer i Walter [187, 189, 190]. Badania na murach referencyjnych (o zróżnicowanych rozmiarach) prowadzili Rob i in. [180], Królak i Pieniążek [84], Wójcik [197], Zielke [219], Hoffman [56], Alfano i in. [4], Venzmer i in. [186], Hölzen [62], Balak [12, 13], Appel [5, 6], Trochonowicz [177–179], Körber [83], Sardella i in. [160], Socoloski i Masuero [166] oraz Franzoni i in. [44]. Z kolei Van Hees i Koek [181], Wójcik [195], Królak i Pieniążek [84], Venzmer i in. [93, 185, 186], Hölzen 06 [61–63], Pohlplatz [150], Simllinger i Balak [11, 163], Appel [6], Larsen [91], Dudás i Terjék [32], Drochytka i in. [31], Van Hees i in. [182], jak również Sardella i in. [160, 161], badali skuteczność preparatów iniekcyjnych w warunkach rzeczywistych (na istniejących obiektach).

Poniżej opisano wybrane, przeprowadzone na przestrzeni kilkudziesięciu lat, w kraju i za granicą badania dotyczące zastosowania i skuteczności metody odtwarzania poziomej izolacji przeciwwilgociowej muru w technologii iniekcji.

5.2.1 Badania BAM

Jednym z pierwszych laboratoryjnych badań skuteczności środków iniekcyjnych były badania przeprowadzone w drugiej połowie lat siedemdziesiątych XX wieku, w Federalnym Instytucie Badania Materiałów (*Bundesanstalt für Materialprüfung* (BAM), obecnie *Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung*) w Berlinie [61]. Badania wykonano na murach referencyjnych o wymiarach 76x36,5x79 cm, wykonanych z cegły pełnej murowanych na zaprawie wapiennej. Po okresie sezonowania wynoszącym ok. 6 tygodni, dolne warstwy cegieł umieszczono w wodzie – po ok. 10 dniach od zanurzenia wilgoć pojawiła się na górnych warstwach cegieł, a po 30 dniach wilgotność muru ustabilizowała się na całej ich wysokości. Po tym czasie w jednym z murów, w 8 i 9 warstwie cegieł, wykonano otwory iniekcyjne o średnicy ok. 30 cm i nachyleniu do poziomu wynoszącym ok. 25 do 30°. Nawierty prowadzono w dwóch rzędach, w rozstawie co 15 cm na głębokość ok. 23–24 cm, co odpowiadało 2/3 grubości ściany. Po oczyszczeniu nawiertów w każdy z nich zaaplikowano ok 200 ml środka iniekcyjnego na bazie krzemianów i metylokrzemianów alkalicznych. Drugie napełnienie otworów środkiem przeprowadzono jeszcze tego samego dnia, trzecie kolejnego dnia, a czwarte po upływie kolejnych czterech dni. Łącznie (w czterech etapach) w strefie iniekcji muru zostało zaaplikowane ok. 4,4 l preparatu. W trakcie tego procesu mur cały czas zanurzony był w wodzie. Po zasklepieniu otworów iniekcyjnych mur osuszono powierzchniowo, zważono, a następnie ponownie umieszczono w wodzie (na głębokość ok. 150 mm).

Zarówno mur poddany iniekcji (mur badawczy 1) jak i mur bez wtórnej izolacji poziomej (mur badawczy 2) przez okres 41 miesięcy zanurzone były w wodzie, podczas gdy proces wysychania, wyrażony jako porównanie zmian zawilgocenia obu murów, był obserwowany i rejestrowany, poprzez ich regularne ważenie (Tabela 5.3).



Rys. 5.3 Końcowy (po 41 miesiącach) rozkład zawilgocenia ściany poddanej oraz niepoddanej iniekcji (rys.: [61])

Tabela 5.1 Końcowy (po 41 miesiącach) rozkład zawilgocenia ściany poddanej iniekcji [61]

Warstwa	Wilgotność masowa [%]										wartość średnia	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	c	z
	1	0,0	0,6	0,5	0,4	0,6	0,3	0,1	0,2	0,3		
2	1,1	1,7	2,2	0,6	1,6	2,4	2,4	1,8	2,8	1,3	1,8	2,0
3	1,6	3,9	3,5	3,8	4,0	2,2	3,7	2,3	3,9	2,2	3,1	3,0
4	2,9	5,8	5,2	3,5	3,3	3,9	3,8	3,4	5,1	3,8	4,1	3,8
5	6,2	7,0	6,6	7,0	7,8	7,1	7,4	4,9	4,6	8,4	6,7	4,5
6	6,3	9,3	7,3	7,3	9,9	15,8	13,3	12,5	11,7	5,8	9,9	4,9
7	13,5	12,1	12,3	15,7	17,1	14,0	17,5	13,7	10,2	12,1	13,8	5,4
8	15,3	15,9	15,6	17,8	14,0	15,4	16,7	21,1	20,3	20,7	17,3	5,7
9	18,6	20,2	21,1	20,4	18,9	14,9	20,9	23,8	19,2	18,3	19,6	9,1
10	20,5	20,3	20,4	21,5	19,3	19,1	18,3	19,1	20,5	20,4	19,9	10,5
11	21,4	20,5	20,8	16,6	20,0	18,8	21,2	20,6	20,8	22,3	20,3	13,1
12	22,1	24,1	23,0	22,8	22,6	19,8	20,6	23,3	23,0	-	22,4	

c – cegła, z - zaprawa

Tabela 5.2 Końcowy (po 41 miesiącach) rozkład zawilgocenia ściany nie poddanej iniekcji (referencyjnej) [61]

Warstwa	Wilgotność masowa [%]										wartość średnia	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	c	z
	1	23,4	23,3	23,4	23,1	21,3	23,7	23,4	23,1	24,1	22,6	23,1
2	23,9	23,2	22,9	23,0	19,9	22,9	23,4	23,8	23,5	23,4	23,0	-
3	22,7	24,0	23,6	24,0	22,4	21,7	23,3	20,3	21,7	24,2	22,8	-
4	24,3	24,2	24,2	23,6	21,2	24,9	24,6	22,9	24,8	24,5	23,9	4,9
5	23,1	20,9	23,6	24,8	22,1	23,7	23,0	22,9	24,5	23,8	23,2	-
6	23,4	21,5	23,8	22,3	23,0	24,0	23,6	23,8	23,0	24,5	23,3	7,8
7	25,9	21,7	22,0	25,0	23,6	22,5	22,1	21,5	22,7	23,6	23,1	-
8	23,3	23,1	23,7	22,4	22,5	23,1	22,0	24,2	20,3	22,2	22,7	11,6
9	25,6	25,2	26,2	24,2	24,1	21,6	22,6	21,4	22,6	25,0	23,9	-
10	24,3	23,4	20,2	20,5	22,8	25,6	25,6	22,1	23,6	26,0	23,4	-
11	26,8	23,9	24,8	23,3	23,5	23,4	22,1	22,2	18,1	20,0	22,8	-
12	27,1	25,3	23,9	26,8	25,0	26,8	27,2	27,2	26,3	-	26,2	-

c – cegła, z - zaprawa

Następnie oba mury zdemontowano, ustalając jednocześnie rozkład wilgotności (w poszczególnych warstwach cegieł) metodą wagowo-suszarkową. Rozkład zawilgocenia w obu murach przedstawiają tabela 5.1 oraz 5.2 (zobacz również Rys. 5.3).

Tabela 5.3 Zmiany wilgotności muru poddanego iniekcji oraz muru referencyjnego [61]

Czas trwania badania		Zmiana zawartości wilgoci [kg]	
[dni]	[miesiące]	Mur badawczy 1	Mur badawczy 2
[1]	[2]	[3]	[4]
7		-3,0	+ 0,7
21		-10,2	+ 0,6
28	1	-19,5	+ 0,6
	2	-23,9	+ 0,6
	3	-24,5	+ 1,1
	4	-25,3	+ 1,0
	5	-25,3	+ 1,9
	6	-25,3	+ 2,0
	8	-25,3	+ 2,2
	10	-25,3	+ 2,6

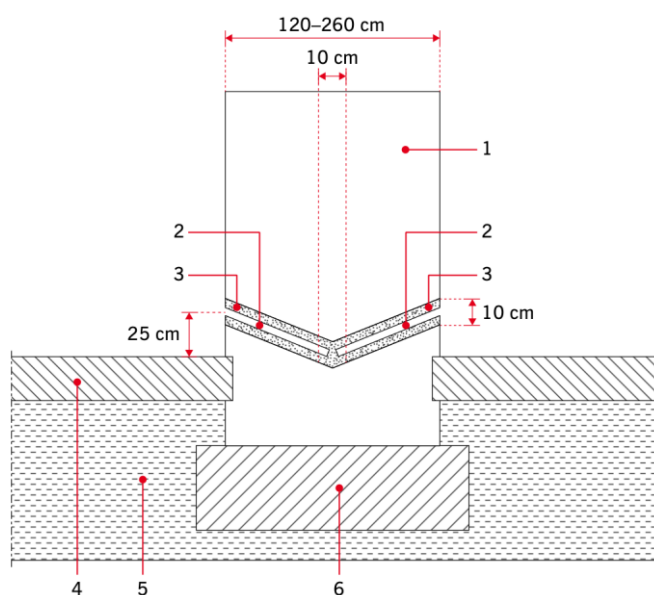
[1]	[2]	[3]	[4]
	12	-25,3	+ 3,0
	14	-25,3	+ 3,2
	18	-25,3	+ 4,3
	24	-25,3	+ 4,4
	36	-25,3	-
	41	-25,3	-

5.2.2 Alte Oper we Frankurcie

Inne badania skuteczności zabiegów iniecyjnych przeprowadzono na początku lat dziewięćdziesiątych XX wieku – tym razem skuteczności „długofalowej”, na istniejącym obiekcie Starej Opery (Alten Oper) we Frankfurcie nad Menem (Fot. 5.1) [61].



Fot. 5.1 Stara Opera (Alte Oper) we Frankfurcie nad Menem wzniesiona w latach 1873-80 (CC BY: Roland Meinecke)



Rys. 5.4 Schemat wykonania iniekcji w ścianach murenych Starej Opery we Frankfurcie nad Menem (rys.: [61])
 1) mur z piaskowca, 2) otwory iniecyjne wiercone pod kątem ok. 20° do poziomu, 3) pakery z uszczelnieniem gumowym, 4) posadzka „wprowadzona” w istniejący mur na głębokość kilku centymetrów, 5) grunt rodzimy (wysoki stopień wilgotności), 6) fundament betonowy, występujący miejscowo (wilgotność masowa do 12%)

Czternaście lat wcześniej (podczas odbudowy zniszczonego w trakcie nalotu w 1944 r. budynku) w ekstremalnie grubych murach opery – tzw. murach mamucich, których grubość sięga 200 cm (Rys. 5.4) – wykonano iniekcję metodą niskociśnieniową. Zawilgocenie murów podczas prowadzenia prac sięgało 15% (wilgotności masowej). Iniekcję wykonano za pośrednictwem otworów o średnicy 30 mm, nawierconych obustronnie na wysokości ok. 10 cm nad posadzką, pod kątem ok. 20° do poziomu. Głębokość nawiertów wynosiła połowę grubości ściany z naddatkiem wynoszącym 10 cm (w celu zachowania zakładu dwustronnie wykonywanych otworów).

Iniekcję prowadzono przy ciśnieniu 1 do 8 barów za pośrednictwem pakerów z uszczelnieniem gumowym. Zużycie środka iniekcyjnego wyniosło ok. 15 l/m² rzutu muru. Badania kontrolne przeprowadzono na ok 100 m² rzutu muru. Na wysokości od 0 do 15 cm nad poziomem posadzki w strefie przypowierzchniowej muru stwierdzono wilgotność masową na poziomie 7 do 9%. Natomiast w strefie > 20 cm nad poziomem posadzki wilgotność masowa wynosiła poniżej 1%. A zatem, po 14 latach od wykonania prac, zawilgocenie muru zostało zredukowane o ponad 90%.

5.2.3 Badania Politechniki Krakowskiej

Jedne z pierwszych na szerszą skalę badań skuteczności środków iniekcyjnych w Polsce były przeprowadzone w latach 1992-95 na Politechnice Krakowskiej, na zlecenie ówczesnego Komitetu Badań Naukowych (KBN) [81, 84]. Celem przedsięwzięcia było sprawdzenie skuteczności preparatów iniekcyjnych na rzeczywistych obiektach (w których wykonano wtórną hydroizolację poziomą metodą iniekcji) oraz na murach doświadczalnych. Równocześnie prowadzono badania laboratoryjne stopnia penetracji preparatów w cegle ceramicznej, kamieniu oraz zaprawie cementowo-wapiennej, w zależności od ich zawilgocenia.

Tabela 5.4 Wyniki badań wilgotnościowych ścian istniejących [81]

Metoda	Termin badania (rok)	Wilgotność masowa murów	
		u_{sr}	$u_{\text{sr,spr}}$
Krystaliczna	przed iniekcją	10,0	10,5
	1992	6,4	6,9
	1993	6,6	6,8
	1994	4,0	4,5
Termoiniekcji	przed iniekcją	3,9	3,4
	1992	5,6	4,9
	1993	5,1	5,0
	1994	3,5	3,4
Elektroiniekcji	1992	3,3	3,4
	1993	3,0	2,9
	1994	3,4	3,6
Politechniki Krakowskiej	przed iniekcją	4,0	3,7
	1992	2,1	2,1
	1993	3,2	3,6
	1994	1,8	1,4
Magnetokinezy	1992	4,2	4,0
	1993	4,1	4,1
	1994	4,3	4,4

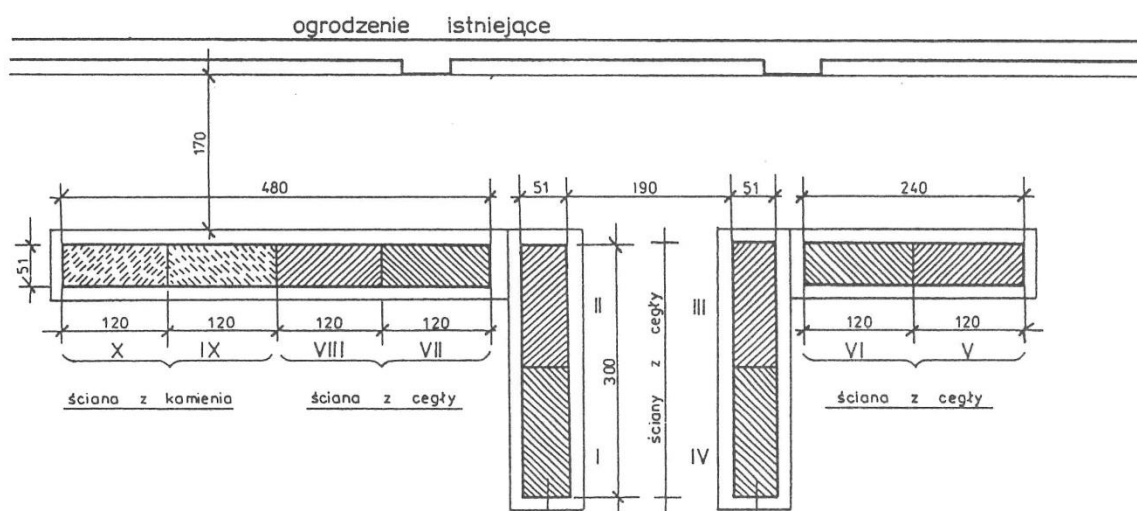
u_{sr} – średnia ze wszystkich pomiarów, $u_{\text{sr,spr}}$ – średnia po odrzuceniu wyników różniących się od u_{sr} o więcej niż 20% (w %)

W przypadku obiektów rzeczywistych, obserwacji poddano 18 w obiektów, w których zastosowano następujące metody odtwarzania hydroizolacji poziomej (Tabela 5.4):

- iniekcja krystaliczna (8 budynków),
- elektroiniekcja (4 budynki),
- termoiniekcja (4 budynki),
- metoda Politechniki Krakowskiej (2 budynki).

Do badań włączono również trzy budynki, w których zastosowano metodę magnetokinezy. Ponieważ, jak ustalono w toku badań, w przypadku jedynie 20% obiektów wykonano wstępne badania wilgotnościowe (przed przystąpieniem do renowacji), jako kryterium skuteczności przyjęto wilgotność muru powyżej wykonanej przepony. Najlepsze rezultaty (najniższą wilgotność muru) odnotowano w budynkach, w których zastosowano termoiniekcję oraz metodę Politechniki Krakowskiej, natomiast najgorsze w budynkach w których wykonano iniekcje krystaliczną.

Badania na murach doświadczalnych przeprowadzono, wznosząc uprzednio 10 fragmentów ścian – z których osiem wykonano z cegły, a dwa z kamienia naturalnego (dolomitu) – o długości od 1,20 do 1,50 m, wysokości ok. 1,00 m i grubości ok 0,50 m (Rys. 5.5). Dolne fragmenty ścian przez cały okres badania zanurzone były w wodzie.



Rys. 5.5 Badania skuteczności iniekcji na murach doświadczalnych – szkic sytuacyjny (rys.: [84])

Skuteczność przepon wykonanych poszczególnymi metodami (Tabela 5.5) badano pobierając próbki zwiercin z otworów o głębokości ok. 20 cm, wykonywanych od strony otworów iniekcyjnych, w odległości 30 cm od krawędzi murów, na trzech wysokościach: pod przeponą, w przeponie oraz 15 cm nad nią. Pobrano również próbki w postaci rdzeni o średnicy 50 mm, w celu określenia nasiąkliwości muru. Uzyskane wyniki potwierdziły skuteczność metody Politechniki Krakowskiej, termoiniekcji oraz iniekcji grawitacyjnej z zastosowaniem krzemianów i metylokrzemianów alkalicznych. Najmniejszą skuteczność odnotowano w przypadku iniekcji krystalicznej, co zdaniem autorów związane jest z tym, że zastosowany w tej technologii preparat iniekcyjny jako jedyny nie wykazuje działania hydrofobizującego.

Metody krystaliczną i magnetokinezy uznano za całkowicie nieprzydatne do osuszania murów, natomiast w przypadku pozostałych technologii zastosowanych w murach doświadczalnych raz budynkach eksploatowanych, wyniki badań, z uwagi na mankamenty metodyczne i zbyt małą bazę badawczą, uznano za nie dające podstaw do wnioskowania o skuteczności iniekcji [81].

Tabela 5.5 Badanie skuteczności iniekcji na murach doświadczalnych [84]

Fragment	Materiał	Metoda	Preparat iniekcyjny
I	cegła	iniekcja krystaliczna	cement + aktywator
II	cegła	termoiniekcja	żywica metylosilikonowa w benzynie lakowej
III	cegła	ciśnieniowa	mieszanina krzemianu alkalicznego i estru
IV	cegła	Politechniki Krakowskiej	żywica metylosilikonowa w benzynie lakowej
I	cegła	iniekcja krystaliczna	cement + aktywator
II	cegła	termoiniekcja	żywica metylosilikonowa w benzynie lakowej
III	cegła	ciśnieniowa	mieszanina krzemianu alkalicznego i estru
IV	cegła	Politechniki Krakowskiej	żywica metylosilikonowa w benzynie lakowej

Równolegle prowadzone badania laboratoryjne miały na celu oznaczenie skuteczności preparatów przy różnym zawilgoceniu oraz ustalenie optymalnych rozstawów otworów iniekcyjnych. Badania ilości wchłoniętego preparatu, wysokości podciągania kapilarnego oraz nasiąkliwości nasączonych próbek wykonano na próbkach cegły ceramicznej pełnej, kamienia naturalnego (dolomitu) oraz zaprawie cementowo-wapiennej. W zawilgocone próbki wykonano otwory a następnie nasączano je preparatem iniekcyjnym przy użyciu wyskalowanego naczynia. Po nasączaniu, próbki pocięto na płytki o grubości 2 cm, na których oznaczono wysokość podciągania kapilarnego oraz nasiąkliwość w zależności od odległości od otworu. W ocenie wyników przyjęto, że za skuteczną w danym materiale można uznać taką przeponę, która spełnia następujące kryteria:

- nasiąkliwość masowa po iniekcji $\leq 6\%$,
- wysokość podciągania kapilarnego ≤ 20 mm,
- promień penetracji preparatu ≥ 7 cm.

Wynikający z wyników badań zakres spełnianych przez materiały kryteriów skuteczności przedstawiono w tabeli:

Tabela 5.6 Zakres spełnianych kryteriów [84]

Preparat iniekcyjny	Cegła				Zaprawa			Kamień		
	wilgotność pierwotna [%]									
	0	5	10	15	0	5	8	0	1	5
Żywica metylosilikonowa w benzynie lakowej	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Żywica silikonowa w benzynie lakowej	+	+	+	-	+	-	-	+	+	+
Żywica silikonowa w ługu potasowym	+	+	+	-	+	-	-	+	-	-
Krzemiany i metylokrzemiany alkaliczne	+	-	-	-	+	-	-	+	+	+
Iniekcja krystaliczna	+	-	-	-	+	-	-	-	-	-

+ kryteria spełnione, - kryteria nie spełnione

Uwzględniając podane powyżej założenia oraz uzyskane wyniki autorzy badań zaproponowali optymalne, dla poszczególnych preparatów, odległości otworów iniekcyjnych w cegle ceramicznej oraz dolomicie:

Tabela 5.7 Orientacyjne odległości otworów iniekcyjnych [84]

Preparat iniekcyjny	Cegła			Kamień
	wilgotność pierwotna muru [%]			
	5	10	15	5
	odległość otworów iniekcyjnych [cm]			
Żywica metylosilikonowa w benzynie lakowej	20	15	12	15
Żywica silikonowa w benzynie lakowej	16	12	10	10
Żywica silikonowa w ługu potasowym	12	8	6	6
Krzemiany i metylokrzemiany alkaliczne	14	10	7	15
Iniekcja krystaliczna	12	8	6	-

W przypadku wyższych wilgotności zalecono zagęszczenie nawiertów, wykonanie ich dwurzędowo, względnie wykonanie iniekcji ciśnieniowej.

5.2.4 Badania IBF

W ramach projektu badawczego *Hydrophobierende und/oder porenverschließende Injektionsmittel* (Hydrofobizujące i/lub zwięzające pory preparaty iniekcyjne) w austriackim Instytucie Badań nad Szkodami Budowlanymi (*ofi-Institut für Bauschadensforschung*) przeprowadzono obszerne badania cegły oraz zaprawy murarskiej poddanych działaniu środków iniekcyjnych [12].

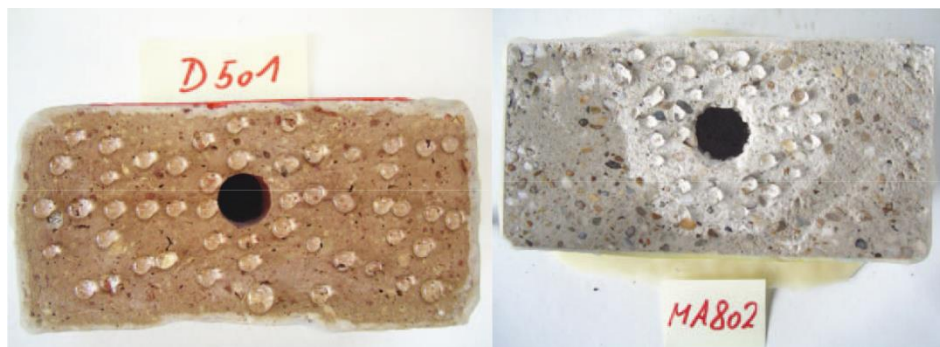


Fot. 5.2 Przygotowanie (na górze) oraz impregnacja (na dole) próbek (fot: [12])

Użyte do badań cegły zostały przepołowione oraz wykonano w nich otwory o średnicy 22 mm. Następnie nasączono je wodą do trzech różnych stopni zawilgocenia (S), tj. 20%, 50% oraz 80%, po czym z pięciu stron zabezpieczono żywicą epoksydową. Tak przygotowane próbki poddano iniekcji grawitacyjnej środkami iniekcyjnymi o stężeniu według wskazań producenta, jak również o połowę mniejszym i dwukrotnie wyższym niż wskazania producenta. Po zakończeniu iniekcji próbki przez okres minimum jednego tygodnia suszono w temperaturze 40 °C. Ponadto wykonano próbki zaprawy mu-

rarskiej – wapiennej oraz wapienno-trasowej. Zaprawę wapienną przygotowano, zainiektowano oraz osuszono w ten sam sposób jak próbki cegły. Natomiast impregnację zaprawy wapienno-trasowej, z uwagi na znaczną ilość zarysowań powstających podczas wykonywania odwiertów, wykonano poprzez zanurzenie w środku iniekcyjnym (Fot. 5.2).

Badania na próbkach cegły w większości przypadków wykazały bardzo dobre rozprowadzenie iniektu w materiale, niezależnie od stopnia zawilgocenia czy stężenia środka iniekcyjnego. W większości przypadków przekrój próbki w 100% wykazywał właściwości hydrofobowe (Fot. 5.3).



Fot. 5.3 Efekt hydrofobizacji widoczny na przekroju cegły oraz zaprawy wapiennej (fot: [12])

W tabeli 5.8 przedstawiono wyniki badań hydrofobizacji oraz promienia penetracji w zależności od stężenia środka iniekcyjnego w cegle o stopniu zawilgocenia 80%.

Tabela 5.8 Penetracja środka iniekcyjnego w cegle przy stopniu zawilgocenia 80% [12]

Środek iniekcyjny	Hydrofobizacja przekroju [%]/ Promień penetracji [mm]		
	stężenie środka iniekcyjnego		
	x 1	x 2	x 0,5
Krzemiany	100/75	100/75	100/75
Mikroemulsja	100/75	90/75	90/75
Mikroemulsja	95/75	90/75	90-95/75
Hydrofobizujący/zwężający pory	100/75	-	95/75
Metylokrzemiany potasowe	100/75	100/75	100/75
Metylokrzemiany alkaliczne	100/75	-	40/75

Tabela 5.9 Penetracja środka iniekcyjnego w zaprawie wapienno-trasowej przy stopniu zawilgocenia 20% [12]

Środek iniekcyjny	Głębokość wnikania [mm]		
	stężenie środka iniekcyjnego		
	x 1	x 2	x 0,5
Krzemiany	60-85	35-65	45-80
Mikroemulsja	15	10	10
Mikroemulsja	10	10	7
Hydrofobizujący/zwężający pory	10-60	-	60-65
Metylokrzemiany potasowe	60-80	10	70
Metylokrzemiany alkaliczne	60	-	35-55

W przypadku zaprawy wapiennej zaobserwowano wyraźnie niższy promień penetracji środka iniekcyjnego w porównaniu do cegły. Można tu zaobserwować trend, że im niższy stopień zawilgocenia, tym lepsze penetracja środkiem iniekcyjnym (Fot. 5.3). Stężenie środka iniekcyjnego także wpływało

na skuteczność iniekcji. Również w przypadku zaprawy wapienno-trasowej stopień rozproszczenia środka iniekcyjnego w próbce był mniejszy niż w przypadku cegły.

Głębokość wnikania środka iniekcyjnego (w zależności od jego stężenia) w zaprawę wapienno-trasową o stopniu zawilgocenia 20% przedstawiono w tabeli powyżej (Tabela 5.9).

Równoległe do prowadzonych w ramach projektu *Hydrophobierende und/oder porenverschließende Injektionsmittel* badań laboratoryjnych wykonano dwadzieścia ścian modelowych z cegły ceramicznej murowanej na zaprawie wapienno-trasowej [12]. Mury modelowe wykonano na płytach betonowych oraz zadaszono w celu ochrony przed opadami atmosferycznymi (Fot. 5.4). Następnie wykonano nawierty w rozstawie nie większym niż 10 cm, przez które z kolei zawilgocono mury w strefie przewidzianej iniekcji do stopnia zawilgocenia 20%, 50% oraz 100%. W kolejnym etapie przeprowadzono iniekcję murów przy użyciu sześciu różnych środków iniekcyjnych (w stężeniu według zaleceń producenta) oraz zastosowaniu pięciu różnych metod iniekcji: ciśnieniowej, impulsowej, zasobników grawitacyjnych, wałków dozujących oraz nalewania.



Fot. 5.4 Mury modelowe wykonane w Guntramsdorf (Austria) (fot.: [12])

Po wykonaniu iniekcji osiemnaście z dwudziestu murów zostało przez siedem dni poddane suszeniu metodą prętów grzejnych, po czym określono stopień zwilgocenia muru powyżej pasa iniekcji. Przez kolejne sześć tygodni strefa murów poniżej wykonanej przepony iniekcyjnej była poddawana zawilgoceniu i ponownie zbadano stopień zawilgocenia muru. Wykonano również nawierty (o średnicy 67 cm) w strefie iniekcji (centralnie w osiach otworów iniekcyjnych jak również pomiędzy nimi), oraz pobrano próbki zaprawy ze strefy iniekcji, w celu określenia stopnia penetracji środka iniekcyjnego w murze.

Tabela 5.10 Skuteczność iniekcji wykonanej w murach modelowych [12]

Nr	Środek iniekcyjny	Metoda iniekcji	S	S _{kap} /Skuteczność		
				C(A)	C(B)	ZWT
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]
1	Krzemiany	ciśnieniowa	100%	14,1%	84,1%	82,0%
2	Krzemiany	ciśnieniowa	50%	18,0%	85,6%	63,0%
3	Krzemiany	ciśnieniowa	20%	1,2%	6,9%	98,2%
4	Metylokrzemiany potasowe	rurki infuzyjnej	20%	4,1%	6,8%	73,0%
5	Metylokrzemiany potasowe	rurki infuzyjnej	50%	18,3%	11,7%	83,6%
6	Metylokrzemiany potasowe	rurki infuzyjnej	100%	5,8%	80,6%	74,2%
7	Mikroemulsja	nalewania	20%	5,4%	0,8%	98,9%

[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]
8	Mikroemulsja	nalewania	50%	5,2%	90,0%	99,1%
9	Mikroemulsja	nalewania	100%	43,4%	55,4%	85,9%
10	Mikroemulsja	impulsowa	20%	12,2%	1,2%	95,4%
11	Mikroemulsja	impulsowa	50%	77,9%	98,9%	84,4%
12	Mikroemulsja	impulsowa	100%	99,5%	99,0%	99,7%
13	Metylokrzemiany alkaliczne	impulsowa	20%	99,9%	99,8%	99,2%
14	Metylokrzemiany alkaliczne	impulsowa	50%	99,4%	99,3%	99,2%
15	Metylokrzemiany alkaliczne	impulsowa	100%	69,3%	85,7%	97,3%
16	Hydrofobizujący/zwężający pory	dozowników	20%	84,7%	99,8%	83,8%
17	Hydrofobizujący/zwężający pory	dozowników	50%	95,5%	59,0%	94,1%
18	Hydrofobizujący/zwężający pory	dozowników	100%	99,7%	99,6%	88,8%
19	Krzemiany	ciśnieniowa	50%*	5,3%	19,9%	96,5%
20	Metylokrzemiany potasowe	rukki infuzyjnej	50%*	4,0%	4,6%	68,5%

Legenda: S – stopień zawilgocenia, 50%* - bez osuszania, S_{kap} – stopień zawilgocenia kapilarnego, skuteczność: skuteczny/nieskuteczny, C(A) – cegła pobrana w osiach otworów iniekcyjnych, C(B) – cegła pobrana między otworami iniekcyjnymi, ZWT – zaprawa wapienno-trasowa

Na podstawie prób wykonanych na murach modelowych stwierdzono przede wszystkim iż najskuteczniejszym sposobem wykonywania iniekcji okazała się metoda wałków. Ponadto stwierdzono, iż środek iniekcyjny praktycznie nie rozchodzi się w zaprawie murarskiej. Szczegółowe wyniki badań murów modelowych przedstawiono w tabeli powyżej (Tabela 5.10).

5.2.5 Badania Politechniki Lubelskiej

Na Politechnice Lubelskiej przeprowadzono badania, których celem było określenie możliwości, jak również skuteczności działania hydrofobizacji wgłębnej w murach z opoki wapienistej [178]. W toku badań laboratoryjnych w trzech etapach wykonano kolejno badania:

- cech fizyko-mechanicznych opok pochodzących z trzech kamieniołomów, jak również kilku rodzajów zapraw murarskich: wapiennej wapienno-cementowej, trasowej oraz trasowej modyfikowanej pianą;
- związane z doбором preparatów hydrofobizujących – przeprowadzono proces hydrofobizacji oraz określono promień penetracji preparatu, zarówno w opoce, jak i w zaprawie;
- cech fizyko-mechanicznych opoki i zapraw po hydrofobizacji – w przypadku opoki wykonano badania: wytrzymałości na ścislenie, nasiąkliwości wodą, kapilarnego podciągania, odporności na zamarzanie, odporności na krystalizację soli oraz zasolenia, natomiast w przypadku zapraw: nasiąkliwości, kapilarnego podciągania oraz kapilarnego podciągania przez pomiar wilgotności masowej.

W celu określenia promienia penetracji środków iniekcyjnych w opoce zakładzie kamieniarskim przygotowano próbki 0,3 x 0,3 x 0,15-0,20 m. Do próbnej iniekcji wytypowano pięć rodzajów hydrofobizujących środków iniekcyjnych: żywicę akrylową, mieszaninę krzemianu i estru, krzemian modyfikowany silikonem, emulsję silikonową oraz mikroemulsję silikonową. Na podstawie badań wstępnych, ze względu na brak możliwości skutecznego wprowadzenia w strukturę opoki, wyeliminowano dwa materiały (żywicę akrylową oraz mieszaninę krzemianu i estru) – do dalszych badań zaklasyfikowano trzy pozostałe produkty. Przed przystąpieniem do iniekcji w każdej z próbek wykonano otwór iniekcyjny o średnicy 12 mm. Zwierciny z otworu posłużyły do określenia wilgotności próbki.

Iniekcja przy użyciu krzemianu modyfikowanego silikonem okazała się trudna i powolna – próby iniektowania próbek o niższej wilgotności również nie przynosiły efektu, w związku z czym badania przerwano. Emulsja silikonowa była stosunkowo dobrze przyjmowana przez materiał, choć nie zaob-

serwowano wypiętrzania się iniektu na powierzchni próbki. Również w próbkach o większej wilgotności zastosowanie emulsji silikonowej przyniosło dobry skutek, a po przecięciu próbek zaobserwowano duży promień penetracji, wynoszący średnio powyżej 5 cm, zaś oznaczenie absorpcji kropli wody dało efekt pozytywny. Podobne efekty podczas aplikacji uzyskano dla mikroemulsji silikonowej, jednak w tym wypadku promień penetracji nie okazał się w pełni zadowalający – parametry warunkujące skuteczność tego środka przedstawiono w tabeli:

Tabela 5.11 Zestawienie parametrów warunkujących skuteczność hydrofobizacji mikroemulsją silikonową [178]

Nr	Ciśnienie iniekcji [bar]	Stężenie	Wilgotność [%]	Promień penetracji [cm]	Badanie absorpcji kroplą wody (efekt hydrofobizacji)		
					3 cm	6 cm	9 cm
1	10	1:9	11,34	3,4	tak	nie	nie
2	10	1:9	13,66	3,1	tak	nie	nie
3	10	1:9	14,02	3,6	tak	nie	nie
4	10	1:7	16,45	3,4	tak	nie	nie
5	15	1:7	19,33	8,7	tak	tak	nie
6	15	1:7	18,98	9,1	tak	tak	nie
7	15	1:6	20,54	8,8	tak	tak	nie
8	10	1:6	20,11	4,3	tak	nie	nie
9	10	1:5	26,67	3,9	tak	nie	nie
10	15	1:5	25,01	6,1	tak	tak	nie

W przypadku iniekcji zapraw, zadawalające efekty uzyskano jedynie dla zaprawie wapiennej. Podczas iniekcji przy zmiennym ciśnieniu 1 do 6 bar uzyskano średnio 5 do 8 cm penetracji preparatu, co pozwala to na stwierdzenie, że możliwe jest stworzenie przepony hydrofobowej w zaprawach wapiennych.

Szczegółowe badania cech fizyko-mechanicznych opoki po hydrofobizacji przeprowadzono jedynie w przypadku próbek poddanych iniekcji przy użyciu emulsji silikonowej. Ze względu na brak efektów przy nasączeniu kamieni krzemianem modyfikowanym silikonem oraz niewystarczające efekty przy mikroemulsji silikonowej badania tych materiałów ograniczono do pomiaru nasiąkliwości. W toku przeprowadzonych badań, w szczególności nasiąkliwości i kapilarności, potwierdzono skuteczność hydrofobizacji opoki. Również badania mrozoodporności oraz odporności na krystalizację wykazały poprawę odporności hydrofobizowanej opoki na powyższe czynniki.

Czwartym etapem badań prowadzonych na Politechnice Lubelskiej [178] było przeprowadzenie badań na trzech wzniesionych murach modelowych (doświadczalnych) [179]. Wykonano trzy mury o wymiarach 150 x 120 x 50 cm na zaprawie wapiennej o proporcjach (wapno suchogazzone : piasek) 1:1,5 (Fot. 5.5). W celu przyspieszenia wiązania zaprawy wapiennej, mury, po owinięciu ich folią, poddano procesowi karbonizacji. Proces iniekcji przeprowadzono, zgodnie z informacjami zawartymi w instrukcji WTA 4-4-04/D [213] (poprzedniej wersji instrukcji WTA 4-10-15/D [211] – porównaj: Rozdział 4.7.2) oraz informacjami zawartymi w karcie technicznej środka iniekcyjnego, na trzy sposoby: jako iniekcje dwustronną (mur nr 1), iniekcję jednostronną z wypełnieniem rys i spękań zaprawą na bazie trasy (mur nr 2), oraz iniekcje jednostronną (mur nr 3).

Po upływie czternastu dni od przeprowadzenia iniekcji wanny, w których znajdowały się mury, zalano wodą. Po upływie kolejnych czterdziestu dni, celem określenia poziomu zawilgocenia muru, w trzech rzędach – pod przeponą, w pasie przepony oraz nad przeponą – pobrano próbki zaprawy. Z kolei odwierty opoki pobrano w dwóch rzędach: pod przeponą oraz nad przeponą. Badania zawilgocenia

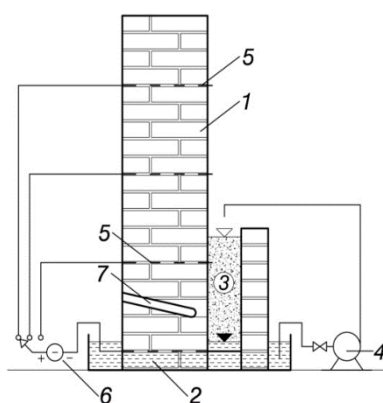
pobranych próbek potwierdziły skuteczność wszystkich wariantów wykonania izolacji metodą iniekcji niskociśnieniowej z użyciem mikroemulsji silikonowej. Zaobserwowano jednak przewagę iniekcji dwustronnej w odniesieniu do pozostałych wariantów. Zaobserwowano również, iż wstępne wypełnienie otworów trasem może powodować utrudnienia w aplikacji preparatów iniekcyjnych. Rozwiązaniem może być w tym wypadku podawanie trasu przy minimalnym ciśnieniu oraz rozwiercanie tak wypełnionych otworów wiertłem o większej średnicy, względnie aplikacja zaprawy trasowej drugim rzędem otworów (poniżej planowanej przepony).



Fot. 5.5 Wzniesione do badań mury modelowe z opoki wapiennej (fot: [179])

5.2.6 Badania Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego

Na Uniwersytecie Warmińsko-Mazurskim prowadzono badania nad wykorzystaniem nowej metody iniekcji chemicznej polegającej na zastosowaniu preparatu krzemo-organicznego w połączeniu z lekkim granulatem silikatowym [202]. Badania prowadzono na modelowym murze ceglanym wykonanym na zaprawie wapienno-cementowej, w którego spoinach umieszczono siatki z drutu stalowego, pokrytego chromoniklem (Rys. 5.6). Mury wraz z bocznymi zasobnikami wykonano w wannach, które następnie napełniono wodą. Poziom zawilgocenia w strefie wykonywanych otworów wiertniczych regulowano pośrednio, stykającym się z murem granulatem wapniowo-krzemowym, nawadnianym automatycznie pompą cyrkulacyjną. Zestaw zasilaczy prądu stałego, siatek chromowo-niklowych oraz odpowiednie zasolenie wody wypełniającej wanny dodatkowo modelował zjawiska elektrokinetyczne.



Rys. 5.6 Stanowisko do badania efektów suszarniczych w strefie iniekcji (rys.: [202])

Na tak przygotowanym stanowisku badawczym obserwowano zmiany zawartości wilgoci w strefie nawięrtów wywołane przez w prowadzony w otwory wiertnicze lekki granulaty silikatowy. Zaobserwowano, że jednorazowy wkład granulatu pozwala zaabsorbować taką ilość wilgoci z obszaru przy-

głego, że efekt osuszenia można zaobserwować już po kilkunastu minutach i trwa on do sześciu godzin. Przy wysokim, wynoszącym ok. 20%, zawilgoceniu muru strefa zadawalającego oddziaływania granulatu wynosi ok. 42 mm, z kolei przy zawilgoceniu na poziomie 10% sięga ona niemal 70 mm. Przy niższym poziomie zawartości wilgoci w murze strefy osuszenia, powstałe na skutek umieszczenia sorbentu w nawiertach o średnicy 20 mm wykonanych w odstępach co 15 cm, nakładają się na siebie po upływie około czterech godzin, co umożliwia rozpoczęcie iniekcji preparatem krzemorganicznym.

5.3 Badania własne autora (badania wstępne)

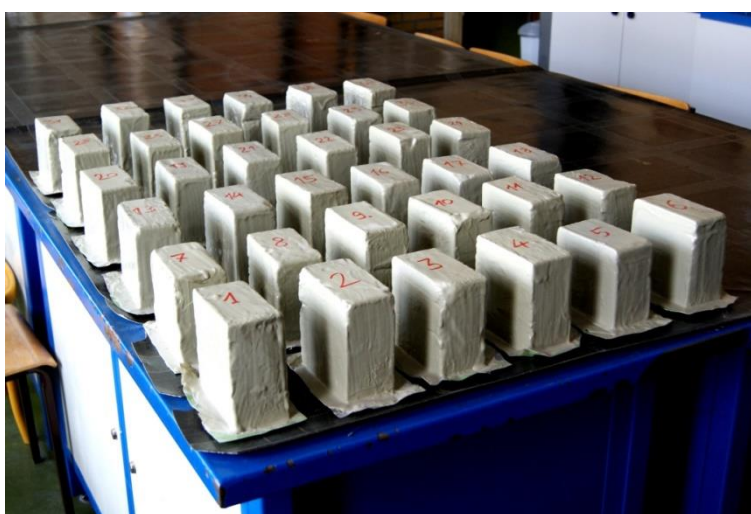
5.3.1 Penetracja preparatów iniekcyjnych w cegle ceramicznej

W ramach projektu mającego na celu określić trwałość wtórnych izolacji poziomych wykonywanych metodą iniekcji penetracyjnej (grawitacyjnej) przeprowadzono badania rozchodzenia się substancji iniekcyjnej w elementach wykonanych z ceramiki o czerepie porowatym, o zróżnicowanym poziomie zawilgocenia [103]. W badaniach wykorzystano cztery spośród dostępnych w handlu środków iniekcyjnych, o następujących bazach materiałowych:

- organiczne i nieorganiczne związki krzemu,
- roztwór związków krzemu z dodatkami hydrofobowymi,
- żywica silikonowa,
- silan (koncentrat mikroemulsji silikonowej),

przy czym środek na bazie silanów, z uwagi na fakt iż dostarczany jest w formie koncentratu, stosowany był w dwóch proporcjach mieszania z wodą – minimalnej (1:12) oraz maksymalnej (1:20) zalecanej przez producenta. Z uwagi na fakt, że wciąż zdarzające się zastosowania (głównie przez tzw. inwestorów „prywatnych”) szkła wodnego, do badań włączono również szkło wodne sodowe.

Badania prowadzone były na próbkach z cegły ceramicznej pełnej o maksymalnej nasiąkliwości (określonej przez ważenie po gotowaniu w wodzie) ok. 17,4%. W przepołowionych ceglach wykonano nawierty o średnicy ok. 20 mm i głębokości ok. 90 mm. Następnie próbki zostały nawodnione w takim stopniu, aby uzyskać trzy różne poziomy stopnia przesiąknięcia wilgocią: 20%, 50% oraz 80% (Tabela 5.12).



Fot. 5.6 Próbki przygotowane do badań (fot.: autor)

Zawilgocone próbki zostały pokryte materiałem zamkniętym na dyfuzję pary wodnej a następnie były sezonowane przez okres minimum dwóch tygodni, w celu uzyskania równomiernego rozkładu zawil-

gocenia (Fot. 5.6). Aplikacja środków iniekcyjnych prowadzona była grawitacyjnie (przy zastosowaniu lejków iniekcyjnych) przez okres 48 godzin, po czym próbki zostały przecięte i wysuszone do stałej masy w temperaturze 50 °C.

Tabela 5.12 Stopnie przesiąknięcia wilgocią próbek oraz odpowiadające im wilgotności masowe [103]

Stopień przesiąknięcia wilgocią (S)	Wilgotność masowa (u)
20%	3,5 ± 0,2%
50%	8,7 ± 0,2%
80%	14,0 ± 0,2%

Stopień rozprzestrzenienia się iniektu wokół nawiertu oceniony został wizualnie na suchych próbkach oraz po zwilżeniu wodą (Fot. 5.7 i 5.8) – wyniki oceny (pomiar odległości od krawędzi otworu) przedstawia tabela 5.13.



Fot. 5.7 Penetracja żywicy silikonowej przy S = 50% (fot.: autor)



Fot. 5.8 Penetracja silanu (1:12 z wodą) przy S = 50% (fot.: autor)

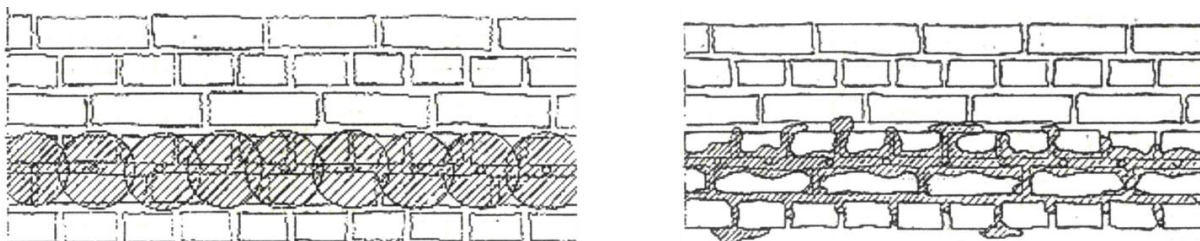
Tabela 5.13 Stopień rozprzestrzenienia środka iniekcyjnego w cegle pełnej o różnym poziomie zawilgocenia [103]

Preparat iniekcyjny (baza materiałowa)	Penetracja środkiem iniekcyjnym [mm]		
	S = 20%	S = 50%	S = 80%
Organiczne i nieorganiczne związki krzemu	2-6	12-41	19-35
Roztwór związków krzemu z dodatkami hydrofobowymi	33-50	34-46	10-23
Żywica silikonowa	45 - pełne	35-46	11-22
Silan (1:12 z wodą)	30-35	30-40	9-23
Silan (1:20 z wodą)	19-35	33 - pełne	14-16
Szkło wodne sodowe	30-44	11-22	20-22

Wyniki przeprowadzonych badań wskazują na fakt, iż całkowite i równomierne rozprowadzenia środka iniekcyjnego w murze (zgodnie z założeniami metody) w większości przypadków może być trudne do osiągnięcia. Tak jak sugerują to Balak i Similinger [15], przy prowadzeniu prac iniekcyjnych należałoby dążyć do zagęszczenia nawiertów (zmniejszenia odstępów między otworami) oraz w każdym przypadku wykonywać dwa rzędy otworów. Zasadnym wydaje się również wprowadzenie do zakresu prac diagnostycznych sprawdzenia, w jaki sposób preparat, który ma być zastosowany, rozprzestrzenia się w materiale przy istniejącym poziomie zawilgocenia.

5.3.2 Wpływ środków iniekcyjnych na właściwości zaprawy murarskiej

Choć z założenia przepona iniekcyjna powstaje w całym przekroju muru, w praktyce środek iniekcyjny migruje głównie w zaprawie murarskiej (Rys. 5.7) – wytyczne wykonywania wtórnych izolacji poziomych [211] jak również zalecenia producentów poszczególnych preparatów podkreślają konieczność przecinania co najmniej jednej (w grubszych murach dwóch) spoin wsporczych, a w przypadku poziomych otworów iniekcyjnych, wykonuje się je zazwyczaj wyłącznie w spoinie. Mając powyższe na uwadze wykonano badania, których celem było określenie wpływu działania wybranych preparatów, stosowanych do wykonywania wtórnej hydroizolacji poziomej murów metodą iniekcji chemicznej, na właściwości zaprawy murarskiej [86].



Rys. 5.7 Idealistyczna i rzeczywista dystrybucja środka iniekcyjnego w murze (rys.: [61])



Fot. 5.9 Próbkę zaprawy podczas formowania, zawilgacania oraz przeprowadzania iniekcji (fot.: autor)

Do badań wykorzystano zaprawę cementowo-wapienną o składzie objętościowym 2:0,5:8 (wapno hydratyzowane : cement portlandzki CEM I 32,5R : piasek o uziarnieniu 0-2 mm). Świeżą zaprawę umieszczono w formach wykonanych z rur PVC o średnicy 200 mm, przyciętych na odcinki 300 mm (Fot. 5.9). Po wstępnym związaniu zaprawy, tj. po dwóch dniach od zaformowania, próbki na kolejne pięć dni umieszczono w workach polietylenowych. Po okresie niezbędnym do uzyskania pełnej wytrzymałości przez zaprawę przystąpiono do jej zawilgocenia, umieszczając formy w kuwecie z wodą (na ruszcie) w taki sposób, aby zanurzenie stale wynosiło ok. 10 mm. Po dwóch dniach formy wycią-

gnięto z wody, zawinięto w folię i pozostawiono na dwa tygodnie, aby zapewnić równomierny rozkład wilgoci w zaprawie. W tak wykonanych próbkach wykonano otwory i przeprowadzono iniekcję – grawitacyjną przy wykorzystaniu kremu iniekcyjnego oraz ciśnieniową (pod ciśnieniem 0,20 MPa zwiększonym po 30 s do 0,50 MPa) przy wykorzystaniu metylokrzemianów alkalicznych oraz mikroemulsji silikonowej (SMK). Po kolejnych czterech tygodniach zaprawę rozformowano i pocięto piłą tarczową na próbki sześciennie o boku ok. 45 mm.

W ramach badań określone zostały następujące parametry zaprawy:

- nasiąkliwość
- podciąganie kapilarne i współczynnik absorpcji wody,
- wytrzymałość na ściskanie,
- mrozoodporność,
- odporność na krystalizację soli.

Badanie nasiąkliwości wykonano na dwudziestu czterech próbkach sześciennych, które po wysuszeniu w temperaturze $105 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ i zważeniu umieszczono w wannie, na ruszcie, a następnie zalano wodą do jednej czwartej wysokości. Po 24 h, tj. po zakończeniu zawilgacania próbek na skutek kapilarnego podciągania wilgoci, próbki zalano do połowy ich wysokości, po kolejnych 3 h do trzech czwartych wysokości. Całkowite zalanie wodą (minimum 20 mm powyżej górnej krawędzi próbek) nastąpiło 30 h od momentu rozpoczęcia badania. Po całkowitym nasączeniu próbki wyciągnięto z wody, osuszono ściereczką i zważono. Nasiąkliwość w stosunku do suchej masy zaprawy określono wg wzoru 11.

Badanie zjawiska podciągania kapilarnego przeprowadzono na dwudziestu czterech sześciennych próbkach zaprawy wysuszonych do stałej masy, które po zważeniu zostały umieszczone na ruszcie w płaskim naczyniu, a następnie zalane wodą w taki sposób, aby były zanurzone w wodzie na głębokość ok. 10 mm. Pomiar podciągania kapilarnego wykonano po 1, 3, 6 oraz 24 h od zanurzenia, wazząc próbki (po ich uprzednim osuszeniu ściereczką). Przyrost wilgotności próbek podczas poszczególnych pomiarów obliczono wg wzoru 9, natomiast współczynnik absorpcji wody ze wzoru 36. Wyniki badania nasiąkliwości oraz podciągania kapilarnego przedstawia tabela:

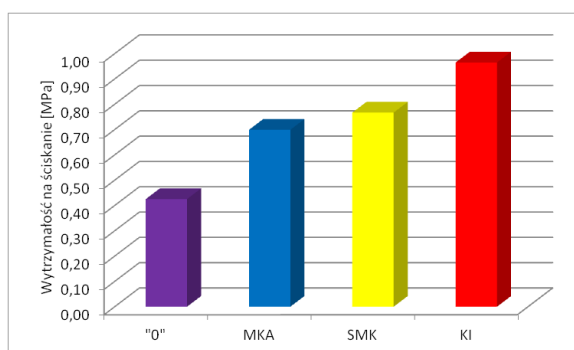
Tabela 5.14 Wyniki badań podciągania kapilarnego oraz nasiąkliwości zaprawy [86]

Preparat iniekcyjny	u_1 [%]	u_3 [%]	u_6 [%]	u_{24} [%]	w_{24} [$\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$]	n [%]
MKA	12,0	12,1	12,2	12,3	1,93	12,0
SMK	11,5	11,7	11,7	11,9	1,87	12,0
KI	7,8	8,0	8,1	8,4	1,35	10,2
0	11,7	11,8	11,8	11,9	1,89	11,8

u_i – wilgotność masowa po 1, 3, 6, oraz 24 h od zanurzenia, MKA – metylokrzemian alkaliczny, SMK – mikroemulsja silikonowa, KI – krem iniekcyjny, 0 – brak (zaprawa nieimpregnowana)

Próbie ściskania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej Instron 8500 Plus. Do badania użyto czterdziestu próbek sześciennych. Przyłożone obciążenie sterowane było siłą 50 N/s – wartość ta została dobrana w ten sposób, by próba ściskania pojedynczej kostki mieściła się w przedziale 30 a 90 sekund. Z uwagi na nieregularny kształt próbek, przed badaniem próbki zostały one wyrównane/wygładzone siatką ścierną o gradacji 220. Zmierzone zostały obciążenie ściskające (w tym obciąż-

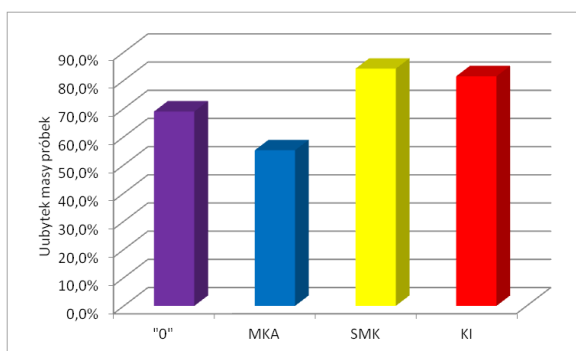
żenie niszczące) oraz przemieszczenie przy ściskaniu. Średnią wytrzymałość na ściskanie przedstawia rysunek 5.8.



Rys. 5.8 Średnia wytrzymałość zaprawy na ściskanie [86]

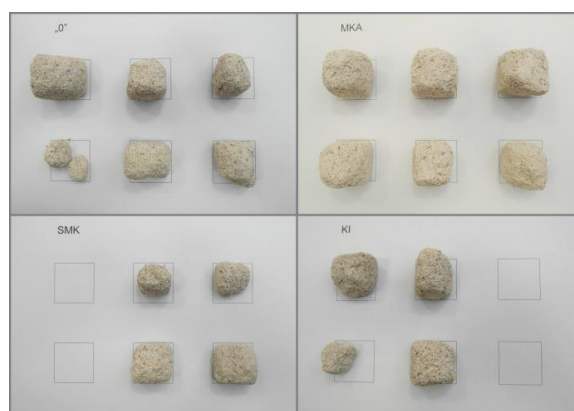
0 – zaprawa nieimpregnowana, MKA – metylokrzemian alkaiczny, SMK – mikroemulsja silikonowa, KI – krem iniekcyjny

Oznaczenie odporności na działanie mrozu wykonano poprzez określenie ubytku masy spowodowanego cyklicznym zamrażaniem i rozmrażaniem. Do badania przygotowano dwadzieścia cztery próbki. Wszystkie wysuszone do stałej masy, a następnie zważono. W dalszej kolejności próbki zostały zanurzone w wodzie w celu ich pełnego zawilgocenia. Nasycone próbki wyjęto z wody i umieszczono na 4 h w zamrażarce, w temperaturze $-20 \pm 2^\circ\text{C}$. Po zamrożeniu próbki przeniesiono do wanny z wodą o temperaturze $20 \pm 2^\circ\text{C}$ na co najmniej 4 h. Wykonano 25 cykli zamrażania i rozmrażania, po czym próbki wysuszone do stałej masy i ponownie zważono. Jako kryterium odporności na mróz przyjęto ubytek masy próbki w trakcie badania wyrażony w procentach (w stosunku do masy próbki przed rozpoczęciem badania) – średnie ubytki przedstawia rysunek 5.9. Fotografia 5.10 obrazuje z kolei wygląd próbek po zakończeniu badania.



Rys. 5.9 Średni procentowy ubytek masy zaprawy po cyklach zamrażania/rozmrażania

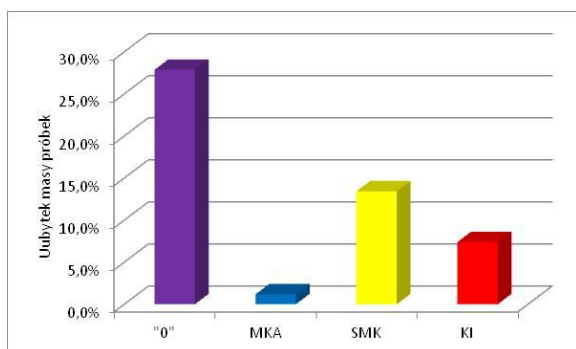
0 – zaprawa nieimpregnowana, MKA – metylokrzemian alkaiczny, SMK – mikroemulsja silikonowa, KI – krem iniekcyjny



Fot. 5.10 Próbkki zaprawy po cyklach zamrażania i rozmrażania (fot.: autor)

Badanie odporności na krystalizację soli przeprowadzono na dwudziestu czterech próbkach sześciennych, które po wysuszeniu i zważeniu na 2 h umieszczono w 14% roztworze dziesięciowodnego siarczanu sodu ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$). Następnie próbki suszono w temperaturze $105 \pm 5^\circ\text{C}$ przez minimum 16 h. W celu zapewnienia wysokiej wilgotności powietrza w pierwszym etapie suszenia, przed jego rozpoczęciem, w suszarce umieszczano kuwetę z wodą. Po zakończeniu suszenia próbki przez ok. 2 h ochładzano do temperatury pokojowej i ponownie zanurzano w roztworze soli. Po wykonaniu 15 takich cykli próbki były przez 24 h przechowywane w wodzie o temperaturze pokojowej, a następnie wysuszone do stałej masy i zważone. Odporność na krystalizację soli wyznaczono analogicznie jak dla

mrozoodporności. Rysunek 5.10 ukazuje średni procentowy ubytek masy. Fotografia 5.11 natomiast przedstawia wygląd próbek po badaniu.



Rys. 5.10 Średni procentowy ubytek masy zaprawy po badaniu odporności na krystalizację soli [86]

0 – zaprawa nieimpregnowana, MKA – metylokrzemian alkaiczny, SMK – mikroemulsja silikonowa, KI – krem iniekcyjny



Fot. 5.11 Próbki zaprawy po cyklach badania odporności na zasolenie (fot.: autor)

Wyniki badań podciągania kapilarnego oraz nasiąkliwości całkowitej potwierdzają, iż wysoki poziom zawilgocenia (impregnacja zaprawy prowadzona była przy zawilgoceniu, wynikającym z kapilarnego podciągania wody, zbliżonym do maksymalnego) utrudnia lub wręcz uniemożliwia stosowanie środków na bazie metylokrzemianów alkalicznych oraz mikroemulsji silikonowej. Natomiast bardzo dobrze w takich przypadkach sprawdzają się kremy iniekcyjne (wykazano ponad trzynastoprocentową redukcję nasiąkliwości całkowitej oraz niemal dwudziestodwunastoprocentowy spadek współczynnika absorpcji kapilarnej). Wszystkie badane środki iniekcyjne wpłynęły korzystnie na wytrzymałość na ściskanie oraz na odporność na działanie szkodliwych soli budowlanych. Dodatkowo metylokrzemiany alkaliczne spowodowały wzrost mrozoodporności zaprawy. Z uwagi na fakt, iż zaprawa poddana działaniu środków bazujących na wyłącznie na efekcie hydrofobizacji (mikroemulsji silikonowej oraz kremów iniekcyjnych) spowodowała spadek wytrzymałości na działanie mrozu, środków tych nie należy stosować, jeśli przegroda nie będzie miała możliwości wyschnąć przed zimą oraz nie jest chroniona przed przemarzaniem. Wyniki przeprowadzonych badań potwierdzają również, iż zabiegu iniekcji chemicznej muru nie należy prowadzić bez uwzględnienia specyficznych uwarunkowań, takich jak poziom zawilgocenia, położenie przegrody, warunki otoczenia, itp. Należy także pamiętać że mur to konglomerat składający się z materiałów o różnych parametrach technicznych.

5.3.3 Wysychanie muru oraz skuteczność iniekcji

W laboratorium Instytutu Konstrukcji Budowlanych Politechniki Poznańskiej wzniesiono trzy mury doświadczalne. Wymiary, markę zaprawy oraz grubość spoin przyjęto przez analogię do "dużych" murów doświadczalnych przy kontroli skuteczności w metodzie WTA [211]. Każdy z murów o długości ok 0,75 m składał się z trzynastu warstw cegły ceramicznej pełnej klasy 15, układanych (na grubość jednej cegły) w wiązaniu łączonym (pospolitym). Do murowania użyto zaprawy wapienno-cementowej o proporcjach objętościowych 2 : 0,5 : 8 (wapno hydratyzowane: cement CEM I 32,5R : piasek). Spoiny wsporne oraz poziome miały grubość odpowiednio 12 mm oraz 10 mm. Boczne powierzchnie murów zabezpieczono zaprawą uszczelniającą.

Wysezonowane mury poddano zawilgacaniu, zanurzając je w wodzie na głębokość ok. 15 cm (poziom wody utrzymywany był przez cały okres trwania badań). Po trzech tygodniach zawilgacania część murów znajdującą się powyżej poziomu wody zawinięto z czterech stron folią (Fot. 5.12), w celu

stworzenia tzw. komina kapilarnego, tj. zintensyfikowania procesu zawilgacania na skutek kapilarnego podciągania wilgoci. Po upływie sześciu tygodni od umieszczenia murów w wodzie przystąpiono do wykonania przepony poziomej metodą iniekcji chemicznej.

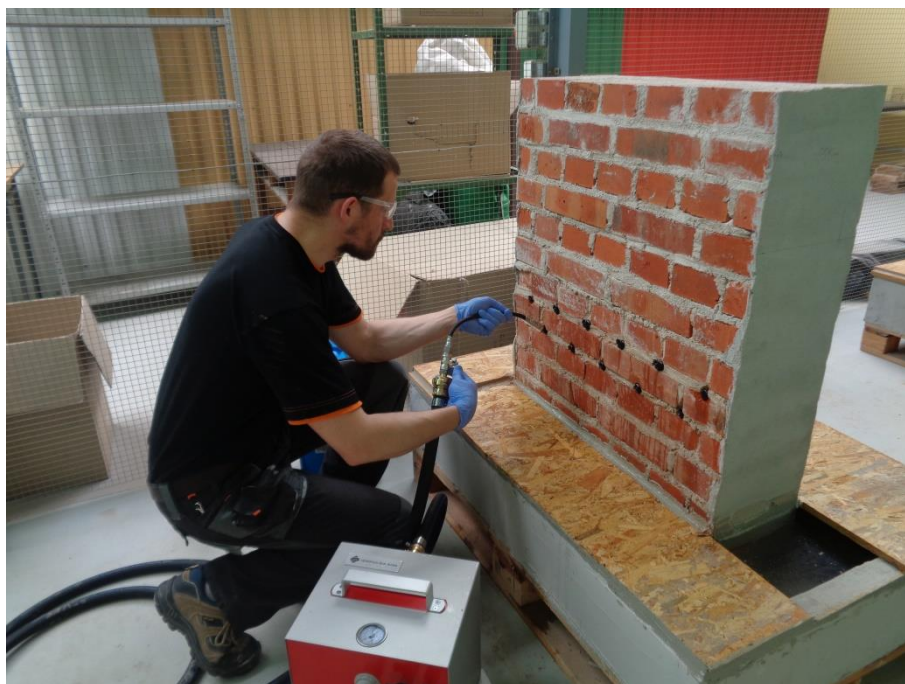


Fot. 5.12 Zawilgacanie kapilarne murów referencyjnych (fot.: autor)

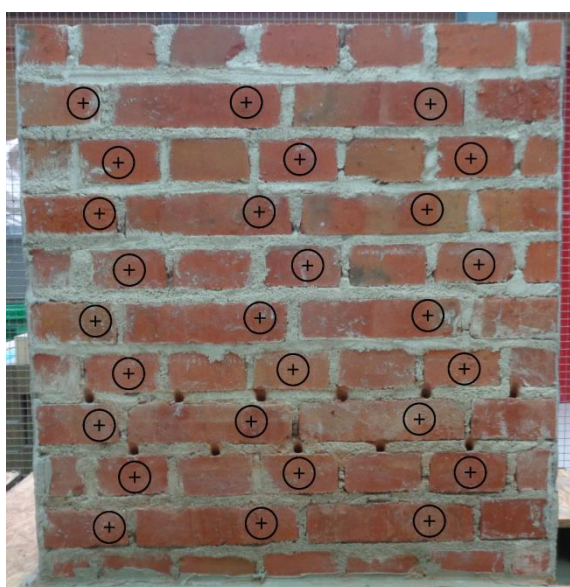
W każdym z trzech murów referencyjnych wykonano przeponę przeciw kapilarnemu podciąganiu wody, przy czym w każdym zastosowano inny środek iniekcyjny: preparat na bazie krzemianów (mieszanie krzemianów i metylokrzemianów alkalicznych), mikroemulsję silikonową oraz krem iniekcyjny na bazie silanów. Otwory iniekcyjne nawiercono pod kątem ok. 45° w osiowym rozstawie ok. 12,5 cm, w dwóch rzędach. Zwierciny usunięto przedmuchiując otwory niezależnym sprężonym powietrzem.

W przypadku środka na bazie krzemianów oraz mikroemulsji silikonowej iniekcję prowadzono zgodnie z zaleceniami producentów, przy zastosowaniu niskociśnieniowej pompy pneumatycznej oraz plastikowych pakerów wbijanych (Fot. 5.13). Aplikację kremu iniekcyjnego przeprowadzono bezciśnieniowo, jednokrotnie wypełniając otwory iniekcyjne.

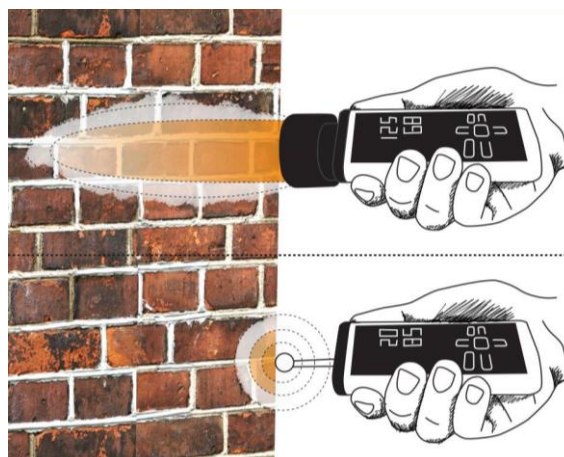
Kontrolę procesu wysychania ścian poddanych iniekcji przeprowadzono metodą nieniszczących pomiarów zespolonych, tj. prowadząc jednoczesne pomiary wilgotności powierzchniowej z zastosowaniem wilgotnościomierza elektronicznego Trotec T660 (głębokość pomiaru ok. 40 mm) oraz wilgotności węgłnej wilgotnościomierzem mikrofalowym T610 (Rys. 5.11) [105]. Aby pomiary wykonywane były zawsze w tym samym miejscu, jeszcze przed rozpoczęciem badania na murze doświadczalnym wyznaczono pięćdziesiąt cztery (po trzy na każdej z warstw muru, z wyjątkiem trzech dolnych i jednej od góry, po obu jego stronach) punkty pomiarowe (Fot. 5.14). Wynik badania stanowiła średnia z dziesięciu pojedynczych pomiarów wykonanych obu urządzeniami w każdym z punktów kontrolnych. Pomiary wilgotności murów przeprowadzono bezpośrednio przed oraz po 5, 13, 20, 30 oraz 60 (± 1) dniach od wykonaniem iniekcji.



Fot. 5.13 Iniekcja ciśnieniowa w murze referencyjnym (fot.: autor)



Fot. 5.14 Mur badawczy z zaznaczonymi punktami pomiarowymi (fot.: autor)



Rys. 5.11 Zasada prowadzenia zespolonych badań wilgotności (rys.: [105])

Jako ocena efektywności przeprowadzonej iniekcji przyjęto wyrażoną procentowo średnią wartość spadku zawilgocenia w poszczególnych poziomach (warstwach) muru, po kolejnych okresach badawczych (5, 13, 20, 30 oraz 60 dni od daty przeprowadzenia iniekcji), w porównaniu do średniej wartości zawilgocenia muru bezpośrednio przed wykonaniem przepony (Tabela 5.15 do 5.18).

Uzyskane pomiary zawilgocenia nie pozwalają na jednoznaczną ocenę skuteczności działania zastosowanych środków iniekcyjnych. Wprawdzie w przypadku wszystkich trzech murów poddanych iniekcji odnotowano spadki zawilgocenia, lecz wystąpiły one również w przypadku muru porównawczego (nie poddanego impregnacji). Wpływ na to mogło mieć sztuczne stworzenie komina kapilarnego (po zdjęciu folii wzrosła wydajność powierzchniowego odparowywania wilgoci), fakt, iż pierwszego pomiaru dokonano przed przeprowadzeniem iniekcji, ale już po wykonaniu odwiertów, jak również to,

Tabela 5.15 Procentowy spadek wilgotności muru poddanego iniekcji krzemianowej [105]

Pomiar	Czas [dni]	Numer warstwy (od spodu)									
		12	11	10	9	8	7	6	5	4	
powierzchniowy (ok. 3 cm)	awers	5	15,1	15,5	15,9	11,3	13,8	5,4	-2,9	-2,1	2,8
		13	14,0	14,8	20,1	10,8	17,1	8,6	10,4	2,8	5,2
		20	10,5	10,4	14,0	6,0	13,3	11,2	-9,1	3,2	5,2
		30	21,5	26,4	24,1	19,7	20,5	10,0	13,3	2,8	8,1
		60	15,9	15,3	16,7	10,1	19,1	13,9	15,6	6,3	5,5
	rewers	5	4,3	-0,4	4,8	-2,0	7,6	3,0	6,1	8,3	-1,1
		13	-0,9	1,2	1,8	-1,6	28,1	14,3	39,0	21,3	9,4
		20	-1,5	-1,4	2,2	-0,6	13,4	6,1	22,3	14,5	4,5
		30	7,9	7,9	10,6	8,5	12,7	8,4	22,9	6,1	13,1
		60	2,8	5,3	5,2	4,7	11,9	9,1	19,8	18,3	16,3
wgłębny (ok. 25 cm)	awers	5	-0,1	5,0	3,9	4,7	11,6	-1,9	-15,5	-24,6	-4,8
		13	7,4	7,7	2,0	9,4	16,5	-3,4	-10,9	-19,4	0,6
		20	4,9	7,5	6,6	11,9	21,7	-1,0	-7,1	-14,0	2,4
		30	-7,4	-1,4	-6,2	-2,0	6,4	-13,0	-16,4	-21,4	-1,2
		60	7,0	11,4	8,6	13,2	19,5	-4,7	-9,6	-16,8	2,7
	rewers	5	2,6	1,2	3,0	8,0	12,0	2,6	-2,6	-27,1	-5,2
		13	7,5	6,5	7,3	13,3	18,0	4,6	-2,8	-24,6	-4,3
		20	7,8	7,4	5,9	13,4	20,1	3,3	-4,3	-24,7	-4,2
		30	-6,5	-5,5	-2,0	0,9	9,4	-7,0	-12,3	-32,8	-10,5
		60	9,7	7,5	8,8	13,1	21,8	-6,3	-3,1	-24,5	-1,9

awers – od strony nawięrtów iniekcyjnych, rewers – z drugiej strony niż nawięrt

Tabela 5.16 Procentowy spadek wilgotności muru poddanego iniekcji mikroemulsją silikonową [105]

Pomiar	Czas [dni]	Numer warstwy (od spodu)									
		12	11	10	9	8	7	6	5	4	
powierzchniowy (ok. 3 cm)	awers	5	-4,7	0,0	-10,7	6,9	-1,5	0,4	-0,3	6,3	3,5
		13	-10,7	-2,4	-13,1	-3,0	-3,3	3,7	14,1	16,8	7,3
		20	-10,8	1,0	-14,2	1,8	1,5	8,6	27,2	17,7	3,0
		30	0,8	10,4	2,1	13,7	5,0	12,7	37,3	20,5	2,8
		60	-1,2	0,8	-9,6	10,5	10,9	18,3	56,9	33,5	12,2
	rewers	5	-4,6	4,6	6,8	5,7	7,2	2,5	-3,4	-5,2	4,4
		13	0,2	6,5	7,6	5,8	7,8	5,6	-10,1	8,3	6,0
		20	-8,2	-4,1	-3,3	1,3	3,2	0,9	1,9	9,4	2,0
		30	7,8	15,2	13,8	10,3	19,8	16,0	-3,3	14,5	-0,9
		60	-4,9	8,8	4,8	5,8	16,8	9,0	2,3	11,3	13,0
wgłębny (ok. 25 cm)	awers	5	-9,0	-4,0	-5,9	-2,4	-8,9	-9,9	-6,1	-9,7	-9,2
		13	-12,1	-8,5	-6,4	-1,9	1,1	-2,4	0,2	-8,0	-4,1
		20	-10,8	5,0	-0,4	4,4	11,5	6,5	8,9	-1,4	0,4
		30	-10,8	-3,7	-7,5	1,0	14,4	11,5	12,7	-1,5	-1,7
		60	-7,6	-5,0	-4,7	3,9	22,6	19,9	29,8	3,9	0,5
	rewers	5	-12,7	-4,7	-4,5	-1,3	-2,5	-6,6	-5,1	-8,8	-7,9
		13	-5,0	-6,2	-7,0	-4,2	0,6	-1,2	0,9	-5,8	0,8
		20	-1,1	1,6	1,1	3,6	10,1	10,3	9,1	0,8	7,3
		30	-6,6	-4,2	-6,5	-1,0	6,6	10,8	10,1	2,1	3,5
		60	2,7	-0,9	-1,5	4,8	12,4	16,9	14,2	5,7	7,6

awers – od strony nawięrtów iniekcyjnych, rewers – z drugiej strony niż nawięrt

Tabela 5.17 Procentowy spadek wilgotności muru poddanego iniekcji kremem iniekcyjnym [105]

Pomiar	Czas [dni]	Numer warstwy (od spodu)									
		12	11	10	9	8	7	6	5	4	
powierzchniowy (ok. 3 cm)	awers	5	4,3	17,5	16,1	15,1	30,1	30,1	31,3	5,1	14,7
		13	1,9	18,9	18,3	14,6	30,4	50,1	47,5	0,5	11,7
		20	-11,1	10,0	9,8	6,1	31,3	55,8	56,5	8,6	19,6
		30	-0,5	15,6	21,2	17,0	33,8	63,5	67,4	17,8	18,5
		60	5,6	19,6	20,5	20,1	40,8	68,5	71,8	25,7	25,7
	rewers	5	-7,6	5,2	3,1	1,2	11,8	13,3	10,3	0,1	-1,8
		13	2,6	7,3	12,8	10,6	14,9	23,5	12,7	-3,6	3,6
		20	-3,1	-1,4	0,7	0,4	10,7	18,3	13,2	-3,6	1,0
		30	-3,4	-1,1	4,3	0,1	13,0	16,6	13,3	0,9	3,3
		60	2,9	6,2	10,3	8,4	21,0	25,0	17,7	-1,7	3,2
względny (ok. 25 cm)	awers	5	7,9	-2,8	3,2	0,8	9,5	13,7	10,2	3,7	3,0
		13	14,3	4,3	10,6	10,1	20,2	27,5	22,2	10,3	10,0
		20	9,3	-2,6	4,3	4,6	16,5	27,1	28,2	11,5	8,6
		30	10,1	-1,5	7,6	3,6	14,8	28,5	29,5	14,7	7,6
		60	3,5	-6,8	1,5	0,0	12,7	24,1	27,5	13,2	7,7
	rewers	5	-2,6	-2,9	-5,5	0,0	5,2	14,4	7,0	1,5	2,9
		13	8,8	0,8	1,9	7,0	13,7	22,5	9,8	4,2	4,7
		20	4,0	-1,7	-2,5	1,2	12,4	20,3	12,0	3,3	3,7
		30	4,9	0,0	0,0	2,1	13,0	24,0	16,4	4,8	6,5
		60	13,6	6,5	3,1	8,3	15,7	24,1	16,4	3,3	4,6

awers – od strony nawięrtów iniekcyjnych, rewers – z drugiej strony niż nawięrt

Tabela 5.18 Procentowy spadek wilgotności muru nie poddanego iniekcji (porównawczego) [105]

Pomiar	Czas [dni]	Numer warstwy (od spodu)									
		12	11	10	9	8	7	6	5	4	
powierzchniowy (ok. 3 cm)	awers	5	5,1	2,6	10,1	13,9	17,1	1,7	12,9	13,7	0,9
		13	9,2	10,2	14,4	16,4	16,0	14,2	20,3	18,1	4,0
		20	1,6	3,7	3,4	14,2	13,5	8,9	17,0	17,6	9,8
		30	21,7	18,5	22,6	29,0	25,6	11,9	29,2	13,4	6,1
		60	11,8	0,5	10,3	21,7	24,5	13,2	24,0	14,5	11,4
	rewers	5	1,3	0,9	4,1	9,4	12,0	2,4	6,4	12,2	0,1
		13	15,9	11,0	16,6	13,7	23,8	9,7	13,1	14,9	9,4
		20	-1,9	-2,1	0,4	2,4	17,4	9,5	10,7	16,6	17,0
		30	6,6	10,6	12,9	12,8	23,6	12,3	16,4	16,8	0,8
		60	5,2	8,2	6,2	7,1	19,8	16,2	19,0	15,4	7,2
względny (ok. 25 cm)	awers	5	-4,3	-6,5	-2,2	-4,5	13,5	13,6	5,3	4,8	5,6
		13	0,5	-0,8	2,0	0,9	20,3	21,4	12,9	8,0	8,1
		20	1,7	-0,4	4,6	2,4	23,6	25,6	17,8	8,9	11,8
		30	-8,2	-6,3	-3,6	-4,4	16,6	21,7	14,8	5,3	7,7
		60	-4,4	-10,5	-2,4	-2,5	14,9	24,4	18,4	3,5	7,2
	rewers	5	3,0	-1,6	-2,1	-4,7	15,6	16,4	11,7	7,6	4,5
		13	9,6	2,8	-0,3	0,4	21,4	26,0	17,7	8,7	7,8
		20	8,2	1,2	2,7	1,9	24,2	30,5	20,0	12,4	11,6
		30	2,3	-3,1	-4,8	-4,6	20,2	25,2	14,4	5,0	5,1
		60	9,3	5,2	5,3	-1,1	37,9	33,5	22,0	6,6	3,8

awers – od strony nawięrtów iniekcyjnych, rewers – z drugiej strony niż nawięrt

że pomiary wykonywano w okresie letnim (tj. przy wysokiej temperaturze oraz niskiej wilgotności względnej powietrza).

W przypadku ścian poddanych iniekcji największe spadki wilgotności muru odnotowano:

- przy zastosowaniu iniekcji krzemianowej nad pasem iniekcji (o ok. 14%) – w pasie iniekcji odnotowano niewielki wzrost wilgotności powierzchniowej,
- przy zastosowaniu mikroemulsji silikonowej w pasie iniekcji i bezpośrednio nad nim (o ok. 18%) – odnotowano natomiast niewielki wzrost zawilgocenia w górnych warstwach muru,
- przy zastosowaniu kremu iniekcyjnego w pasie iniekcji (o ok. 35%); natomiast spadek wilgotności powierzchniowej w poziomie iniekcji, od strony wykonywanych nawiertów wyniósł ok. 70% – przyczyny tego faktu można upatrywać w sposobie (nie wymagających pakierów ani dozowników) prowadzenia iniekcji oraz silnie hydrofobizującym działaniu preparatu.

Podkreślenia wymaga również fakt, że wysychanie murów przebiegało bardzo nierównomiernie. W tym samym momencie obserwowane były spadki wilgotności w jednym miejscu, przy jednoczesnym wzroście w innym.

Metoda nieniszczących pomiarów zespolonych może okazać się bardzo pomocna przy ocenie skuteczności działań renowacyjnych na obiektach rzeczywistych. W przypadku badań porównawczych wymaga ona jednak ustabilizowanych warunków (w tym ustalonej na pewnym poziomie temperatury i wilgotności powietrza) oraz kalibracji metody poprzez wykonanie kontrolnych pomiarów i ustalenie faktycznej wilgotności masowej, np. metodą karbidową (urządzeniem CM) lub wagowo-suszarkową. Natomiast w przypadku długofalowych pomiarów na obiektach budowlanych wskazane jest dodatkowa rejestracja warunków klimatycznych.

Interpretacja uzyskanych pomiarów każe również wysnuć wniosek iż dobór punktów pomiarowych wykonany zgodnie z instrukcją WTA nr 4-10-15/D [211] może prowadzić do zakłóceń pomiarów tam, gdzie wskazania ww. instrukcji stoją w sprzeczności z zaleceniami producenta wilgotnościomierzy (tj. minimalnej odległości od krawędzi przegrody).



Fot. 5.15 Próbkki (rdzenie wiertnicze) podczas badania absorpcji kapilarnej (fot.: autor)

Po upływie trzech miesięcy od wykonania iniekcji, w strefie wykonania wtórnej izolacji poziomej każdego z trzech murów pobrano rdzenie wiertnicze (Fot. 5.15), w celu przeprowadzenia pomiarów

współczynnika kapilarnej absorpcji wody (w_{24}) oraz określenia jakości uszczelnienia (Q_w) [125]. Dodatkowo, powyżej pasa iniekcji z każdego z murów pobrano również próbkę referencyjną. Wszystkie rdzenie osuszono do stałej masy, przechowując je w temperaturze ok. 40 °C. Tak przygotowane próbki zanurzono w wodzie (poziom zanurzenia przez cały okres badania utrzymywano na poziomie ok. 12 mm) i zważono odpowiednio po pięciu i dwudziestu minutach oraz jednej, czterech, ośmiu, szesnastu i dwudziestu czterech godzinach.

Wyniki przeprowadzonych pomiarów, jak również:

- współczynnik absorpcji kapilarnej po 24 godzinach od zanurzenia w wodzie (w_{24}), obliczony zgodnie ze wzorem 36, oraz
- współczynnik jakości izolacji (Q_w) wyznaczony z równania 44, przedstawia tabela:

Tabela 5.19 Wyniki pomiarów absorpcji kapilarnej rdzeniu wiertniczych [125]

Nr	A [m ²]	Masa w kg po "x" godzinach od zanurzenia								w_{24} [kg/m ² ·h ^{0,5}]	Q_w [%]	
		0	0,1	0,33	1	4	8	16	24			
A0	0,016	3,640	3,650	3,655	3,665	3,695	3,720	3,760	3,795	1,93	2,73	-
B0	0,016	3,660	3,665	3,670	3,680	3,730	3,785	3,860	3,905	3,05		
C0	0,016	3,750	3,750	3,760	3,780	3,840	3,915	3,970	4,005	3,23		
A1	0,016	3,770	3,770	3,775	3,780	3,795	3,815	3,855	3,880	1,39	0,94	81
A3	0,017	3,785	3,785	3,785	3,790	3,795	3,805	3,815	3,825	0,48		
B1	0,016	3,770	3,775	3,775	3,775	3,780	3,785	3,795	3,800	0,39		
B2	0,015	3,610	3,615	3,615	3,615	3,615	3,620	3,620	3,625	0,20	0,22	113
B3	0,016	3,745	3,745	3,745	3,745	3,745	3,745	3,750	3,750	0,07		
C1	0,015	3,665	3,665	3,665	3,670	3,675	3,685	3,700	3,715	0,70		
C2	0,016	3,735	3,740	3,740	3,740	3,740	3,740	3,740	3,740	0,06	0,40	104
C3	0,016	3,745	3,750	3,750	3,750	3,760	3,770	3,775	3,780	0,44		

A0-C0 – próbki referencyjne, A – próbki poddane iniekcji środkiem na bazie krzemianów, B – próbki poddane iniekcji mikroemulsją silikonową, C – próbki poddane iniekcji kremem iniekcyjnym

W przypadku wszystkich trzech środków iniekcyjnych odnotowano poprawę parametrów muru pod kątem kapilarnej absorpcji wody, choć jako zadowalający ($Q_w \geq 90\%$) uznać można jedynie efekt iniekcji mikromulsją silikonową oraz kremem iniekcyjnym. Podkreślenia wymaga jednak fakt, że w przypadku tych dwóch środków iniekcyjnych nie tylko udało się przekroczyć wartość graniczną współczynnika jakości izolacji, ale również uzyskać współczynnik absorpcji mniejszy niż wartość graniczna dla materiałów o obniżonej chłonności. Należy jednak zauważyć znaczne zróżnicowanie uzyskanych wartości współczynnika w_{24} . Zróżnicowanie to dotyczy również próbek referencyjnych – w jednym przypadku wartość ta jest niższa niż dla materiałów silnie chłonnych. Przyczyny tego zjawiska można upatrywać w niekontrolowanym przemieszczeniu się środka iniekcyjnego poza planowaną strefę iniekcji podczas prowadzenia aplikacji ciśnieniowej. Ryzyko wystąpienia takiego zjawiska stanowi tzw. słaby punkt iniekcji pod ciśnieniem [77].

Opisany sposób oceny skuteczności zabiegów iniekcyjnych pozwala na bardzo dokładną weryfikację efektów uzyskanych w stosunku do oczekiwanych. Jednakże, z uwagi na konieczność pobierania rdzeni wiertniczych, nie należy oczekiwać, iż stanie się on szeroko i powszechnie stosowaną praktyką. W warunkach budowy wystarczającą zdaje się być ocena wysychania poprzez okresowe pomiary wilgotności metodami nieniszczącymi.

6 METODA BADAWCZA

6.1 Cel i przedmiot badań

Prowadzone dotychczas metody badań szeroko rozumianej skuteczności środków iniekcyjnych przeciw kapilarnemu podciąganiu wilgoci w murze można podzielić na następujące kategorie:

- wdrożeniowe – których celem jest określenie parametrów wprowadzanej lub rozwijanej metody wykonywania iniekcji;
- certyfikujące – mające na celu ocenę oraz opcjonalną certyfikację dostępnego w handlu preparatu;
- diagnostyczne – prowadzące do doboru optymalizacji zastosowania wybranej metody w specyficznych warunkach (konkretnym obiekcie budowlanym);
- oceniające – prowadzone w celu oceny zastosowania danego preparatu i/lub metody w konkretnej sytuacji.

Za wyjątkiem badań certyfikujących, do wszystkich kategorii można zaliczyć zarówno badania laboratoryjne – prowadzone na próbkach pojedynczych materiałów oraz murach badawczych o zróżnicowanych rozmiarach – jak i polowe (in situ).

W zdecydowanej większości przypadków badań jako kryterium oceny skuteczności środków i/lub technologii iniekcji przyjmowane były bądź postęp wysychania strefy muru znajdującej się powyżej wykonanej przepony, bądź też zmiana parametrów przegrody w strefie przeprowadzonej iniekcji. O ile w przypadku metod mechanicznych o skuteczności uszczelnienia (podobnie jak w przypadku standardowych materiałów hydroizolacyjnych) o skuteczności w głównej mierze decydują właściwości samego materiału (i to je należy badać), to specyfika metody wykonywania wtórnej izolacji poziomej w technologii iniekcji sprawia, że praktycznie nie ma możliwości oceny danego preparatu i/lub sposobu jego zastosowania w oderwaniu od parametrów przegrody budowlanej.

Stosowane w kraju i za granicą metody badań skuteczności, których wynik ma stanowić kryterium doboru środka iniekcyjnego (rozdział 4.7) nie mogą, co zrozumiałe, stanowić bezpośredniego przełożenia na uzyskanie takich samych albo bardzo zbliżonych efektów na konkretnych obiektach budowlanych. Nie uwzględniają bowiem szeregu innych czynników, niemożliwych do założenia dla wszystkich spotykanych zastosowań (np. stopnia przesiąknięcia wilgocią, czy poziomu zasolenia muru) [40]. Pozwalają jednak dokonać porównania między poszczególnymi środkami iniekcyjnymi dostępnymi na rynku, jak również wskazują niektóre zalety lub ograniczenia poszczególnych preparatów. W większości przypadków brak jest jednak jednoznacznego kryterium (takiego jak np. klasy wytrzymałości w przypadku betonów i zapraw czy współczynnik przewodzenia ciepła λ w przypadku materiałów termoizolacyjnych), które pozwalało by sklasyfikować środki iniekcyjne pod kątem nie tyle ich właściwości jako takich, co ich wpływu na zahamowanie kapilarnego transportu wilgoci w przegrodach budowlanych.

Głównym celem prowadzonych badań było zaproponowanie parametru pozwalającego ocenić i porównać skuteczność stosowanych środków iniekcyjnych. Celem dodatkowym była weryfikacja tezy:

Na skuteczność zabiegu wykonywania wtórnej izolacji poziomej przeciw wilgoci podciąganej kapilarnie w technologii iniekcji wpływają stosowany środek iniekcyjny oraz jego sposób jego aplikacji, jak również zawilgocenie oraz zasolenie muru.

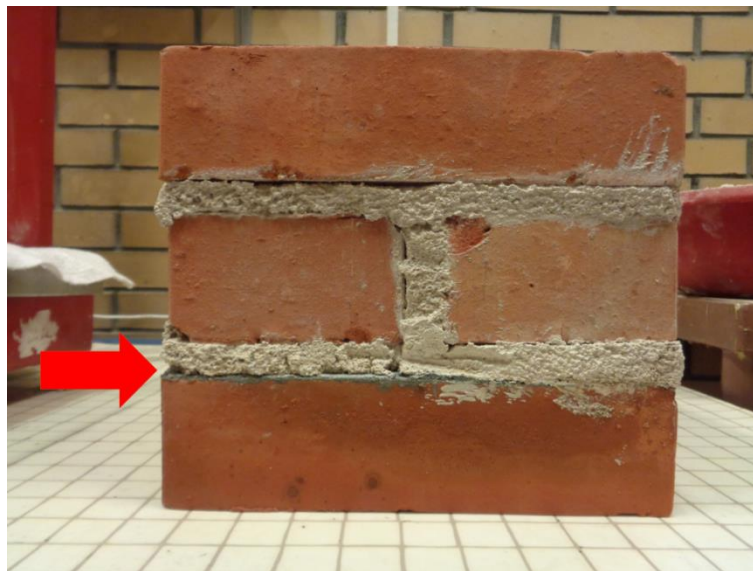
Oraz też pomocniczych:

- im wyższy stopień zawilgocenia, tym mniejsza skuteczność iniekcji chemicznej,
- zasolenie przegrody obniża skuteczność technologii iniekcji,
- technologie bezciśnieniowe pozwalają na uzyskanie jednorodnej przepony przecinającej podciąganie kapilarne.

6.2 Metodyka badań

6.2.1 Przygotowanie i selekcja próbek

W ramach przeprowadzonych badań przygotowano 39 próbek analogicznych do stosowanych w metodzie BuFAS (rozdział 4.7.3) [20], tj. składające się z sześciu cegieł ułożonych w trzy warstwy (na szerokość jednej cegły w obu kierunkach) i połączonych zaprawą wapienno-cementową. Markę zaprawy oraz grubość spoin przyjęto przez analogię do zaprawy stosowanej w metodzie WTA [211], tj. użyto zaprawy o proporcjach objętościowych 2 : 0,5 : 8 (wapno hydratyzowane: cement CEM I 32,5R : piasek), a spoiny wsporne oraz poziome miały grubość odpowiednio 12 mm oraz 10 mm. W przypadku trzech próbek na etapie murowania nad pierwszą warstwą wykonano warstwę hydroizolacyjną z sztywnego szlamu uszczelniającego (Fot. 6.1).



Fot. 6.1 próbka badawcza z wykonaną warstwą hydroizolacji mineralnej (fot.: autor)

Wysezonowane próbki wysuszono do stałej masy w temperaturze 60 °C i zważono, a następnie wydzielono te z wykonaną warstwą hydroizolacji mineralnej (próbki oznaczono numerami od 01 do 03) i zabezpieczono je przed zawilgoceniem poprzez owinięcie folią. Pozostałe próbki podzielono, przy użyciu generatora liczb losowych, na mniejsze grupy, wg następujących kryteriów (porównaj: Tabela 6.1):

- technologia iniekcji:
 - iniekcja niskociśnieniowa mieszaniną krzemianów i metylokrzemianów alkalicznych (12 próbek),
 - technologia kremów iniekcyjnych:
 - krem iniekcyjny – emulsja o/w (12 próbek),
 - krem iniekcyjny – emulsja w/o (12 próbek);

- zawilgocenie:
 - wodą wodociągową (24 próbki),
 - roztworem soli (24 próbki);
- stopień zawilgocenia:
 - S = 80% (18 próbek),
 - S = 95% (18 próbek).

Tabela 6.1 Kryteria podziału i podział próbek

Oznaczenie	Technologia iniekcji	Preparat iniekcyjny (baza materiałowa)	Stopień zawilgocenia (S)	Zawilgocenie	Liczba Próbek
11-13	niskociśnieniowa	krzemian alkaliczny, krzemian metylu potasu	80%	wodą	3
14-16			95%	wodociągową	3
17-19			80%	roztworem	3
20-22			95%	soli	3
23-25	kremów iniekcyjnych	trietoksyoctysilan (80% emulsja o/w)	80%	wodą	3
26-28			95%	wodociągową	3
29-31			80%	roztworem	3
32-34			95%	soli	3
35-37		trietoksyoctysilan (40% emulsja w/o)	80%	wodą	3
38-40			95%	wodociągową	3
41-43			80%	roztworem	3
44-46			95%	soli	3
łącznie:					36

Następnie, również przy użyciu generatora liczb losowych, wytypowano trzy próbki w celu zbadania własności absorpcji wody przed wykonaniem iniekcji (oznaczenie: 04 do 06).

6.2.2 Zawilgocenie

Próbki przeznaczone do osiągnięcia stopnia zawilgocenia S=95 % umieszczono w pojemnikach z tworzywa sztucznego. Próbki ustawiono na podkładkach dyntansowych, tak aby woda miała do nich dostęp ze wszystkich stron a następnie zalano je wodą do ok. 1/3 ich wysokości. Po upływie 24 godzin próbki zalano do wysokości ok. 2/3 wysokości, a po kolejnych 24 godzinach zwiększono poziom wody w taki sposób, aby utrzymywał się na poziomie min. 10 mm powyżej górnych krawędzi próbek. Próbki przechowywane były w wodzie do momentu uzyskania stałej masy. Do zawilgocenia stosowano wodę wodociągową oraz zdefiniowany roztwór soli (tzw. *roztwór soli WTA*). Roztwór soli WTA wykorzystywany jest do badania odporności na szkodliwe dole budowlane tynków renowacyjnych, wg instrukcji WTA nr 2-9-20 [208] i zawiera mieszaninę soli, które są uważane za istotne dla najczęściej występujących uszkodzeń, związanych z zasoleniem. Wykonanie go wymaga dodania do 1 litra wody demineralizowanej następujących ilości i rodzajów soli: 35 gram chlorku sodu, 5 gram bezwodnego siarczanu sodu oraz 15 gram azotanu sodu.

Po zwilgoceniu do stałej masy, próbki wyjęto z wody/roztworu, osuszono powierzchniowo i zważono, a następnie zabezpieczono przed wysychaniem owijając je ze wszystkich stron folią. Na podstawie masy próbek suchych oraz w stanie maksymalnego nasycenia obliczono:

- uśrednione zawilgocenie w stanie pełnego nasycenia – które wyniosło odpowiednio 11,7% dla próbek zawilgoconych wodą wodociągową oraz 12,2% w przypadku próbek nasączonych roztworem soli – oraz

- ilość wody i roztworu (jak również docelową masę poszczególnych próbek), niezbędną do zawilgocenia pozostałych próbek do stopnia zawilgocenia S równego 80%, z dokładnością $\pm 5\%$.

Po zakończeniu zawilgoceniu wszystkich próbek do docelowego poziomu, zabezpieczono je folią przed wysychaniem i pozostawiono na minimum dwa tygodnie, w celu uzyskania jednorodnego rozkładu wilgoci w strukturze próbki.

6.2.3 Wykonanie iniekcji

Przed przystąpieniem do wykonania otworów iniekcyjnych i przeprowadzenia iniekcji boczne krawędzie dolnej warstwy cegły (a w przypadku próbek przeznaczonych do iniekcji ciśnieniowej również dolną spoinę wsporną) zabezpieczono mineralnym szlamem uszczelniającym. W celu zasymulowania warunków, jakie występują w murze (tj. ściskania muru) próbki zabezpieczono od góry i od spodu płaskownikami stalowymi, a następnie skręcono czterema parami nakrętek na gwintowanych prętach stalowych (Fot. 6.2) – górne nakrętki dokręcono kluczem dynamometrycznym, aż do uzyskania momentu skręcającego o wartości 25 Nm.

W każdej z próbek wykonano po dwa otwory iniekcyjne w rozstawie ok 12 cm. W przypadku próbek przeznaczonych do wykonania iniekcji niskociśnieniowej nawierzy wykonano pod kątem ok. 30° do poziomu, w taki sposób, aby otwór przecinał dolną spoinę wsporną i kończył się ok. 5 cm (licząc w poziomie) od przeciwległej krawędzi próbki (Fot. 6.2). W próbkach przeznaczonych do iniekcji kremami wiercono w takim samym rozstawie i na taką samą głębokość (liczoną w poziomie), ale nawierzy wykonano poziomo w dolnej spoinie wspornej (Fot. 6.4).



Fot. 6.2 Wykonywanie nawierzeń – iniekcja niskociśnieniowa (fot.: autor)

Iniekcję niskociśnieniową prowadzono poprzez pakery stalowe wkręcane (z uszczelką gumową), przy użyciu pompy pneumatycznej. Ciśnienie iniekcji wynosiło ok. 0,80 MPa, natomiast czas iniekcji – na każdy paker (otwór iniekcyjny) – ok. 10 minut (Fot. 6.3). Pakery iniekcyjne zdementowano po ok. 24 godzinach, a następnie otwory iniekcyjne wypełniono grawitacyjnie (zalano) suspensją cementową. Iniekcję kremami iniekcyjnymi wykonano wypełniając jednokrotnie wykonane nawierzy kremem (Fot. 6.4), bezpośrednio po czym zasklepiono otwory powierzchniowo przy zastosowaniu mineralnej szpachlówki uszczelniającej.



Fot. 6.3 Iniekcja niskociśnieniowa (fot.: autor)



Fot. 6.4 Iniekcja w technologii kremów (fot.: autor)

6.2.4 Badanie absorpcji kapilarnej

Do badania absorpcji kapilarnej zainiektowanych próbek przystąpiono po upływie pięciu tygodni od przeprowadzenia iniekcji, przy czym odpowiednio wcześniej (tj. przed wykonaniem iniekcji) wykonano badania trzech, wytypowanych metodą losową, niezainiektowanych próbek (04-06) oraz trzech próbek z mineralną hydroizolacją poziomą w dolnej spoinie wspornej (01-03). Właściwości absorpcyjne tych dwóch rodzajów próbek miały następnie posłużyć jako dwa skrajne poziomy odniesienia dla wyników badań próbek poddanych iniekcji. Bezpośrednio przed badaniem próbki suszono przez 48 godzin w temperaturze 60 °C.

Przed przystąpieniem do testu nasiąkliwości wszystkie próbki zważono w stanie suchym, a następnie naniesiono na ich spodniej powierzchni po 24 punkty pomiarowe (Fot. 6.6), w celu wykonania pomiarów długości próbek (wykonano po 24 pomiary dla każdej próbki). Na tej podstawie obliczono średnią długości podstawy próbki w każdym z kierunków l_1 oraz l_2 , jak również pole powierzchni czołowej próbki A (Tabela 6.2).



Fot. 6.5 Punkty pomiarowe na powierzchni czołowej próbki do badania absorpcji kapilarnej (fot.: autor)

Tabela 6.2 Masa, długości oraz pole powierzchni czołowej próbek (wraz z niepewnościami standardowymi)

Próbka	m_i [kg]	l_1 [mm]	$u(l_1)$ [mm]	l_2 [mm]	$u(l_2)$ [mm]	A [m ²]	$u(A)$ [m ²]
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]
01	25,24	245,50	0,34	249,17	0,47	0,06117	0,00014
02	25,28	247,75	0,49	248,81	0,54	0,06164	0,00018
03	25,38	243,16	1,19	243,21	0,43	0,05914	0,00031
04	25,98	249,53	0,71	252,35	0,74	0,06297	0,00026
05	25,90	244,86	0,96	249,06	0,49	0,06098	0,00027
06	26,40	248,64	1,06	251,25	1,73	0,06247	0,00051
11	26,78	247,48	0,55	252,02	0,12	0,06237	0,00014
12	27,20	249,53	0,71	252,35	0,74	0,06297	0,00026
13	26,72	250,11	0,42	248,69	0,62	0,06220	0,00019
14	27,06	250,44	0,78	249,61	0,48	0,06251	0,00023
15	27,06	248,02	0,88	249,36	0,46	0,06185	0,00025
16	26,46	249,26	0,39	249,34	0,30	0,06215	0,00012
17	27,70	249,74	0,33	257,06	0,25	0,06420	0,00011
18	27,24	248,11	0,43	249,96	0,70	0,06202	0,00020
19	27,44	246,95	0,67	250,51	0,25	0,06186	0,00018
20	27,74	246,48	1,01	254,75	0,55	0,06279	0,00029
21	27,92	250,94	0,33	255,41	0,30	0,06409	0,00011
22	27,88	249,67	0,57	251,39	0,37	0,06276	0,00017
23	26,18	246,81	0,77	252,58	0,22	0,06234	0,00020
24	26,44	244,86	0,96	249,06	0,49	0,06098	0,00027
25	26,90	248,64	1,06	251,25	1,73	0,06247	0,00051
26	25,98	246,85	1,01	248,91	0,33	0,06144	0,00026
27	26,38	248,89	0,60	252,85	0,61	0,06293	0,00021
28	26,40	248,68	1,63	251,71	0,62	0,06260	0,00044
29	26,72	246,23	0,50	249,14	0,73	0,06135	0,00022
30	26,90	250,82	0,62	254,58	0,37	0,06385	0,00018
31	26,70	245,43	1,24	248,44	0,61	0,06097	0,00034
32	27,32	249,77	0,71	255,37	0,47	0,06378	0,00022

[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]
33	27,08	251,54	0,64	251,23	0,49	0,06319	0,00020
34	27,32	250,43	0,68	251,70	0,28	0,06303	0,00018
35	26,70	253,24	0,52	245,87	0,41	0,06226	0,00016
36	27,02	250,53	0,25	252,50	0,47	0,06326	0,00013
37	26,40	249,18	0,58	249,09	0,43	0,06207	0,00018
38	26,86	246,31	0,48	254,93	0,35	0,06279	0,00015
39	26,70	249,86	0,87	251,16	0,43	0,06275	0,00024
40	26,52	251,77	0,26	251,89	0,60	0,06342	0,00016
41	26,78	248,38	0,28	253,18	0,31	0,06288	0,00010
42	27,02	248,59	0,37	251,47	0,48	0,06251	0,00015
43	26,64	246,75	0,38	253,27	0,74	0,06249	0,00021
44	26,64	247,46	0,41	248,56	0,43	0,06151	0,00015
46	26,48	250,02	0,56	247,86	0,53	0,06197	0,00019

Niepewność pomiaru długości próbki $u(l)$ obliczono metodą oceny niepewności typu A, zgodnie z zasadami metodologii ewaluacji danych pomiarowych Międzynarodowej Organizacji Pomiarowej ISO [71], na podstawie wzoru:

Ocena niepewności typu A	Równanie 48	
$u(x) = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$	symbol	nazwa
	$u(x)$	niepewność standardowa
	x_i	wartość pojedynczego pomiaru
	\bar{x}	średnia arytmetyczna n pomiarów
	n	liczba pomiarów

Niepewność pomiaru pola powierzchni $u(A)$ próbki obliczono zgodnie z prawem propagacji niepewności dla funkcji wielu zmiennych na podstawie wzoru [71]:

Niepewność złożona funkcji wielu zmiennych	Równanie 49	
$u_c(y) = \sqrt{\sum_k \left[\frac{\partial y}{\partial x_k} u(x_k) \right]^2}$	symbol	nazwa
	$u_c(y)$	niepewność złożona funkcji y
	x	zmiennie
	$u(x)$	niepewność standardowa zmiennej x

Przy czym dla praktycznych obliczeń zastosowano złożoną niepewność względną $w(y) = u_c(y) / |y|$:

Złożona niepewność względna	Równanie 50	
$w(y) = \sqrt{\sum_k [p_k w(x_k)]^2}$	symbol	nazwa
	$w(y)$	złożona niepewność względna funkcji y
	x	zmiennie
	p_k	współczynnik wrażliwości
	$w(x_k)$	niepewność względna $u(x_k) / x_k $

gdzie

Współczynnik wrażliwości	Równanie 51	
$p_k = \frac{x_k}{y} \frac{\partial y}{\partial x_k}$	symbol	nazwa
	p_k	współczynnik wrażliwości
	x	zmiennie

Przykładowe obliczenia złożonej niepewności względnej (dla próbki 01) przedstawia tabela:

Tabela 6.3 Obliczenia złożonej niepewności względnej pola powierzchni czołowej próbki 01

	x_k	$u(x_k)$	$w=u/ x_k $	p_k	$p_k w(x_k)$
długość l_1	245,50 mm	0,34 mm	0,14%	1	0,14%
długość l_2	249,17 mm	0,47mm	0,19%	1	0,19%
Suma (geometryczna):					0,23%

Test nasiąkliwości prowadzono umieszczając próbki w pojemnikach z wodą w taki sposób, aby ciecz przez cały okres badania miała styczność jedynie z dolną powierzchnią próbki (Rys. 1.24, Fot. 6.6) – każdą z próbek umieszczono na czterech punktach podparcia, które utrzymywały ją z daleka od dna naczynia, natomiast boczne krawędzie zabezpieczono mineralnym szlamem uszczelniającym. Przez cały okres badania wysokość lustra wody utrzymywana była na poziomie ok. 5 mm powyżej dolnej krawędzi próbki. Po zanurzeniu próbki w wodzie rozpoczęto rejestrację czasu.



Fot. 6.6 Badanie absorpcji kapilarnej próbek poddanych iniekcji chemicznej (fot.: autor)



Fot. 6.7 Stanowisko badawcze – ważenie próbek z rejestracją czasu wyjęcia oraz ponownego zanurzenia próbki (fot.: autor)

Po ok 5 minutach od zanurzenia, próbki wyjęto z wody, osuszono powierzchniowo wilgotną szmatką i zważono, a następnie ponownie zanurzono w wodzie. Procedurę zanurzania, wyjmowania, osuszania powierzchni i ważenia powtórzono po czasie ok. 20 min, 1 h, 2h, 4 h, 6 h, 8 h, 20 h oraz 24 h. Z uwagi na rozmiar i ciężar próbek, rejestrowano zarówno czas wyjęcia próbki z wody, jak i jej ponownego zanurzenia, tak aby w dalszych obliczeniach uwzględnić łączny czas kontaktu próbki z wodą (Fot. 6.7).

6.3 Wyniki badań

Przyrost masy na jednostkę powierzchni zanurzonej w wodzie po każdym ważeniu Δm_t – wraz z niepewnością standardową $u(\Delta m_t)$ – obliczono wg wzoru 33, a następnie sporządzono jego wykresy w funkcji pierwiastka z czasu zanurzenia w wodzie \sqrt{t} .

Jeśli podczas badania nie została osiągnięta pojemność kapilarna próbki, wykres przyjmował formę funkcji liniowej opisanej wzorem $\Delta m_t = a \cdot \sqrt{t} + b$. Jeśli natomiast pojemność kapilarna została osiągnięta, następowało wypłaszczenie i wykres przyjmował formę dwóch funkcji liniowych przecinających się w punkcie odpowiadającym wartości Δm_t równej pojemności kapilarnej. W obu przypadkach współczynniki prostej a i b , wraz z niepewnościami ich wyznaczenia $u(a)$ oraz $u(b)$, jak również współczynnikiem korelacji R^2 , wyznaczono metodą regresji liniowej [48, 67, 151]. W przypadku wykresu zawierających dwie proste, ilość punktów pomiarowych dla każdej z nich dobrano w taki sposób, aby uzyskać jak najlepsze dopasowanie (jak najwyższą wartość R^2).

Wyniki badania absorpcji kapilarnej poszczególnych próbek zestawiono w tabelach od 6.4 do 6.44. Natomiast sporządzone na ich podstawie wykresy absorpcji kapilarnej (wraz ze współczynnikami prostych, niepewnościami ich wyznaczenia oraz współczynnikami korelacji) przedstawiają rysunki 6.1 do 6.41.

W dalszych obliczeniach nie uwzględniano próbek nr 11 (Rys. 6.7) oraz 23 (Rys. 6.19) z uwagi na znaczną różnicę uzyskanych wyników w porównaniu z pozostałymi próbkami z serii. W przypadku próbki nr 23 odnotowano dodatkowo znaczny rozrzut poszczególnych punktów pomiarowych (współczynnik korelacji $R^2 < 0,95$). Z kolei w przypadku próbek 41 do 43 z interpretacji wyników badań wyłączono wyniki całej serii, z uwagi na fakt, iż jedna z próbek (nr 43) uległa uszkodzeniu podczas badań, a wyniki uzyskane dla dwóch pozostałych (Rys. 6.37 oraz 6.38) są w znacznym stopniu rozbieżne.

Tabela 6.4 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 01 – z warstwą hydroizolacji mineralnej

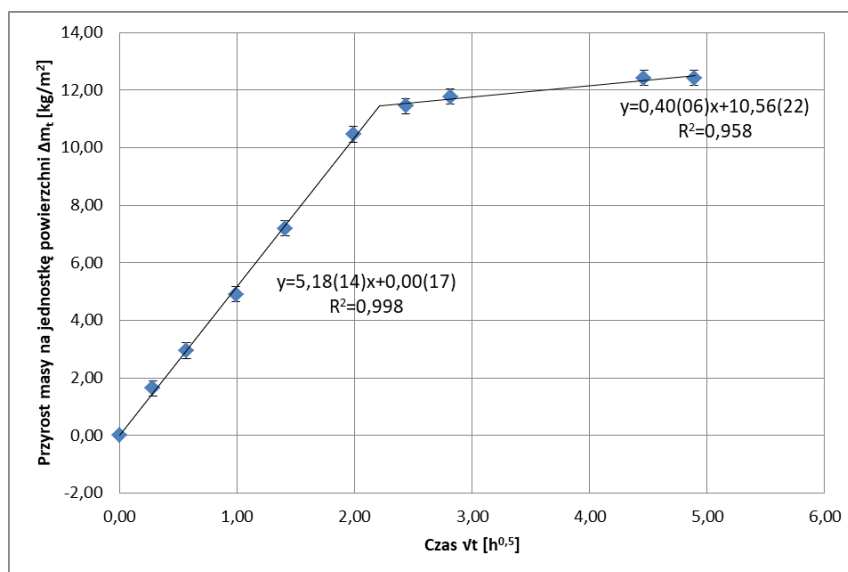
Lp.	t	t [h]	\sqrt{t} [h ^{0,5}]	m_t [kg]	$m_t - m_i$ [kg]	Δm_t [kg/m ²]	$u(\Delta m_t)$ [kg/m ²]
1.	0:00:00	0,00	0,00	25,24	0,00	0,00	-
2.	0:04:49	0,08	0,28	25,34	0,10	1,63	0,27
3.	0:19:22	0,32	0,57	25,42	0,18	2,94	0,27
4.	0:58:42	0,98	0,99	25,54	0,30	4,90	0,27
5.	1:58:58	1,98	1,41	25,68	0,44	7,19	0,27
6.	3:57:07	3,95	1,99	25,88	0,64	10,46	0,27
7.	5:56:12	5,94	2,44	25,94	0,70	11,44	0,27
8.	7:55:19	7,92	2,81	25,96	0,72	11,77	0,27
9.	19:54:31	19,91	4,46	26,00	0,76	12,42	0,27
10.	23:53:41	23,89	4,89	26,00	0,76	12,42	0,27

Tabela 6.5 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 02 – z warstwą hydroizolacji mineralnej

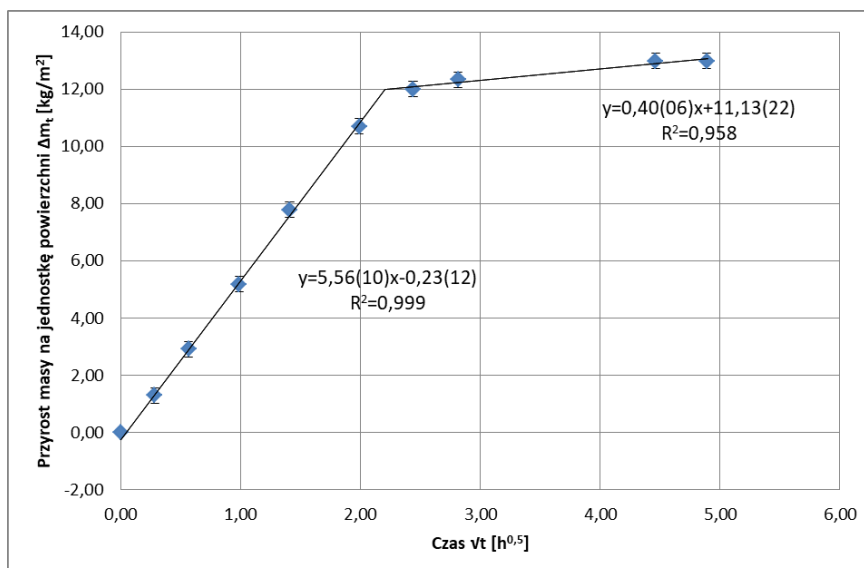
Lp.	t	t [h]	\sqrt{t} [h ^{0,5}]	m_t [kg]	$m_t - m_i$ [kg]	Δm_t [kg/m ²]	$u(\Delta m_t)$ [kg/m ²]
1.	0:00:00	0,00	0,00	25,28	0,00	0,00	-
2.	0:04:47	0,08	0,28	25,36	0,08	1,30	0,26
3.	0:19:12	0,32	0,57	25,46	0,18	2,92	0,27
4.	0:58:31	0,98	0,99	25,60	0,32	5,19	0,27
5.	1:58:50	1,98	1,41	25,76	0,48	7,79	0,27
6.	3:57:07	3,95	1,99	25,94	0,66	10,71	0,27
7.	5:56:17	5,94	2,44	26,02	0,74	12,00	0,27
8.	7:55:16	7,92	2,81	26,04	0,76	12,33	0,27
9.	19:54:34	19,91	4,46	26,08	0,80	12,98	0,27
10.	23:53:30	23,89	4,89	26,08	0,80	12,98	0,27

Tabela 6.6 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 03 – z warstwą hydroizolacji mineralnej

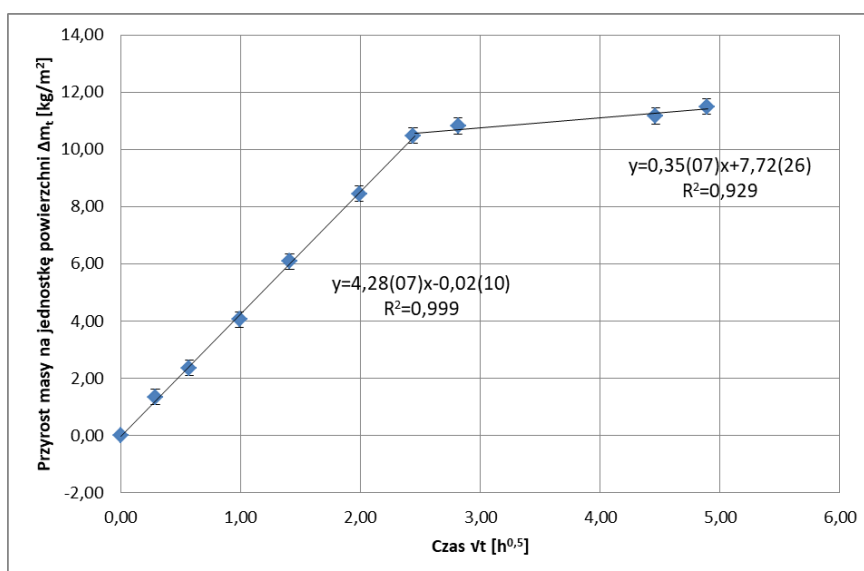
Lp.	t	t [h]	\sqrt{t} [h ^{0,5}]	m_t [kg]	$m_t - m_i$ [kg]	Δm_t [kg/m ²]	$u(\Delta m_t)$ [kg/m ²]
1.	0:00:00	0,00	0,00	25,38	0,00	0,00	-
2.	0:05:01	0,08	0,29	25,46	0,08	1,35	0,28
3.	0:19:28	0,32	0,57	25,52	0,14	2,37	0,28
4.	0:58:45	0,98	0,99	25,62	0,24	4,06	0,28
5.	1:58:50	1,98	1,41	25,74	0,36	6,09	0,28
6.	3:57:20	3,96	1,99	25,88	0,50	8,45	0,28
7.	5:56:18	5,94	2,44	26,00	0,62	10,48	0,28
8.	7:55:25	7,92	2,81	26,02	0,64	10,82	0,28
9.	19:54:34	19,91	4,46	26,04	0,66	11,16	0,28
10.	23:53:40	23,89	4,89	26,06	0,68	11,50	0,28



Rys. 6.1 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 01 – z warstwą hydroizolacji mineralnej



Rys. 6.2 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 02 – z warstwą hydroizolacji mineralnej



Rys. 6.3 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 03 – z warstwą hydroizolacji mineralnej

Tabela 6.7 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 04 – nie poddanej iniekcji

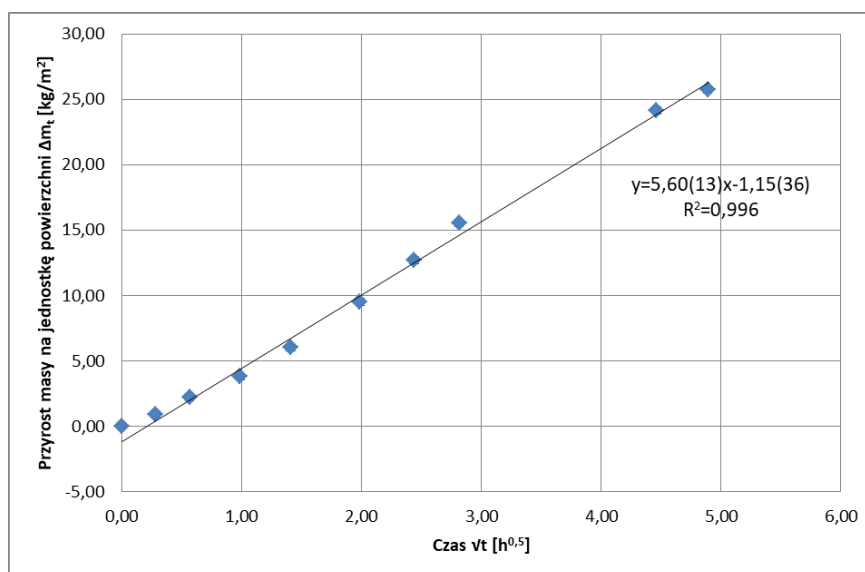
Lp.	t	t [h]	\sqrt{t} [$h^{0,5}$]	m_t [kg]	$m_t - m_i$ [kg]	Δm_t [kg/m^2]	$u(\Delta m_t)$ [kg/m^2]
1.	0:00:00	0,00	0,00	25,98	0,00	0,00	-
2.	0:04:45	0,08	0,28	26,04	0,06	0,95	0,26
3.	0:19:09	0,32	0,56	26,12	0,14	2,22	0,26
4.	0:58:26	0,97	0,99	26,22	0,24	3,81	0,26
5.	1:58:46	1,98	1,41	26,36	0,38	6,03	0,26
6.	3:56:49	3,95	1,99	26,58	0,60	9,53	0,26
7.	5:56:55	5,95	2,44	26,78	0,80	12,70	0,26
8.	7:54:58	7,92	2,81	26,96	0,98	15,56	0,27
9.	19:54:15	19,90	4,46	27,50	1,52	24,14	0,28
10.	23:53:28	23,89	4,89	27,60	1,62	25,73	0,28

Tabela 6.8 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 05 – nie poddanej iniekcji

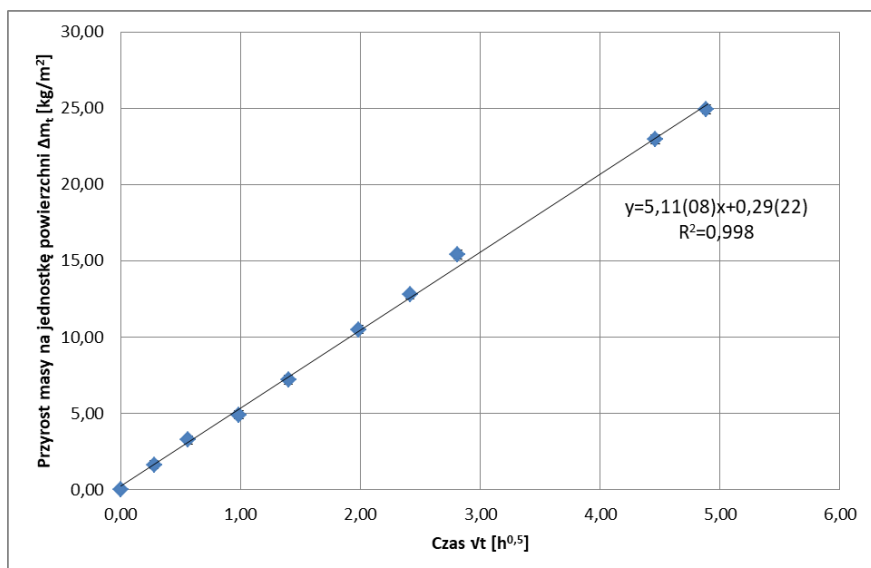
Lp.	t	t [h]	\sqrt{t} [$h^{0,5}$]	m_t [kg]	$m_t - m_i$ [kg]	Δm_t [kg/m^2]	$u(\Delta m_t)$ [kg/m^2]
1.	0:00:00	0,00	0,00	25,90	0,00	0,00	-
2.	0:04:38	0,08	0,28	26,00	0,10	1,64	0,27
3.	0:18:57	0,32	0,56	26,10	0,20	3,28	0,27
4.	0:58:18	0,97	0,99	26,20	0,30	4,92	0,27
5.	1:57:23	1,96	1,40	26,34	0,44	7,21	0,27
6.	3:56:35	3,94	1,99	26,54	0,64	10,49	0,27
7.	5:49:18	5,82	2,41	26,68	0,78	12,79	0,27
8.	7:54:29	7,91	2,81	26,84	0,94	15,41	0,28
9.	19:53:47	19,90	4,46	27,30	1,40	22,96	0,29
10.	23:53:01	23,88	4,89	27,42	1,52	24,92	0,29

Tabela 6.9 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 06 – nie poddanej iniekcji

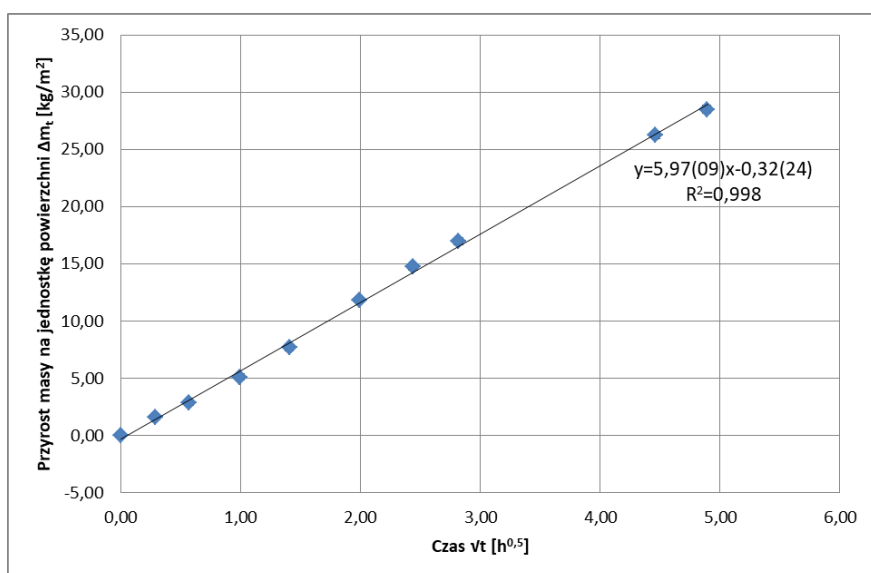
Lp.	t	t [h]	\sqrt{t} [$h^{0,5}$]	m_t [kg]	$m_t - m_i$ [kg]	Δm_t [kg/m^2]	$u(\Delta m_t)$ [kg/m^2]
1.	0:00:00	0,00	0,00	26,40	0,00	0,00	-
2.	0:04:55	0,08	0,29	26,50	0,10	1,60	0,26
3.	0:19:21	0,32	0,57	26,58	0,18	2,88	0,26
4.	0:58:57	0,98	0,99	26,72	0,32	5,12	0,26
5.	1:58:43	1,98	1,41	26,88	0,48	7,68	0,27
6.	3:57:27	3,96	1,99	27,14	0,74	11,85	0,28
7.	5:56:33	5,94	2,44	27,32	0,92	14,73	0,29
8.	7:55:40	7,93	2,82	27,46	1,06	16,97	0,30
9.	19:54:58	19,92	4,46	28,04	1,64	26,25	0,34
10.	23:54:06	23,90	4,89	28,18	1,78	28,49	0,35



Rys. 6.4 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 04 – nie poddanej iniekcji



Rys. 6.5 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 05 – nie poddanej iniekcji



Rys. 6.6 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 06 – nie poddanej iniekcji

Tabela 6.10 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 11 – poddanej iniekcji ciśnieniowej (S=80%, zasolenie: nie)

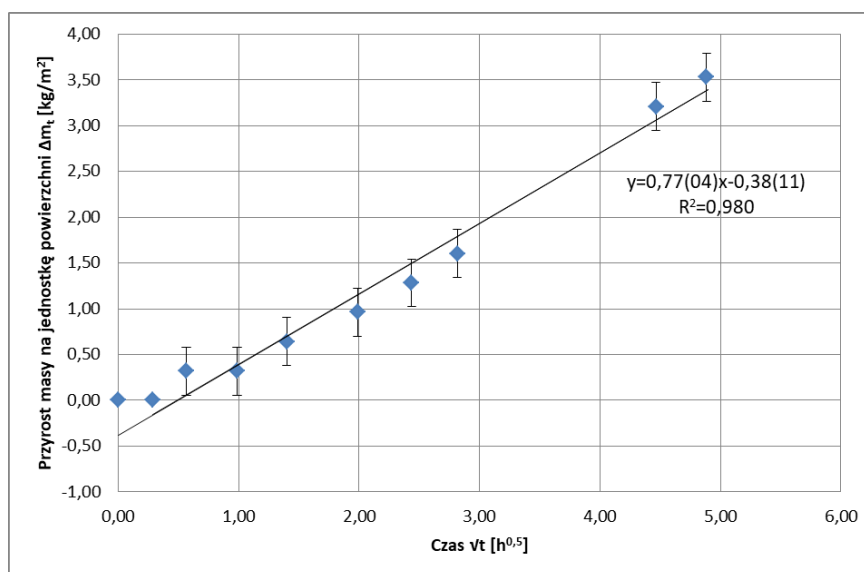
Lp.	t	t [h]	\sqrt{t} [h ^{0,5}]	m_t [kg]	$m_t - m_i$ [kg]	Δm_t [kg/m ²]	$u(\Delta m_t)$ [kg/m ²]
1.	0:00:00	0,00	0,00	26,78	0,00	0,00	-
2.	0:05:00	0,08	0,29	26,78	0,00	0,00	-
3.	0:19:15	0,32	0,57	26,80	0,02	0,32	0,26
4.	0:58:29	0,97	0,99	26,80	0,02	0,32	0,26
5.	1:57:39	1,96	1,40	26,82	0,04	0,64	0,26
6.	3:56:59	3,95	1,99	26,84	0,06	0,96	0,26
7.	5:56:17	5,94	2,44	26,86	0,08	1,28	0,26
8.	7:55:31	7,93	2,82	26,88	0,10	1,60	0,26
9.	19:56:07	19,94	4,46	26,98	0,20	3,21	0,26
10.	23:51:48	23,86	4,89	27,00	0,22	3,53	0,26

Tabela 6.11 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 12 – poddanej iniekcji ciśnieniowej (S=80%, zasolenie: nie)

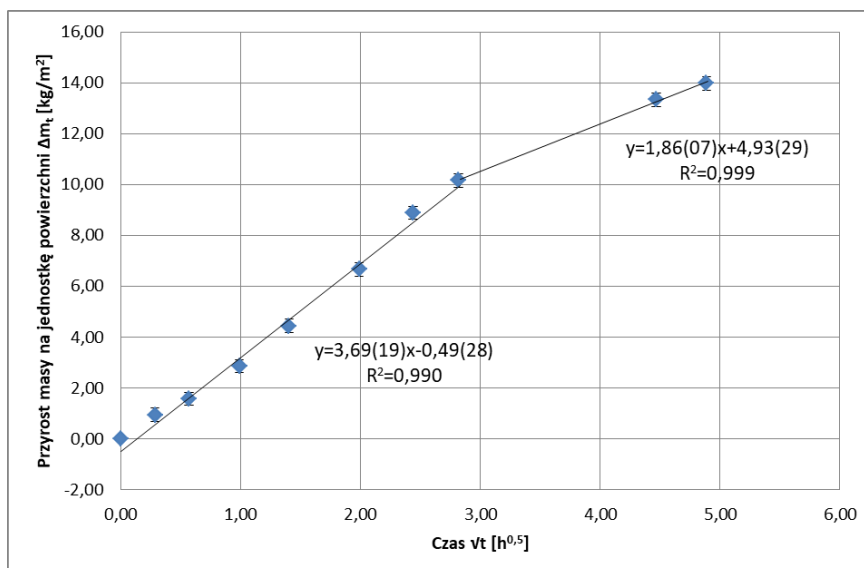
Lp.	t	t [h]	\sqrt{t} [h ^{0,5}]	m_t [kg]	$m_t - m_i$ [kg]	Δm_t [kg/m ²]	$u(\Delta m_t)$ [kg/m ²]
1.	0:00:00	0,00	0,00	27,20	0,00	0,00	-
2.	0:04:55	0,08	0,29	27,26	0,06	0,95	0,26
3.	0:19:20	0,32	0,57	27,30	0,10	1,59	0,26
4.	0:58:46	0,98	0,99	27,38	0,18	2,86	0,26
5.	1:57:58	1,97	1,40	27,48	0,28	4,45	0,26
6.	3:57:13	3,95	1,99	27,62	0,42	6,67	0,26
7.	5:56:35	5,94	2,44	27,76	0,56	8,89	0,26
8.	7:55:41	7,93	2,82	27,84	0,64	10,16	0,26
9.	19:56:48	19,95	4,47	28,04	0,84	13,34	0,26
10.	23:53:00	23,88	4,89	28,08	0,88	13,98	0,27

Tabela 6.12 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 13 – poddanej iniekcji ciśnieniowej (S=80%, zasolenie: nie)

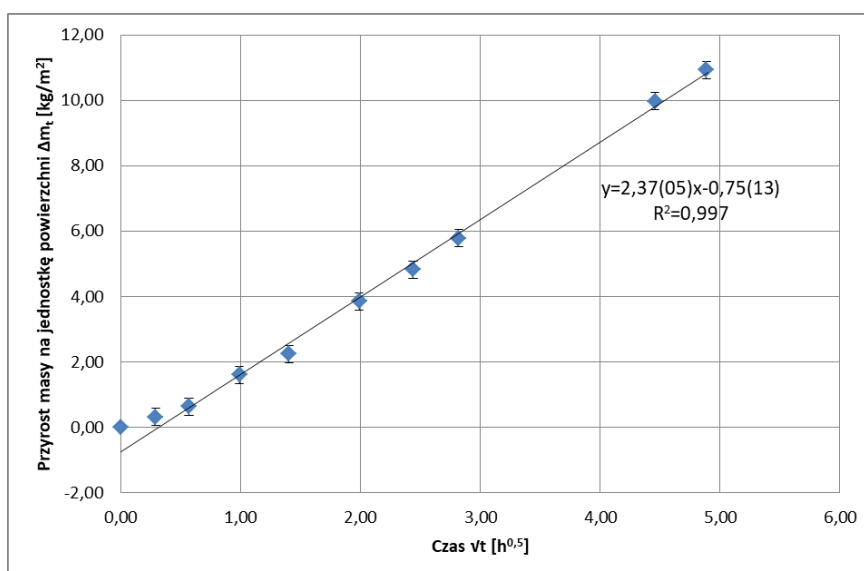
Lp.	t	t [h]	\sqrt{t} [h ^{0,5}]	m_t [kg]	$m_t - m_i$ [kg]	Δm_t [kg/m ²]	$u(\Delta m_t)$ [kg/m ²]
1.	0:00:00	0,00	0,00	26,72	0,00	0,00	-
2.	0:05:02	0,08	0,29	26,74	0,02	0,32	0,26
3.	0:19:21	0,32	0,57	26,76	0,04	0,64	0,26
4.	0:58:49	0,98	0,99	26,82	0,10	1,61	0,26
5.	1:58:02	1,97	1,40	26,86	0,14	2,25	0,26
6.	3:57:28	3,96	1,99	26,96	0,24	3,86	0,26
7.	5:56:44	5,95	2,44	27,02	0,30	4,82	0,26
8.	7:57:01	7,95	2,82	27,08	0,36	5,79	0,26
9.	19:52:17	19,87	4,46	27,34	0,62	9,97	0,26
10.	23:52:24	23,87	4,89	27,40	0,68	10,93	0,26



Rys. 6.7 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 11 – poddanej iniekcji ciśnieniowej (S=80%, zasolenie: nie)



Rys. 6.8 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 12 – poddanej iniekcji ciśnieniowej (S=80%, zasolenie: nie)



Rys. 6.9 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 13 – poddanej iniekcji ciśnieniowej (S=80%, zasolenie: nie)

Tabela 6.13 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 14 – poddanej iniekcji ciśnieniowej (S=95%, zasolenie: nie)

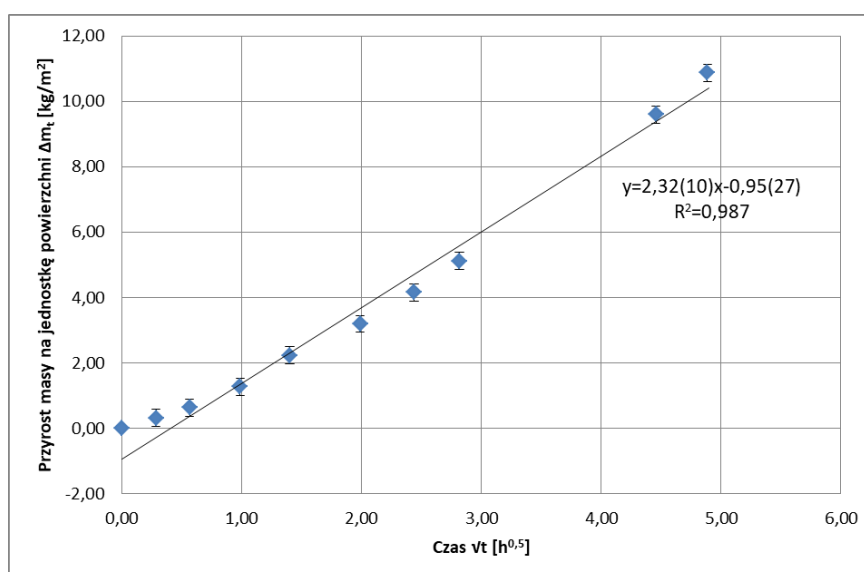
Lp.	t	t [h]	\sqrt{t} [$h^{0,5}$]	m_t [kg]	$m_t - m_i$ [kg]	Δm_t [kg/m^2]	$u(\Delta m_t)$ [kg/m^2]
1.	0:00:00	0,00	0,00	27,06	0,00	0,00	-
2.	0:04:50	0,08	0,28	27,08	0,02	0,32	0,26
3.	0:19:09	0,32	0,56	27,10	0,04	0,64	0,26
4.	0:58:27	0,97	0,99	27,14	0,08	1,28	0,26
5.	1:57:48	1,96	1,40	27,20	0,14	2,24	0,26
6.	3:57:05	3,95	1,99	27,26	0,20	3,20	0,26
7.	5:56:19	5,94	2,44	27,32	0,26	4,16	0,26
8.	7:56:15	7,94	2,82	27,38	0,32	5,12	0,26
9.	19:51:58	19,87	4,46	27,66	0,60	9,60	0,26
10.	23:52:41	23,88	4,89	27,74	0,68	10,88	0,26

Tabela 6.14 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 15 – poddanej iniekcji ciśnieniowej (S=95%, zasolenie: nie)

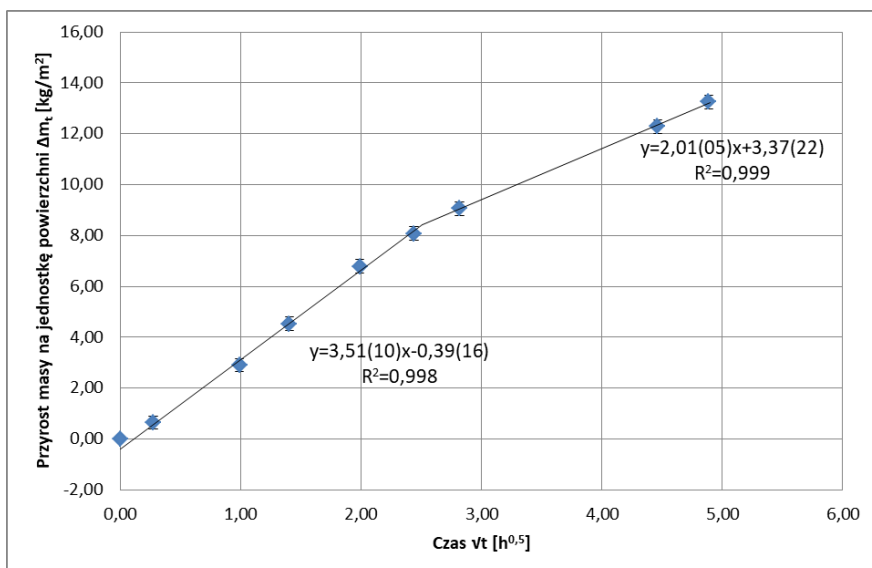
Lp.	t	t [h]	\sqrt{t} [h ^{0,5}]	m _t [kg]	m _t -m _i [kg]	Δm _t [kg/m ²]	u(Δm _t) [kg/m ²]
1.	0:00:00	0,00	0,00	27,06	0,00	0,00	-
2.	0:04:28	0,07	0,27	27,10	0,04	0,65	0,26
3.	0:58:50	0,98	0,99	27,24	0,18	2,91	0,26
4.	1:58:10	1,97	1,40	27,34	0,28	4,53	0,26
5.	3:57:22	3,96	1,99	27,48	0,42	6,79	0,27
6.	5:56:43	5,95	2,44	27,56	0,50	8,08	0,27
7.	7:56:01	7,93	2,82	27,62	0,56	9,05	0,27
8.	19:54:17	19,90	4,46	27,82	0,76	12,29	0,27
9.	23:52:09	23,87	4,89	27,88	0,82	13,26	0,27

Tabela 6.15 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 16 – poddanej iniekcji ciśnieniowej (S=95%, zasolenie: nie)

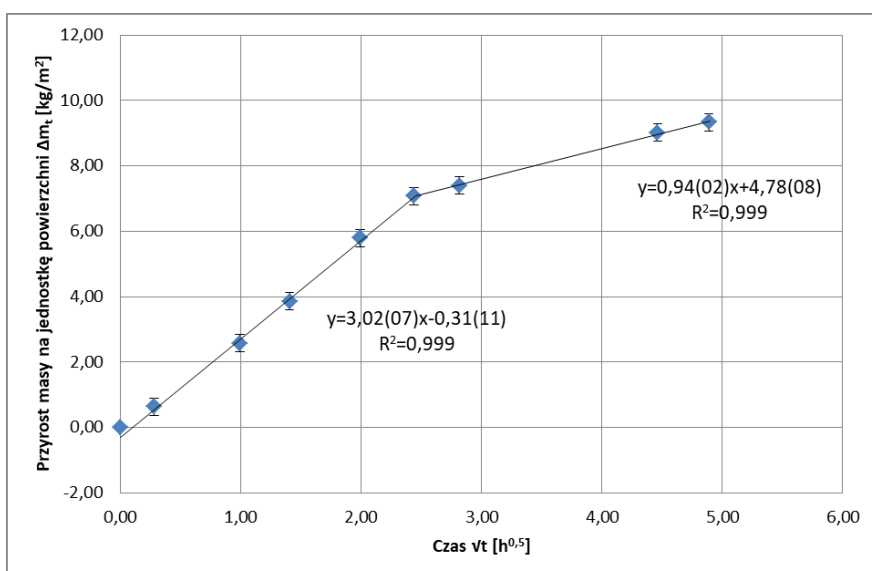
Lp.	t	t [h]	\sqrt{t} [h ^{0,5}]	m _t [kg]	m _t -m _i [kg]	Δm _t [kg/m ²]	u(Δm _t) [kg/m ²]
1.	0:00:00	0,00	0,00	26,46	0,00	0,00	-
2.	0:04:45	0,08	0,28	26,50	0,04	0,64	0,26
3.	0:59:06	0,99	0,99	26,62	0,16	2,57	0,26
4.	1:58:27	1,97	1,41	26,70	0,24	3,86	0,26
5.	3:57:43	3,96	1,99	26,82	0,36	5,79	0,26
6.	5:57:02	5,95	2,44	26,90	0,44	7,08	0,26
7.	7:55:58	7,93	2,82	26,92	0,46	7,40	0,26
8.	19:54:53	19,91	4,46	27,02	0,56	9,01	0,26
9.	23:53:18	23,89	4,89	27,04	0,58	9,33	0,26



Rys. 6.10 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 14 – poddanej iniekcji ciśnieniowej (S=95%, zasolenie: nie)



Rys. 6.11 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 15 – poddanej iniekcji ciśnieniowej (S=95%, zasolenie: nie)



Rys. 6.12 Wykres absorpcji kapilarnej próbki – poddanej iniekcji ciśnieniowej (S=95%, zasolenie: nie)

Tabela 6.16 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 17 – poddanej iniekcji ciśnieniowej (S=95%, zasolenie: tak)

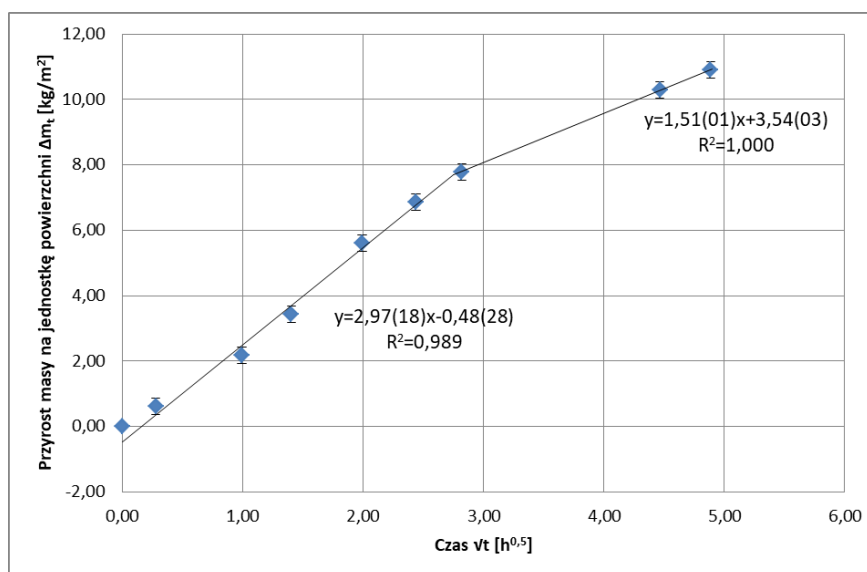
Lp.	t	t [h]	\sqrt{t} [h ^{0,5}]	m_t [kg]	$m_t - m_i$ [kg]	Δm_t [kg/m ²]	$u(\Delta m_t)$ [kg/m ²]
1.	0:00:00	0,00	0,00	27,70	0,00	0,00	-
2.	0:04:37	0,08	0,28	27,74	0,04	0,62	0,25
3.	0:58:59	0,98	0,99	27,84	0,14	2,18	0,25
4.	1:58:17	1,97	1,40	27,92	0,22	3,43	0,25
5.	3:57:43	3,96	1,99	28,06	0,36	5,61	0,25
6.	5:56:58	5,95	2,44	28,14	0,44	6,85	0,25
7.	7:56:32	7,94	2,82	28,20	0,50	7,79	0,25
8.	19:55:53	19,93	4,46	28,36	0,66	10,28	0,25
9.	23:52:49	23,88	4,89	28,40	0,70	10,90	0,25

Tabela 6.17 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 18 – poddanej iniekcji ciśnieniowej (S=95%, zasolenie: tak)

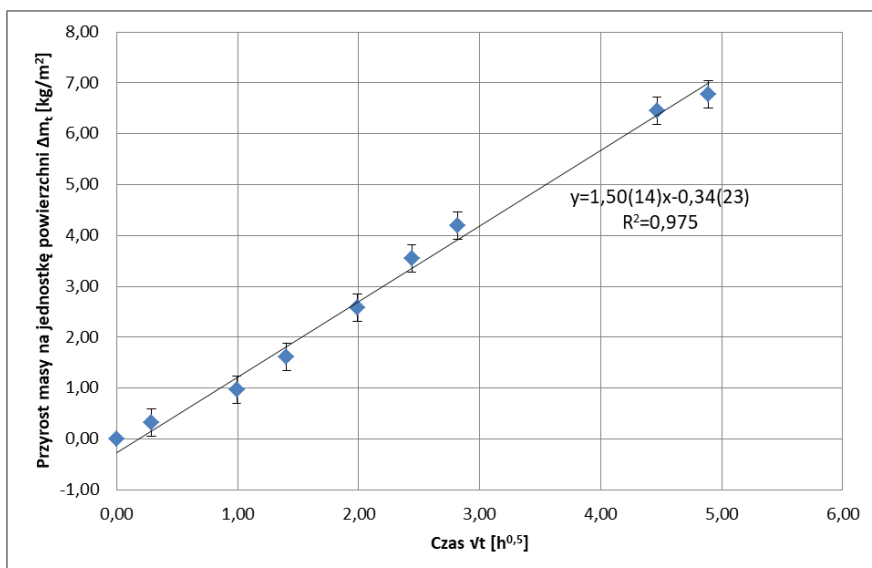
Lp.	t	t [h]	\sqrt{t} [h ^{0,5}]	m _t [kg]	m _t -m _i [kg]	Δm _t [kg/m ²]	u(Δm _t) [kg/m ²]
1.	0:00:00	0,00	0,00	27,24	0,00	0,00	-
2.	0:04:57	0,08	0,29	27,26	0,02	0,32	0,26
3.	0:59:15	0,99	0,99	27,30	0,06	0,97	0,26
4.	1:58:34	1,98	1,41	27,34	0,10	1,61	0,26
5.	3:57:52	3,96	1,99	27,40	0,16	2,58	0,26
6.	5:57:12	5,95	2,44	27,46	0,22	3,55	0,26
7.	7:56:25	7,94	2,82	27,50	0,26	4,19	0,26
8.	19:56:11	19,94	4,47	27,64	0,40	6,45	0,26
9.	23:53:53	23,90	4,89	27,66	0,42	6,77	0,26

Tabela 6.18 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 19 – poddanej iniekcji ciśnieniowej (S=95%, zasolenie: tak)

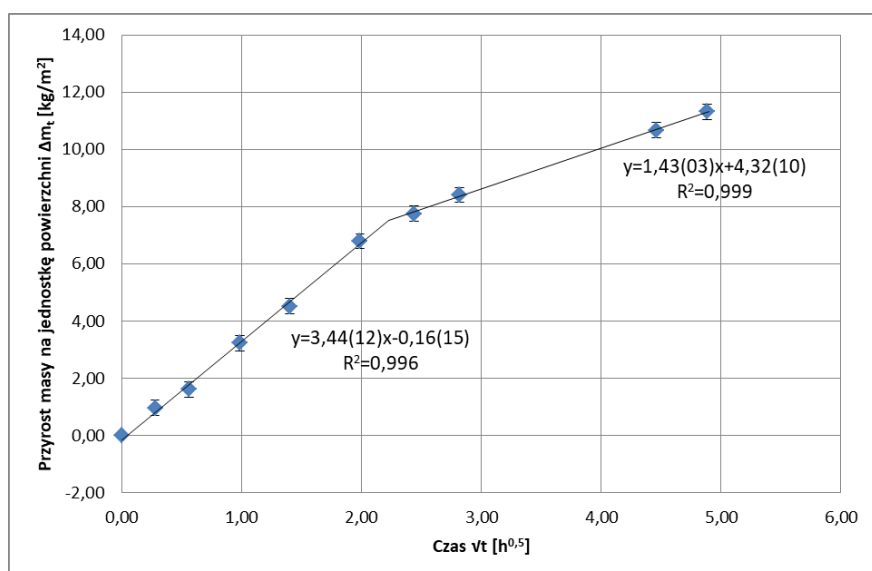
Lp.	t	t [h]	\sqrt{t} [h ^{0,5}]	m _t [kg]	m _t -m _i [kg]	Δm _t [kg/m ²]	u(Δm _t) [kg/m ²]
1.	0:00:00	0,00	0,00	27,44	0,00	0,00	-
2.	0:04:35	0,08	0,28	27,50	0,06	0,97	0,26
3.	0:18:54	0,32	0,56	27,54	0,10	1,62	0,26
4.	0:58:11	0,97	0,98	27,64	0,20	3,23	0,26
5.	1:57:33	1,96	1,40	27,72	0,28	4,53	0,26
6.	3:56:55	3,95	1,99	27,86	0,42	6,79	0,26
7.	5:56:17	5,94	2,44	27,92	0,48	7,76	0,26
8.	7:55:33	7,93	2,82	27,96	0,52	8,41	0,27
9.	19:53:43	19,90	4,46	28,10	0,66	10,67	0,27
10.	23:51:31	23,86	4,88	28,14	0,70	11,32	0,27



Rys. 6.13 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 17 – poddanej iniekcji ciśnieniowej (S=95%, zasolenie: tak)



Rys. 6.14 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 18 – poddanej iniekcji ciśnieniowej (S=95%, zasolenie: tak)



Rys. 6.15 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 19 – poddanej iniekcji ciśnieniowej (S=95%, zasolenie: tak)

Tabela 6.19 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 20 – poddanej iniekcji ciśnieniowej (S=95%, zasolenie: tak)

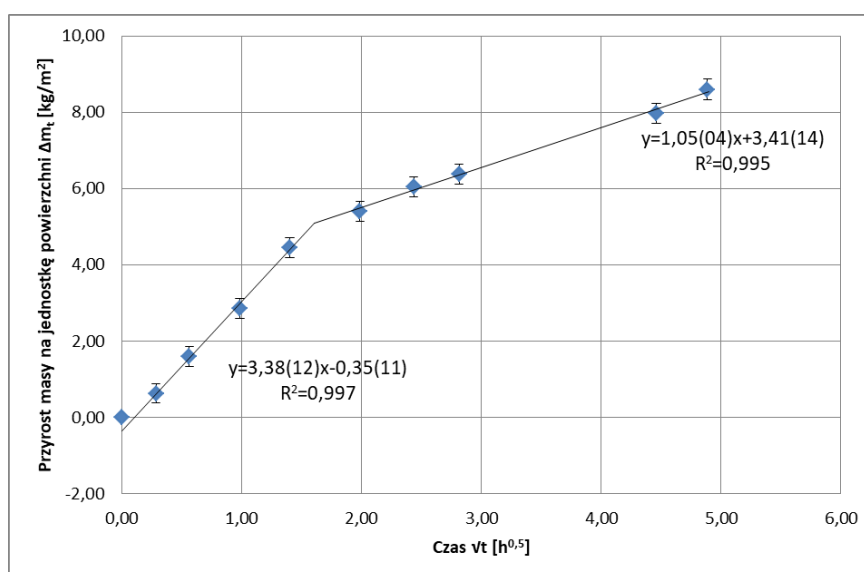
Lp.	t	t [h]	vt [h ^{0,5}]	m _t [kg]	m _t -m _i [kg]	Δm _t [kg/m ²]	u(Δm _t) [kg/m ²]
1.	0:00:00	0,00	0,00	27,74	0,00	0,00	-
2.	0:04:52	0,08	0,28	27,78	0,04	0,64	0,26
3.	0:19:02	0,32	0,56	27,84	0,10	1,59	0,26
4.	0:58:15	0,97	0,99	27,92	0,18	2,87	0,26
5.	1:57:38	1,96	1,40	28,02	0,28	4,46	0,26
6.	3:56:56	3,95	1,99	28,08	0,34	5,41	0,26
7.	5:56:06	5,94	2,44	28,12	0,38	6,05	0,26
8.	7:54:57	7,92	2,81	28,14	0,40	6,37	0,26
9.	19:53:41	19,89	4,46	28,24	0,50	7,96	0,26
10.	23:52:43	23,88	4,89	28,28	0,54	8,60	0,26

Tabela 6.20 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 21 – poddanej iniekcji ciśnieniowej (S=95%, zasolenie: tak)

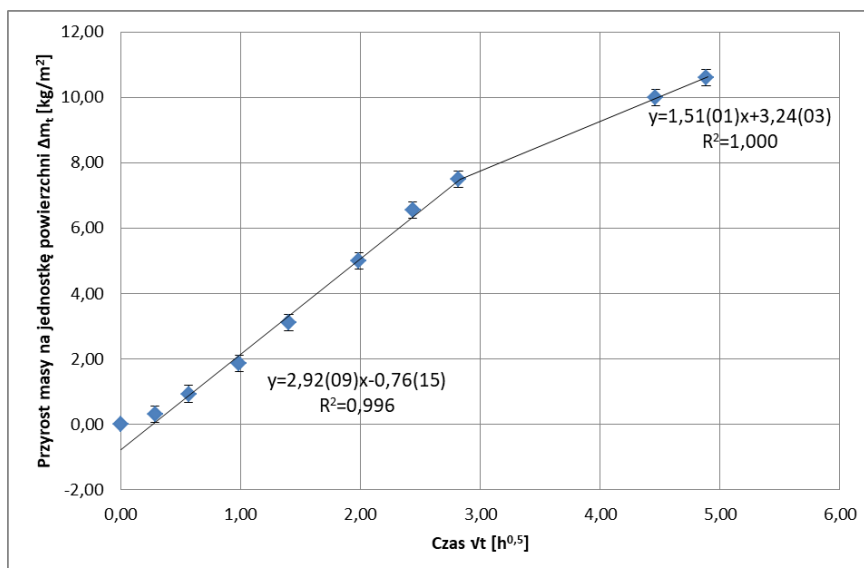
Lp.	t	t [h]	\sqrt{t} [$h^{0,5}$]	m_t [kg]	$m_t - m_i$ [kg]	Δm_t [kg/m^2]	$u(\Delta m_t)$ [kg/m^2]
1.	0:00:00	0,00	0,00	27,92	0,00	0,00	-
2.	0:04:54	0,08	0,29	27,94	0,02	0,31	0,25
3.	0:19:13	0,32	0,57	27,98	0,06	0,94	0,25
4.	0:58:25	0,97	0,99	28,04	0,12	1,87	0,25
5.	1:57:36	1,96	1,40	28,12	0,20	3,12	0,25
6.	3:56:50	3,95	1,99	28,24	0,32	4,99	0,25
7.	5:56:07	5,94	2,44	28,34	0,42	6,55	0,26
8.	7:55:36	7,93	2,82	28,40	0,48	7,49	0,26
9.	19:54:17	19,90	4,46	28,56	0,64	9,99	0,26
10.	23:51:42	23,86	4,88	28,60	0,68	10,61	0,26

Tabela 6.21 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 22 – poddanej iniekcji ciśnieniowej (S=95%, zasolenie: tak)

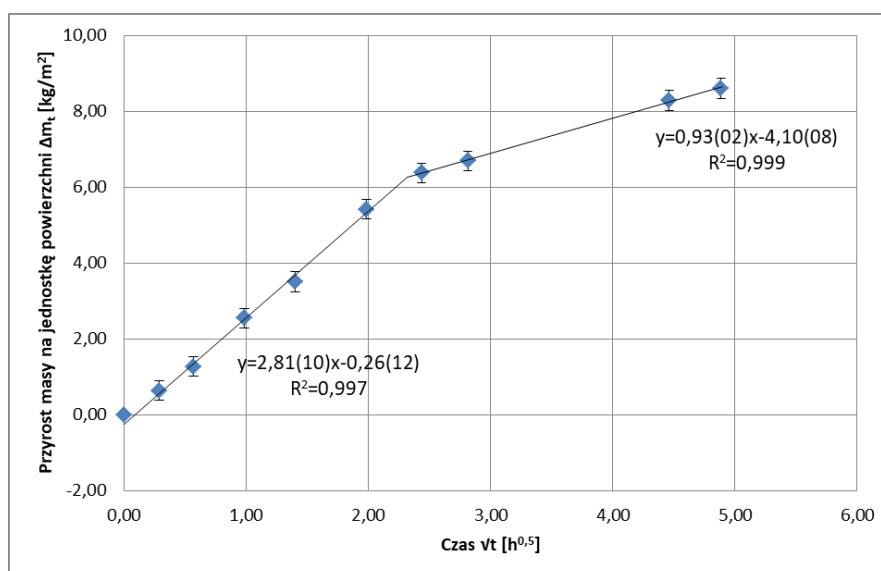
Lp.	t	t [h]	\sqrt{t} [$h^{0,5}$]	m_t [kg]	$m_t - m_i$ [kg]	Δm_t [kg/m^2]	$u(\Delta m_t)$ [kg/m^2]
1.	0:00:00	0,00	0,00	27,88	0,00	0,00	
2.	0:05:01	0,08	0,29	27,92	0,04	0,64	0,26
3.	0:19:16	0,32	0,57	27,96	0,08	1,27	0,26
4.	0:58:15	0,97	0,99	28,04	0,16	2,55	0,26
5.	1:57:31	1,96	1,40	28,10	0,22	3,51	0,26
6.	3:56:24	3,94	1,98	28,22	0,34	5,42	0,26
7.	5:55:40	5,93	2,43	28,28	0,40	6,37	0,26
8.	7:54:51	7,91	2,81	28,30	0,42	6,69	0,26
9.	19:54:09	19,90	4,46	28,40	0,52	8,28	0,26
10.	23:52:32	23,88	4,89	28,42	0,54	8,60	0,26



Rys. 6.16 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 20 – poddanej iniekcji ciśnieniowej (S=95%, zasolenie: tak)



Rys. 6.17 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 21 – poddanej iniekcji ciśnieniowej (S=95%, zasolenie: tak)



Rys. 6.18 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 22 – poddanej iniekcji ciśnieniowej (S=95%, zasolenie: tak)

Tabela 6.22 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 23 – poddanej iniekcji kremem o/w (S= 80%, zasolenie: nie)

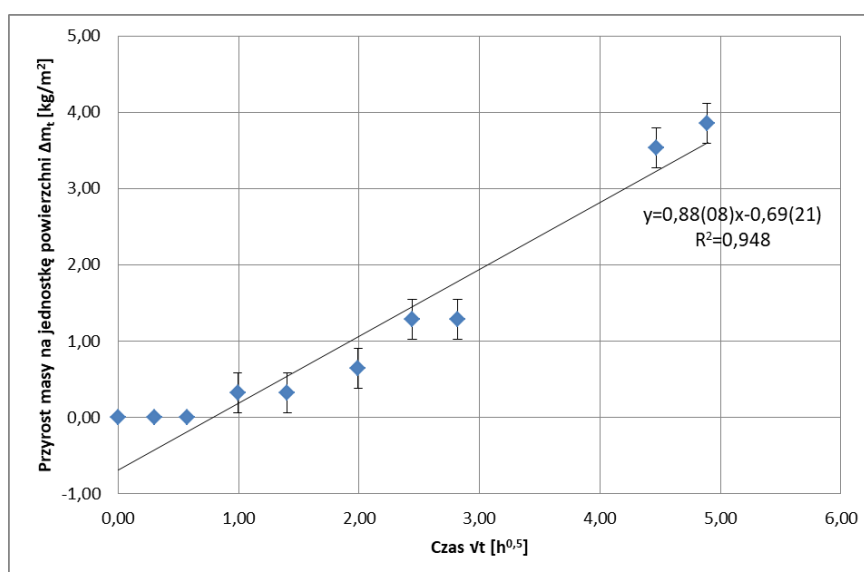
Lp.	t	t [h]	vt [h ^{0,5}]	m _t [kg]	m _t -m _i [kg]	Δm _t [kg/m ²]	u(Δm _t) [kg/m ²]
1.	0:00:00	0,00	0,00	26,18	0,00	0,00	-
2.	0:05:34	0,09	0,30	26,18	0,00	0,00	-
3.	0:19:34	0,33	0,57	26,18	0,00	0,00	-
4.	0:59:02	0,98	0,99	26,20	0,02	0,32	0,26
5.	1:58:30	1,98	1,41	26,20	0,02	0,32	0,26
6.	3:57:57	3,97	1,99	26,22	0,04	0,64	0,26
7.	5:57:18	5,96	2,44	26,26	0,08	1,28	0,26
8.	7:56:45	7,95	2,82	26,26	0,08	1,28	0,26
9.	19:57:23	19,96	4,47	26,40	0,22	3,53	0,26
10.	23:53:20	23,89	4,89	26,42	0,24	3,85	0,26

Tabela 6.23 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 24 – poddanej iniekcji kremem o/w (S= 80%, zasolenie: nie)

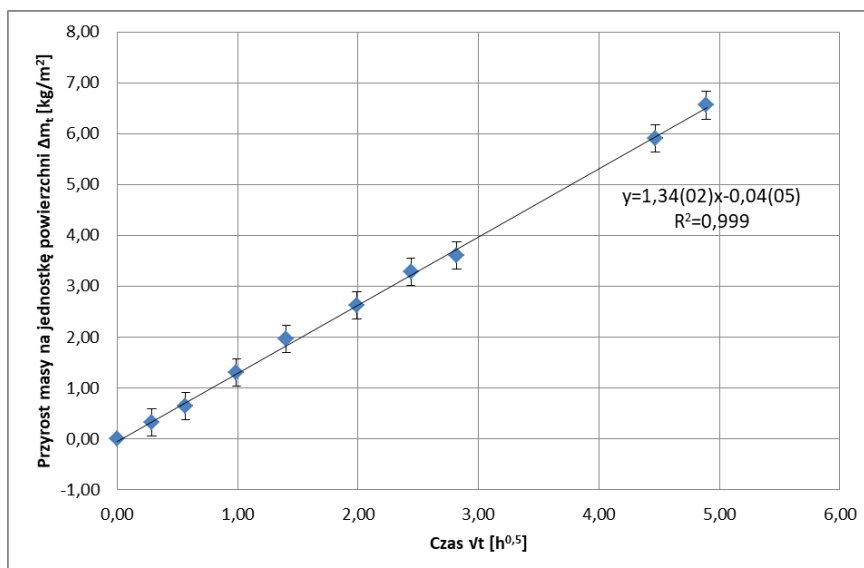
Lp.	t	t [h]	\sqrt{t} [h ^{0,5}]	m_t [kg]	$m_t - m_i$ [kg]	Δm_t [kg/m ²]	$u(\Delta m_t)$ [kg/m ²]
1.	0:00:00	0,00	0,00	26,44	0,00	0,00	-
2.	0:04:56	0,08	0,29	26,46	0,02	0,33	0,27
3.	0:19:25	0,32	0,57	26,48	0,04	0,66	0,27
4.	0:58:52	0,98	0,99	26,52	0,08	1,31	0,27
5.	1:58:20	1,97	1,40	26,56	0,12	1,97	0,27
6.	3:57:40	3,96	1,99	26,60	0,16	2,62	0,27
7.	5:57:04	5,95	2,44	26,64	0,20	3,28	0,27
8.	7:56:08	7,94	2,82	26,66	0,22	3,61	0,27
9.	19:57:05	19,95	4,47	26,80	0,36	5,90	0,27
10.	23:53:47	23,90	4,89	26,84	0,40	6,56	0,27

Tabela 6.24 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 25 – poddanej iniekcji kremem o/w (S= 80%, zasolenie: nie)

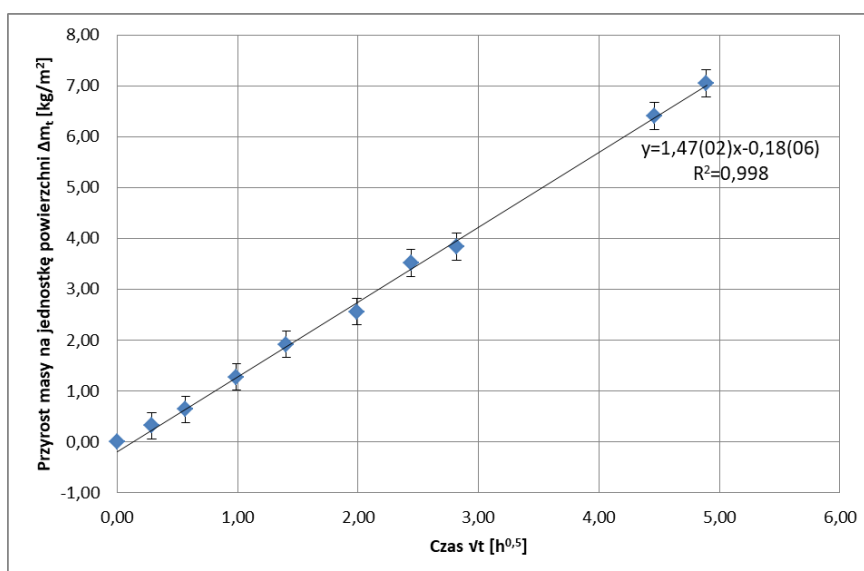
Lp.	t	t [h]	\sqrt{t} [h ^{0,5}]	m_t [kg]	$m_t - m_i$ [kg]	Δm_t [kg/m ²]	$u(\Delta m_t)$ [kg/m ²]
1.	0:00:00	0,00	0,00	26,90	0,00	0,00	-
2.	0:04:56	0,08	0,29	26,92	0,02	0,32	0,26
3.	0:19:22	0,32	0,57	26,94	0,04	0,64	0,26
4.	0:58:49	0,98	0,99	26,98	0,08	1,28	0,26
5.	1:58:18	1,97	1,40	27,02	0,12	1,92	0,26
6.	3:57:42	3,96	1,99	27,06	0,16	2,56	0,26
7.	5:57:02	5,95	2,44	27,12	0,22	3,52	0,26
8.	7:56:23	7,94	2,82	27,14	0,24	3,84	0,26
9.	19:53:30	19,89	4,46	27,30	0,40	6,40	0,27
10.	23:53:32	23,89	4,89	27,34	0,44	7,04	0,27



Rys. 6.19 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 23 – poddanej iniekcji kremem o/w (S= 80%, zasolenie: nie)



Rys. 6.20 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 24 – poddanej iniekcji kremem o/w (S= 80%, zasolenie: nie)



Rys. 6.21 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 25 – poddanej iniekcji kremem o/w (S= 80%, zasolenie: nie)

Tabela 6.25 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 26 – poddanej iniekcji kremem o/w (S= 95%, zasolenie: nie)

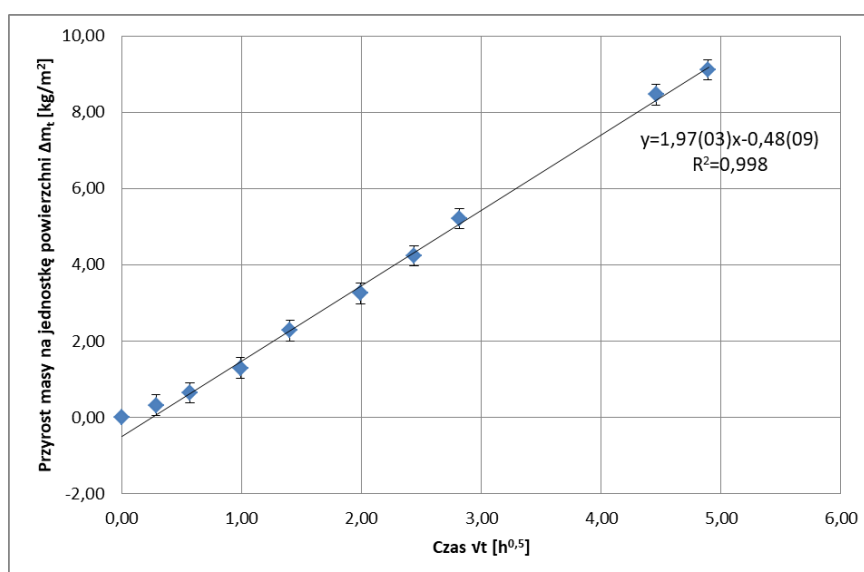
Lp.	t	t [h]	\sqrt{t} [h ^{0,5}]	m_t [kg]	$m_t - m_i$ [kg]	Δm_t [kg/m ²]	$u(\Delta m_t)$ [kg/m ²]
1.	0:00:00	0,00	0,00	25,98	0,00	0,00	-
2.	0:04:55	0,08	0,29	26,00	0,02	0,33	0,27
3.	0:19:22	0,32	0,57	26,02	0,04	0,65	0,27
4.	0:58:50	0,98	0,99	26,06	0,08	1,30	0,27
5.	1:58:14	1,97	1,40	26,12	0,14	2,28	0,27
6.	3:57:37	3,96	1,99	26,18	0,20	3,26	0,27
7.	5:57:00	5,95	2,44	26,24	0,26	4,23	0,27
8.	7:56:00	7,93	2,82	26,30	0,32	5,21	0,27
9.	19:52:12	19,87	4,46	26,50	0,52	8,46	0,27
10.	23:53:29	23,89	4,89	26,54	0,56	9,11	0,27

Tabela 6.26 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 27 – poddanej iniekcji kremem o/w (S= 95%, zasolenie: nie)

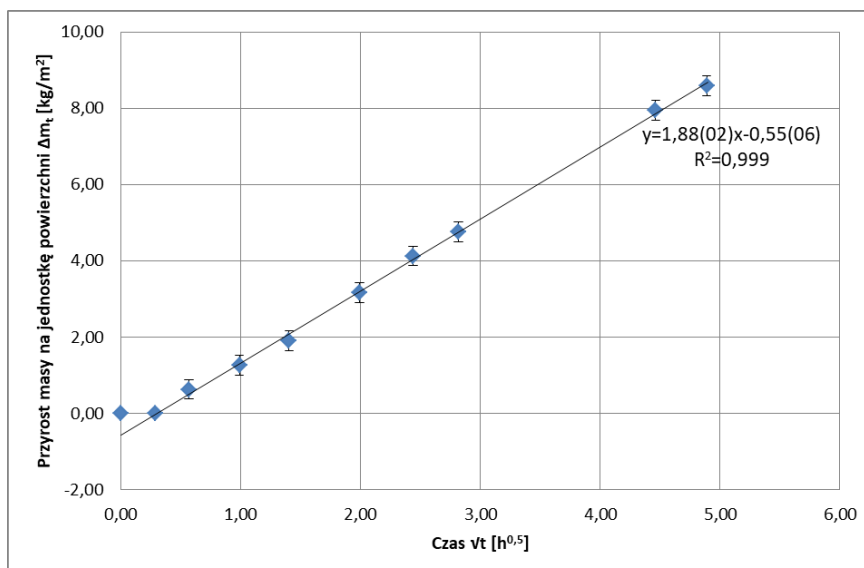
Lp.	t	t [h]	\sqrt{t} [h ^{0,5}]	m_t [kg]	$m_t - m_i$ [kg]	Δm_t [kg/m ²]	$u(\Delta m_t)$ [kg/m ²]
1.	0:00:00	0,00	0,00	26,38	0,00	0,00	-
2.	0:04:57	0,08	0,29	26,38	0,00	0,00	-
3.	0:19:20	0,32	0,57	26,42	0,04	0,64	0,26
4.	0:58:47	0,98	0,99	26,46	0,08	1,27	0,26
5.	1:58:11	1,97	1,40	26,50	0,12	1,91	0,26
6.	3:57:35	3,96	1,99	26,58	0,20	3,18	0,26
7.	5:56:55	5,95	2,44	26,64	0,26	4,13	0,26
8.	7:56:17	7,94	2,82	26,68	0,30	4,77	0,26
9.	19:55:12	19,92	4,46	26,88	0,50	7,95	0,26
10.	23:53:27	23,89	4,89	26,92	0,54	8,58	0,26

Tabela 6.27 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 28 – poddanej iniekcji kremem o/w (S= 95%, zasolenie: nie)

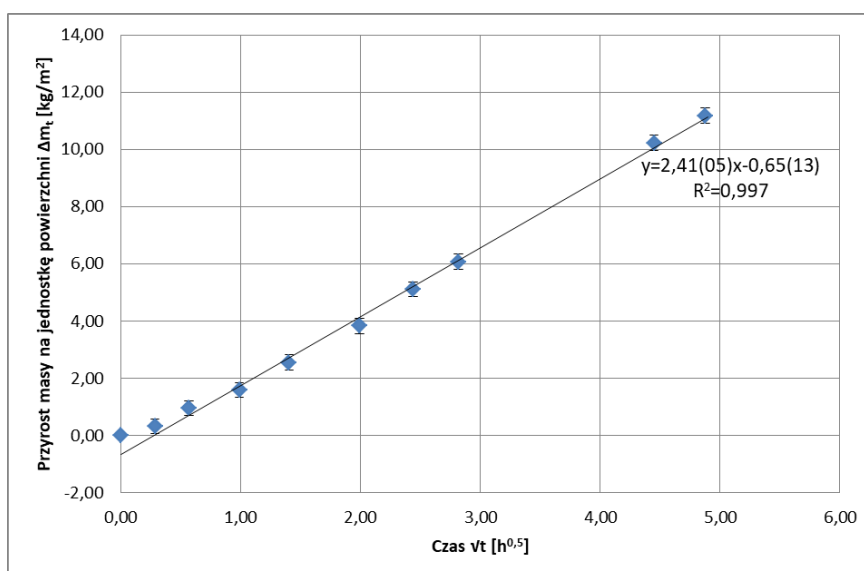
Lp.	t	t [h]	\sqrt{t} [h ^{0,5}]	m_t [kg]	$m_t - m_i$ [kg]	Δm_t [kg/m ²]	$u(\Delta m_t)$ [kg/m ²]
1.	0:00:00	0,00	0,00	26,40	0,00	0,00	-
2.	0:04:55	0,08	0,29	26,42	0,02	0,32	0,26
3.	0:19:22	0,32	0,57	26,46	0,06	0,96	0,26
4.	0:58:48	0,98	0,99	26,50	0,10	1,60	0,26
5.	1:58:14	1,97	1,40	26,56	0,16	2,56	0,26
6.	3:57:37	3,96	1,99	26,64	0,24	3,83	0,26
7.	5:56:56	5,95	2,44	26,72	0,32	5,11	0,26
8.	7:55:58	7,93	2,82	26,78	0,38	6,07	0,26
9.	19:47:17	19,79	4,45	27,04	0,64	10,22	0,27
10.	23:46:35	23,78	4,88	27,10	0,70	11,18	0,27



Rys. 6.22 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 26 – poddanej iniekcji kremem o/w (S= 95%, zasolenie: nie)



Rys. 6.23 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 27 – poddanej iniekcji kremem o/w (S= 95%, zasolenie: nie)



Rys. 6.24 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 28 – poddanej iniekcji kremem o/w (S= 95%, zasolenie: nie)

Tabela 6.28 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 29 – poddanej iniekcji kremem o/w (S=80%, zasolenie: tak)

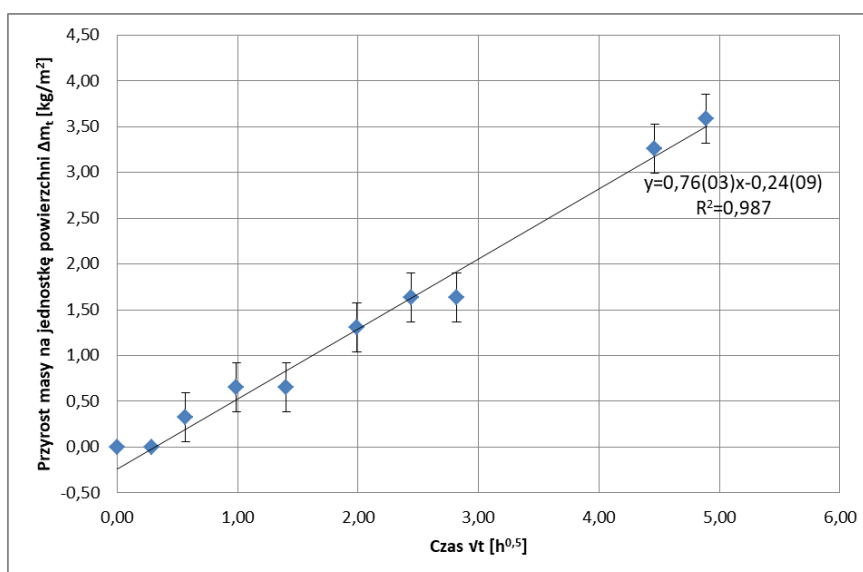
Lp.	t	t [h]	\sqrt{t} [h ^{0,5}]	m_t [kg]	$m_t - m_i$ [kg]	Δm_t [kg/m ²]	$u(\Delta m_t)$ [kg/m ²]
1.	0:00:00	0,00	0,00	26,72	0,00	0,00	-
2.	0:04:58	0,08	0,29	26,72	0,00	0,00	-
3.	0:19:26	0,32	0,57	26,74	0,02	0,33	0,27
4.	0:58:54	0,98	0,99	26,76	0,04	0,65	0,27
5.	1:58:19	1,97	1,40	26,76	0,04	0,65	0,27
6.	3:57:44	3,96	1,99	26,80	0,08	1,30	0,27
7.	5:57:03	5,95	2,44	26,82	0,10	1,63	0,27
8.	7:56:26	7,94	2,82	26,82	0,10	1,63	0,27
9.	19:54:47	19,91	4,46	26,92	0,20	3,26	0,27
10.	23:52:41	23,88	4,89	26,94	0,22	3,59	0,27

Tabela 6.29 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 30 – poddanej iniekcji kremem o/w (S=80%, zasolenie: tak)

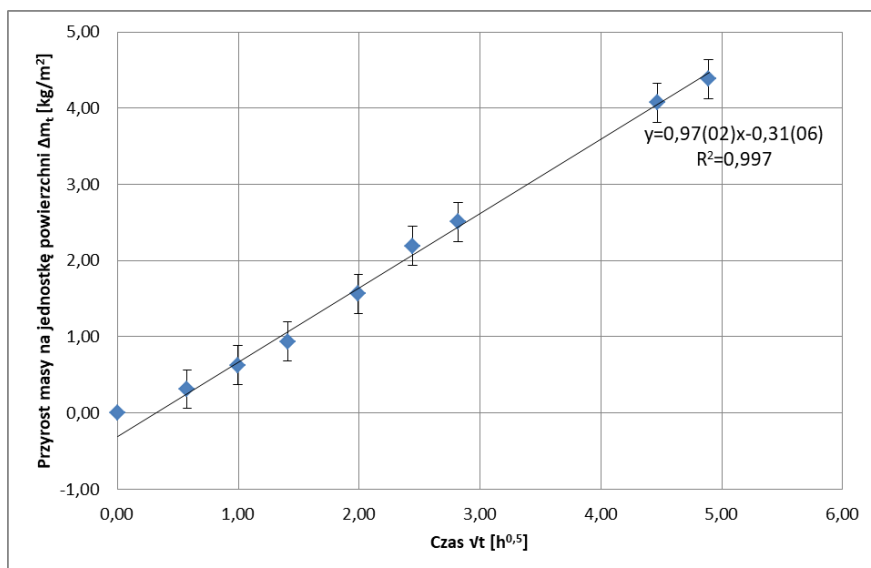
Lp.	t	t [h]	\sqrt{t} [h ^{0,5}]	m_t [kg]	$m_t - m_i$ [kg]	Δm_t [kg/m ²]	$u(\Delta m_t)$ [kg/m ²]
1.	0:00:00	0,00	0,00	26,90	0,00	0,00	-
2.	0:19:56	0,33	0,58	26,92	0,02	0,31	0,26
3.	0:59:24	0,99	0,99	26,94	0,04	0,63	0,26
4.	1:58:49	1,98	1,41	26,96	0,06	0,94	0,26
5.	3:58:13	3,97	1,99	27,00	0,10	1,57	0,26
6.	5:57:34	5,96	2,44	27,04	0,14	2,19	0,26
7.	7:56:39	7,94	2,82	27,06	0,16	2,51	0,26
8.	19:56:02	19,93	4,46	27,16	0,26	4,07	0,26
9.	23:54:31	23,91	4,89	27,18	0,28	4,39	0,26

Tabela 6.30 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 31 – poddanej iniekcji kremem o/w (S=80%, zasolenie: tak)

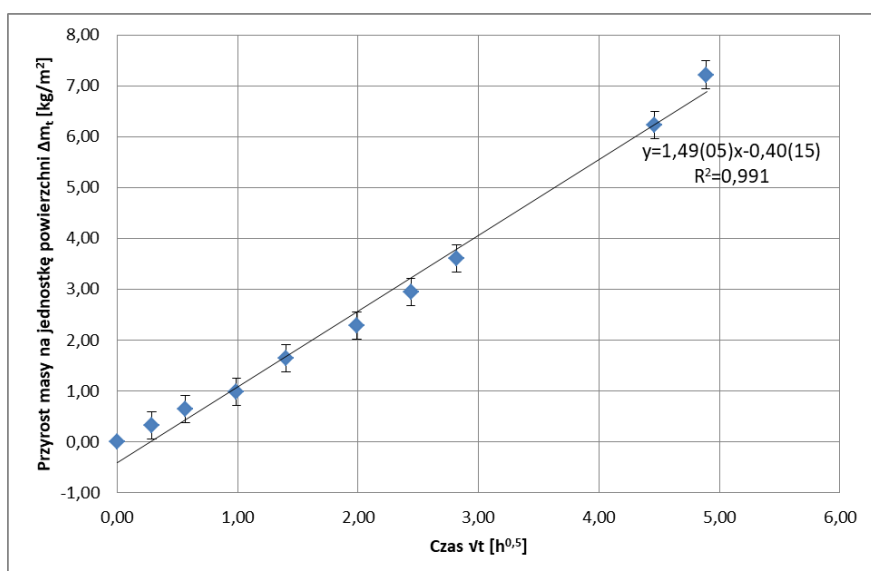
Lp.	t	t [h]	\sqrt{t} [h ^{0,5}]	m_t [kg]	$m_t - m_i$ [kg]	Δm_t [kg/m ²]	$u(\Delta m_t)$ [kg/m ²]
1.	0:00:00	0,00	0,00	26,70	0,00	0,00	-
2.	0:05:00	0,08	0,29	26,72	0,02	0,33	0,27
3.	0:19:19	0,32	0,57	26,74	0,04	0,66	0,27
4.	0:58:49	0,98	0,99	26,76	0,06	0,98	0,27
5.	1:58:05	1,97	1,40	26,80	0,10	1,64	0,27
6.	3:57:32	3,96	1,99	26,84	0,14	2,30	0,27
7.	5:56:58	5,95	2,44	26,88	0,18	2,95	0,27
8.	7:56:12	7,94	2,82	26,92	0,22	3,61	0,27
9.	19:54:21	19,91	4,46	27,08	0,38	6,23	0,27
10.	23:52:46	23,88	4,89	27,14	0,44	7,22	0,27



Rys. 6.25 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 29 – poddanej iniekcji kremem o/w (S=80%, zasolenie: tak)



Rys. 6.26 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 30 – poddanej iniekcji kremem o/w (S=80%, zasolenie: tak)



Rys. 6.27 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 31 – poddanej iniekcji kremem o/w (S=80%, zasolenie: tak)

Tabela 6.31 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 32 – poddanej iniekcji kremem o/w (S=95%, zasolenie: tak)

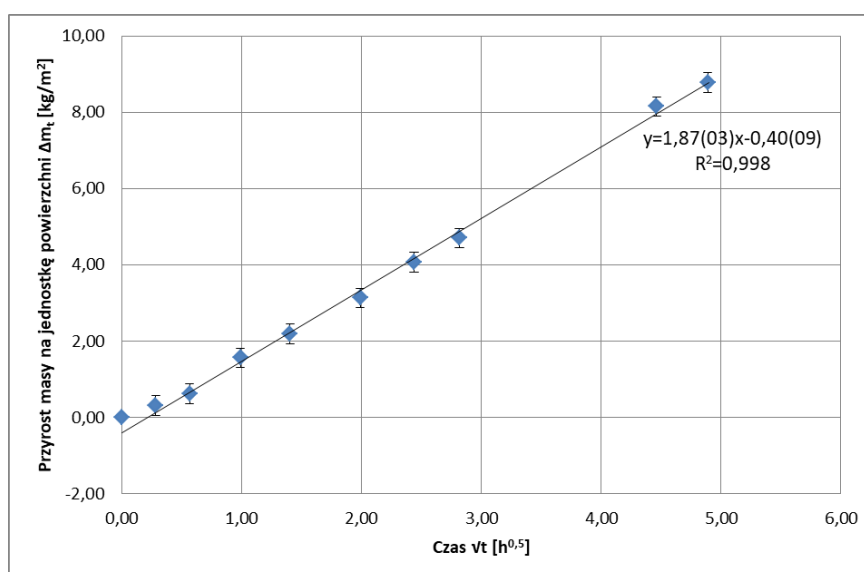
Lp.	t	t [h]	\sqrt{t} [h ^{0,5}]	m_t [kg]	$m_t - m_i$ [kg]	Δm_t [kg/m ²]	$u(\Delta m_t)$ [kg/m ²]
1.	0:00:00	0,00	0,00	27,32	0,00	0,00	-
2.	0:04:48	0,08	0,28	27,34	0,02	0,31	0,26
3.	0:19:10	0,32	0,57	27,36	0,04	0,63	0,26
4.	0:58:38	0,98	0,99	27,42	0,10	1,57	0,26
5.	1:57:59	1,97	1,40	27,46	0,14	2,19	0,26
6.	3:57:18	3,96	1,99	27,52	0,20	3,14	0,26
7.	5:56:41	5,94	2,44	27,58	0,26	4,08	0,26
8.	7:55:41	7,93	2,82	27,62	0,30	4,70	0,26
9.	19:54:09	19,90	4,46	27,84	0,52	8,15	0,26
10.	23:53:19	23,89	4,89	27,88	0,56	8,78	0,26

Tabela 6.32 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 33 – poddanej iniekcji kremem o/w (S=95%, zasolenie: tak)

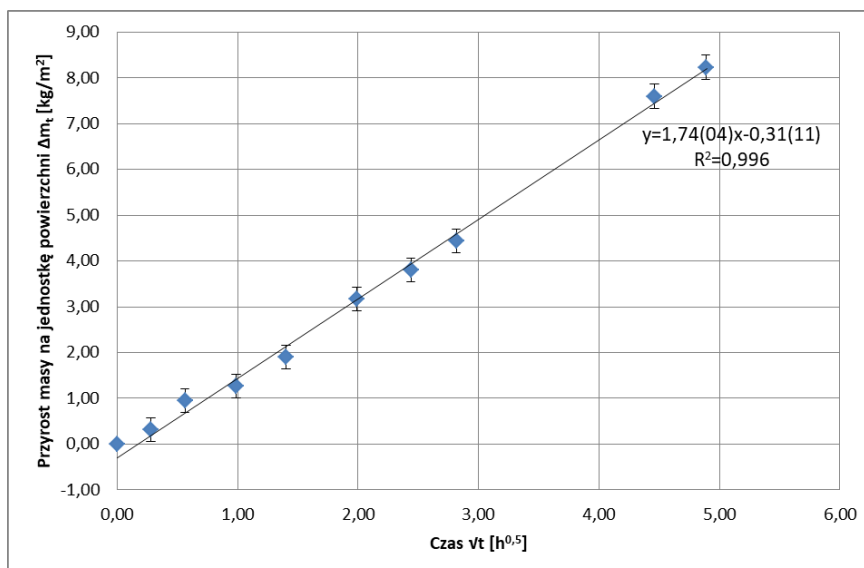
Lp.	t	t [h]	\sqrt{t} [h ^{0,5}]	m_t [kg]	$m_t - m_i$ [kg]	Δm_t [kg/m ²]	$u(\Delta m_t)$ [kg/m ²]
1.	0:00:00	0,00	0,00	27,08	0,00	0,00	-
2.	0:04:40	0,08	0,28	27,10	0,02	0,32	0,26
3.	0:19:04	0,32	0,56	27,14	0,06	0,95	0,26
4.	0:58:32	0,98	0,99	27,16	0,08	1,27	0,26
5.	1:57:57	1,97	1,40	27,20	0,12	1,90	0,26
6.	3:57:21	3,96	1,99	27,28	0,20	3,16	0,26
7.	5:56:39	5,94	2,44	27,32	0,24	3,80	0,26
8.	7:56:02	7,93	2,82	27,36	0,28	4,43	0,26
9.	19:54:10	19,90	4,46	27,56	0,48	7,60	0,26
10.	23:52:24	23,87	4,89	27,60	0,52	8,23	0,26

Tabela 6.33 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 34 – poddanej iniekcji kremem o/w (S=95%, zasolenie: tak)

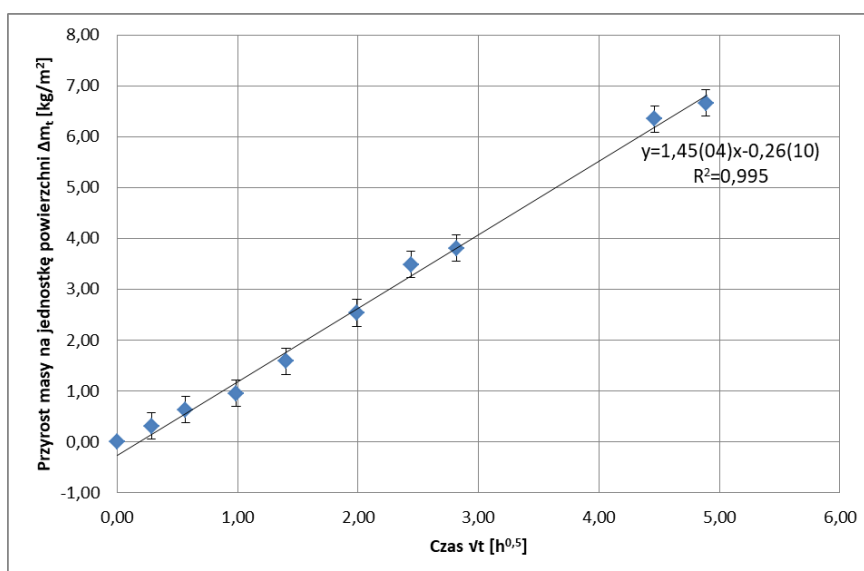
Lp.	t	t [h]	\sqrt{t} [h ^{0,5}]	m_t [kg]	$m_t - m_i$ [kg]	Δm_t [kg/m ²]	$u(\Delta m_t)$ [kg/m ²]
1.	0:00:00	0,00	0,00	27,32	0,00	0,00	-
2.	0:04:55	0,08	0,29	27,34	0,02	0,32	0,26
3.	0:19:21	0,32	0,57	27,36	0,04	0,63	0,26
4.	0:58:45	0,98	0,99	27,38	0,06	0,95	0,26
5.	1:58:05	1,97	1,40	27,42	0,10	1,59	0,26
6.	3:57:27	3,96	1,99	27,48	0,16	2,54	0,26
7.	5:56:46	5,95	2,44	27,54	0,22	3,49	0,26
8.	7:55:54	7,93	2,82	27,56	0,24	3,81	0,26
9.	19:54:22	19,91	4,46	27,72	0,40	6,35	0,26
10.	23:53:19	23,89	4,89	27,74	0,42	6,66	0,26



Rys. 6.28 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 32 – poddanej iniekcji kremem o/w (S=95%, zasolenie: tak)



Rys. 6.29 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 33 – poddanej iniekcji kremem o/w (S=95%, zasolenie: tak)



Rys. 6.30 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 34 – poddanej iniekcji kremem o/w (S=95%, zasolenie: tak)

Tabela 6.34 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 35 – poddanej iniekcji kremem w/o (S=80%, zasolenie: nie)

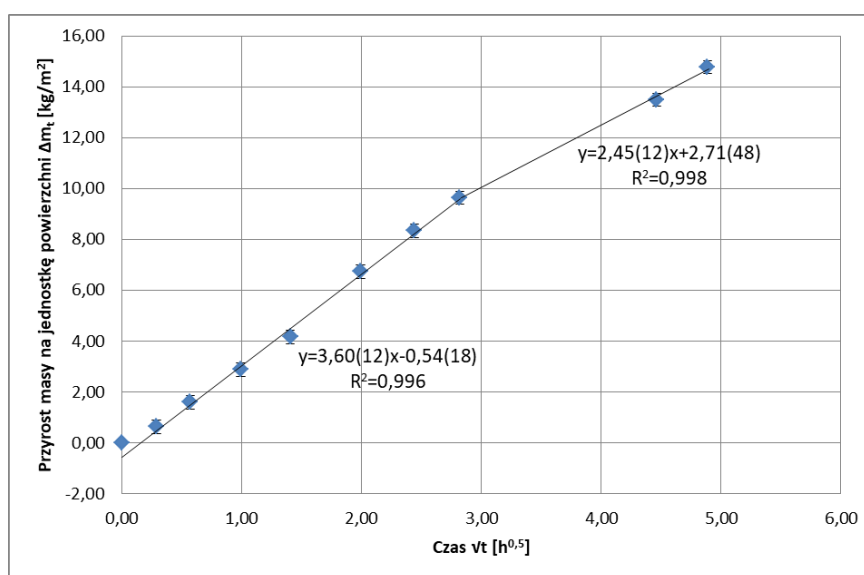
Lp.	t	t [h]	vt [h ^{0,5}]	m _t [kg]	m _t -m _i [kg]	Δm _t [kg/m ²]	u(Δm _t) [kg/m ²]
1.	0:00:00	0,00	0,00	26,70	0,00	0,00	-
2.	0:05:00	0,08	0,29	26,74	0,04	0,64	0,26
3.	0:19:31	0,33	0,57	26,80	0,10	1,61	0,26
4.	0:58:58	0,98	0,99	26,88	0,18	2,89	0,26
5.	1:58:26	1,97	1,40	26,96	0,26	4,18	0,26
6.	3:57:50	3,96	1,99	27,12	0,42	6,75	0,26
7.	5:57:18	5,95	2,44	27,22	0,52	8,35	0,26
8.	7:56:43	7,95	2,82	27,30	0,60	9,64	0,26
9.	19:54:47	19,91	4,46	27,54	0,84	13,49	0,26
10.	23:52:47	23,88	4,89	27,62	0,92	14,78	0,27

Tabela 6.35 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 36 – poddanej iniekcji kremem w/o (S=80%, zasolenie: nie)

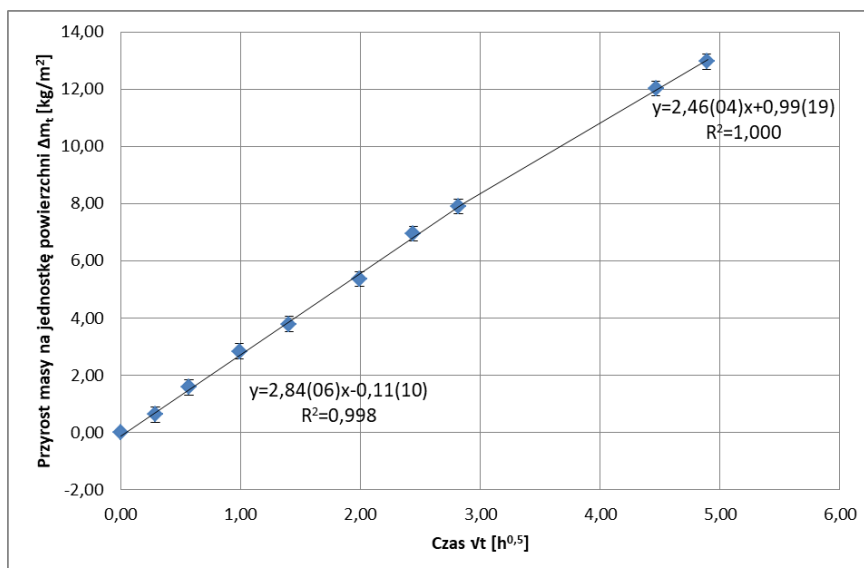
Lp.	t	t [h]	\sqrt{t} [h ^{0,5}]	m _t [kg]	m _t -m _i [kg]	Δm _t [kg/m ²]	u(Δm _t) [kg/m ²]
1.	0:00:00	0,00	0,00	27,02	0,00	0,00	-
2.	0:04:55	0,08	0,29	27,06	0,04	0,63	0,26
3.	0:19:23	0,32	0,57	27,12	0,10	1,58	0,26
4.	0:58:51	0,98	0,99	27,20	0,18	2,85	0,26
5.	1:58:18	1,97	1,40	27,26	0,24	3,79	0,26
6.	3:57:44	3,96	1,99	27,36	0,34	5,37	0,26
7.	5:57:08	5,95	2,44	27,46	0,44	6,96	0,26
8.	7:56:08	7,94	2,82	27,52	0,50	7,90	0,26
9.	19:55:18	19,92	4,46	27,78	0,76	12,01	0,26
10.	23:53:56	23,90	4,89	27,84	0,82	12,96	0,26

Tabela 6.36 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 37 – poddanej iniekcji kremem w/o (S=80%, zasolenie: nie)

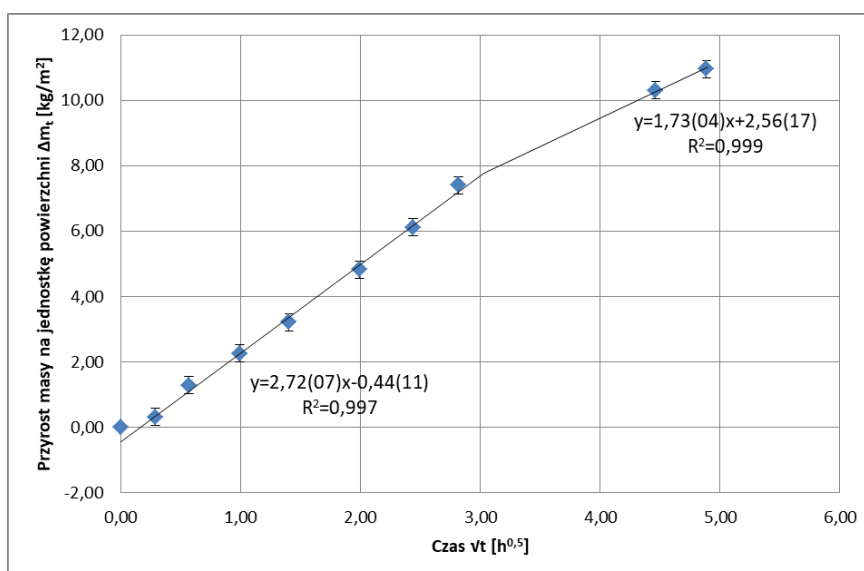
Lp.	t	t [h]	\sqrt{t} [h ^{0,5}]	m _t [kg]	m _t -m _i [kg]	Δm _t [kg/m ²]	u(Δm _t) [kg/m ²]
1.	0:00:00	0,00	0,00	26,40	0,00	0,00	-
2.	0:04:56	0,08	0,29	26,42	0,02	0,32	0,26
3.	0:19:23	0,32	0,57	26,48	0,08	1,29	0,26
4.	0:58:52	0,98	0,99	26,54	0,14	2,26	0,26
5.	1:58:15	1,97	1,40	26,60	0,20	3,22	0,26
6.	3:57:38	3,96	1,99	26,70	0,30	4,83	0,26
7.	5:57:00	5,95	2,44	26,78	0,38	6,12	0,26
8.	7:56:24	7,94	2,82	26,86	0,46	7,41	0,26
9.	19:54:59	19,92	4,46	27,04	0,64	10,31	0,26
10.	23:53:04	23,88	4,89	27,08	0,68	10,96	0,27



Rys. 6.31 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 35 – poddanej iniekcji kremem w/o (S=80%, zasolenie: nie)



Rys. 6.32 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 36 – poddanej iniekcji kremem w/o (S=80%, zasolenie: nie)



Rys. 6.33 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 37 – poddanej iniekcji kremem w/o (S=80%, zasolenie: nie)

Tabela 6.37 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 38 – poddanej iniekcji kremem w/o (S=95%, zasolenie: nie)

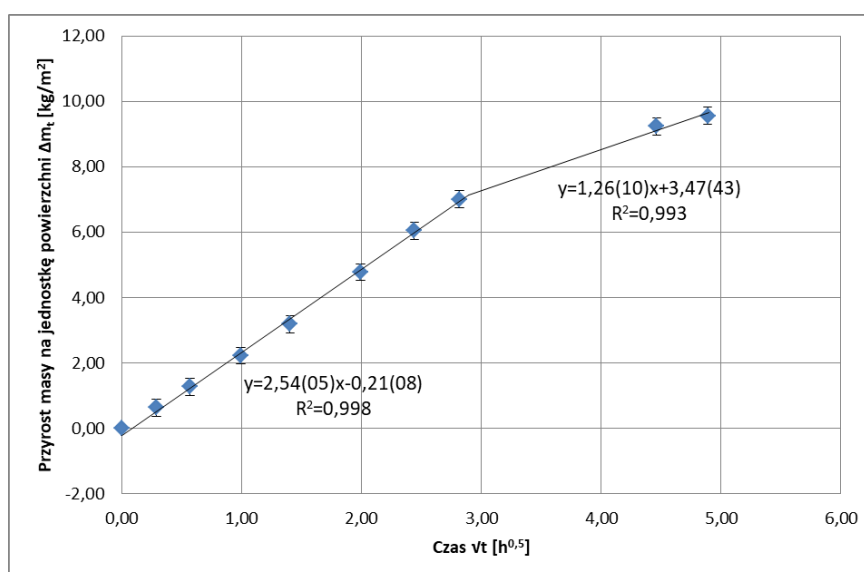
Lp.	t	t [h]	\sqrt{t} [$h^{0.5}$]	m_t [kg]	$m_t - m_i$ [kg]	Δm_t [kg/m^2]	$u(\Delta m_t)$ [kg/m^2]
1.	0:00:00	0,00	0,00	26,86	0,00	0,00	-
2.	0:04:58	0,08	0,29	26,90	0,04	0,64	0,26
3.	0:19:25	0,32	0,57	26,94	0,08	1,27	0,26
4.	0:58:52	0,98	0,99	27,00	0,14	2,23	0,26
5.	1:58:19	1,97	1,40	27,06	0,20	3,19	0,26
6.	3:57:43	3,96	1,99	27,16	0,30	4,78	0,26
7.	5:57:05	5,95	2,44	27,24	0,38	6,05	0,26
8.	7:56:10	7,94	2,82	27,30	0,44	7,01	0,26
9.	19:55:14	19,92	4,46	27,44	0,58	9,24	0,26
10.	23:54:06	23,90	4,89	27,46	0,60	9,56	0,26

Tabela 6.38 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 39 – poddanej iniekcji kremem w/o (S=95%, zasolenie: nie)

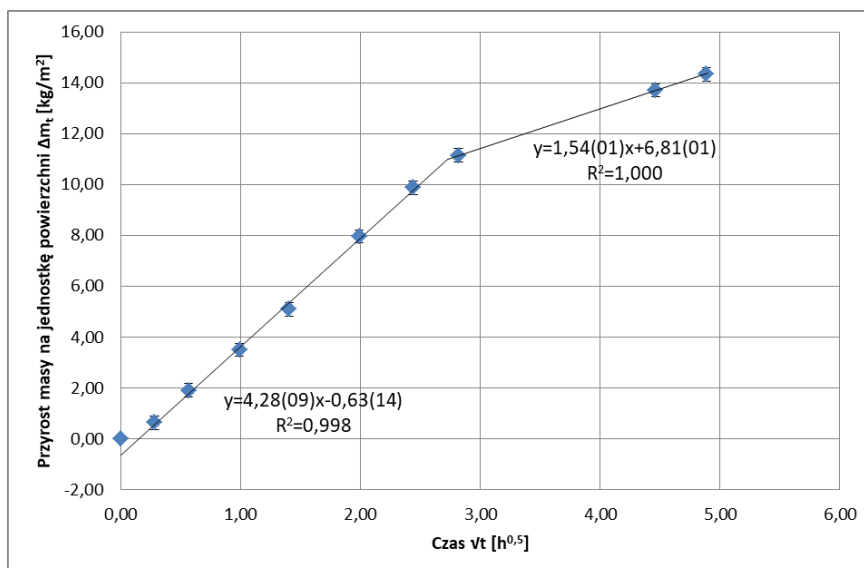
Lp.	t	t [h]	\sqrt{t} [h ^{0,5}]	m_t [kg]	$m_t - m_i$ [kg]	Δm_t [kg/m ²]	$u(\Delta m_t)$ [kg/m ²]
1.	0:00:00	0,00	0,00	26,70	0,00	0,00	-
2.	0:04:44	0,08	0,28	26,74	0,04	0,64	0,26
3.	0:19:10	0,32	0,57	26,82	0,12	1,91	0,26
4.	0:58:36	0,98	0,99	26,92	0,22	3,51	0,26
5.	1:58:02	1,97	1,40	27,02	0,32	5,10	0,26
6.	3:57:26	3,96	1,99	27,20	0,50	7,97	0,26
7.	5:56:48	5,95	2,44	27,32	0,62	9,88	0,26
8.	7:56:13	7,94	2,82	27,40	0,70	11,15	0,26
9.	19:54:17	19,90	4,46	27,56	0,86	13,70	0,27
10.	23:52:33	23,88	4,89	27,60	0,90	14,34	0,27

Tabela 6.39 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 40 – poddanej iniekcji kremem w/o (S=95%, zasolenie: nie)

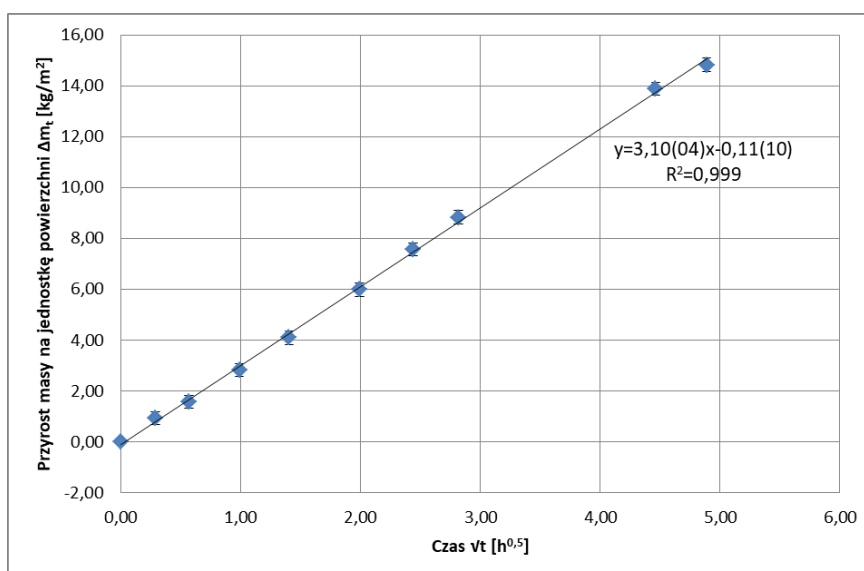
Lp.	t	t [h]	\sqrt{t} [h ^{0,5}]	m_t [kg]	$m_t - m_i$ [kg]	Δm_t [kg/m ²]	$u(\Delta m_t)$ [kg/m ²]
1.	0:00:00	0,00	0,00	26,52	0,00	0,00	-
2.	0:05:00	0,08	0,29	26,58	0,06	0,95	0,26
3.	0:19:24	0,32	0,57	26,62	0,10	1,58	0,26
4.	0:58:47	0,98	0,99	26,70	0,18	2,84	0,26
5.	1:58:14	1,97	1,40	26,78	0,26	4,10	0,26
6.	3:57:36	3,96	1,99	26,90	0,38	5,99	0,26
7.	5:56:58	5,95	2,44	27,00	0,48	7,57	0,26
8.	7:55:57	7,93	2,82	27,08	0,56	8,83	0,26
9.	19:54:31	19,91	4,46	27,40	0,88	13,88	0,26
10.	23:53:37	23,89	4,89	27,46	0,94	14,82	0,26



Rys. 6.34 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 38 – poddanej iniekcji kremem w/o (S=95%, zasolenie: nie)



Rys. 6.35 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 39 – poddanej iniekcji kremem w/o (S=95%, zasolenie: nie)



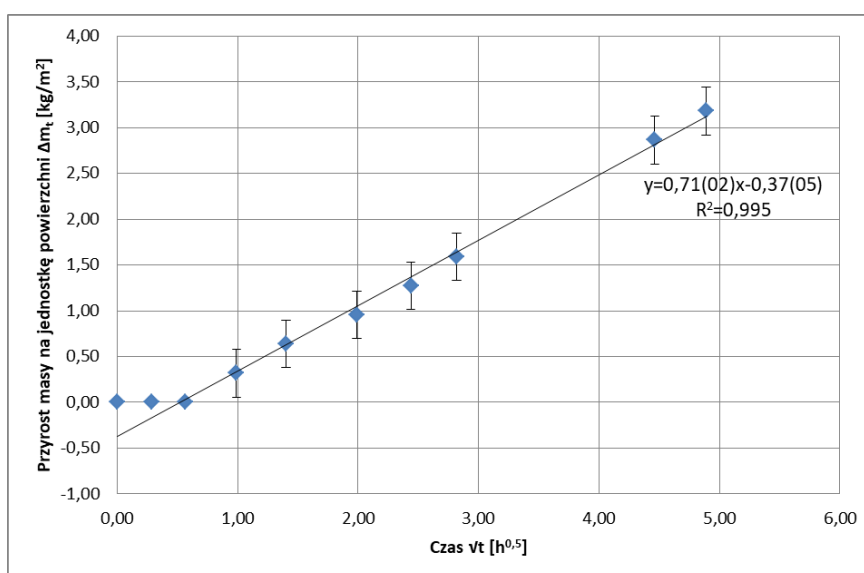
Rys. 6.36 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 40 – poddanej iniekcji kremem w/o (S=95%, zasolenie: nie)

Tabela 6.40 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 41 – poddanej iniekcji kremem w/o (S=80%, zasolenie: tak)

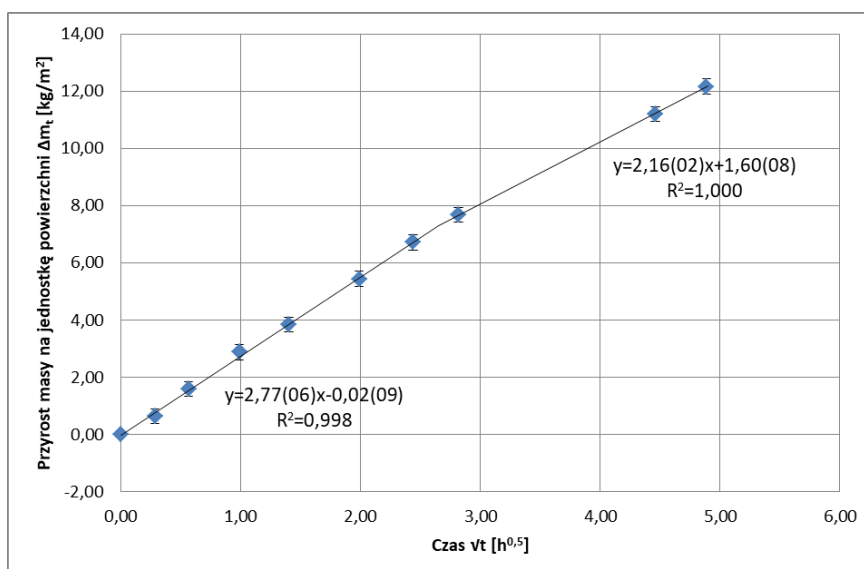
Lp.	t	t [h]	vt [h ^{0,5}]	m _t [kg]	m _t -m _i [kg]	Δm _t [kg/m ²]	u(Δm _t) [kg/m ²]
1.	0:00:00	0,00	0,00	26,78	0,00	0,00	-
2.	0:04:57	0,08	0,29	26,78	0,00	0,00	-
3.	0:19:25	0,32	0,57	26,78	0,00	0,00	-
4.	0:58:50	0,98	0,99	26,80	0,02	0,32	0,26
5.	1:58:11	1,97	1,40	26,82	0,04	0,64	0,26
6.	3:57:37	3,96	1,99	26,84	0,06	0,95	0,26
7.	5:56:59	5,95	2,44	26,86	0,08	1,27	0,26
8.	7:56:42	7,95	2,82	26,88	0,10	1,59	0,26
9.	19:55:30	19,93	4,46	26,96	0,18	2,86	0,26
10.	23:54:29	23,91	4,89	26,98	0,20	3,18	0,26

Tabela 6.41 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 42 – poddanej iniekcji kremem w/o (S=80%, zasolenie: tak)

Lp.	t	t [h]	\sqrt{t} [h ^{0,5}]	m_t [kg]	$m_t - m_i$ [kg]	Δm_t [kg/m ²]	$u(\Delta m_t)$ [kg/m ²]
1.	0:00:00	0,00	0,00	27,02	0,00	0,00	-
2.	0:04:51	0,08	0,28	27,06	0,04	0,64	0,26
3.	0:19:14	0,32	0,57	27,12	0,10	1,60	0,26
4.	0:58:37	0,98	0,99	27,20	0,18	2,88	0,26
5.	1:57:58	1,97	1,40	27,26	0,24	3,84	0,26
6.	3:57:17	3,95	1,99	27,36	0,34	5,44	0,26
7.	5:56:39	5,94	2,44	27,44	0,42	6,72	0,26
8.	7:55:52	7,93	2,82	27,50	0,48	7,68	0,26
9.	19:53:37	19,89	4,46	27,72	0,70	11,20	0,26
10.	23:51:49	23,86	4,89	27,78	0,76	12,16	0,26



Rys. 6.37 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 41 – poddanej iniekcji kremem w/o (S=80%, zasolenie: tak)



Rys. 6.38 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 42 – poddanej iniekcji kremem w/o (S=80%, zasolenie: tak)

Tabela 6.42 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 44 – poddanej iniekcji kremem w/o (S=95%, zasolenie: tak)

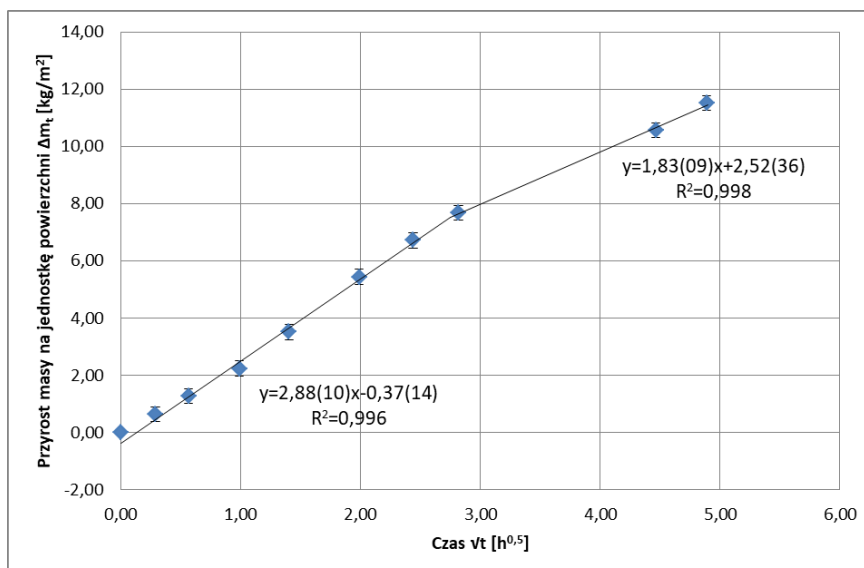
Lp.	t	t [h]	\sqrt{t} [h ^{0,5}]	m _t [kg]	m _t -m _i [kg]	Δm _t [kg/m ²]	u(Δm _t) [kg/m ²]
1.	0:00:00	0,00	0,00	26,64	0,00	0,00	-
2.	0:04:58	0,08	0,29	26,68	0,04	0,64	0,26
3.	0:19:14	0,32	0,57	26,72	0,08	1,28	0,26
4.	0:58:49	0,98	0,99	26,78	0,14	2,24	0,26
5.	1:58:06	1,97	1,40	26,86	0,22	3,52	0,26
6.	3:57:27	3,96	1,99	26,98	0,34	5,44	0,26
7.	5:56:55	5,95	2,44	27,06	0,42	6,72	0,26
8.	7:56:09	7,94	2,82	27,12	0,48	7,68	0,26
9.	19:55:19	19,92	4,46	27,30	0,66	10,56	0,26
10.	23:53:17	23,89	4,89	27,36	0,72	11,52	0,26

Tabela 6.43 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 45 – poddanej iniekcji kremem w/o (S=95%, zasolenie: tak)

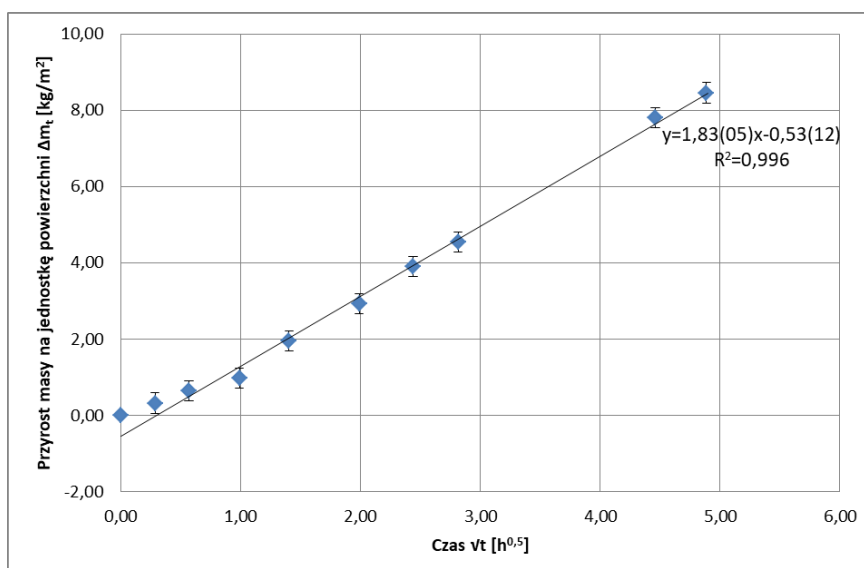
Lp.	t	t [h]	\sqrt{t} [h ^{0,5}]	m _t [kg]	m _t -m _i [kg]	Δm _t [kg/m ²]	u(Δm _t) [kg/m ²]
1.	0:00:00	0,00	0,00	26,64	0,00	0,00	-
2.	0:04:54	0,08	0,29	26,66	0,02	0,33	0,27
3.	0:19:20	0,32	0,57	26,68	0,04	0,65	0,27
4.	0:58:43	0,98	0,99	26,70	0,06	0,98	0,27
5.	1:58:06	1,97	1,40	26,76	0,12	1,95	0,27
6.	3:57:26	3,96	1,99	26,82	0,18	2,93	0,27
7.	5:56:48	5,95	2,44	26,88	0,24	3,90	0,27
8.	7:55:28	7,92	2,82	26,92	0,28	4,55	0,27
9.	19:53:40	19,89	4,46	27,12	0,48	7,80	0,27
10.	23:52:54	23,88	4,89	27,16	0,52	8,45	0,27

Tabela 6.44 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 46 – poddanej iniekcji kremem w/o (S=95%, zasolenie: tak)

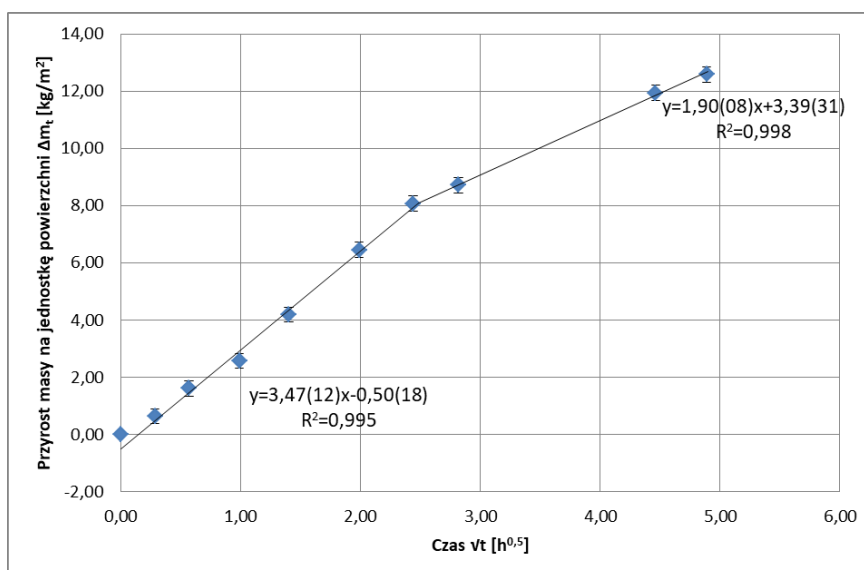
Lp.	t	t [h]	\sqrt{t} [h ^{0,5}]	m _t [kg]	m _t -m _i [kg]	Δm _t [kg/m ²]	u(Δm _t) [kg/m ²]
1.	0:00:00	0,00	0,00	26,48	0,00	0,00	-
2.	0:04:54	0,08	0,29	26,52	0,04	0,65	0,26
3.	0:19:15	0,32	0,57	26,58	0,10	1,61	0,26
4.	0:58:38	0,98	0,99	26,64	0,16	2,58	0,26
5.	1:57:58	1,97	1,40	26,74	0,26	4,20	0,26
6.	3:57:16	3,95	1,99	26,88	0,40	6,45	0,26
7.	5:56:39	5,94	2,44	26,98	0,50	8,07	0,26
8.	7:56:11	7,94	2,82	27,02	0,54	8,71	0,26
9.	19:54:44	19,91	4,46	27,22	0,74	11,94	0,27
10.	23:53:31	23,89	4,89	27,26	0,78	12,59	0,27



Rys. 6.39 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 44 – poddanej iniekcji kremem w/o (S=95%, zasolenie: tak)



Rys. 6.40 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 45 – poddanej iniekcji kremem w/o (S=95%, zasolenie: tak)



Rys. 6.41 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 46 – poddanej iniekcji kremem w/o (S=95%, zasolenie: tak)

7 INTERPRETACJA WYNIKÓW BADAŃ

7.1 Dynamika absorpcji kapilarnej i jej redukcja

Z uwagi na zróżnicowanie przebiegu wykresów absorpcji kapilarnej badanych próbek, widoczne zarówno pomiędzy próbkami niezaimpregnowanymi oraz zawierającymi powłokową barierę przeciwwilgociową, jak i poszczególnymi próbkami poddanymi iniekcji, stwierdzono, że żaden z podanych w rozdziale 1.5.2 sposobów obliczania współczynnika absorpcji kapilarnej $w_{24'}$, nie pozwoli na wiarygodne porównanie właściwości poszczególnych próbek, jako że porównanie takie nie mogło by uwzględniać przebiegu funkcji. W związku z powyższym proponuje się wprowadzenie nowej wielkości – współczynnika dynamiki absorpcji kapilarnej (po 24 h od zanurzenia) $d_{wa,24'}$.

Wartość współczynnika dynamiki absorpcji kapilarnej odpowiada całe wykresu przyrostu masy na jednostkę powierzchni w funkcji pierwiastka czasu (powierzchni pola pod wykresem) w granicach całkowania od punktu przecięcia prostej pierwotnej z osią odciętych $\sqrt{t_0}$ do punktu $(\sqrt{t_{24'}} = \sqrt{t_0} + \sqrt{24h})$.

W celu obliczenia wartości współczynnika dynamiki absorpcji kapilarnej należy:

- wyznaczyć miejsce przecięcia prostej pierwotnej z osią odciętych $\sqrt{t_0}$ wraz z niepewnością $u(\sqrt{t_0})$,
- wyznaczyć tzw. punkt krytyczny (jeśli występuje), tj. miejsce przecięcia krzywych pierwotnej oraz wtórnej oraz odpowiadające mu wartości $\sqrt{t_{pk}}$ oraz Δm_{pk} (wraz z niepewnościami),
- wyznaczyć wartość $\sqrt{t_{24'}} = \sqrt{t_0} + \sqrt{24h}$ oraz odpowiadającą jej wartość $\Delta m_{24'}$ (wraz z niepewnościami),
- obliczyć wartość współczynnika dynamiki absorpcji kapilarnej według wzoru:

Współczynnik dynamiki absorpcji kapilarnej			Równanie 52
$d_{wa,24'} = \frac{\sqrt{24} \cdot \Delta m_{pk} + \Delta m_{24'} (\sqrt{24 - t_{pk}})}{2}$	symbol	jednostka	nazwa
	$d_{wa,24'}$	$\text{kg} \cdot \text{h}^{0.5} / \text{m}^2$	współczynnik dynamiki absorpcji kapilarnej
	Δm_{pk}	kg / m^2	pojemność kapilarna
	$\Delta m_{24'}$	kg / m^2	wartość Δm odczytana z linii prostej dla czasu $t_{24'}$
	t_{pk}	h	czas osiągnięcia przez próbkę pojemności kapilarnej

W przypadku szczególnym, gdy pojemność kapilarna próbki nie została osiągnięta w czasie badania (punkt krytyczny wykresu nie występuje), wzór powyższy redukuje się do postaci:

$$d_{wa,24'} = \frac{\sqrt{24}}{2} \cdot \Delta m_{24'}$$

W celu oceny skuteczności środków iniekcyjnych przeciwdziałających podciąganiu kapilarnemu wilgoci w murze można wykorzystać dwie wartości odniesienia, tj.:

- średnią wartość współczynnika dynamiki absorpcji kapilarnej próbek nie poddanych iniekcji $d_{wa,24'}^0$, jako wartość „wyjściową”, oraz
- średnią wartość współczynnika dynamiki absorpcji kapilarnej próbek zawierających powłokową izolację mineralną $d_{wa,24'}^1$, jako wartość „referencyjną”

i wprowadzić nową wielkość, czyli stopień redukcji dynamiki absorpcji kapilarnej R_{ad} .

Jeżeli jako punkt odniesienia przyjąć wartość

$$d_{wa,24'}^0 - d_{wa,24'}^1$$

stopień redukcji dynamiki absorpcji kapilarnej dla danego środka iniekcyjnego byłby dany wzorem:

Stopień redukcji dynamiki absorpcji kapilarnej			Równanie 53
$R_{ad} = \frac{d_{wa,24'}^0 - d_{wa,24'}^i}{d_{wa,24'}^0 - d_{wa,24'}^1}$	symbol	jednostka	nazwa
	R_{ad}	-	stopień redukcji dynamiki absorpcji kapilarnej
	$d_{wa,24'}^i$	$\text{kg}\cdot\text{h}^{0,5}/\text{m}^2$	średnia wartość współczynnika dynamiki absorpcji kapilarnej próbek poddanych iniekcji
	$d_{wa,24'}^0$	$\text{kg}\cdot\text{h}^{0,5}/\text{m}^2$	średnia wartość współczynnika dynamiki absorpcji kapilarnej próbek nie poddanych iniekcji
	$d_{wa,24'}^1$	$\text{kg}\cdot\text{h}^{0,5}/\text{m}^2$	średnia wartość współczynnika dynamiki absorpcji kapilarnej próbek zawierających uszczelnienie powłokowe

Wyniki obliczeń wartości (wraz z niepewnościami) punktów charakterystycznych uzyskanych w toku badań wykresów absorpcji kapilarnej zestawiono w tabeli 7.1, natomiast wartości współczynnika dynamiki absorpcji kapilarnej próbek referencyjnych wraz z wartościami odniesienia do obliczenia stopnia redukcji kapilarnej zawiera tablica 7.2.

Tabela 7.1 Wartości punktów charakterystycznych wykresów absorpcji kapilarnej próbek poddanych badaniom

Próbka	vt_0 [h ^{0,5}]	$u(vt_0)$ [h ^{0,5}]	vt_{pk} [h ^{0,5}]	$u(vt_{pk})$ [h ^{0,5}]	Δm_{pk} [kg/m ²]	$u(\Delta m_{pk})$ [kg/m ²]	$vt_{24'}$ [h ^{0,5}]	$u(vt_{24'})$ [h ^{0,5}]	$\Delta m_{24'}$ [kg/m ²]	$u(\Delta m_{24'})$ [kg/m ²]
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]
01	0,00	0,03	2,21	0,09	11,44	0,48	4,90	0,03	12,51	0,36
02	0,04	0,02	2,20	0,07	12,00	0,38	4,94	0,02	13,08	0,36
03	0,00	0,02	2,47	0,09	10,58	0,39	4,90	0,02	11,43	0,42
04	0,20	0,06	-	-	-	-	5,10	0,06	27,43	0,84
05	-0,06	-0,04	-	-	-	-	4,84	-0,04	25,01	0,49
06	0,05	0,04	-	-	-	-	4,95	0,04	29,24	0,55
11	0,49	0,15	-	-	-	-	5,39	0,15	3,77	0,28
12	0,13	0,08	2,96	0,39	10,46	1,38	5,03	0,08	14,31	0,47
13	0,32	0,06	-	-	-	-	5,22	0,06	11,60	0,32
14	0,41	0,12	-	-	-	-	5,31	0,12	11,36	0,65
15	0,11	0,05	2,51	0,26	8,42	0,88	5,01	0,05	13,46	0,36
16	0,10	0,04	2,44	0,10	7,07	0,30	5,00	0,04	9,47	0,13
17	0,16	0,10	2,75	0,39	7,69	1,08	5,06	0,10	11,17	0,15
18	0,22	0,15	-	-	-	-	5,12	0,15	7,37	0,79
19	0,05	0,04	2,23	0,17	7,51	0,57	4,94	0,04	11,39	0,18
20	0,10	0,03	1,61	0,12	5,09	0,37	5,00	0,03	8,64	0,25
21	0,26	0,05	2,83	0,21	7,52	0,55	5,16	0,05	11,03	0,09
22	0,09	0,04	2,32	0,14	6,26	0,38	4,99	0,04	8,73	0,13
23	0,79	0,25	-	-	-	-	5,68	0,25	4,30	0,53
24	0,03	0,03	-	-	-	-	4,93	0,03	6,56	0,11
25	0,12	0,04	-	-	-	-	5,02	0,04	7,20	0,14
26	0,24	0,05	-	-	-	-	5,14	0,05	9,67	0,22
27	0,29	0,03	-	-	-	-	5,19	0,03	9,23	0,14
28	0,27	0,05	-	-	-	-	5,17	0,05	11,79	0,30

[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]
29	0,31	0,12	-	-	-	-	5,21	0,12	3,74	0,22
30	0,32	0,06	-	-	-	-	5,22	0,06	4,78	0,15
31	0,27	0,10	-	-	-	-	5,17	0,10	7,29	0,35
32	0,21	0,05	-	-	-	-	5,11	0,05	9,18	0,21
33	0,18	0,06	-	-	-	-	5,08	0,06	8,51	0,25
34	0,18	0,07	-	-	-	-	5,08	0,07	7,09	0,24
35	0,15	0,05	2,82	0,60	9,62	2,04	5,05	0,05	15,06	0,76
36	0,04	0,03	2,86	0,76	8,01	2,14	4,94	0,03	13,12	0,30
37	0,16	0,04	3,03	0,32	7,78	0,81	5,06	0,04	11,29	0,28
38	0,08	0,03	2,89	0,43	7,13	1,05	4,98	0,03	9,77	0,67
39	0,15	0,03	2,72	0,10	11,01	0,42	5,05	0,03	14,60	0,07
40	0,03	0,03	-	-	-	-	4,93	0,03	15,19	0,23
41	0,52	0,07	-	-	-	-	5,42	0,07	3,50	0,13
42	0,01	0,03	2,65	0,34	7,31	0,93	4,90	0,03	12,18	0,15
44	0,13	0,05	2,75	0,50	7,53	1,36	5,03	0,05	11,70	0,57
45	0,29	0,07	-	-	-	-	5,19	0,07	8,98	0,29
46	0,15	0,05	2,48	0,32	8,10	1,06	5,04	0,05	12,95	0,50

Tabela 7.2 Średnia wartość współczynnika dynamiki absorpcji kapilarnej próbek nie poddanych iniekcji oraz zawierających powłokową izolację mineralną

Próbka	$d_{wa,24'}$ [kg·h ^{0,5} /m ²]	$u(d_{wa,24})$ [kg·h ^{0,5} /m ²]	$d_{wa,24'}^0$ [kg·h ^{0,5} /m ²]	$d_{wa,24'}^1$ [kg·h ^{0,5} /m ²]	$u(d_{wa,24'}^0)$ [kg·h ^{0,5} /m ²]	$u(d_{wa,24'}^1)$ [kg·h ^{0,5} /m ²]
01	44,86	0,69	-	43,99	-	0,43
02	47,31	0,57				
03	39,80	0,63				
04	67,18	0,62	66,69	-	0,92	-
05	61,27	0,23				
06	71,63	0,28				

W przypadku stopnia redukcji dynamiki kapilarnej zastosowano niepewność rozszerzoną pomiaru (tj. miarę pewności umożliwiającą wnioskowanie o zgodności wyniku z innymi rezultatami), obliczoną poprzez wyznaczenie iloczynu współczynnika rozszerzenia oraz złożonej niepewności standardowej [39, 71]:

Niepewność rozszerzona pomiaru		Równanie 54
$U(y) = k_p \cdot u_c(y)$	symbol	nazwa
	$U(y)$	niepewność rozszerzona
	$u_c(y)$	niepewność złożona funkcji y
	k_p	współczynnik rozszerzenia

Indeks p w powyższym wzorze oznacza poziom ufności, czyli prawdopodobieństwo zdarzenia, że wartość mierzonych wielkości zawarta jest w przedziale $(y - U(y), y + U(y))$. Wartość współczynnika rozszerzenia, zgodnie z międzynarodową praktyką, przyjęto jako $k_p = 2$, tj. odpowiadającą prawdopodobieństwu realizacji wartości współczynnika redukcji dynamiki kapilarnej w przedziale $(R_{ad} - U(R_{ad}), R_{ad} + U(R_{ad}))$, wynoszącym nie mniej niż 95% [71].

Wyniki obliczeń współczynników dynamiki absorpcji kapilarnej oraz stopnia redukcji dynamiki kapilarnej próbek poddanych iniekcji zestawiono w tabelach 7.3 do 7.5.

7.2 Iniekcja niskociśnieniowa

W przypadku iniekcji ciśnieniowej płynem iniekcyjnym na bazie związków krzemu (krzemianów i metylokrzemianów alkalicznych) podkreślenia wymaga przede wszystkim fakt znacznego rozrzutu uzyskanych wyników, co obrazuje kształt poszczególnych wykresów absorpcji kapilarnej (Rys. 6.7 do 6.18). Najbardziej regularny przebieg absorpcji zaobserwowano w przypadku próbek o wysokim stopniu zawilgocenia i obecności szkodliwych soli budowlanych (Rys. 6.16-6.18). Stan powyższy wydaje się potwierdzać zarzut stawiany iniekcjom ciśnieniowym, w kontekście niekontrolowanej dystrybucji płynu iniekcyjnego w strukturze muru [77] – jednakże z wyłączeniem sytuacji, gdy pory materiału są w znacznej mierze wypełnione wodą oraz solami, co może powodować ograniczenie niekontrolowanej ucieczki iniektu poza strefę iniekcji. Można postawić tezę, że wysoki poziom zawilgocenia i zasolenia działa jak swego rodzaju czynnik regulujący proces iniekcji ciśnieniowej.

Tabela 7.3 Współczynniki dynamiki absorpcji kapilarnej oraz współczynniki redukcji absorpcji próbek poddanych iniekcji ciśnieniowej

Próbka	S	zasolenie	$d_{wa,24'}$	$u(d_{wa,24})$	$d_{wa,24'}^i$	$u(d_{wa,24}^i)$	R_{ad}	$U(R_{ad})$
			$[kg \cdot h^{0,5} / m^2]$	$[kg \cdot h^{0,5} / m^2]$	$[kg \cdot h^{0,5} / m^2]$	$[kg \cdot h^{0,5} / m^2]$		
11	80%	nie	9,23	0,68	34,40	1,51	1,42	0,20
12			40,40	2,92				
13			28,40	0,78				
14	95%	nie	27,82	1,59	31,58	0,84	1,55	0,18
15			37,47	1,87				
16			29,44	0,54				
17	80%	tak	31,73	2,26	27,88	1,05	1,71	0,20
18			18,05	1,93				
19			33,85	1,02				
20	95%	tak	27,14	0,68	28,46	0,51	1,68	0,18
21			31,25	1,18				
22			26,98	0,67				

Mimo zróżnicowanej dystrybucji środka iniekcyjnego w strukturze muru, iniekcja ciśnieniowa charakteryzuje się wysokim poziomem skuteczności. Uśredniona wartość stopnia redukcji dynamiki absorpcji kapilarnej wyniosła 1,59. Przy czym podkreślenia wymaga fakt, że znaczne lepsze wyniki odnotowano w przypadku próbek zawilgoconych roztworem soli – odpowiednio 1,71 i 1,68, w porównaniu do wartości 1,42 i 1,55 w przypadku próbek zawilgoconych wodą wodociągową. Przyczyny należy upatrywać w zasadzie działania iniekcji mieszaniną organicznych i nieorganicznych związków krzemu, tj. zwężeniem światła kapilar przy ich jednoczesnej hydrofobizacji – obecność soli w porach materiału może mieć bowiem działanie zwiększające efekt „uszczelnienia” kapilar.

Iniekcja niskociśnieniowa okazała się również bardziej skuteczna w przypadku podwyższonego (95%) poziomu zawilgocenia – stopień redukcja absorpcji kapilarnej był o 8,8% wyższy niż w przypadku stopnia zawilgocenia na poziomie 80% – ale jedynie w przypadku zawilgocenia wodą nie zawierającą szkodliwych soli budowlanych. W tym drugim przypadku odnotowano spadek stopnia redukcji o 1,5%. Przyczyn tego zjawiska można upatrywać w różnicy lekkości cieczy wypełniającej pory i wpływu tego parametru na rozchodzenie się w strukturze muru iniektu aplikowanego pod ciśnieniem.

7.3 Krem iniekcyjny (emulsja o/w)

W przypadku iniekcji kremem iniekcyjnym na bazie silanów typu o/w podkreślenia wymaga nie tylko największa ze wszystkich trzech środków iniekcyjnych skuteczność – średnia wartość stopnia redukcji dynamiki absorpcji wyniosła 2,11 i w przypadku tylko jednej serii próbek wartość ta nie przekroczyła dwóch – ale również regularność i kształt uzyskanych wykresów absorpcji (Rys. 6.19 do 6.30). W żadnym z przypadków nie odnotowano też osiągnięcia pojemności kapilarnej.

Jednakże, wbrew panującej powszechnie opinii [116, 193], podwyższone zawilgocenie okazuje się mieć negatywny wpływ na skuteczność iniekcji. Stopień redukcji dynamiki absorpcji dla próbki o stopniu zawilgocenia wynoszącym 95% był niższy odpowiednio o 16,5% w próbkach niezasolonych oraz o 13,6% w próbkach zawierających znaczną ilość szkodliwych soli. Ponieważ krem iniekcyjny rozchodzi się w przegrodzie na dwa sposoby (wyrównanie stężeń oraz dyfuzja substancji czynnej w formie gazowej), wysoki poziom wypełnienia porów wodą może mieć negatywny wpływ na dystrybucję oparów silanu.

Tabela 7.4 Współczynniki dynamiki absorpcji kapilarnej oraz współczynniki redukcji absorpcji próbek poddanych iniekcji kremem o/w

Próbka	S	zasolenie	$d_{wa,24'}$	$u(d_{wa,24})$	$d_{wa,24'}^i$	$u(d_{wa,24}^i)$	R_{ad}	$U(R_{ad})$
			[kg·h ^{0,5} /m ²]	[kg·h ^{0,5} /m ²]	[kg·h ^{0,5} /m ²]	[kg·h ^{0,5} /m ²]		
23	80%	nie	10,52	1,30	16,85	0,21	2,20	0,21
24			16,07	0,26				
25			17,64	0,34				
26	95%	nie	23,70	0,54	25,07	0,33	1,83	0,18
27			22,61	0,35				
28			28,89	0,74				
29	80%	tak	9,17	0,53	12,91	0,36	2,37	0,23
30			11,70	0,36				
31			17,87	0,86				
32	95%	tak	22,48	0,51	20,22	0,33	2,05	0,20
33			20,83	0,62				
34			17,36	0,59				

Odnotowano natomiast większą skuteczność bariery przeciw wilgoci kapilarnej wykonanej w próbkach o podwyższonym zasoleniu (średnio o 9,8%). Ponieważ zawarte w kremach iniekcyjnych silany działają jedynie na drodze hydrofobizacji, obecność soli może mieć wpływ podobny do efektu zwężenia światła kapilar występującego w przypadku zastosowania środków iniekcyjnych działającej na tej zasadzie.

7.4 Krem iniekcyjny (emulsja w/o)

W przypadku kremu iniekcyjnego o tzw. odwróconej recepturze (jest to pierwszy na rynku krem iniekcyjny w formule emulsji woda w oleju) również zaobserwowano relatywnie niezróżnicowany przebieg wykresów absorpcji kapilarnej (Rys. 6.31 do 6.41), choć w tym wypadku w większości przypadków odnotowano osiągnięcie pojemności kapilarnej. Zmiana dynamiki przebiegu absorpcji jest jednak wówczas niewielka. Podkreślenia wymaga również fakt, że skuteczność zabiegu iniekcji chemicznej, wyrażona stopniem redukcji dynamiki absorpcji kapilarnej, którego średnia wartość wyniosła w tym wypadku 1,45, jest nie tylko niższa niż w przypadku „tradycyjnego” kremu, ale też najniższa spośród wszystkich badanych preparatów.

Tabela 7.5 Współczynniki dynamiki absorpcji kapilarnej oraz współczynniki redukcji absorpcji próbek poddanych iniekcji kremem w/o

Próbka	S	zasolenie	$d_{wa,24'}$	$u(d_{wa,24})$	$d_{wa,24}^i$	$u(d_{wa,24}^i)$	R_{ad}	$U(R_{ad})$
			[kg·h ^{0,5} /m ²]	[kg·h ^{0,5} /m ²]	[kg·h ^{0,5} /m ²]	[kg·h ^{0,5} /m ²]		
35	80%	nie	40,33	4,72	34,72	2,42	1,41	0,26
36			33,28	5,20				
37			30,54	1,83				
38	95%	nie	27,67	2,24	36,27	0,81	1,34	0,16
39			43,93	0,81				
40			37,20	0,56				
41	80%	tak	8,56	0,32	-	-	-	-
42			31,65	2,09				
43			próbka uszkodzona					
44	95%	tak	31,79	3,06	30,07	1,29	1,61	0,20
45			21,99	0,71				
46			36,43	2,25				

Podobnie jak w przypadku kremu iniekcyjnego w formule o/w, skuteczność impregnacji okazała się niższa niż w przypadku wyższego poziomu zawilgocenia. Niemniej różnica ta (4,8%) jest niemal trzykrotnie niższa w przypadku tradycyjnego kremu. Przyczyny tego faktu można upatrywać właśnie w formule kremu, która, dzięki temu, że substancja czynna nie musi „wydostawać się” z otoczki wody zwartej w samym preparacie, ma powodować szybsze rozchodzenie się silanu w strukturze muru.

Z kolei „pozytywny” wpływ zasolenia próbki na ograniczenie absorpcji kapilarnej jest znacząco (nie-mal dwukrotnie) wyższy, niż w przypadku kremu w formule o/w. Ten efekt należy interpretować w kontekście mniejszej skuteczności preparatu – mniejszy wpływ hydrofobizacji sprawia bowiem, że zwężenie światła kapilar związane z obecnością soli odgrywa większą rolę.

Interpretacja wyników badań próbek poddanych iniekcji przy zastosowaniu kremu iniekcyjnego w formule w/o nie może być pełna z uwagi na fakt, że jedna z serii próbek została w całości z tej interpretacji wyłączona (Rys. 6.37-6.38).

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przeprowadzone badania empiryczne prowadzą do sformułowania następujących wniosków końcowych:

1. Zarówno stosowany środek iniekcyjny i sposób jego aplikacji, jak również stopień zawilgocenia i zasolenia przegrody mają istotny wpływ na skuteczność wykonania wtórnej hydroizolacji poziomej przeciw wilgoci podciąganej kapilarnie.

Wyniki przeprowadzonych badań potwierdzają zatem w całości tezę główną (choć tylko dwie z trzech tez pomocniczych – porównaj wnioski 2. do 4.) przedmiotowej pracy. Najskuteczniejszy okazał się środek iniekcyjny na bazie silanów w postaci kremu w formule emulsji olej w wodzie. Jego zastosowanie pozwoliło na ograniczenie w dynamiki absorpcji kapilarnej w badanych próbkach w stopniu ponad dwukrotnie wyższym niż zastosowanie w najniższej spoinie wspornej hydroizolacji z mineralnej zaprawy uszczelniającej. Również krem iniekcyjny w formule woda w oleju oraz aplikowany metodą ciśnieniową płyn iniekcyjny na bazie metylokrzemianów i krzemianów alkalicznych pozwoliły uzyskać ograniczenie dynamiki absorpcji w stopniu wyższym niż próbka referencyjna, choć efekt ten był wyraźnie niższy niż w przypadku kremu w formule o/w.

2. Wzrost stopnia zawilgocenia muru powoduje spadek skuteczności iniekcji chemicznej.

Każdy z zastosowanych w badaniach środków iniekcyjnych okazał się mniej skuteczny w przypadku wyższego stopnia zawilgocenia. Wyjątek stanowiły nie zawierające szkodliwych soli próbki poddane iniekcji ciśnieniowej. Wynik ten należy jednak poddać weryfikacji, ponieważ na jego uzyskanie mogła mieć z jednej strony wpływ znaczna nieregularność wyników uzyskanych w przypadku iniekcji ciśnieniowej, jak również fakt, że w przypadku niezasolonych próbek o stopniu zawilgocenia 80% w interpretacji wyników uwzględniono jedynie dwie próbki.

3. Na podstawie uzyskanych wyników nie można jednoznacznie określić stopnia, w jakim zasolenie przegrody wpływa na skuteczność iniekcji chemicznej.

Wbrew postawionej tezie pomocniczej, zasolenie próbek okazało się mieć pozytywny wpływ na skuteczność zastosowanych środków iniekcyjnych. Przyczyną tego zjawiska jest najprawdopodobniej efekt zwężenia światła kapilar w wyniku osadzania się w nich kryształów soli. Podkreślenia wymaga jednak fakt, że do uzyskania wartości referencyjnych pozwalających na ocenę stopnia ograniczenia absorpcji kapilarnej stosowano próbki niezasolone. Precyzyjne określenie wpływu zasolenia na skuteczność iniekcji – z uwzględnieniem zarówno poziomu zasolenia, jak i rodzaju obecnych w przegrodzie związków – wymaga dalszych, pogłębionych badań, które pomogą zweryfikować sprzeczne opinie dotyczące wpływu zawilgocenia na skuteczność wykonywania hydroizolacji poziomej metodą iniekcji [210, 221].

4. W przypadku stosowania iniekcji pod ciśnieniem istnieje wysokie ryzyko nierównomiernego rozprowadzenia preparatu iniekcyjnego w strukturze przegrody.

Jeżeli za jeden z wyznaczników skuteczności uznać jednorodność uzyskanej przepony, należy stwierdzić, że uzyskane wyniki badań w pełni potwierdzają wymieniany w literaturze „słaby punkt” iniekcji niskociśnieniowych, tj. możliwość niekontrolowanej dystrybucji płynu iniekcyjnego w strukturze muru [77]. Z jednej strony przez wiele lat możliwość wprowadzenia pod ciśnieniem preparatu iniek-

cyjnego w pory wypełnione wodą podawano za podstawowy atut tego rodzaju iniekcji. Należy jednak mieć na względzie, że płyn iniekcyjny będzie się rozprzestrzeniał w przegrodzie po linii najmniejszego oporu – efekt ten potwierdza znaczny rozrzut wyników (przebiegu wykresów absorpcji) w przypadku próbek poddanych iniekcji ciśnieniowej oraz fakt, że zróżnicowanie to maleje wraz ze wzrostem stopnia wypełnienia porów. Z drugiej strony należy zauważyć, że iniekcja kremem w formule w/o pozwoliła uzyskać zbliżone, a w przypadku kremu w formule o/w znacznie lepsze wyniki, przy stopniu zawilgocenia zbliżonym do całkowitego (przy czym wykonanie wtórnej izolacji poziomej w technologii kremów iniekcyjnych jest technicznie zdecydowanie mniej skomplikowane niż przeprowadzenie iniekcji niskociśnieniowej).

5. Analiza uzyskanych wyników badań wykazała, że stosowany dotychczas powszechnie parametr, jakim jest współczynnik absorpcji kapilarnej w_{24} , nie uwzględnia wszystkich aspektów procesu kapilarnej absorpcji wody w materiałach porowatych.

Wyniki przeprowadzonych badań pozwoliły zaobserwować, że istotnym efektem zastosowania strukturalnej izolacji poziomej w murze jest nie tylko ograniczenie absorpcji, ale również zmiana jej dynamiki. Tymczasem żaden ze stosowanych sposobów obliczania współczynnika absorpcji kapilarnej w_{24} – czyli wielkości częstokroć stosowanej do oceny skuteczności zabiegów iniekcyjnych – nie uwzględnia tego faktu. Warto zauważyć, że w przypadku próbek referencyjnych (tj. nie poddanych iniekcji oraz zawierających barierę przeciwwilgociową w postaci zaprawy uszczelniającej w najniższej spoinie wspornej) wartości współczynnika w_{24} zdefiniowanego jako nachylenie wykresu absorpcji w początkowej fazie procesu, byłyby niemal takie same. Dlatego zasadnym jest wprowadzenie nowej wielkości – współczynnika dynamiki absorpcji kapilarnej (po 24 h od zanurzenia) $d_{wa,24'}$, odpowiadającego całce wykresu przyrostu masy na jednostkę powierzchni w funkcji pierwiastka czasu (powierzchni pola pod wykresem absorpcji).

6. Proponuje się wprowadzenie do stosowania stopnia redukcji dynamiki absorpcji kapilarnej R_{ad} , jako parametru pozwalającego klasyfikować preparaty iniekcyjne pod kątem ich skuteczności.

Porównanie współczynnika dynamiki absorpcji kapilarnej próbek poddanych iniekcji z tą samą wielkością określoną dla dwóch typów próbek referencyjnych (dwóch „punktów granicznych”) pozwala z kolei na wprowadzenie dodatkowej nowej wielkości: stopnia redukcji dynamiki absorpcji kapilarnej. Ponieważ zarówno badanie próbek referencyjnych jak i próbek poddanych iniekcji prowadzone jest w tych samych warunkach (z uwzględnieniem zarówno parametrów murków badawczych jak i warunków zewnętrznych), stopień redukcji dynamiki absorpcji kapilarnej może stanowić jednoznaczne kryterium pozwalające klasyfikować środki iniekcyjne pod kątem ich wpływu na zahamowanie kapilarnego podciągania wilgoci w przegrodach budowlanych. Przy czym powinien od uwzględniać określone warunki brzegowe (stopień zawilgocenia, względnie zawilgocenia i zasolenia) – np. symbol R_{ad}^{95} oznaczałby stopień redukcji absorpcji kapilarnej przy stopniu zawilgocenia $S = 95\%$.

Warto jednak zauważyć, że w przypadku, gdy stopień redukcji dynamiki absorpcji kapilarnej miałby być na szerszą skalę stosowany do klasyfikacji (i/lub certyfikacji) preparatów iniekcyjnych, należałoby zwiększyć ilość stosowanych próbek. Jak pokazały wyniki wykonanych badań, zbieżność uzyskanych wyników w przypadku poszczególnych próbek może się – w zależności od zastosowanego środka iniekcyjnego oraz sposobu jego aplikacji – w sposób znaczący różnić. Dlatego jako ilość minimalną dla danych warunków brzegowych należałoby przyjąć cztery próbki, w przypadku bezciśnieniowej aplikacji preparatu, oraz sześć, w przypadku iniekcji pod ciśnieniem. Badania powinny być ponadto prowa-

dzone w ustabilizowanych (zdefiniowanych) warunkach ciepłno-wilgotnościowych, ponieważ (jak wykazali Karagiannis i in. [78]) współczynnik absorpcji wody wzrasta wraz z temperaturą.

7. Należy kontynuować badania dotyczące skuteczności iniekcyjnych metod odtwarzania hydroizolacji poziomej murów.

Przeprowadzone badania obarczone są pewnymi ograniczeniami. Przede wszystkim – z uwagi na ilość uwzględnionych „warunków brzegowych” – ograniczenia ilości zastosowanych wariantów. Rozszerzenie wiedzy na temat zakresu wpływu poziomego zawilgocenia oraz zasolenia przegrody (z uwzględnieniem poziomego zasolenia oraz rodzaju występujących związków) na skuteczność poszczególnych środków iniekcyjnych wymaga zatem przeprowadzenia dalszych, pogłębionych badań. W przypadku wpływu szkodliwych soli budowlanych wskazane byłoby określenie – na przykład przy zastosowaniu mikroskopu elektronowego – w jaki sposób związki te wpływają na strukturę porów o różnych rozmiarach, a tym samym na dystrybucję preparatu iniekcyjnego w materiale budowlanym.

Przeprowadzona analiza literatury wskazuje również na konieczność określenia wpływu zawilgocenia przegrody (w szczególności niskiego poziomego zawilgocenia) na skuteczność kremów iniekcyjnych (obecnie brakuje badań i certyfikatów potwierdzających efektywność tego rodzaju środków iniekcyjnych przy stopniu przesiąknięcia wilgocią wynoszącego poniżej 80% [193]). Z kolei wyniki przeprowadzonych badań wskazują, że należałoby sprawdzić czy wpływ poziomego na skuteczność preparatu nie jest skorelowany z formułą kremu. Sprawdzenia wymaga również wpływ, jaki na skuteczność przepon wykonanych przy zastosowaniu kremów iniekcyjnych ma występowanie w iniektowanej przegrodzie pustek (np. w murze warstwowym) lub innych wolnych przestrzeni (rys, kawern, itp.), w których może zachodzić wzmożone parowanie substancji czynnej.

Zarówno w przypadku kremów iniekcyjnych jak i pozostałych stosowanych preparatów, zasadnym byłoby również zbadanie czy (a jeśli tak to w jakim stopniu) skuteczność wykonanej wtórnej izolacji poziomej zmienia się w czasie.

Bibliografia

1. Adamowski, J., „Metodyka badań zawilgoconych murów”, *Materiały Budowlane*, 7/2005, 6-8
2. Adamson, A.W., *Chemia fizyczna powierzchni*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1963
3. Aksielrud, G.A., Altszuler, M.A., *Ruch masy w ciałach porowatych*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1987
4. Alfano, G., Chiancarella, C., Cirillo, E., Fato, I., Martellotta, F., „Long-term performance of chemical damp-proof courses: Twelve years of laboratory testing”, *Building and Environment*, 41(8)/2006, 1060-1069
5. Appel, B., „PUR-Injektionsharze für nachträgliche Abdichtung unter Berücksichtigung hoher Durchfeuchtungsgrade”, [w:] Venzmer, H. (Red.), *Feuchte und Altbausanierung. 20. Hanseatische Sanierungstage vom 5. bis 7. November 2009 im Ostseebad Heringsdorf/Usedom*, Beuth Verlag GmbH, Berlin · Wien · Zürich, 2009, 243-247
6. Appel, B., „Nachträgliche Horizontalabdichtung mit PUR-Injektionsharzen. Anforderungen – Verarbeitung – Wirksamkeit”, [w:] Venzmer, H. (Red.), *Europäischer Sanierungskalender 2010. Bauwerksdiagnostik und Sanierung*, Beuth Verlag GmbH, Berlin · Wien · Zürich, 2010, 25-39
7. Arendt, C., Seele, J., *Feuchte und Salze in Gebäuden: Ursachen, Sanierung, Vorbeugung*, Verlagsanstalt Alexander Koch, Leinfelden-Echterdingen, 2001
8. Arnold, A., Zehnder, K., „Monitoring Wall Paintings Affected by Soluble Salts”, [w:] Cather, S., *The Conservation of Wall Paintings: Proceedings of a Symposium Organized by the Courtauld Institute of Art and the Getty Conservation Institute, London, July 13-16, 1987*, Getty Conservation Institute, Marina del Rey, CA, 1991, 103-135
9. ASTM C1585-04 *Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes*
10. Atkins, P., de Paula, J., *Chemia fizyczna*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2019
11. Balak, M., „Injektionsverfahren zur nachträglichen Abdichtung von Mauerwerk – neueste Erkenntnisse”, *Mauerwerk*, 11(2)/2007, 81-86
12. Balak, M., „Injektionsverfahren zur Horizontalabdichtung – aber richtig”, [w:] Venzmer, H. (Red.), *Feuchte und Altbausanierung. 20. Hanseatische Sanierungstage vom 5. bis 7. November 2009 im Ostseebad Heringsdorf/Usedom*, Beuth Verlag GmbH, Berlin · Wien · Zürich, 2009, 45-53
13. Balak, M., „Nachträgliche Horizontalabdichtung von Bruchsteinmauerwerk mittels Injektionsverfahren”, *Mauerwerk*, 15(6)/2011, 312-316
14. Balak, M., Pech. A., *Mauerwerkstrockenlegung: Von den Grundlagen zur praktischen Anwendung*, Birkhäuser Verlag GmbH, Basel, 2017
15. Balak, M., Simlinger, C., „Nachträgliche Horizontalabdichtung von Mauerwerk mittels Injektionsverfahren – neueste Erkenntnisse”, [w:] Venzmer, H. (Red.), *Feuchteschutz. 18. Hanseatische Sanierungstage vom 8. bis 10. November 2007 im Ostseebad Heringsdorf/Usedom*, Beuth Verlag GmbH, Berlin · Wien · Zürich, 2007, 129-140
16. Bažant, V., Chvalovský, V., Rathouský, J., *Silikony: związki krzemoorganiczne, ich synteza, własności i zastosowanie*, Państwowe Wydawnictwa Techniczne, Warszawa, 1955
17. Bonk, M., „Sanierung von Abdichtungen”, [w:] Cziesielski, E. (Red.), *Lufsky Bauwerkabdichtung*, Teubner, Wiesbaden, 2006, 369-422

18. Borusiewicz, W., 1985. *Konserwacja zabytków budownictwa murowanego*, Arkady, Warszawa, 1985
19. Brachaczek, W., *Analiza wieloczynnikowa parametrów fizycznych w modelowaniu technologicznym tynków renowacyjnych*, Wydawnictwo Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego, Bydgoszcz, 2014
20. BuFas-IM-01/2009 *Injektionsmittel – Horizontalabdichtungen*
21. Ciabach, J., *Właściwości żywic sztucznych stosowanych w konserwacji zabytków*, Wydawnictwo Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Toruń, 2001
22. Czarnecki, L., Broniewski, T., Henning, O., *Chemia w budownictwie*, Arkady, Warszawa, 1996
23. Cziesielski, E., „Beanspruchung der Bauwerke durch Wasser” [w:] Cziesielski, E. (Red.), *Lufsky Bauwerksabdichtung*, Teubner, Wiesbaden, 2006, 11-26
24. de Gennes, P.-G., Brochard-Wyart, F., Quéré, D., *Capillarity and Wetting Phenomena. Drops, Bubbles, Pearls, Waves*, Springer, New York, 2004
25. Dettmering, T., Kollmann, H., *Putze in Bausanierung und Denkmalpflege*, Beuth Verlag GmbH, Berlin · Wien · Zürich, 2011
26. DIN 18130-1:1998, *Baugrund - Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts - Teil 1: Laborversuche*
27. DIN 18195:2000, *Bauwerksabdichtungen – Teil 1 bis Teil 10*
28. DIN 18533-1:2017, *Abdichtung von erdberührten Bauteilen – Teil 1: Anforderungen, Planungs- und Ausführungsgrundsätze*
29. DIN 18533-3:2017, *Abdichtung von erdberührten Bauteilen – Teil 3: Abdichtung mit flüssig zu verarbeitenden Abdichtungstoffen*
30. Domasłowski, W., *Zabytki kamienne i metalowe, ich niszczenie i konserwacja profilaktyczna*, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Toruń, 2011
31. Drochytka, R., Černý, V., Melichar, J., „Examination methods for waterproofing injection screens in various building materials”, *Materiali in Tehnologije*, 51(3)/2017, 529-532
32. Dudás, A., Terjék A., „Efficiency assessment of posterior waterproofing systems of renovated porous limestone masonry work”, *Tehnički Vjesnik*, 22(5)/2015, 1225-1236
33. Duzia, T., Bogusch, N., *Basiswissen Bauphysik. Grundlagen des Wärme- und Feuchteschutzes*, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2020
34. Dylla, A., *Fizyka ciepła budowli w praktyce – obliczenia cieplno-wilgotnościowe*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2015
35. Einstein, A., „Folgerungen aus den Capillaritätserscheinungen”, *Annalen der Physik*, 309(3)/1901, 513-523
36. EMERISDA *Summary report on existing methods against rising damp. D2.1 FINAL version 31-07-2014*
37. Feynman, R.P., Leighton, R.B., Sands, M., *Feynmana wykłady z fizyki, Tom 1, część 2: Optyka · Termodynamika · Fale*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2014
38. Fiertak, M., Dębska, D., Strzyszevska, T., *Chemia dla inżyniera budownictwa*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2011
39. Fotowicz, P., „Obliczanie niepewności rozszerzonej metodą analityczną opartą na splocie rozkładów wielkości wejściowych”, *Pomiary Automatyka Robotyka*, 1/2005, 5-9
40. Francke, B., „Izolacje przeciwwilgociowe murów wykonane metodą iniekcji – wymagania techniczne”, *Materiały Budowlane*, 3/2008, 5-6, 48

41. Francke, B., *Warunki Techniczne Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych. Część C: Zabezpieczenia i izolacje. Zeszyt 5: Izolacje przeciwwilgociowe i wodochronne części podziemnych budynków*, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa, 2019
42. Francke, B., *Nowoczesne hydroizolacje budynków – Zeszyt 1. Zabezpieczenia wodochronne części podziemnych budynków*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2021
43. Franzoni, E., „State-of-the-art on methods for reducing rising damp in masonry”, *Journal of Cultural Heritage*, 31/2018, S3-S9
44. Franzoni, E., Rirsch, E., Paselli, Y., 2020. „Which methods are suitable to assess the effectiveness of chemical injection treatments in the laboratory?”, *Journal of Building Engineering*, 29/2020, 101131
45. Frössel, F., *Osuszanie murów i renowacja piwnic*, Polcen, Warszawa, 2007
46. Frössel, F., *Mauerwerkstroeknenlegung und Kellersanierung. Wenn das Haus nasse FüÙe hat*, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2012
47. Garbalińska, H., Narodowska, K., „Wpływ składu mieszanki i wyjściowego zawilgocenia kruszywa lekkiego na sorpcyjność kapilarną betonu keramzytowego”, *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury - Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture. JCEEA*, z. 64 (4/17/2017), 279-286
48. Gonet, M., *Excel w obliczeniach naukowych i inżynierskich*, Helion, Gliwice, 2011
49. Gumkowska, A., *Laboratorium w szufladzie. Chemia*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2015
50. Gutarowska, B., Piotrowska, M., Koziróg, A., 2019. *Grzyby w budynkach. Zagrozenia, ochrona, usuwanie*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2019
51. Hacquebord, A., Lubelli, B., van Hees, R.P.J., Nijland, T., 2013. *Evaluation of Spreading and Effectiveness of Injection Products against Rising Damp in Mortar/Brick Combinations*, *Procedia Chemistry*, 8/2013, 139-149
52. Hall, C., Hoff, W.D., *Water Transport in Brick, Stone and Concrete*, Taylor & Francis, London and New York, 2002
53. Hauksbee, F., „An account of an experiment touching the direction of a Drop of Oil of Oranges, between two glass planes, towards any side of them that is nearest press'd together”, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 27/1710, 395-396
54. Hauksbee, F., „An account of an experiment touching the ascent of water between two glass planes, in an hyperbolick figure”, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 27/1710, 539-540
55. Henning, O., Knöfel, D., *Baustoffchemie*, Verlag Bauwesen, Berlin, 2002
56. Hoffmann, D., „Praxis- und Laborversuche zur Wirksamkeit von Verfahren zur Abdichtung von Mauerwerk gegen aufsteigende Feuchtigkeit”, [w:] Venzmer, H. (Red.), *Injektionsmittelabdichtung. Vorträge 7. Dahlberg-Kolloquium – 14. und 15. September 2006*, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 67-76
57. Hoła, J., „Degradacja budynków zabytkowych wskutek nadmiernego zawilgocenia – wybrane problemy”, *Budownictwo i Architektura*, 17(1)/2018, 133-148
58. Hoła, J., Matkowski, Z., „Przyczyny i skutki nadmiernego zawilgocenia murów ceglanych na przykładzie obiektów zabytkowych”, *Materiały Budowlane*, 3/2009, 14-17
59. Hoła, J., Matkowski, Z., „Wybrane problemy dotyczące zabezpieczeń przeciwwilgociowych ścian w istniejących obiektach murowanych” *Awarie budowlane, XXIV Konferencja Naukowo-Techniczna, Szczecin-Międzyzdroje*, 2009, 73-92

60. Hołownia-Kędzia, D., *Wykorzystanie metody wzniesienia kapilarnego do pomiarów zwilżalności układów rzeczywistych*, Praca doktorska, Politechnika Gdańska, 2012
61. Hölzen, F.-J., „Zur Wirksamkeit von Injektionsmitteln an Fallbeispielen”, [w:] Venzmer, H. (Red.), *Injektionsmittelabdichtung. Vorträge 7. Dahlberg-Kolloquium – 14. und 15. September 2006*, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2006, 117-131
62. Hölzen, F.-J., „Zur Bedeutung der thermisch-konvektiven Vortrocknung für Injektionsmittelabdichtungen bei hohen Durchfeuchtungsgraden”, [w:] Venzmer, H. (Red.), *Feuchte und Altbausanierung. 20. Hanseatische Sanierungstage vom 5. bis 7. November 2009 im Ostseebad Heringsdorf/Usedom*, Beuth Verlag GmbH, Berlin · Wien · Zürich, 2009, 25-42
63. Hölzen, F.-J., „Injektionsmittelanwendungen gegen aufsteigende Feuchtigkeit – erfolgreiche Praxisbeispiele”, [w:] Venzmer, H. (Red.), *Europäischer Sanierungskalender 2010. Bauwerksdiagnostik und Sanierung*, Beuth Verlag GmbH, Berlin · Wien · Zürich, 2010, 9-23
64. Hölzen, F.-J., „Entwicklung und Anwendung der nachträglichen chemischen Horizontalsperren in 25 Jahren – Grundsätze für die Planung und Ausführung, Ausblick für die Zukunft”, [w:] Venzmer, H. (Red.), *25 Jahre Feuchte und Altbausanierung. 25. Hanseatische Sanierungstage vom 30. Oktober bis 1. November 2014 im Ostseebad Heringsdorf/Usedom*, Beuth Verlag GmbH, Berlin · Wien · Zürich, 2014, 21-32
65. Hölzen, F.-J., *Kein Wärmeschutz ohne Feuchteschutz: Gebäudeabdichtung und Dämmung im erdberührten Bereich*, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2016
66. Homann, M., „Feuchteschutz”, [w:] Willems, W.M. (Red.), *Lehrbuch der Bauphysik*, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2017
67. Hyk, W., Stojek, Z., *Analiza statystyczna w laboratorium badawczym*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2019
68. Jasińko, J., Matkowski, Z., „Zasolenie i zawilgocenie murów ceglanych w obiektach zabytkowych – diagnostyka, metodyka badań, techniki rehabilitacji”, *Wiadomości Konserwatorskie*, 14/2003, 43-48
69. Jasiński, T., *Związki krzemooorganiczne*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe. Warszawa, 1955
70. Jeżowiecka-Kabsch, K., Szewczyk, H., *Mechanika płynów*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2001
71. Joint Committee for Guides in Metrology, *Ewaluacja danych pomiarowych Przewodnik wyrażania niepewności pomiaru*, Sèvres, 2008
72. Jurin, J., „An account of some experiments shown before the Royal Society; with an enquiry into the cause of the ascent and suspension of water in capillary tubes”, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 30/1719, 739-747
73. Jurin, J., „An account of some new experiments, relating to the action of glass tubes upon water and quicksilver”, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 30/1719, 1083-1096
74. Kaliszuk-Wietecha, A., „Nowe ujęcie sposobu osuszania i zabezpieczania przeciwwilgociowego murów w metodzie termoiniekcji”, *Materiały Budowlane*, 3/2015, 24-25
75. Kaliszuk-Wietecha, A., *Budownictwo zrównoważone: wybrane zagadnienia z fizyki budowli*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, Warszawa
76. Kaliszuk-Wietecha, A., „Osuszanie i zabezpieczanie wodochronne zawilgoconych elementów budynków”, *Materiały Budowlane*, 5/2018, 53-56
77. Kaliszuk-Wietecha, A., Olifierowicz, J., „Metody osuszania ścian budynków istniejących”, *Materiały Budowlane*, 7/2005, 32-36

78. Karagiannis, N., Karoglou, M., Bakolas, A., Moropoulou, A., „Effect of Temperature on Water Capillary Rise Coefficient of Building Materials”, *International Symposium of Building Pathology ISBP-2015*, Porto, 2015
79. Karyś, J., „Sposoby osuszania budynków”, [w:] Ważny, J., Karyś, J. (Red.), *Ochrona budynków przed korozją biologiczną*, Arkady, Warszawa, 2001, 256-279
80. Kawałko, A., *Synteza i właściwości fizykochemiczne układu SiO₂-SnO₂ otrzymanego metodą zol-żel w środowisku bezwodnym*, Praca doktorska, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Poznań, 2012
81. Konarski, B., Jabłoński, R., „Zabezpieczanie obiektów budowlanych przed zawilgacaniem a skuteczność osuszania metodami iniekcyjnymi”, *Ochrona Zabytków*, 53/1 (208), 2000, 93-99
82. Koniorczyk, M., Gawin, D., Konca, P., Bednarska, D., „Modeling damage of building materials induced by - sodium sulphate crystallization”, *Bauphysik*, 38(6)/2016, 366-371
83. Körber, P., *Nachweis der Wirksamkeit wasserabweisender Injektionsverfahren für eine nachträgliche Mauerwerksabdichtung, basierend auf experimentellen Untersuchungen an Ziegeln und Mörtel, mit dem Rasterelektronenmikroskop im ESEM-Mode, sowie in der Korrelation zu konventionellen Nachweisverfahren*, Praca doktorska, University of Pécs, Pécs, 2018
84. Królak, E., Pieniążek, Z., *Osuszanie ścian z wilgoci podciąganej kapilarnie*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 1999
85. Ksit, B., Monczyński, B., „Renowacja zawilgoconych obiektów zabytkowych na przykładzie kościoła parafialnego pw. Najświętszej Maryi Panny Wniebowziętej w Zbąszyniu”, [w:] Kamiński, M., Jasiczak, J., Buczkowski, W., Błaszczński, T. (Red.), *Współczesne metody naprawcze w obiektach budowlanych*, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 2009, 267-276
86. Ksit, B., Monczyński, B., „Analiza wpływu środków iniekcyjnych, stosowanych do wykonywania wtórnych hydroizolacji poziomych, na właściwości zaprawy murarskiej”, *Materiały Budowlane*, 11/2016, 78-79
87. Kubik, J., Kucharczyk, A., „Przepływy wilgoci w zasolonej ceramice budowlanej”, *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, z. 59 (3/12/III/2012), 33-38
88. Kubik, J., Wyrwał, J., 2005. „Podstawy fizyki materiałów budowlanych”, [w:] Klemm, P. (Red.), *Budownictwo ogólne. Tom 2. Fizyka budowli*, Arkady, Warszawa, 2005, 9-52
89. Künzle, H., *Bauphysik und Denkmalpflege*, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2009
90. Laplace, P.-S., *Traité de Mécanique Céleste. Tome Quatrième*, Chez Courcier, Paris, 1805
91. Larsen, P.K., „Determination of water content in brick masonry walls using a dielectric probe”, *Journal of Architectural Conservation*, 18(1)/2012, 47-62
92. Lautenschläger, K.-H., Schröter, W., Wanninger, A., *Nowoczesne kompendium chemii*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2007
93. Lesnych, N., Venzmer, H., Koss, L., „Zur Effizienz von Injektionsmittel-Horizontalabdichtungen”, [w:] Venzmer, H. (Red.), *Injektionsmittelabdichtung. Vorträge 7. Dahlberg-Kolloquium – 14. und 15. September 2006*, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2006, 21-37
94. Lubelli, B., van Hees, R.P.J., Hacquebord, A., 2013. „Experimental study of the distribution of chemical products against rising damp in substrates with different water saturation degrees”, *Construction and Building Materials*, 40/2013, 891-898
95. Łukaszewicz, J.W., *Badania i zastosowanie związków krzemooorganicznych w konserwacji zabytków kamiennych*, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Toruń, 2002

96. Magott, C., Rokieli, M., „Sposoby wykonywania izolacji wtórnych i osuszanie budynków”, [w:] Karyś, J. (Red.), *Ochrona przed wilgocią i korozją biologiczną w budownictwie*, Grupa Medium, Warszawa, 2014, 248-293
97. Magott, C., Rokieli, M., „Osuszanie murów”, *Inżynier Budownictwa*, 9/2017, 93-100
98. Mao, L., Kagi, D., 1995. „Method for assessing liquids for the remedial treatment of rising damp”, *Proceedings of the International Colloquium on Methods of evaluating products for the conservation of porous building materials in monuments, Rome 19-21 June 1995*, 359-371
99. Matkowski, Z., Rokieli, M., „Izolacje wodochronne obiektów budowlanych”, [w:] Karyś, J. (Red.), *Ochrona przed wilgocią i korozją biologiczną w budownictwie*, Grupa Medium, Warszawa, 2014, 207-247
100. Method Of Assessment and Testing (MOAT) No. 39:1988 *The assessment of dampproof course systems for existing buildings*
101. Mills, I., Cvitaš, T., Homann, K., Kallay, N., Kozokuchitsu, K., *Quantities, units and symbols in physical chemistry*, Blackwell Science, Oxford, 1993
102. Monczyński, B., „Przeciwwilgociowe wtórne izolacje poziome – możliwości i perspektywy”, [w:] Biliński, T. (Red.), *Renowacja budynków i modernizacja obszarów zabudowanych – Tom 5*, Oficyna Wydawnicza Uniwersytetu Zielonogórskiego, Zielona Góra, 2009, 407-416
103. Monczyński, B., „Wpływ zawilgocenia muru na skuteczność wykonania iniekcyjnej przepony hydroizolacyjnej”, *VI Konferencja Naukowo-Techniczna Renowacja budynków i modernizacja obszarów zabudowanych – Zielona Góra, 24-25 marca 2011 r.*, 157-159
104. Monczyński, B., „Hydroizolacje fundamentów budynków nowo wznoszonych”, *Vademecum Hydroizolacje*, 2015, 6-10
105. Monczyński, B., „Ocena wysychania muru z wilgoci podciąganej kapilarnie metodą nieniszczących pomiarów zespolonych”, [w:] Szymczak-Graczyk, A., Ksiti, B. (Red.), *Budownictwo a środowisko: problemy architektoniczno-techniczne obiektów budowlanych*, Wydawnictwo Zarządu oddziału PZITB w Poznaniu, Poznań, 2017, 189-202
106. Monczyński, B., „Skuteczność środków iniekcyjnych”, *Izolacje*, 2/2017, 81-87
107. Monczyński, B., „Badanie wilgotności mineralnych materiałów budowlanych”, *Izolacje*, 2/2019, 78-84
108. Monczyński, B., „Zasolenie budynków i sposoby jego określania na potrzeby diagnostyki budowlanej”, *Izolacje*, 3/2019, 96-101
109. Monczyński, B., „Diagnostyka zawilgoconych konstrukcji murowych”, *Izolacje*, 1/2019, 89-93
110. Monczyński, B., „Wtórna hydroizolacja przyziemnych części budynków”, *Izolacje*, 4/2019, 120-125
111. Monczyński, B., „Uszczelnienie od zewnątrz odsłoniętych elementów istniejących budynków”, *Izolacje*, 5/2019, 109-115
112. Monczyński, B., „Uszczelnianie istniejących budynków od wewnątrz”, *Izolacje*, 6/2019, 92-98
113. Monczyński, B., „Mechaniczne metody wykonywania wtórnych hydroizolacji poziomych”, *Izolacje*, 9/2019, 104-108
114. Monczyński, B., „Nie tylko hydroizolacja – metody usuwania nadmiaru wilgoci z przegród budowlanych”, *Izolacje*, 11/12/2019, 108-114
115. Monczyński, B., „Wtórne hydroizolacje wykonywane metodą iniekcji uszczelniających”, *Izolacje*, 10/2019, 96-100
116. Monczyński, B., „Wtórne hydroizolacje poziome wykonywane w technologii iniekcji”, *Izolacje*, 7/8/2019, 104-114

117. Monczyński, B., „Nie ma termomodernizacji bez hydroizolacji”, *Izolacje*, 11/12/2020 72-75
118. Monczyński, B., „Przyczyny zawilgacania budynków”, *Izolacje*, 1/2020, 88-93
119. Monczyński, B., „Tynki stosowane na zawilgoconych przegrodach – tynki renowacyjne”, *Izolacje*, 6/2020, 80-88
120. Monczyński, B., „Odtwarzanie hydroizolacji poziomej muru – kryteria doboru środków iniekcyjnych”, *Izolacje*, 3/2020, 85-92
121. Monczyński, B., „Nienormowe metody oceny wyrobów iniekcyjnych”, *Izolacje*, 4/2020, 52-57
122. Monczyński, B., „Uszczelnianie rys oraz złączy metodą iniekcji”, *Izolacje*, 3/2021, 58-64
123. Monczyński, B., „Metody iniekcyjnego uszczelniania rys i złączy”, *Izolacje*, 4/2021, 82–87
124. Monczyński, B., Ksit, B., „Środki iniekcyjne stosowane do wykonywania wtórnych izolacji poziomych w murze”, *Materiały Budowlane*, 3/2017, 12-15
125. Monczyński, B., Ksit, B., Szymczak-Graczyk, A., 2019. „Assessment of The Effectiveness of Secondary Horizontal Insulation Against Rising Damp Performed by Chemical Injection”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 471 (2019) 52063
126. Monczyński, B., Wysocki, G., „Adaptacja obiektów gospodarczych na budynki mieszkalne na przykładzie zabytkowego spichlerza w Chorzemiu”, [w:] Biliński, T. (Red.), *Renowacja budynków i modernizacja obszarów zabudowanych – Tom 6*, Oficyna Wydawnicza Uniwersytetu Zielonogórskiego, Zielona Góra, 2010, 107-116
127. Nawrot, W. „Wytwarzanie poziomej izolacji przeciwwilgociowej w istniejących murach metodą iniekcji krystalicznej”, *Przegląd Budowlany*, 2-3/1987, 107-110
128. Nawrot, W., *Osuszanie budowli: teoria i praktyka*, Agencja Informacyjno-Promocyjna Raport, Kraków, 2009
129. Nowogońska, B., „Consequences of Abandoning Renovation: Case Study — Neglected Industrial Heritage Building”, *Sustainability*, 12/2020, 6441
130. Nowogońska, B., „Diagnostyka w rewitalizacji terenów przemysłowych – przykład budynku pofabrycznego w Zielonej Górze”, *Przegląd Budowlany*, 11-12/2021, 61-64
131. Ö-Norm B 3355:2017 *Trockenlegung von feuchtem Mauerwerk - Bauwerksdiagnostik und Planungsgrundlage*
132. Olifierowicz, J., Szelaż, M., „Zastosowanie metody elektroiniekcji do wykonania izolacji przeciwwilgociowej”, *XIII Warszawska Naukowo-Techniczna Konferencja Remontowa: Ochrona budynków mieszkalnych przed wilgocią i przemarzaniem*, Warszawa-Jadwisin, 1985, 92-107
133. Oswald, R., „Grundlagen der Bauwerksabdichtung”, [w:] Venzmer, H. (Red.), *Feuchte und Altbausaniierung. 20. Hanseatische Sanierungstage vom 5. bis 7. November 2009 im Ostseebad Heringsdorf/Usedom*, Beuth Verlag GmbH, Berlin · Wien · Zürich, 2009, 95-116
134. Pawłowski, K., „Jakość cieplna przegród i złączy budowlanych budynków z uwzględnieniem wymagań obowiązujących od 1 stycznia 2021 r”, *Izolacje*, 11/12/2020, 22–34
135. Pazdro, Z., *Hydrogeologia ogólna*, Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa, 1983
136. Piotrowska, M., „Grzyby pleśniowe w obiektach budowlanych”, [w:] Karyś, J., (Red.), *Ochrona przed wilgocią i korozją biologiczną w budownictwie*, Grupa Medium, Warszawa, 2014, 64-76
137. Płoński, W., 1968. *Problemy wilgoci w przegrodach budowlanych*, Arkady, Warszawa, 1968
138. PN-EN 1015-18:2003, *Metody badań zapraw do murów – Część 18: Określenie współczynnika absorpcji wody spowodowanej podciąganiem kapilarnym stwardniałej zaprawy*
139. PN-EN 15801:2010, *Konserwacja dóbr kultury – Metody badań – Oznaczanie absorpcji kapilarnej*

140. PN-EN 1925:2001, *Metody badań kamienia naturalnego – Oznaczanie współczynnika nasiąkliwości kapilarnej*
141. PN-EN 196-1:2016-07, *Metody badania cementu – Część 1: Oznaczanie wytrzymałości*
142. PN-EN 197-1:2012, *Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku*
143. PN-EN 772-11:2011, *Metody badań elementów murowych – Część 11: Określenie absorpcji wody elementów murowych z betonu kruszywowego, kamienia sztucznego i kamienia naturalnego spowodowanej podciąganiem kapilarnym oraz początkowej absorpcji wody elementów murowych ceramicznych*
144. PN-EN ISO 12570:2002, *Cieplno-wilgotnościowe właściwości materiałów i wyrobów budowlanych - Określanie wilgotności przez suszenie w podwyższonej temperaturze*
145. PN-EN ISO 12571:2013-12, *Cieplno-wilgotnościowe właściwości użytkowe materiałów i wyrobów budowlanych – Określanie właściwości sorpcyjnych*
146. PN-EN ISO 15148:2004, *Cieplno-wilgotnościowe właściwości użytkowe materiałów i wyrobów budowlanych – Określanie współczynnika absorpcji wody przez częściowe zanurzenie*
147. PN-EN ISO 9346:2009, *Cieplno-wilgotnościowe właściwości użytkowe budynków i materiałów budowlanych – Wielkości fizyczne dotyczące przenoszenia masy – Słownik*
148. Pogorzelski, J.A., *Fizyka ciepła budowli*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1976
149. Pogorzelski, J.A., „Zagadnienia cieplno-wilgotnościowe przegród budowlanych”, [w:] Klemm, P. (Red.), *Budownictwo ogólne. Tom 2. Fizyka budowli*, Arkady, Warszawa, 2005
150. Pohlplatz, K., „Epoxyd- und Polyurethanharze zur nachträglichen Verfestigung und Abdichtung von Bestandsmauerwerk”, [w:] Venzmer, H. (Red.), *Injektionsmittelabdichtung. Vorträge 7. Dahlberg-Kolloquium – 14. und 15. September 2006*, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2006, 143-153
151. Rabiej, M., *Analizy statystyczne z programami Statistica i Excel*, Helion, Gliwice, 2018
152. Reinhardt, H.-W. *Ingenieurbaustoffe*, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2010
153. *Richtlinie für die Planung und Ausführung von Abdichtungen mit flexiblen polymermodifizierten Dickbeschichtungen (FPD)*, Deutsche Bauchemie e.V., Frankfurt am Main, 2020
154. *Richtlinie für die Planung und Ausführung von Abdichtungen mit polymermodifizierten Bitumendickbeschichtungen (PMBC)*, Deutsche Bauchemie e.V., Frankfurt am Main, 2020
155. Rokieli, M., *Hydroizolacje w budownictwie. Projektowanie. Wykonawstwo*, Grupa Medium, Warszawa, 2019
156. Rouba, B.J., *Pielęgnacja świątyni i innych zabytków. Książka nie tylko dla księży*, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Toruń, 2014
157. Rouba, B.J., „Zawilgocenie – problem opiekuna kościoła”, *Renowacje i Zabytki*, 1/2021, 122-137
158. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Budownictwa z dnia 17 listopada 2016 r. w sprawie sposobu deklarowania właściwości użytkowych wyrobów budowlanych oraz sposobu znakowania ich znakiem budowlanym (Dz.U. 2016 poz. 1966)
159. Saechtling, H., *Tworzywa sztuczne – poradnik*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2000
160. Sardella, A., De Nuntiis, P., Bonazza, A., „Efficiency evaluation of treatments against rising damp by scale models and test in situ”, *Journal of Cultural Heritage*, S31/2018, S30-S37

161. Sardella, A., De Nuntiis, P., Rizzo, M., Giosuè, C., Tittarelli, F., Bonazza, A., „In situ performance evaluation of chemical injections against rising damp: A case study in Italy”, *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 130/2018, 128-136
162. Siebold, A., Walliser, A., Nardin, M., Oppliger, M., Schultz, J., „Capillary rise for thermodynamic characterization of solid particle surface”, *Journal of Colloid and Interface Science* 186/1997, 60-70
163. Simlinger, C., Balak, M., „Hydrophobierende und/oder porenverschließende Injektionsmitteln zur nachträglichen Horizontalabdichtung von Mauerwerk”, [w:] Venzmer, H. (Red.), *Europäischer Sanierungskalender 2008: Holzschutz, Bautenschutz, Bauwerkserhaltung, Bauwerksinstandsetzung, Restaurierung und Denkmalpflege*, Beuth Verlag GmbH, Berlin · Wien · Zürich, 2008, 41-51
164. Sing, K.S.W., 1985. „Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity (Recommendations 1984)”, *Pure and Applied Chemistry*, 57(4)/1985, 603-619
165. Skibiński, S., „Sole rozpuszczalne w wodzie”, *Renowacje*, 4/2000, 53-59
166. Socoloski, R.F., Masuero, A.B., 2019. „Evaluation of the efficiency of the treatment for rising damp on walls through the insertion of chemical barriers by gravity”, *Construction and Building Materials*, 210/2019, 660-672
167. Spirgatis, R., Engel, J., „Hydrophobierende Imprägnierung von Fassadenoberflächen”, *Schützen & Erhalten*, 3/2010, 11–15
168. Stankiewicz, H., *Zabezpieczenie budowli przed wilgocią, wodą gruntową i korozją*, Arkady, Warszawa, 1959
169. Šťastný, P., Gašparík, J., Makýš, O., 2021. „Analysis of moisture and salinity of historical constructions before and after the application of REMEDIATIONS”, *Journal of Building Engineering*, 41/2021, 102758
170. Stępień, B., *Zasady pisania tekstów naukowych. Prace doktorskie i artykuły*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2021
171. Stöcker, H., *Nowoczesne kompendium fizyki*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2015
172. Strumiłło, C. *Podstawy teorii i techniki suszenia*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1975
173. Szewczyk, J., *Hydroizolacja elementów budowli w wybranych okresach historii architektury czyli o uszczelnieniach z nietypowych materiałów, o dawnych impregnatach, drenażach i pokrewnych rozwiązaniach budowlanych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok, 2019
174. Szlezyngier, W., Brzozowski, Z.K., *Tworzywa sztuczne. Tom 2: Polimery specjalne i inżynieryjne*, Wydawnictwo Oświatowe FOSZE, Rzeszów, 2012
175. Szostak, B., Trochonowicz, M., „Analiza rozkładu soli budowlanych w murach z cegły ceramicznej kamienic śródmiejskich”, *VIII Konferencja Naukowo-Techniczna Renowacja budynków i modernizacja obszarów zabudowanych – Zielona Góra, 19-20 marca 2011 r.*
176. Trochonowicz, M., „Wilgoć w obiektach budowlanych. Problematyka badań wilgotnościowych”, *Budownictwo i Architektura*, 7/2010, 131-144
177. Trochonowicz, M., 2011. *Analiza skuteczności przepon wykonanych metodami iniekcji chemicznej w murach z opoki wapnistej*, Politechnika Lubelska, Lublin 2011

178. Trochonowicz, M., „Analiza skuteczności przepon wykonywanych metodami iniekcji chemicznej w murach z opoki wapnistej. Część I. Badania możliwości wytworzenia przepony w opoce wapnistej i zaprawach”, *Budownictwo i Architektura* 11/2012, 99-112
179. Trochonowicz, M., „Analiza skuteczności przepon wykonywanych metodami iniekcji chemicznej w murach z opoki wapnistej. Część II. Wykonywanie i badanie skuteczności przepon chemicznych w murach z opoki”, *Budownictwo i Architektura*, 12(4)/2013, 151-163
180. van Hees, R.P.J., Koek, J.A.G., „Treatment of rising damp. A laboratory evaluation method”, *Proceedings of the International Colloquium on Methods of evaluating products for the conservation of porous building materials in monuments, Rome 19-21 June 1995*, 403-418
181. van Hees, R.P.J., Lubelli, B., Hacquebord, A., „New test methods to verify the performance of chemical injections to deal with rising damp”, *Journal of Cultural Heritage*, 31S/2018, S52-S59
182. van Hees, R.P.J., Koek, J.A.G., 1996. „Treatment of rising damp. Evaluation of six chemical products”, *Proceedings of the 8th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone: Berlin, 30. Sept. - 4. Oct. 1996*, 1435-1446
183. Van Hellemont, Y., De Clercq, H., Pien, A., „Proposal for a Test Procedure for Injection Products against Rising Damp” [w:] De Clercq, H., Charola, A.E. (Red.), *Hydrophobe V, 5th International Conference on Water Repellent Treatment of Building Materials*, Aedificatio Publishers, Brussels, 2008, 181-190.
184. Venzmer, H., Lesnych, N., Koss, L., Shchukina, L., „Abdichtungsqualität und Funktionsfähigkeit – Zwei Kenngrößen zur praxisnahen Beurteilung von Injektionsmittelabdichtungen insbesondere für Sachverständige”, [w:] Venzmer, H. (Red.), *Bauphysik und Bausanierung. 19. Hanseatische Sanierungstage vom 13. bis 15. November 2008 im Ostseebad Heringsdorf/Usedom*, Beuth Verlag GmbH, Berlin · Wien · Zürich, 2008, 97-110
185. Venzmer, H., Lesnych, N., Koss, L., Shchukina, L., „Dicht oder undicht? Zur bauwerksdiagnostischen Beurteilung von Injektionsmittel-Horizontalabdichtungen durch Sachverständige”, [w:] Venzmer, H. (Red.), *Europäischer Sanierungskalender 2010. Bauwerksdiagnostik und Sanierung*, Beuth Verlag GmbH, Berlin · Wien · Zürich, 2010, 53-63
186. Venzmer, H., Ryschtschenko, M., Lesnych, N., Fedorenko, E., Koss, L., „Zur Prüfung der Effizienz von Injektionsmittel-Horizontalabdichtungen”, [w:] Venzmer, H. (Red.), *Europäischer Sanierungskalender 2008. Holzschutz, Bautenschutz, Bauwerkserhaltung, Bauwerksinstandsetzung, Restaurierung und Denkmalpflege*, Beuth Verlag GmbH, Berlin · Wien · Zürich, 2008, 7-40
187. Venzmer, H., Walter A. „Bautenschutz durch Abdichtung. Modellierung der Injektionsmittelausbreitung in Mauerwerksbaustoffen”, [w:] Venzmer, H. (Red.), *Bautenschutz. Innovative Sanierungslösungen*, Beuth Verlag GmbH, Berlin · Wien · Zürich, 2014, 21-29
188. Vitruvius Pollio, M., *O architektury ksiąg dziesięć*, Pruszyński i S-ka, Warszawa, 1999
189. Walter, A., *Möglichkeiten und Grenzen der Drucklosen Injektionsmittel – Applikation in Mauerwerksbaustoffen*, Praca doktorska, University of Pécs, Pécs, 2018
190. Walter, A., 2019. „Experimental studies on the moisture-dependent spread of injection agents”, *Pollack Periodica*, 14(1)/2019, 117-128
191. Washburn, E.W., 1921. „The dynamics of capillary flow”, *Physical Review*, 17(3)/1921, 273-283
192. Weber, J., „Baudiagnose und Geräte”, [w:] Weber, J. (Red.), *Bauwerksabdichtung in der Altbausanieung: Verfahren und juristische Betrachtungsweise*, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2012, 99-135

193. Weber, J., „Horizontalsperren im Injektionsverfahren”, [w:] Weber, J. (Red.), *Bauwerksabdichtung in der Altbausanierung: Verfahren und juristische Betrachtungsweise*, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2018, 257-304
194. Wiłun, Z., *Zarys geotechniki*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2000
195. Wójcik, R. 1998. „Praktyczne zastosowanie metod iniekcji krystalicznej, iniekcji parafinowej oraz metod mechanicznych do osuszania ścian”, *XLIV Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB*, Poznań-Krynica, 1998, 131-142
196. Wójcik, R. „Ochrona budynków przed wilgocią i wodą gruntową”, [w:] Klemm, P. (Red.), *Budownictwo ogólne. Tom 2. Fizyka budowli*, Arkady, Warszawa, 2005, 913-981
197. Wójcik, R., *Hydrofobizacja i uszczelnianie przegród murowych metodą iniekcji termicznej.*, Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego, Olsztyn, 2006
198. Wójcik, R. „Odtwarzanie izolacji poziomych”, *Builder*, 1/2008, 90-93
199. Wójcik, R., „Odtwarzanie izolacji poziomych w istniejących budynkach metodą parafinowej iniekcji termohermetycznej”, *Materiały Budowlane*, 3/2008, 7-8
200. Wójcik, R., „Kryteria oceny metod odtwarzania poziomych izolacji przeciwwilgociowych w murach”, *Materiały Budowlane*, 3/2011, 2-3,7
201. Wójcik, R., „Nowy preparat organiczno-krzemowy do odtwarzania blokad przeciwwilgociowych w murach”, *Materiały Budowlane*, 3/2014, 32-33
202. Wójcik, R., „Aktualne trendy w ochronie budowli przed wilgocią gruntową – nowe koncepcje”, [w:] Kamiński, K., Kubissa, W. (Red.), *Wybrane zagadnienia rewitalizacji obiektów budowlanych*, Politechnika Warszawska Filia w Płocku, Płock, 2014, 95-105
203. Wójcik, R., „Co inżynier budownictwa powinien wiedzieć o osuszaniu budynków?”, *Inżynier Budownictwa*, 4/2019, 60-66
204. Wójcik, R., Panuś, A., „Ocena skuteczności kremów tiksotropowych stosowanych do odtwarzania strukturalnych blokad przeciwwilgociowych”, *Materiały Budowlane*, 3/2017, 6-8
205. Wójcik, R., Panuś, A., Tunkiewicz, M., Hamdy, M., „Influence of chemical damp proof cream on the capillary action and microstructure of mortars”, *Energy Procedia*. 132/2017, 670-675
206. Wójcik, R., Tunkiewicz, M., „Pory butelkowe – charakterystyka, sposoby wyznaczania na przykładzie zaprawy cementowo-wapiennej”, *Materiały Budowlane*, 10/2017, 57-59
207. Wołoch, F., Gaczek, M., Fiszer, S., „Oddziaływanie soli na elementy budynku”, *Builder*, 12/2017, 70-74
208. WTA Merkblatt 2-9-20/D, *Sanierputzsysteme*, Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., München, 2020
209. WTA Merkblatt 3-13-19/D, *Salzreduzierung an porösen mineralischen Baustoffen mittels Kompressen*, Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., München, 2019
210. WTA Merkblatt 3-17-10/D, *Hydrophobierende Imprägnierung von mineralischen Baustoffen*, Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., München, 2010
211. WTA Merkblatt 4-10-15/D, *Injektionsverfahren mit zertifizierten Injektionsstoffen gegen kapillaren Feuchtetransport*, Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., München, 2015
212. WTA Merkblatt 4-11-16/D, *Messung des Wassergehalts bzw. der Feuchte von mineralischen Baustoffen*, Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., München, 2016

213. WTA Merkblatt 4-4-04/D, *Mauerwerksinjektion gegen kapillare Feuchtigkeit*, Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., München, 2004
214. WTA Merkblatt 4-6-14/D, *Nachträgliches Abdichten erdberührter Bauteile*, Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., München, 2014
215. WTA Merkblatt 4-7-15/D, *Nachträgliche mechanische Horizontalsperre*, Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., München, 2015
216. WTA Merkblatt 5-20-09/D, *Gelinjektion*, Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., München, 2009
217. Wyrwał, J., 1989. *Ruch wilgoci w porowatych materiałach i przegrodach budowlanych*, Dział Wydawnictw Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Opolu, Opole, 1989
218. Young, T., 1805. „An essay on the cohesion of fluids”, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 95/1805, 65-87
219. Zielke, T., „Untersuchungen zur Wirksamkeit von Injektionsmitteln zur nachträglichen Abdichtung von Mauerwerk”, [w:] Venzmer, H. (Red.), *Injektionsmittelabdichtung. Vorträge 7. Dahlberg-Kolloquium – 14. und 15. September 2006*, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2006, 41-55
220. Zyska, B., *Zagrożenia biologiczne w budynku*, Arkady, Warszawa, 1999
221. Назаревич, Б.Л., „Экспериментальное исследование процесса засоленности образцовки рпичной стены и его практическое значение”, [w:] Błaszczuński, T., Siewczyńska, M. (Red.), *Naprawy a trwałość obiektów budowlanych*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2017, 90-95

Spis rysunków

Rys. 0.1 Schemat analityczny postępowania badawczego w pracy	17
Rys. 1.1 Budowa cząsteczki wody.....	19
Rys. 1.2 Dipol elektryczny.....	20
Rys. 1.3 Struktura wody.....	20
Rys. 1.4 Najczęściej występujące źródła zawilgocenia budynku	21
Rys. 1.5 Schematyczne przedstawienie różnych typów porów i kapilar	22
Rys. 1.6 Rozkład wielkości porów w wybranych materiałach budowlanych.....	23
Rys. 1.7 Schematyczne przedstawienie przebiegu sorpcji wilgoci w materiale porowatym	29
Rys. 1.8 Typowy kształt izotermy sorpcji.....	29
Rys. 1.9 Kondensacja (skraplanie) – zjawisko zmiany stanu skupienia, z fazy gazowej w fazę ciekłą... 30	
Rys. 1.10 Zależność temperatury punktu rosy od temperatury i wilgotności względnej powietrza	31
Rys. 1.11 Dyfuzja pary wodnej – kompensacja stężenia pary wodnej poprzez ruch molekularny Brown	31
Rys. 1.12 Konwekcja pary wodnej – kompensacja ciśnienia powietrza przez przepływ powietrza.....	32
Rys. 1.13 Kierunek dyfuzji pary wodnej w przegrodzie budowlanej w zależności od występujących ciśnięć cząstkowych pary wodnej	32
Rys. 1.14 Schematyczne przedstawienie transportu wilgoci w porowatym materiale budowlanym, wraz ze wzrostem zawilgocenia	34
Rys. 1.15 Wzajemne relacje kierunków dyfuzji, transportu cienkiej warstwy cieczy oraz sorpcji/desorpcji wewnątrz porów materiału	35
Rys. 1.16 Średnica porów transportujących wilgoć kapilarną.....	35
Rys. 1.17 Oddziaływanie sił międzycząsteczkowych na powierzchni i w głębi wody.....	36
Rys. 1.18 Napięcie powierzchniowe cieczy	36
Rys. 1.19 Najczęściej obserwowane efekty napięcia powierzchniowego wody	37
Rys. 1.20 Równowaga sił prowadząca do powstania kąta zwilżania γ	37
Rys. 1.21 Zetknięcie kropli wody z powierzchnią ciała stałego	38
Rys. 1.22 Wznoszenie się cieczy w kapilarze o stałym promieniu.....	39
Rys. 1.23 Podciąganie wody ze swobodnej powierzchni cieczy przez pochyłą kapilarę.....	39
Rys. 1.24 Schemat stanowiska badawczego do określania absorpcji kapilarnej materiałów budowlanych; tzw. test nasiąkliwości	43
Rys. 1.25 Typowy przebieg absorpcji wody w funkcji pierwiastka z czasu.....	44
Rys. 2.1 Główne rodzaje wody w gruncie.....	47
Rys. 2.2 Schemat ilustrujący stopniową zmianę wytrzymałości na ściskanie muru wskutek zmiany w czasie jego stanu wilgotnościowego.....	51
Rys. 2.3 Wpływ zawilgocenia na przewodność cieplną wybranych materiałów budowlanych.....	52
Rys. 2.4 Właściwości termoizolacyjne muru ceglanego (wyrażone w % termoizolacyjności muru suchego) w zależności od jego wilgotności objętościowej [%]	53
Rys. 2.5 Transport wilgoci oraz soli w murze	57
Rys. 2.6 Rozkład soli wpływającej na destrukcję cokołowej strefy budynku [108].....	58
Rys. 2.7 Związek pomiędzy morfologią kryształów a wilgotnością podłoża z materiału porowatego..	58
Rys. 2.8 Model niszczącego działania procesu krystalizacji soli (azotanu sodu)	60
Rys. 2.9 Orientacyjna ocena zagrożenia uszkodzeniami spowodowanymi przez szkodliwe sole budowlane.....	62

Rys. 3.1 Rodzaje obciążenia wodą, działające na przyziemne elementy budynku	64
Rys. 3.2 Wilgotność gruntu działająca na płytę fundamentową	65
Rys. 3.3 Wilgotność gruntu i woda bez ciśnienia działająca na ściany stykające się z gruntem i płytę fundamentową	65
Rys. 3.4 Woda bez ciśnienia działająca na ściany stykające się z gruntem i płytę fundamentową.....	65
Rys. 3.5 Umiarkowane oddziaływanie wody pod ciśnieniem (woda spiętrzona)	65
Rys. 3.6 Woda bez ciśnienia na stropach pokrytych gruntem	65
Rys. 3.7 Umiarkowane oddziaływanie wody pod ciśnieniem (woda gruntowa).....	65
Rys. 3.8 Dwa sposoby wykonania wtórnej hydroizolacji przyziemnej części budynku	66
Rys. 3.9 Ogólny schemat wykonania wtórnej hydroizolacji zewnętrznej w przypadku obciążenia wilgocią gruntu lub wodą nie wywierającą ciśnienia	66
Rys. 3.10 Ogólny schemat wykonania wtórnej hydroizolacji od wewnątrz	67
Rys. 3.11 Schematyczne przedstawienie transportu wilgoci w ścianie zewnętrznej – zastosowanie szczelnego tynku w strefie cokołowej powoduje powstanie tzw. komina kapilarnego i zwiększenie wysokości kapilarnego podciągania	68
Rys. 3.12 Schematyczne przedstawienie wysokości zawilgocenia od grubości i sposobu wykończenia muru	69
Rys. 3.13 Poziom podciągania w ścianach budynku przy zawilgoceniu kapilarnym oraz oddziaływaniu wody rozproszonej	69
Rys. 3.14 Dynamika podciągania kapilarnego wilgoci w murze oraz schematyczne przedstawienie trzech czynników determinujących maksymalną wysokość zawilgocenia.....	70
Rys. 3.15 Metody ochrony budowli przed podciąganiem wilgoci z gruntu	71
Rys. 3.16 Zasada działania zjawiska elektroosmozy	72
Rys. 3.17 Technologia wymiany muru.....	73
Rys. 3.18 Metoda wciskania blachy ze stali szlachetnej.....	74
Rys. 3.19 Schemat sposobu podcinania muru piłami sznurowymi	75
Rys. 3.20 Schemat wykonywania bariery przeciwwilgociowej metodą rdzeni wiertniczych.....	76
Rys. 4.1 Metoda Politechniki Krakowskiej.....	79
Rys. 4.2 Schemat instalacji elektroiniekcyjnej (od zewnątrz) w budynku niepodpiwniczonym	80
Rys. 4.3 Schemat instalacji elektroiniekcyjnej w budynkach podpiwniczonych	80
Rys. 4.4 Schemat usytuowania odwiertów w metodzie termoiniekcji	81
Rys. 4.5 Osuszanie muru w strefie iniekcji metoda mikrofalową.....	82
Rys. 4.6 Schemat technologii odtwarzania izolacji strukturalnych metodą iniekcji termohermetycznej	85
Rys. 4.7 Schematyczne przedstawienie zasady działania środków iniekcyjnych wg WTA 4-10-15/D ..	86
Rys. 4.8 Podobieństwo w budowie ketonu metylowego (z lewej) oraz meru polidimetylosiloksanu (z prawej).....	88
Rys. 4.9 Amorficzna budowa żelu krzemionkowego (a) i krystaliczna budowa krzemionki (b).....	90
Rys. 4.10 Powstawanie siloksanu (wiązań Si-O-Si) z silanów	91
Rys. 4.11 Efekt tzw. hydrofobowej szczotki molekularnej	92
Rys. 4.12 Pojedynczy agregat mikroemulsji silikonowej	92
Rys. 4.13 Główne okresy stosowania hydrofobizujących preparatów iniekcyjnych	93
Rys. 4.14 Penetracja środka iniekcyjnego w postaci kremu.....	93
Rys. 4.15 Schemat rozmieszczenia łańcucha nawiertów w przypadku iniekcji grawitacyjnej	98
Rys. 4.16 Metoda rurki infuzyjnej.....	99

Rys. 4.17 Schemat rozmieszczenia łańcucha nawiertów w przypadku iniekcji ciśnieniowej.....	100
Rys. 4.18 Iniekcja wielostopniowa	100
Rys. 4.19 Iniekcja impulsowa	102
Rys. 4.20 Mur doświadczalny wg ITB.....	104
Rys. 4.21 Schemat muru badawczego dla iniekcji grawitacyjnej w metodzie WTA.....	106
Rys. 4.22 Schemat muru badawczego dla iniekcji ciśnieniowej w metodzie WTA	107
Rys. 4.23 Schemat stanowiska badawczego przy pomiarze parowania.....	108
Rys. 4.24 Rozmieszczenie punktów kontrolnych przy nieniszczącym badaniu wilgotności.....	108
Rys. 4.25 Schemat badania skuteczności przepony iniekccyjnej metodą próby wodoszczelności.....	109
Rys. 4.26 Budowa próbki do badań wg wytycznych BuFAS	110
Rys. 4.27 Filary testowe wg wytycznych BBA.....	111
Rys. 4.28 Model wieży z cegły/gliny stosowany do utrzymania stałego dopływu wody do badanych próbek	112
Rys. 5.1 Zawilgacanie muru zewnętrznego piwnic bez izolacji przeciwwilgociowych jako proces podciągania kapilarnego wód od stopy fundamentowej — błędna interpretacja, zrównująca metody ograniczenia podciągania kapilarnego z osuszeniem budynku.....	116
Rys. 5.2 Mechanizm zawilgacania murów piwnicznych bez izolacji przeciwwilgociowych w danym układzie warunków gruntowo-wodnych.....	116
Rys. 5.3 Końcowy (po 41 miesiącach) rozkład zawilgocenia ściany poddanej oraz niepoddanej iniekcji	118
Rys. 5.4 Schemat wykonania iniekcji w ścianach mamucich Starej Opery we Frankfurcie nad Menem	120
Rys. 5.5 Badania skuteczności iniekcji na murach doświadczalnych – szkic sytuacyjny	122
Rys. 5.6 Stanowisko do badania efektów suszarniczych w strefie iniekcji.....	129
Rys. 5.7 Idealistyczna i rzeczywista dystrybucja środka iniekcyjnego w murze	132
Rys. 5.8 Średnia wytrzymałość zaprawy na ściskanie.....	134
Rys. 5.9 Średni procentowy ubytek masy zaprawy po cyklach zamarzania/rozmarzania	134
Rys. 5.10 Średni procentowy ubytek masy zaprawy po badaniu odporności na krystalizację soli	135
Rys. 5.11 Zasada prowadzenia zespolonych badań wilgotności	137
Rys. 6.1 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 01 – z warstwą hydroizolacji mineralnej.....	151
Rys. 6.2 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 02 – z warstwą hydroizolacji mineralnej.....	152
Rys. 6.3 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 03 – z warstwą hydroizolacji mineralnej.....	152
Rys. 6.4 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 04 – nie poddanej iniekcji	153
Rys. 6.5 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 05 – nie poddanej iniekcji	154
Rys. 6.6 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 06 – nie poddanej iniekcji	154
Rys. 6.7 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 11 – poddanej iniekcji ciśnieniowej (S=80%, zasolenie: nie)	155
Rys. 6.8 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 12 – poddanej iniekcji ciśnieniowej (S=80%, zasolenie: nie)	156
Rys. 6.9 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 13 – poddanej iniekcji ciśnieniowej (S=80%, zasolenie: nie)	156
Rys. 6.10 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 14 – poddanej iniekcji ciśnieniowej (S=95%, zasolenie: nie).....	157
Rys. 6.11 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 15 – poddanej iniekcji ciśnieniowej (S=95%, zasolenie: nie).....	158

Rys. 6.12 Wykres absorpcji kapilarnej próbki – poddanej iniekcji ciśnieniowej (S=95%, zasolenie: nie)	158
Rys. 6.13 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 17 – poddanej iniekcji ciśnieniowej (S=95%, zasolenie: tak)	159
Rys. 6.14 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 18 – poddanej iniekcji ciśnieniowej (S=95%, zasolenie: tak)	160
Rys. 6.15 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 19 – poddanej iniekcji ciśnieniowej (S=95%, zasolenie: tak)	160
Rys. 6.16 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 20 – poddanej iniekcji ciśnieniowej (S=95%, zasolenie: tak)	161
Rys. 6.17 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 21 – poddanej iniekcji ciśnieniowej (S=95%, zasolenie: tak)	162
Rys. 6.18 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 22 – poddanej iniekcji ciśnieniowej (S=95%, zasolenie: tak)	162
Rys. 6.19 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 23 – poddanej iniekcji kremem o/w (S= 80%, zasolenie: nie)	163
Rys. 6.20 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 24 – poddanej iniekcji kremem o/w (S= 80%, zasolenie: nie)	164
Rys. 6.21 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 25 – poddanej iniekcji kremem o/w (S= 80%, zasolenie: nie)	164
Rys. 6.22 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 26 – poddanej iniekcji kremem o/w (S= 95%, zasolenie: nie)	165
Rys. 6.23 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 27 – poddanej iniekcji kremem o/w (S= 95%, zasolenie: nie)	166
Rys. 6.24 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 28 – poddanej iniekcji kremem o/w (S= 95%, zasolenie: nie)	166
Rys. 6.25 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 29 – poddanej iniekcji kremem o/w (S=80%, zasolenie: tak)	167
Rys. 6.26 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 30 – poddanej iniekcji kremem o/w (S=80%, zasolenie: tak)	168
Rys. 6.27 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 31 – poddanej iniekcji kremem o/w (S=80%, zasolenie: tak)	168
Rys. 6.28 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 32 – poddanej iniekcji kremem o/w (S=95%, zasolenie: tak)	169
Rys. 6.29 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 33 – poddanej iniekcji kremem o/w (S=95%, zasolenie: tak)	170
Rys. 6.30 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 34 – poddanej iniekcji kremem o/w (S=95%, zasolenie: tak)	170
Rys. 6.31 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 35 – poddanej iniekcji kremem w/o (S=80%, zasolenie: nie)	171
Rys. 6.32 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 36 – poddanej iniekcji kremem w/o (S=80%, zasolenie: nie)	172
Rys. 6.33 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 37 – poddanej iniekcji kremem w/o (S=80%, zasolenie: nie)	172

Rys. 6.34 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 38 – poddanej iniekcji kremem w/o (S=95%, zasolenie: nie).....	173
Rys. 6.35 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 39 – poddanej iniekcji kremem w/o (S=95%, zasolenie: nie).....	174
Rys. 6.36 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 40 – poddanej iniekcji kremem w/o (S=95%, zasolenie: nie).....	174
Rys. 6.37 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 41 – poddanej iniekcji kremem w/o (S=80%, zasolenie: tak).....	175
Rys. 6.38 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 42 – poddanej iniekcji kremem w/o (S=80%, zasolenie: tak).....	175
Rys. 6.39 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 44 – poddanej iniekcji kremem w/o (S=95%, zasolenie: tak).....	177
Rys. 6.40 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 45 – poddanej iniekcji kremem w/o (S=95%, zasolenie: tak).....	177
Rys. 6.41 Wykres absorpcji kapilarnej próbki 46 – poddanej iniekcji kremem w/o (S=95%, zasolenie: tak).....	177

Spis fotografii

Fot. 1.1 Napięcie powierzchniowe wody	21
Fot. 1.2 Woda skroplona w postaci kropel na pajęczynie	30
Fot. 2.1 Szkody spowodowane zawilgoceniem zabytkowego (1685 r.) spichlerza w Stargardzie Szczecińskim	49
Fot. 2.2 Zawilgocenie ścian wewnętrznych nowo wznoszonego budynku, powstałe na skutek nieprawidłowego wykonania hydroizolacji poziomej	50
Fot. 2.3 Uszkodzenia konstrukcji murowej spowodowane destrukcyjnym działaniem mrozu	52
Fot. 2.4 Porażenie mykologiczne zawilgoconej przegrody	54
Fot. 2.5 Wykwity solne na powierzchni muru	59
Fot. 2.6 Odspojenia warstw muru w wyniku krystalizacji soli w głębi muru	60
Fot. 2.7 Wykwity solne na wewnętrznej powierzchni odspojonego fragmentu cegły	60
Fot. 2.8 Plamy wilgoci i wysolenia na murach zamku w Malborku	61
Fot. 3.1 Zawilgocenie ścian zewnętrznych na skutek kapilarnego podciągania wilgoci z gruntu	68
Fot. 3.2 Wciskanie blachy ze stali szlachetnej	74
Fot. 3.3 Podcinanie muru piłą tarczową	75
Fot. 3.4 Membrana hydroizolacyjna umieszczona w nacięciu muru	75
Fot. 4.1 Efekt iniekcji krystalicznej – współcentryczne pierścienie	83
Fot. 4.2 Stan przegrody po dwóch latach od wykonania iniekcji krystalicznej	84
Fot. 4.3 Termopakery	85
Fot. 4.4 Aplikacja kremu iniekcyjnego	94
Fot. 4.5 W handlu dostępne są różnego rodzaju zasobniki wykorzystujące siłę ciężkości, ale również takie, które wykorzystują siły spójności (syfon)	102
Fot. 4.6 W praktyce często wykorzystywane są dozowniki wykonane „metodą chałupniczą”	102
Fot. 4.7 Mury badawcze przygotowane do iniekcji w metodzie ITB	104
Fot. 4.8 Pobieranie zwiercin na potrzeby badania wilgotności muru przed wykonaniem iniekcji	105
Fot. 5.1 Stara Opera (Alte Oper) we Frankfurcie nad Menem wzniesiona w latach 1873-80	120
Fot. 5.2 Przygotowanie (na górze) oraz impregnacja (na dole) próbek	124
Fot. 5.3 Efekt hydrofobizacji widoczny na przekroju cegły oraz zaprawy wapiennej	125
Fot. 5.4 Mury modelowe wykonane w Guntramsdorf (Austria)	126
Fot. 5.5 Wzniesione do badań mury modelowe z opoki wapiennej	129
Fot. 5.6 Próbkę przygotowane do badań	130
Fot. 5.7 Penetracja żywicy silikonowej przy S = 50%.....	131
Fot. 5.8 Penetracja silanu (1:12 z wodą) przy S = 50%	131
Fot. 5.9 Próbkę zaprawy podczas formowania, zawilgacania oraz przeprowadzania iniekcji	132
Fot. 5.10 Próbkę zaprawy po cyklach zamrażania i rozmrażania	134
Fot. 5.11 Próbkę zaprawy po cyklach badania odporności na zasolenie	135
Fot. 5.12 Zawilgacanie kapilarne murów referencyjnych	136
Fot. 5.13 Iniekcja ciśnieniowa w murze referencyjnym	137
Fot. 5.14 Mur badawczy z zaznaczonymi punktami pomiarowymi	137
Fot. 5.15 Próbkę (rdzenie wiertnicze) podczas badania absorpcji kapilarnej	140
Fot. 6.1 próbkę badawczą z wykonaną warstwą hydroizolacji mineralnej	143
Fot. 6.2 Wykonywanie nawiertów – iniekcja niskociśnieniowa	145
Fot. 6.3 Iniekcja niskociśnieniowa	146

Fot. 6.4 Iniekcja w technologii kremów	146
Fot. 6.5 Punkty pomiarowe na powierzchni czołowej próbki do badania absorpcji kapilarnej	147
Fot. 6.6 Badanie absorpcji kapilarnej próbek poddanych iniekcji chemicznej	149
Fot. 6.7 Stanowisko badawcze – ważenie próbek z rejestracją czasu wyjęcia oraz ponownego zanurzenia próbki	149

Spis tabel

Tabela 1.1 Gęstość czystej (pozbawionej powietrza) wody w kg/m^3 w zakresie temperatury 273÷305 K (w odstępach co 0,1 K) pod normalnym ciśnieniem atmosferycznym.....	20
Tabela 1.2 Współczynniki przeliczeniowe wilgotności powietrza	25
Tabela 1.3 Współczynniki przeliczeniowe wilgotności materiału	28
Tabela 1.4 Napięcie powierzchniowe niektórych cieczy w temperaturze 20 °C.....	36
Tabela 1.5 Podział materiałów budowlanych na podstawie współczynnika absorpcji kapilarnej	45
Tabela 1.6 Współczynnik absorpcji kapilarnej wybranych materiałów budowlanych.....	45
Tabela 2.1 Klasyfikacja izolacji na podstawie warunków gruntowo-wodnych wodnych	46
Tabela 2.2 Klasyfikacja wodoprzepuszczalności gruntu na podstawie współczynnika wodoprzepuszczalności <i>k</i>	46
Tabela 2.3 Stopnie zawilgocenia murów w zależności od wartości wilgotności masowej	48
Tabela 2.4 Klasyfikacja zawilgocenia muru na podstawie stopnia przesiąknięcia wilgocią	49
Tabela 2.5 Uszkodzenia substancji budowlanej (współ-)spowodowane przez wodę.....	50
Tabela 2.6 Podział grzybów pleśniowych ze względu na minimalną aktywność wody.....	55
Tabela 2.7 Sukcesja grzybów pleśniowych w budynku	56
Tabela 2.8 Wymagania klimatyczne organizmów w budynku	56
Tabela 2.9 Wartości ciśnienia krystalizacyjnego dla wybranych soli rozpuszczalnych w wodzie	60
Tabela 2.10 Stopnie obciążenia solami na podstawie.....	61
Tabela 2.11 Ocena ryzyka związanego z różnymi stężeniami anionów szkodliwych soli budowlanych	62
Tabela 3.1 Dobór izolacji na podstawie warunków gruntowo-wodnych.....	64
Tabela 3.2 Sposób wykonania hydroizolacji wtórnych w zależności od występującego obciążenia wodą.....	68
Tabela 3.3 Przegląd mechanicznych metod wykonania wtórnej izolacji poziomej	73
Tabela 3.4 Wymagania dotyczące wykonania wtórnych hydroizolacji poziomymi metodami mechanicznymi.....	77
Tabela 4.1 Charakterystyka i ograniczenia środków iniekcyjnych	96
Tabela 4.2 Wybór sposobu wykonywania nawiertów w przypadku iniekcji ciśnieniowej.....	100
Tabela 4.3 Przebieg iniekcji impulsowej (nastawy czasowe)	101
Tabela 4.4 Porównanie iniekcji grawitacyjnej oraz ciśnieniowej [193].....	103
Tabela 4.5 Właściwości cegły do wznoszenia murów doświadczalnych w metodzie WTA 4-10-15 ...	106
Tabela 4.6 Proporcje objętościowe zaprawy do wznoszenia murów doświadczalnych w metodzie WTA	106
Tabela 4.7 Kryteria oceny skuteczności hydrofobizacji na podstawie testu kropli.....	113
Tabela 5.1 Końcowy (po 41 miesiącach) rozkład zawilgocenia ściany poddanej iniekcji.....	118
Tabela 5.2 Końcowy (po 41 miesiącach) rozkład zawilgocenia ściany nie poddanej iniekcji (referencyjnej)	119
Tabela 5.3 Zmiany wilgotności muru poddanego iniekcji oraz muru referencyjnego	119
Tabela 5.4 Wyniki badań wilgotnościowych ścian istniejących.....	121
Tabela 5.5 Badanie skuteczności iniekcji na murach doświadczalnych	123
Tabela 5.6 Zakres spełnianych kryteriów	123
Tabela 5.7 Orientacyjne odległości otworów iniekcyjnych	124
Tabela 5.8 Penetracja środka iniekcyjnego w cegle przy stopniu zawilgocenia 80%.....	125

Tabela 5.9 Penetracja środka iniekcyjnego w zaprawie wapienno-trasowej przy stopniu zawilgocenia 20%	125
Tabela 5.10 Skuteczność iniekcji wykonanej w murach modelowych	126
Tabela 5.11 Zestawienie parametrów warunkujących skuteczność hydrofobizacji mikroemulsją silikonową	128
Tabela 5.12 Stopnie przesiąknięcia wilgocią próbek oraz odpowiadające im wilgotności masowe... ..	131
Tabela 5.13 Stopień rozprzestrzenienia środka iniekcyjnego w cegle pełnej o różnym poziomie zawilgocenia	131
Tabela 5.14 Wyniki badań podciągania kapilarnego oraz nasiąkliwości zaprawy.....	133
Tabela 5.15 Procentowy spadek wilgotności muru poddanego iniekcji krzemianowej.....	138
Tabela 5.16 Procentowy spadek wilgotności muru poddanego iniekcji mikroemulsją silikonową	138
Tabela 5.17 Procentowy spadek wilgotności muru poddanego iniekcji kremem iniekcyjnym.....	139
Tabela 5.18 Procentowy spadek wilgotności muru nie poddanego iniekcji (porównawczego)	139
Tabela 5.19 Wyniki pomiarów absorpcji kapilarnej rdzeniu wiertniczych	141
Tabela 6.1 Kryteria podziału i podział próbek	144
Tabela 6.2 Masa, długości oraz pole powierzchni czołowej próbek (wraz z niepewnościami standardowymi)	147
Tabela 6.3 Obliczenia złożonej niepewności względnej pola powierzchni czołowej próbki 01	149
Tabela 6.4 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 01 – z warstwą hydroizolacji mineralnej.....	150
Tabela 6.5 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 02 – z warstwą hydroizolacji mineralnej.....	151
Tabela 6.6 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 03 – z warstwą hydroizolacji mineralnej.....	151
Tabela 6.7 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 04 – nie poddanej iniekcji	152
Tabela 6.8 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 05 – nie poddanej iniekcji	153
Tabela 6.9 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 06 – nie poddanej iniekcji	153
Tabela 6.10 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 11 – poddanej iniekcji ciśnieniowej (S=80%, zasolenie: nie).....	154
Tabela 6.11 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 12 – poddanej iniekcji ciśnieniowej (S=80%, zasolenie: nie).....	155
Tabela 6.12 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 13 – poddanej iniekcji ciśnieniowej (S=80%, zasolenie: nie).....	155
Tabela 6.13 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 14 – poddanej iniekcji ciśnieniowej (S=95%, zasolenie: nie).....	156
Tabela 6.14 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 15 – poddanej iniekcji ciśnieniowej (S=95%, zasolenie: nie).....	157
Tabela 6.15 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 16 – poddanej iniekcji ciśnieniowej (S=95%, zasolenie: nie).....	157
Tabela 6.16 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 17 – poddanej iniekcji ciśnieniowej (S=95%, zasolenie: tak).....	158
Tabela 6.17 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 18 – poddanej iniekcji ciśnieniowej (S=95%, zasolenie: tak).....	159
Tabela 6.18 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 19 – poddanej iniekcji ciśnieniowej (S=95%, zasolenie: tak).....	159
Tabela 6.19 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 20 – poddanej iniekcji ciśnieniowej (S=95%, zasolenie: tak).....	160

Tabela 6.20 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 21 – poddanej iniekcji ciśnieniowej (S=95%, zasolenie: tak).....	161
Tabela 6.21 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 22 – poddanej iniekcji ciśnieniowej (S=95%, zasolenie: tak).....	161
Tabela 6.22 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 23 – poddanej iniekcji kremem o/w (S= 80%, zasolenie: nie).....	162
Tabela 6.23 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 24 – poddanej iniekcji kremem o/w (S= 80%, zasolenie: nie).....	163
Tabela 6.24 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 25 – poddanej iniekcji kremem o/w (S= 80%, zasolenie: nie).....	163
Tabela 6.25 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 26 – poddanej iniekcji kremem o/w (S= 95%, zasolenie: nie).....	164
Tabela 6.26 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 27 – poddanej iniekcji kremem o/w (S= 95%, zasolenie: nie).....	165
Tabela 6.27 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 28 – poddanej iniekcji kremem o/w (S= 95%, zasolenie: nie).....	165
Tabela 6.28 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 29 – poddanej iniekcji kremem o/w (S=80%, zasolenie: tak).....	166
Tabela 6.29 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 30 – poddanej iniekcji kremem o/w (S=80%, zasolenie: tak).....	167
Tabela 6.30 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 31 – poddanej iniekcji kremem o/w (S=80%, zasolenie: tak).....	167
Tabela 6.31 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 32 – poddanej iniekcji kremem o/w (S=95%, zasolenie: tak).....	168
Tabela 6.32 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 33 – poddanej iniekcji kremem o/w (S=95%, zasolenie: tak).....	169
Tabela 6.33 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 34 – poddanej iniekcji kremem o/w (S=95%, zasolenie: tak).....	169
Tabela 6.34 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 35 – poddanej iniekcji kremem w/o (S=80%, zasolenie: nie).....	170
Tabela 6.35 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 36 – poddanej iniekcji kremem w/o (S=80%, zasolenie: nie).....	171
Tabela 6.36 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 37 – poddanej iniekcji kremem w/o (S=80%, zasolenie: nie).....	171
Tabela 6.37 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 38 – poddanej iniekcji kremem w/o (S=95%, zasolenie: nie).....	172
Tabela 6.38 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 39 – poddanej iniekcji kremem w/o (S=95%, zasolenie: nie).....	173
Tabela 6.39 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 40 – poddanej iniekcji kremem w/o (S=95%, zasolenie: nie).....	173
Tabela 6.40 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 41 – poddanej iniekcji kremem w/o (S=80%, zasolenie: tak).....	174
Tabela 6.41 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 42 – poddanej iniekcji kremem w/o (S=80%, zasolenie: tak).....	175

Tabela 6.42 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 44 – poddanej iniekcji kremem w/o (S=95%, zasolenie: tak).....	176
Tabela 6.43 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 45 – poddanej iniekcji kremem w/o (S=95%, zasolenie: tak).....	176
Tabela 6.44 Wyniki badania absorpcji kapilarnej próbki 46 – poddanej iniekcji kremem w/o (S=95%, zasolenie: tak).....	176
Tabela 7.1 Wartości punktów charakterystycznych wykresów absorpcji kapilarnej próbek poddanych badaniom.....	179
Tabela 7.2 Średnia wartość współczynnika dynamiki absorpcji kapilarnej próbek nie poddanych iniekcji oraz zawierających powłokową izolację mineralną	180
Tabela 7.3 Współczynniki dynamiki absorpcji kapilarnej oraz współczynniki redukcji absorpcji próbek poddanych iniekcji ciśnieniowej.....	181
Tabela 7.4 Współczynniki dynamiki absorpcji kapilarnej oraz współczynniki redukcji absorpcji próbek poddanych iniekcji kremem o/w	182
Tabela 7.5 Współczynniki dynamiki absorpcji kapilarnej oraz współczynniki redukcji absorpcji próbek poddanych iniekcji kremem w/o	183

Spis równań

Równanie 1 Porowatość efektywna	23
Równanie 2 Wilgotność bezwzględna objętościowa	24
Równanie 3 Wilgotność bezwzględna masowa.....	24
Równanie 4 Równanie stanu gazu doskonałego	25
Równanie 5 Ciśnienie cząstkowe pary wodnej.....	25
Równanie 6 Wilgotność względna powietrza.....	25
Równanie 7 Gęstość wilgoci	26
Równanie 8 Wilgotność objętościowa	26
Równanie 9 Wilgotność masowa	26
Równanie 10 Wilgotność równowagowa	26
Równanie 11 Nasiąkliwość wagowa.....	27
Równanie 12 Stopień nasycenia.....	27
Równanie 13 Stopień nasycenia higroskopijnego	27
Równanie 14 Gęstość objętościowa pary.....	27
Równanie 15 Związek wilgotności objętościowej z zawartością pary wodnej.....	28
Równanie 16 Równanie Kelvina	30
Równanie 17 Opór dyfuzyjny	33
Równanie 18 Współczynnik oporu dyfuzyjnego	33
Równanie 19 Równowagowy współczynnik oporu dyfuzyjnego.....	33
Równanie 20 Prawo Ficka.....	33
Równanie 21 Napięcie powierzchniowe	36
Równanie 22 Kąt zwilżania	38
Równanie 23 Równanie Younga i Laplace'a	38
Równanie 24 Składowa siła ciężkości	39
Równanie 25 Prawo Hagena-Poiseuille'a	39
Równanie 26 Siła bezwładności.....	40
Równanie 27 Prędkość podciągania kapilarnego.....	40
Równanie 28 Równanie Washburna	40
Równanie 29 Czas przepływu cieczy według ruchu kapilarnego	41
Równanie 30 Prawo Jurina	41
Równanie 31 Współczynnik sorpcji wody	42
Równanie 32 Wartość współczynnika absorpcji wody.....	43
Równanie 33 Przyrost masy na jednostkę powierzchni zanurzonej wodzie	43
Równanie 34 Wartość współczynnika absorpcji wody (typ A) wg PN-EN 15148	44
Równanie 35 Współczynnik absorpcji wody po 24 h od zanurzenia.....	45
Równanie 36 Współczynnik aktywności wody	54
Równanie 37 Ciśnienie krystalizacji soli	59
Równanie 38 Skuteczność hydroizolacji poziomej wykonanej metodą mechaniczną	78
Równanie 39 Współczynnik redukcji absorpcji wody	110
Równanie 40 Referencyjny współczynnik absorpcji kapilarnej muru	113
Równanie 41 Współczynnik absorpcji kapilarnej muru w strefie iniekcji	113
Równanie 42 Współczynnik redukcji absorpcji wody muru w strefie iniekcji.....	114

Równanie 43 Maksymalny (docelowy) współczynnik redukcji absorpcji wody muru w strefie iniekcji	114
Równanie 44 Jakość uszczelnienia muru w strefie iniekcji.....	114
Równanie 45 Współczynnik redukcji zawilgocenia muru.....	115
Równanie 46 Maksymalny (docelowy) współczynnik redukcji zawilgocenia muru	115
Równanie 47 Postęp wysychania muru poddanego iniekcji	115
Równanie 48 Ocena niepewności typu A	148
Równanie 49 Niepewność złożona funkcji wielu zmiennych	148
Równanie 50 Złożona niepewność względna.....	148
Równanie 51 Współczynnik wrażliwości	148
Równanie 52 Współczynnik dynamiki absorpcji kapilarnej.....	178
Równanie 53 Stopień redukcji dynamiki absorpcji kapilarnej.....	179
Równanie 54 Niepewność rozszerzona pomiaru	180