

Analiza skuteczności przepon  
wykonanych metodami iniekcji  
chemicznej w murach z opoki wapnistej

# Monografie – Politechnika Lubelska



Politechnika Lubelska  
Wydział Budownictwa i Architektury  
ul. Nadbystrzycka 40  
20-618 Lublin

Maciej Trochonowicz

# Analiza skuteczności przepon wykonanych metodami iniekcji chemicznej w murach z opoki wapnistej



Politechnika Lubelska  
Lublin 2011

**Recenzenci:**

dr hab. Jadwiga W. Łukaszewicz, prof. Uniwersytetu Mikołaja Kopernika  
dr hab. inż. Anna Halicka, prof. Politechniki Lubelskiej

**Promotor:**

dr hab. inż. Bogusław Szmygin, prof. Politechniki Lubelskiej

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2011

ISBN: 978-83-62596-40-9

**Wydawca:** Politechnika Lubelska

ul. Nadbystrzycka 38D, 20-618 Lublin

**Realizacja:** Biblioteka Politechniki Lubelskiej

Ośrodek ds. Wydawnictw i Biblioteki Cyfrowej

ul. Nadbystrzycka 36A, 20-618 Lublin

tel. (81) 538-46-59, email: wydawca@pollub.pl

[www.biblioteka.pollub.pl](http://www.biblioteka.pollub.pl)

**Druk:**

ESUS Agencja Reklamowo-Wydawnicza Tomasz Przybylak

[www.esus.pl](http://www.esus.pl)

---

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL [www.bc.pollub.pl](http://www.bc.pollub.pl)

Nakład: 100 egz.

# SPIS TREŚCI

<b>1. GENEZA PRACY .....</b>	<b>9</b>
1.1. CELE PRACY .....	10
1.2. TEZY .....	10
<b>2. ANALIZA LITERATUROWA.....</b>	<b>11</b>
<b>3. WILGOTNOŚĆ – INFORMACJE PODSTAWOWE.....</b>	<b>13</b>
3.1. ZAWILGOCENIE MATERIAŁÓW I PRZEGRÓD BUDOWLANYCH .....	13
3.1.1. Formy występowania wilgoci w materiałach budowlanych.....	14
3.1.2. Mechanizmy i modele ruchu wilgoci w materiałach budowlanych.....	18
3.1.3. Parametry charakteryzujące strukturę materiałów budowlanych .....	24
3.2. BADANIA BEZPOŚREDNIE WILGOTNOŚCI MATERIAŁÓW BUDOWLANYCH.....	28
3.2.1. Metoda laboratoryjna – grawimetryczna .....	29
3.2.2. Wytyczne do pobierania materiału .....	30
3.2.3. Badania własne – Wpływ techniki poboru próbek na wynik badania wilgotności.....	31
3.3. METODY POŚREDNIE BADANIA WILGOTNOŚCI.....	34
3.3.1. Metody elektryczne .....	35
3.3.2. Metoda chemiczna.....	37
3.3.3. Charakterystyka pośrednich metod pomiarowych.....	38
3.3.4. Badania własne – Kalibracja urządzeń pomiarowych .....	40
3.4. ŹRÓDŁA ZAWILGOCENIA OBIEKTÓW BUDOWLANYCH .....	42
3.5. NEGATYWNE SKUTKI ZAWILGOCENIA BUDYNKU .....	48
<b>4. INIEKCJE .....</b>	<b>55</b>
4.1. INIEKCJE CHEMICZNE – INFORMACJE PODSTAWOWE.....	55
4.1.1. Historia stosowania iniekcji.....	56
4.1.2. Podział metod ze względu na działanie preparatu .....	58
4.1.3. Podział metod pod względem wartości ciśnienia. ....	59
4.2. PREPARATY HYDROFOBOWE .....	62
4.2.1. Związki krzemooorganiczne – Informacje ogólne i podział.....	62
4.2.2. Typy preparatów stosowanych do iniekcji hydrofobizujących.....	66
4.3. TECHNOLOGIE WYKONYWANIA IZOLACJI METODAMI INIEKCJI .....	70
4.3.1. Analiza metod iniekcyjnych ze względu na stosowane ciśnienie. ....	73
4.3.2. Analiza metod ze względu na średnicę i rozstaw otworów. ....	73
<b>5. OPOKA .....</b>	<b>75</b>
5.1. ZŁOŻA OPOKI W POLSCE.....	75
5.2. OPOKA JAKO MATERIAŁ BUDOWLANY .....	79
5.2.1. Zalety opoki.....	79
5.2.2. Wady opoki .....	80
5.3. BUDOWNICTWO Z OPOKI NA TERENIE LUBELSZCZYZNY .....	81
5.3.1. Elementy murowe z opoki.....	81
5.3.2. Budownictwo z opoki.....	82

<b>6. METODYKA BADAŃ.....</b>	<b>85</b>
<b>7. PROGRAM BADAŃ WŁASNYCH.....</b>	<b>91</b>
<b>8. BADANIA WŁAŚCIWOŚCI MATERIAŁÓW PRZED HYDROFOBIZACJĄ.....</b>	<b>93</b>
8.1. CHARAKTERYSTYKA CECH FIZYKO – MECHANICZNYCH OPOKI .....	93
8.2. BADANIA STRUKTURY OPOKI .....	95
8.2.1. Mikroskopia optyczna .....	95
8.2.2. Analiza składu mineralnego opoki metodą XRD (Rentgenowska analiza fazowa) oraz metodą termiczną DTA/TG .....	96
8.2.3. SEM -Skaningowa Mikroskopia Elektronowa .....	97
8.3. CHARAKTERYSTYKA CECH FIZYKO - MECHANICZNYCH ZAPRAW .....	98
8.3.1. Przygotowanie próbek do badań.....	98
8.3.2. Oznaczanie cech fizyko - mechanicznych stwardniałych zapraw. ....	99
<b>9. HYDROFOBIZACJA MATERIAŁÓW.....</b>	<b>101</b>
9.1. DOBÓR PREPARATÓW HYDROFOBIZUJĄCYCH.....	101
9.2. PRZYGOTOWANIE PRÓBEK DO INIEKCJI HYDROFOBIZU- JĄCEJ .....	103
9.3. PROCES HYDROFOBIZACJI MATERIAŁÓW .....	104
9.3.1. Opoka .....	104
9.3.2. Zaprawy.....	105
9.4. WSTĘPNE BADANIA SKUTECZNOŚCI HYDROFOBIZACJI MATERIAŁÓW .....	106
9.4.1. Opoka .....	106
9.4.2. Zaprawy.....	109
9.5. CHARAKTERYSTYKA CECH FIZYKO – MECHANICZNYCH OPOKI PO HYDROFOBIZACJI .....	112
9.5.1. Przygotowanie próbek .....	112
9.5.2. Oznaczanie wytrzymałości na ściskanie.....	113
9.5.3. Oznaczenie nasiąkliwość wodą .....	114
9.5.4. Oznaczenie kapilarnego podciągania.....	116
9.5.5. Odporność na zamarzanie.....	119
9.5.6. Odporność na krystalizację soli.....	122
9.5.7. Badanie zasolenia .....	128
9.6. BADANIA STRUKTURY OPOKI PO HYDROFOBIZACJI .....	128
9.6.1. Metoda sorpcji par azotu – badanie tekstury .....	128
9.6.2. SEM (Skaningowa Mikroskopia Elektronowa) – zmiana struktury po hydrofobizacji.....	130
9.6.3. Wnioski dotyczące badań opoki po hydrofobizacji.....	131
9.7. CHARAKTERYSTYKA CECH FIZYKO – MECHANICZNYCH ZAPRAW PO HYDROFOBIZACJI.....	131
9.7.1. Przygotowanie próbek .....	131
9.7.2. Oznaczanie nasiąkliwości.....	132
9.7.3. Oznaczanie kapilarnego podciągania.....	133

9.7.4.	Oznaczanie kapilarnego podciągania przez pomiar wilgotności masowej .....	134
9.7.5.	Wnioski dotyczące badań w zaprawach .....	136
<b>10.</b>	<b>HYDROFOBIZACJA MURÓW .....</b>	<b>137</b>
10.1.	BADANIA MOŻLIWOŚCI WYKONANIA INIEKCJI W BŁOKACH WIELKOWYMIAROWYCH Z OPOKI .....	137
10.2.	WYKONANIE MURÓW Z OPOKI.....	138
10.3.	BADANIE SZYBKOŚCI PODCIĄGANIA KAPILARNEGO NA MURACH Z OPOKI .....	140
10.4.	INIEKCJA MURÓW .....	142
10.5.	BADANIE SKUTECZNOŚCI PRZEPONY CHEMICZNEJ W MURZE Z OPOKI.....	144
10.6.	WNIOSKI DOTYCZĄCE BADAŃ NA MURACH Z OPOKI WAPNISTEJ.....	146
<b>11.</b>	<b>WNIOSKI KOŃCOWE.....</b>	<b>147</b>
<b>12.</b>	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>149</b>
	<b>STRESZCZENIE .....</b>	<b>165</b>





# 1. GENEZA PRACY

Na terenie makroregionu lubelskiego obiekty zabytkowe i tradycyjne z wykorzystaniem opoki stanowią dość znaczny procent. Rozwój budownictwa z tego materiału powodowany był dostępnością materiału, łatwością w jego pozyskaniu i obróbce oraz dość wysoką estetyką kamienia. Duże znaczenie miała również stosunkowo wysoka izolacyjność cieplna murów z opoki.

Na przestrzeni wieków rozwinęło się wiele ośrodków, gdzie znaczna część zabudowy powstała z tego materiału. Oczywiście najbardziej znanymi są Kazimierz nad Wisłą i Janowiec, należy jednak pamiętać, że z opoki budowano również w miejscowościach na wschód i południe od Lublina ( Piaski, Trawniki, Biskupice, Gardzienice itp.). Obiekty wzniesione całkowicie lub częściowo z tego kamienia spotkać można również w Lublinie. Z surowca o podobnej budowie powstawały również obiekty na terenie Zamojszczyzny.

Pomimo szeregu istotnych zalet, opoki mają niestety również wady. Największą z nich jest podatność na destrukcyjne działanie wody. Wpływ ten jest związany ze specyficznym charakterem materiału. Przy bardzo wysokiej porowatości materiał wykazuje stosunkowo dużą nasiąkliwość i wysoką kapilarność. Dodatkowo przy wysokim zawilgoceniu drastycznie obniża się wytrzymałość kamienia na ściskanie (do 50 %).

Wszystko to powoduje konieczność właściwego zabezpieczania obiektów z opoki przed działaniem wód gruntowych i opadowych. Wykonywanie izolacji w obiektach istniejących jest zagadnieniem trudnym technologicznie i kosztownym. O ile technologia wykonywania izolacji pionowych w istotny sposób nie różni się od technologii stosowanych w obiektach nowo wznoszonych, to dość dużym problemem jest izolacja pozioma.

Ze względu na: niejednorodność, niską wytrzymałość i dużą szerokość murów, stosowanie sprawdzonych i skutecznych metod mechanicznych w większości przypadków jest niemożliwe. Alternatywą staje się, więc wykorzystanie przepon chemicznych wykonywanych metodą iniekcji.

Stan wiedzy na temat możliwości stosowania iniekcji chemicznych w opoce jest niezadowolający. Wynika to przede wszystkim z lokalności jego stosowania. Firmy oferujące preparaty do wykonywania tego typu izolacji, skupiają się raczej na murach wykonanych z materiałów szeroko stosowanych w budownictwie. Oferowane środki nie zostały przebadane pod kątem możliwości ich zastosowania w tak nietypowym i jak się okazuje, "trudnym" materiale.

W związku z tym, niezwykle istotnym jest przeprowadzenie badań, które pozwolą na odpowiedź, czy jest możliwe wykonanie przepon w murach z opoki, oraz jak powinna zostać dobrana technologia ich wykonania.

### **1.1. CELE PRACY**

1. Dobór środków iniekcyjnych skutecznych w opoce i zaprawie.
2. Określenie parametrów wilgotnościowych muru warunkujących możliwość wykonania przepony.
3. Ustalenie parametrów technologicznych iniekcji (ciśnienie, rozstaw otworów).

### **1.2. TEZY**

1. Promień penetracji iniektu w opoce zależy od rodzaju preparatu oraz jej wilgotności i porowatości.
2. Skuteczność hydrofobizacji zapraw zależy od ich porowatości i wilgotności oraz ciśnienia i ilości preparatu.
3. Istnieje możliwość ustalenia optymalnych parametrów technologicznych gwarantujących skuteczność iniekcji w murach z opoki na zaprawie wapiennej.

## 2. ANALIZA LITERATUROWA

Przyjęta tematyka pracy wymusiła konieczność wykonania stosunkowo szerokiej analizy literaturowej. W sumie na przestrzeni kilku lat, autor zapoznał się z ponad 300 pozycjami. Znaczna część z nich okazała się na tyle istotna, że pozwoliła na wyraźne poszerzenie wiedzy przed rozpoczęciem badań i uniknięcie szeregu błędów podczas ich prowadzenia.

Z racji ilości i szerokości zagadnień poruszanych w pracy, zdecydowano o podziale części literaturowej na trzy duże rozdziały. Kolejno były to zagadnienia wilgotnościowe, technologie i materiały stosowane przy iniekcji oraz opoka występująca na terenie Lubelszczyzny.

Ze zdecydowanie największą ilością materiałów źródłowych, udało się autorowi zapoznać podczas kwerendy literaturowej poświęconej zagadnieniom wilgotnościowym. Tematyką tą od wielu lat zajmuje się znaczna część ośrodków naukowych w kraju i zagranicą. W opracowaniu rozdziału szczególnie pomocnymi były prace: J. Adamowskiego [3][4], F. Frossel [37], J. Hoły [45][47], J. Jasieńki [50][53], P. Klemm[18][60], E. Królaka[67], W. Płońskiego [113], J.A. Pogorzelskiego [115], M. Rokiela [122], S. Skibińskiego [129][130], J. Wyrwał [157][158].

Przyjęto podział rozdziału „Wilgotność- Informacje podstawowe” na szereg podrozdziałów. Omówiono w nich kolejno tematykę: zawilgocenia materiałów i przegród budowlanych, mechanizmów i modeli ruchu wilgoci, metodykę badań bezpośrednich i pośrednich wilgotności oraz źródła i negatywne skutki zawilgocenia obiektów budowlanych. Część rozdziału dotyczącego badań pośrednich uzupełniono o wyniki badań własnych autora.

Drugi z rozdziałów literaturowych, a czwarty w pracy, poświęcono tematyce iniekcji. W kolejnych podrozdziałach opisano: podziały metod, charakterystyki preparatów, technologii oraz urządzeń stosowanych przy wykonywaniu przepon. Z zebranych i analizowanych materiałów największą ilość stanowią poświęcone technologiom wykonywania iniekcji. Niestety, jakość większości nie jest najlepsza, ponieważ w większości dostępne materiały mają charakter reklamowy lub kryptoreklamowy. Autor spotykał się również wielokrotnie z drukowaniem tych samych materiałów pod zmienionymi tytułami. Kolejnym problemem jest „wiekowość” najlepszych opracowań. Publikowane wyniki rzetelnych badań, skuteczności działania przepon wykonywanych metodami iniekcji pochodzą z przed 20 i więcej lat. Jest to szczególnie istotne w związku z faktem, że ponad 90% metod i preparatów wyszła z użycia. Pomimo tych krytycznych uwag, na temat dostępnej literatury, kilkanaście pozycji okazało się niezwykle wartościowymi. W pracy wykorzystano opracowania: J. Adamowskiego [5][2], D. Czernego [24], T. Domina [31], F. Frossel [37], Z. Pieniążka [31], J. Hoły [46][47], J. Jasieńki [51][52], Z. Matkowskiego [2], K. Kramarza [64][65][66], E. Królaka

[67], W. Nawrota [86][87] [88], J. Olifierowicza [97][98][99][100], M. Rokiela [123], R. Wójcika [146][147][148].

Wyraźnie lepiej wygląda sytuacja związana z jakością artykułów i publikacji traktujących o związkach chemicznych stosowanych do wykonywania iniekcji. W większości przypadków są to materiały o wysokim poziomie merytorycznym i opracowane kompleksowo. Zastrzeżeń nie budzi również czas ich powstania. Podrozdział oparto na publikacjach: J. Łukaszewicz [75][76][77][78], W. Domaśłowskiego [27][28][29], J. Ciabacha [21], L. Czarneckiego [22], T. Jasińskiego [54] i R. Krzywobłockiej – Laurów [69][70]. Dane techniczne preparatów stosowanych w iniekcjach pochodziły z materiałów firmowych.

Ze zdecydowanie najmniejszą ilością pozycji literaturowych mamy do czynienia w przypadku trzeciego rozdziału literaturowego, a piątego pracy, poświęconego opoce. Ilość i jakość materiałów źródłowych, dotyczących tematyki skał i ich wykorzystania, nie budzi zastrzeżeń. Problemem jest natomiast niewielka ilość i „wiekowość” opracowań dotyczących samej opoki (kilka pozycji). Związane to jest z regionalnym charakterem skały, oraz jego raczej historycznym znaczeniem w budownictwie. W opracowaniu rozdziału wykorzystano m.in. materiały: A. Bolewskiego [14][15], W. Parachoniaka [15], W. Skalmowskiego, M. Kamińskiego [55], S. Kozłowskiego [63], Z. Krzowskiego [68][118], U. Wójtowicz [68], K. Pożaryskiej i W. Pożarskiego [116], E. Osieckiej [103], S. Oterman [105], Z. Brogowskiego [16]. W rozdziale tym zamieszczono najwięcej materiałów własnych autora. Powstały one na podstawie badań *in situ* prowadzonych w złożach i na obiektach wzniesionych z opoki.

### **3. WILGOTNOŚĆ – INFORMACJE PODSTAWOWE**

#### **3.1. ZAWILGOCENIE MATERIAŁÓW I PRZEGRÓD BUDOWLANYCH**

Woda jest substancją warunkującą możliwość wykonania praktycznie wszystkich procesów budowlanych. Niezbędna jest zarówno do produkcji materiałów oraz ich wbudowania. Jednocześnie ta sama woda, a raczej jej nadmiar, jest czynnikiem powodującym największe zagrożenie dla obiektów budowlanych. Wprowadzana na wiele sposobów z czasem staje się przyczyną wielu niekorzystnych zjawisk, a jej usunięcie poważnym problemem. Występuje w różnych stanach skupienia (stały, ciekły, gazowy) w postaci opadów deszczu, śniegu, mgły, wody gruntowej itp., a obiekty takie jak baseny, kanały, zapory są przez cały czas swojej eksploatacji narażone na jej szkodliwy wpływ. Zatem główne zagrożenie dla budynków stanowi woda (pod różnymi postaciami) oraz rozpuszczalne sole. Stąd też stan wilgotnościowy przegród budowlanych ma istotne znaczenie [18][37].

Przez stan wilgotnościowy przegród budowlanych rozumie się aktualny rozkład przestrzenny wilgoci w przegrodzie i tendencje przewidywanych zmian, tj. następujące wysychanie materiałów z wilgoci technologicznej i budowlanej, czy też okresowe lub postępujące zawilgocenie, a więc całokształt przebiegu procesów związanych z zawilgoceniem i wysychaniem materiałów w przegrodach budowlanych w wyniku [18][114][160]:

- początkowej wilgotności materiałów związanej z ich wytwarzaniem,
- przyrostu wilgotności spowodowanego takimi etapami wykonawstwa jak: transport, składowanie, stosowanie zaprawy lub betonu do łączenia komponentów,
- wysychania przegród do otaczającego powietrza,
- zawilgocenia w wyniku opadów atmosferycznych,
- przyrostu wilgotności w przegrodach w wyniku oddziaływania czynników eksploatacyjnych,
- przyrostu wilgotności w wyniku podciągania kapilarnego wilgoci z gruntu.

### 3.1.1. Formy występowania wilgoci w materiałach budowlanych

Wilgoć nie jest pojęciem jednoznacznym; pod tym pojęciem rozumie się parę wodną, wilgoć tzw. sorpcyjną lub błonkową i wodę w stanie ciekłym. Przyjmuje się klasyfikację, zgodnie, z którą wilgoć w materiałach budowlanych może występować, jako woda związana [18][115][159]:

- chemicznie,
- fizykochemicznie,
- fizykomechanicznie.

Woda związana chemicznie (inaczej woda konstytutywna) znajduje się w strukturze niektórych materiałów w ścisłych stosunkach ilościowych. Jest ona silnie połączona ze związkami chemicznymi wchodzącymi w skład tych materiałów i oddzielić ją można tylko przez prażenie w odpowiednio wysokiej temperaturze.

Woda związana fizykochemicznie (inaczej wilgoć sorpcyjna) w materiałach budowlanych występuje na rozwiniętej powierzchni porów i kapilar materiału. Zjawisko to związane jest z istnieniem tzw. sił *van der Waalsa* (sił bliskiego zasięgu) oddziałujących na cząstki gazu w pobliżu powierzchni ciała stałego.

Ciała kapilarno-porowate charakteryzują między innymi następujące wielkości, określane za pomocą specjalnych badań strukturalnych:

- całkowita objętość porów,
- struktura porowatości, to jest rozkład objętości porów w zależności od ich średnicy,
- powierzchnia właściwa, to jest całkowita, rozwinięta powierzchnia porów i kapilar na centymetr sześcienny materiału.

W rzeczywistości kształt porów może być różny, jednak dla uproszczenia można przyjąć ich kształt, jako kulisty. W zależności od umownej średnicy porów zakłada się ich podział na [18][114][160]:

- mikropory –  $\Phi < 20 \text{ \AA}$  (2 nm),
- mezopory –  $20 \text{ \AA} < \Phi < 500\text{-}1000 \text{ \AA}$  (2 nm <  $\Phi$  < 50-100 nm),
- makropory –  $\Phi > 500\text{-}1000 \text{ \AA}$  (50-100 nm).

Sorpcja wilgoci, tj. proces pochłaniania pary wodnej z powietrza otaczającego przez wysuszony materiał o właściwościach hydrofilowych (mający tendencje do przyłączania wody) ma, więc istotne znaczenie w przypadku materiałów o silnie rozwiniętej powierzchni wewnętrznej. W przypadku braku tych sił cząsteczka uderzająca o powierzchnię uległaby odbiciu sprężystemu, a czas jej pozostawania w pobliżu powierzchni byłby rzędu  $10^{-13}$  s. Skoro jednak istnieją siły przyciągania, to czas pobytu cząsteczki przy powierzchni ciała stałego przedłuża się o kilka rzędów wielkości. Fakt „przylepiania się” pojedynczych cząsteczek do powierzchni ciała stałego odpowiada w ujęciu makroskopowym powstawaniu

na tej powierzchni błonki zaadsorbowanej wilgoci. Należy pamiętać jednak, że nie jest to ciecz, lecz warstwa znajdujących się w ciągłym ruchu i zmieniających się miejscami cząstek pary wodnej[114][160].

Wilgoć sorpcyjna różni się od wody w stanie ciekłym: między innymi nie rozpuszcza soli mineralnych (a więc w obszarze wilgotności sorpcyjnej nie dochodzi do ruchu soli w materiale i ich wykwitów), w małym stopniu wpływa na przewodność cieplną materiału, nie zamarza nawet w niskiej temperaturze (a więc nie powoduje spękań mrozowych) i nie stwarza warunków właściwych do rozwoju mikroorganizmów (w tym grzybów domowych i pleśniowych).

Ilość wilgoci zaadsorbowanej na powierzchni ciała stałego zależy od prężności cząstkowej pary wodnej w powietrzu otaczającym, a więc od liczby cząstek pary wodnej, które mogą wejść w kontakt z powierzchnią ciała stałego. Wilgotność sorpcyjną materiałów bada się, umieszczając próbki (uprzednio wysuszone do stałej masy) w eksykatorach nad nasyconymi roztworami różnych soli, zapewniającymi w temperaturze 20-25°C różne wartości wilgotności względnej powietrza i wykonując okresowe ważenie, aż do stwierdzenia stałej masy próbek. Na podstawie wyników badań przyrostu wilgotności próbek materiałów przy kolejnych wartościach wilgotności względnej powietrza sporządzić można tzw. izotermę sorpcji (nazwa bierze się stąd, że badania prowadzi się w jednej temperaturze, najczęściej 23°C). Na rysunku 3.1 przedstawiono izotermy sorpcji dla kilku materiałów. Widoczne są duże różnice, co do wartości wilgotności sorpcyjnej materiałów i kształtu izotermy sorpcji, spowodowane różną powierzchnią właściwą materiału i różną strukturą porowatości.

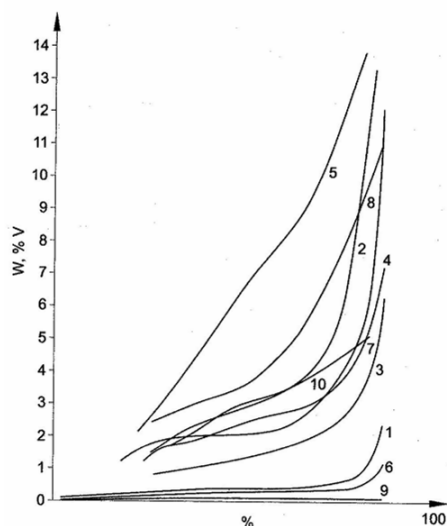
Izotermy sorpcji piankowych tworzyw sztucznych, takich jak polistyren ekspandowany (styropian), polistyren ekstrudowany, poliuretan oraz płyt z wełny mineralnej pokrywają się z osią odciętych; wyroby te mają prawie zerową wilgotność sorpcyjną.

Izotermy sorpcji cegły ceramicznej i gipsu też nieznacznie odstają od osi odciętych; jedynie przy wzroście wilgotności względnej powietrza ponad 90% obserwuje się lekki wzrost wilgotności materiału, nieprzekraczający jednak 1% w stosunku do masy.

Nieco wyższą wilgotnością sorpcyjną charakteryzują się zaprawy i betony; wilgotność sorpcyjna zaprawy cementowej dochodzi do 5%, betonu zwykłego do 3%, betonów z lekkich kruszyw do 6-8%, betonów komórkowych do 6%. Znaczniejszą wilgotnością sorpcyjną charakteryzują się drewno i materiały pochodzenia lignocelulozowego (do ponad 20%).

W izotermach sorpcji można często wyróżnić trzy odcinki, odpowiadające różnym przedziałom wilgotności względnej powietrza, którym towarzyszy różny charakter fizyczny zjawiska sorpcji. Początkowy odcinek izotermy sorpcji (w zakresie wilgotności względnej otaczającego powietrza do około 20%) charakteryzuje się wypukłością krzywizny ku górze; z rozważań teoretycznych fi-

zykochemii powierzchni wynika, że odcinek ten odpowiada wodzie związanej w postaci błonki monomolekularnej (na grubość jednej molekuly wody; tj. ok. 3 Å). Środkowy odcinek (w zakresie wilgotności względnej otaczającego powietrza od około 20% do około 70%) odpowiada wodzie związanej w postaci błonki polimolekularnej (na grubość więcej niż 1 molekuly, maksymalnie 3-4) [115][158].



Fot. 3.1 Izotermę sorpcji wybranych materiałów budowlanych wg badań różnych autorów [18]: 1 – cegła ceramiczna 1700 kg/m<sup>3</sup>, 2 - cegła wapienno-piaskowa 1800 kg/m<sup>3</sup>, 3 - żuzłobeton 1550 kg/m<sup>3</sup>, 4 - beton komórkowy PGS 680 kg/m<sup>3</sup>, 5 - zaprawa cem-wap. 1960 kg/m<sup>3</sup>, 6 - gips 1000 kg/m<sup>3</sup>, 7 - płyta pilśniowa porowata 223 kg/m<sup>3</sup>, 8 - płyta wiórkowo-cementowa 325 kg/m<sup>3</sup>, 9 – płyta z wełny mineralnej 150 kg/m<sup>3</sup>, 10-beton zwykły 2300 kg/m<sup>3</sup>

Przy wysokiej wilgotności względnej powietrza otaczającego (ponad 80%) w porach często występuje zjawisko tzw. kondensacji kapilarnej spowodowanej obecnością menisków wklęsłych i charakteryzujące się wzrostem wilgotności materiału.

Jest to spowodowane faktem, że w pobliżu zakrzywionych powierzchni wklęsłych występuje obniżenie ciśnienia pary wodnej nasyconej; praktycznie wpływ zakrzywienia powierzchni na zmiany ciśnienia pary wodnej nasyconej zaznacza się przy wartości promienia  $r < 10^{-7}$  m (to jest poniżej 1000 Å) i stąd kondensacja kapilarna występuje w mikro i mezoporach, a nie w makroporach [113][159][160].

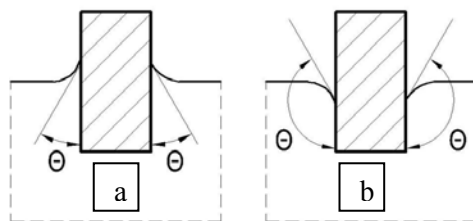
Przy pełnym nasyceniu parą wodną otaczającego powietrza w materiale kapilarno-porowatym następuje wypełnienie wodą tylko mikroporów i mezoporów. W makroporach występuje tylko błonka wilgoci związanej siłami *van der Waal*-sa i nie ulegają one całkowitemu zapełnieniu.



Całkowite zapełnienie makrokapilar może nastąpić jedynie wskutek bezpośredniego styku materiału z wodą, przy czym woda w materiale związana będzie siłami kapilarnymi (woda związana fizykomechanicznie).

Jest to związane ze zjawiskiem zwilżania ciał. Z doświadczenia wiadomo, że wskutek działania sił napięcia powierzchniowego przy powierzchni ciała stałego poziom cieczy zakrzywia się, w wyniku, czego powstaje menisk wklęsły lub wypukły Rys. 3.2. Kształt menisku zależy od stosunku wartości napięcia powierzchniowego na powierzchni trzech faz: gazowej, ciekłej i stałej.

Wartość kąta  $\Theta$  jest miarą zwilżalności. Przyjmuje się, że ciecz zwilża daną powierzchnię, jeśli  $0 < \Theta < \pi/2$  i nie zwilża, jeśli  $\pi/2 < \Theta < \pi$ . W przypadku materiałów hydrofilowych  $0 < \Theta < \pi/2$ , w przypadku materiałów hydrofobowych  $\pi/2 < \Theta < \pi$  [18][159][160].



Fot. 3.2 Kontakt powierzchni materiałów z cieczą: a) zwilżającą, b) niezwilżającą. Na podstawie [18][160]

Różnice w zachowaniu się materiałów względem wody w zależności od kąta zwilżania widać gołym okiem. Kropla wody upuszczona na powierzchnię materiału bitumicznego lub wielkocząsteczkowego polimeru (polistyren, poliuretan) zachowuje kształt kulisty, ze spłaszczeniem w miejscu styku z powierzchnią ciała stałego i wybrzuszeniem na zewnątrz ponad płaszczyznę styku. Kropla wody upuszczona na powierzchnię materiału pochodzenia mineralnego lub roślinnego (przeważnie) rozplywa się szybko po powierzchni, ulegając jednocześnie wchłanianiu przez powierzchnię materiału w wyniku działania sił kapilarnych.

Również w kapilarach ciecz zwilżająca powierzchnię materiału wznosi się ku górze tworząc menisk wklęsły (jak w przypadku doświadczenia z wodą w kapilarze z odfuszczonego szkła), a ciecz niezwilżająca opada i powstaje występujący menisk wypukły (jak rtęć w analogicznym doświadczeniu materiałów rtęcią).

Jeśli kapilara ma przekrój w przybliżeniu kołowy o niezbyt dużym promieniu, to zgodnie z równaniem Younga i Laplace'a, w postaci podanej przez Raleigha, po obu stronach menisku wystąpi różnica ciśnień [18][159].

$$\Delta p = \frac{2 \sigma \cos \Theta}{r} \quad (3.1)$$

Gdzie:

$\sigma$  - napięcie powierzchniowe,

$\Theta$  - kąt zwilżenia,

r - promień kapilary.

Różnica ciśnień  $\Delta p$  warunkuje wznoszenie się cieczy w kapilarze aż do wyrównania różnicy ciśnień siłami masowymi (grawitacji).

W wyniku podciągania kapilarnego nie uzyskujemy zwykle całkowitego wypełnienia porów wodą wskutek uwieżenia powietrza w porach. Nie dotyczy to materiałów włóknistych (niehydrofobizowane płyty z wełny mineralnej) lub jamistych (betony jamiste), które łatwo ulegają całkowitemu nasyceniu przy zetknięciu się z wodą. Woda ta jednak nie jest utrzymywana siłami kapilarnymi i łatwo wycieka z materiału pod wpływem siły grawitacji (jest to tzw. woda pendularna, od łacińskiego *pendulum* - wahadło) [18][115]; pozostaje w nim tylko niewielka ilość, tzw. wilgoci zwilżania. Przy dalszym wysychaniu takiego materiału do otaczającego powietrza uzyskuje się na ogół niższe wilgotności sorpcyjne materiału, niż w przypadku materiałów kapilarno-porowatych. Jest to związane z mniejszą powierzchnią właściwą tych materiałów i brakiem zjawiska kondensacji kapilarnej.

Wilgotność kapilarna jest z reguły znacznie większa, od maksymalnej wilgotności sorpcyjnej. Po ustaniu kontaktu z wodą ma zwykle miejsce powrót materiału do stanu równowagi termodynamicznej z otaczającym powietrzem, w wyniku wysychania.

Stosowany jest też w związku z tym podział materiałów z uwagi na ich wilgotność na:

- powietrzno-suche (w stanie wilgotności sorpcyjnej),
- wilgotne (w stanie wilgotności kapilarnej).

Cały sens zapewnienia dobrych właściwości izolacyjnych i trwałości zewnętrznych przegród budowlanych sprowadza się do utrzymania materiałów w warunkach eksploatacji w zakresie wilgotności sorpcyjnej. Ewentualne zawilgocenie kapilarne powinno mieć charakter tylko przejściowy i powinno się umożliwić doprowadzenie materiału do stanu wilgotności sorpcyjnej (powietrzno-suchego).

### 3.1.2. Mechanizmy i modele ruchu wilgoci w materiałach budowlanych

Łatwo można przekonać się o fakcie, że mechanizm ruchu wilgoci w materiale kapilarno -porowatym zależy od formy związku wilgoci z ciałem stałym i nie jest jednolity w całym zakresie wilgotności materiału. W tym celu można wykonać proste doświadczenie, puszczać kroplę atramentu na bibułę lub płytkę gipsową. Powstanie plama, początkowo szybko rozszerzająca się, a następnie o ograniczonych rozmiarach i dość wyraźnie określonej granicy między obsza-

rem zabarwionym i niezabarwionym. Istnienie tej granicy świadczy o tym, że kapilarny ruch cieczy może się odbywać tylko powyżej określonej wilgotności materiału [18].

Do momentu, w którym nie nastąpi wypełnienie kapilar częściowo wodą, ruch wilgoci może się odbywać tylko, jako ruch oddzielnych molekuł pary wodnej; zjawisko to nazywamy dyfuzją.

W przypadku dyfuzji pary wodnej w powietrzu traktowanym jako tzw. gaz inertyny, co jest słuszne przy ciśnieniu cząstkowym pary wodnej, stanowiącym przeważnie poniżej 3% całkowitego ciśnienia powietrza wilgotnego, gęstość strumienia dyfundującej pary jest określona pierwszym prawem dyfuzji Ficka[18] [115]:

$$q_m = -\beta' \text{ grad } c \quad (3.2)$$

Gdzie:

$\beta'$  - współczynnik przenoszenia masy,

$c$  - stężenie pary wodnej w powietrzu.

Stężenie pary wodnej może być wyrażone przez jej ciśnienie cząstkowe wzorem [18] [115]:

$$c = \frac{p}{R T} \quad (3.3)$$

Gdzie:

$p$  - ciśnienie cząstkowe pary wodnej,

$R$  - stała gazowa uniwersalna,

$T$  - temperatura bezwzględna.

Przy niedużych różnicach temperatury w rozpatrywanym układzie można na podstawie (3.2) i (3.3) napisać, że [18][115]:

$$q_m = -\frac{\beta'}{R T} \text{ grad } p = -\beta \text{ grad } p \quad (3.4)$$

Gdzie:

$\beta'$  - współczynnik przenoszenia masy,

$R$  - stała gazowa uniwersalna,

$T$  - temperatura bezwzględna,

$p$  - ciśnienie cząstkowe pary wodnej.

Stąd też powstał wzór sformułowany jeszcze przed drugą wojną światową; przez Krischera w odniesieniu do materiałów gruboporowatych[18][115].

$$q_m = -\frac{\beta'}{\mu} \text{ grad } p \quad (3.5)$$

Gdzie:

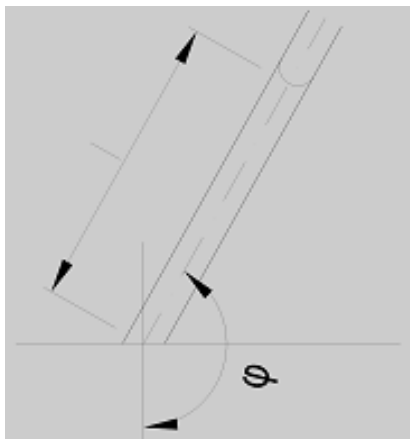
$\mu$  - współczynnik oporu dyfuzyjnego zdefiniowany, jako stosunek gęstości strumienia dyfuzji pary wodnej przez warstwę powietrza o grubości  $d$  do gęstości strumienia dyfuzji przez warstwę materiału o tej samej grubości.

W większości krajów wielkość  $\beta/\mu$  określa się jako współczynnik paroprzepuszczalności  $\delta$ , wyznaczany z badań przy przepływie pary wodnej przez próbkę materiału.

Badania współczynnika paroprzewodności materiałów przeprowadza się najczęściej w warunkach izotermicznych, umieszczając próbkę materiału między dwoma środowiskami o różnej wilgotności względnej powietrza. Jednym z nich jest powietrze w eksykatorze nad roztworem soli zapewniającej określoną wilgotność względną, drugim powietrze nad wodą lub substancją higroskopijną wewnątrz naczynka uszczelnionego na obwodzie. W zależności od zawartości naczynka (woda lub substancja higroskopijna) wilgotność względna może w nim wynosić blisko 100% (nad wodą) lub 0% (np. nad chlorkiem wapnia lub żelazem krzemionkowym). Odpowiednio, mówimy o badaniu współczynnika paroprzewodności metodą "mokrą" (woda pod próbką) lub "suchą" (absorbent pod próbką). Przez ważenie w określonych odstępach czasu ustala się przyrost masy substancji higroskopijnej lub ubytek masy wody [18][115].

Wyniki badań wielu ośrodków wykazują, że w zakresie wilgotności sorpcyjnej materiałów ich współczynnik paroprzewodności mało zależy od metody badania i jest praktycznie stały. Istotniejszy wpływ wywiera obniżenie temperatury próbki poniżej 0°C; kryształki lodu zamykają pory i paroprzewodność materiałów ulega zmniejszeniu. Natomiast kilkakrotny wzrost gęstości strumienia wilgoci, co obliczeniowo odpowiada wzrostowi współczynnika paroprzewodności, stwierdzono w materiałach o wilgotności ponadsorpcyjnej. Stąd też prawo dyfuzji Ficka traci sens niejednokrotnie nawet w przypadku ruchu wilgoci w przegrodach początkowo suchych, ale które w trakcie eksploatacji ulegną zawilgoceniu. To samo dotyczy przegród z wbudowanymi materiałami wilgotnymi, lub wykonywanych przy użyciu procesów mokrych, do których prawo Ficka nie ma zastosowania [18].

Mechanizmu ruchu kapilarnego rozpatrzmy na uproszczonym schemacie ciała kapilarnego w postaci wiązki równoległej rurek (kapilar) o jednakowym promieniu. W przypadku kapilar o przekroju kołowym i cieczy zwilżającej ścianki kapilar menisk przybiera kształt wklęsłej półkuli. Zgodnie z równaniem Younga i Laplace'a po obu stronach menisku występuje różnica ciśnień  $\Delta p$  warunkująca wznoszenie się cieczy w kapilarze.



Fot. 3.3 Wznoszenie cieczy w kapilarze

W przypadku kapilary (Rys. 3.3) o promieniu  $r$  i polu powierzchni przekroju poprzecznego  $\pi r^2$ , nachylonej względem pionu pod kątem  $\vartheta$ , ruch cieczy powstanie pod wpływem siły podciągania kapilarnego [18][114][115].

$$\frac{2 \sigma \cos \Theta}{r} \pi r^2 \quad (3.6)$$

Gdzie:

$\sigma$  - napięcie powierzchniowe,

$\Theta$  - kąt zwilżenia,

$r$  - promień kapilary.

Równoważonej trzema siłami:

- siłą bezwładności,

$$\frac{d^2 l}{d r^2} \rho l \pi r^2 \quad (3.7)$$

- siłą tarcia wynikającą z prawa Poiseuille'a,

$$-\frac{8 \eta l}{r^2} \frac{d l}{d r} \pi r^2 \quad (3.8)$$

- składową siły grawitacji,

$$g \rho l \cos \vartheta \pi r^2 \quad (3.9)$$

Gdzie:

$\rho$  - gęstość dynamiczna cieczy,

$\eta$  - lepkość cieczy,

$g$  - ciśnienie ziemskie.

Ze względu na powolność przepływu wartość siły bezwładności jest tak mała, że można ją pominąć i równanie równowagi sił można napisać w postaci (we wszystkich składnikach opuszczono wspólny czynnik  $\pi r^2$ ) [18]:

$$\frac{2 \sigma \cos \Theta}{r} + g \rho l \cos \vartheta - \frac{8 \eta l}{r^2} \frac{d l}{d r} = 0 \quad (3.10)$$

W szczególnym przypadku, przy ruchu poziomym,  $\cos \nu = 0$  i wtedy można wyznaczyć prędkość ruchu kapilarnego [18].

$$v = \frac{d l}{d r} = \frac{\sigma r \cos \Theta}{4 \eta l} \quad (3.11)$$

Ze wzoru powyższego otrzymujemy związek

$$d r = \frac{4 \eta l d l}{\sigma r \cos \Theta} \quad (3.12)$$

z którego po scałkowaniu obustronnym otrzymuje się

$$r = \frac{2 \eta l^2}{\sigma r \cos \Theta} \quad (3.13)$$

lub inną postać

$$l = \left( \frac{\sigma r \cos \Theta}{4 \eta} \right)^{\frac{1}{2}} r^{\frac{1}{2}} \quad (3.14)$$

Ze wzoru powyższego wynika, że długość słupka wody w kapilarze poziomej, a więc i masa podciągniętej wilgoci, jest proporcjonalna do pierwiastka z czasu podciągania kapilarnego.

Przy ruchu pionowym  $\cos \nu = -1$  i wtedy prędkość ruchu kapilarnego staje się równa [18]:

$$v = \frac{d l}{d r} = \frac{r^2}{8 \eta l} \left( \frac{2 \sigma \cos \Theta}{r} - g \rho l \right) \quad (3.15)$$

Przy małych wartościach czasu, a więc i wysokościach słupka wody w kapilarze, drugi człon w nawiasie w wzorze powyżej jest mały w porównaniu z pierwszym, stąd prędkość podciągania kapilarnego w kapilarze pionowej jest taka sama, jak dla kapilary poziomej.

Ze wzoru na prędkość podciągania kapilarnego wynika, że przy pewnej określonej wysokości słupka wody w kapilarze prędkość staje się równa 0. Otrzymujemy stąd maksymalną wysokość podciągania kapilarnego [18].

$$H = l_{max} = \frac{2 \sigma \cos \Theta}{r \rho g} \quad (3.16)$$

Ze wzoru wynika, że wysokość podciągania kapilarnego jest tym większa, im mniejszy jest umowny promień kapilary.

Sumaryczną gęstość strumienia kapilarnie związanej wilgoci można wyrazić wzorem [18].

$$q_m = - \frac{\rho^2 r^2}{8 \eta} \text{grad} \left( - \frac{2 \sigma \cos \Theta}{r \rho} \right) \quad (3.17)$$

a stąd przedstawić w postaci

$$q_m = - \lambda_m \text{grad} E \quad (3.18)$$

Gdzie:

$$\lambda_m = \frac{\rho^2 r^2}{8 \eta} - \text{współczynnik przewodzenia wilgoci kapilarnej,}$$

$$E = - \frac{2 \sigma \cos \Theta}{r \rho} = \frac{\Delta p}{\rho} - \text{stosunek podciśnienia kapilarnego do gęstości wody.}$$

Wielkość E, występująca tutaj w znaczeniu potencjału, nazywa się potencjałem kapilarnie związanej wilgoci. Sam potencjał odpowiada energii wymaganej do wprowadzenia jednostki masy wody do kapilary, a wymiarem jego jest J/kg [18].

W rzeczywistości materiały kapilarno-porowate mają budowę znacznie bardziej złożoną niż opisuje to model wiązki jednakowych równoległych kapilar. Występuje efekt tzw. krętości kapilar, który wywołuje znaczne rozbieżności ilościowe, tym niemniej w ogólnych zarysach wnioski jakościowe w przypadku diskutowanego modelu są zgodne z rzeczywistością. W szczególności również w badaniach rzeczywistych materiałów masa wody podciąganej przez jednostki powierzchni materiału jest w przybliżeniu proporcjonalna do pierwiastka kwadratowego z czasu. Dużą wartością wysokości podciągania kapilarnego charakteryzują się materiały drobnoporowate, jak na przykład cegła ceramiczna o czerepie porowatym, gips i zaprawa wapienna, znacznie mniejszą cegła ceramiczna o czerepie zwartym (półklinkier i klinkier), cegła wapienno-piaskowa i zaprawy: cementowo-wapienna i cementowa. Podobnie na dużą wysokość (do kilkunastu metrów) podciągają wodę drobnoporowate grunty (gliny, ropy), a nie podciągają wody grube piaski i żwir, stosowane jako podsypka w celu przerwania podciągania kapilarnego [18].

Od wielu lat powstają modele ruchu wilgoci w materiałach kapilarno-porowatych, w których rozpatruje się łącznie dyfuzyjny transport pary wodnej i kapilarny transport cieczy. Na tle licznych prac czysto teoretycznych korzystnie prezentuje się model Kunzela z niemieckiego Fraunhofer Institut für Bauphysik, którego założenia wynikają z badań doświadczalnych prowadzonych na poligonie w Holzkirchen od 1951 r. i który był wielokrotnie sprawdzany w praktyce [18].

### 3.1.3. Parametry charakteryzujące strukturę materiałów budowlanych

Aby zrozumieć procesy powodujące pojawianie się wilgoci w obiektach budowlanych, konieczne jest poznanie parametrów charakteryzujących strukturę materiałów budowlanych oraz zachowanie się tych materiałów wobec wody.

#### Gęstość

Przez gęstość (masę właściwą) rozumiemy masę  $m$  jednostki objętości materiału  $V_a$  bez uwzględniania wielkości porów wewnątrz materiału. Wyrażana jest ona zazwyczaj w  $\text{kg/m}^3$  lub  $\text{g/cm}^3$  [18] [122][161].

$$\rho = \frac{m}{V_a} \quad (3.19)$$

Gdzie:

$m$  – masa próbki,

$V_a$  – objętość próbki.

#### Gęstość pozorna (objętościowa)

Jest to wielkość związana ze strukturą materiału (zawartością porów). Wyrażana jest ona w  $\text{kg/m}^3$  lub  $\text{g/cm}^3$  [18] [122] [161].

$$\rho_0 = \frac{m_s}{V} \quad (3.20)$$

Gdzie:

$m$  – masa próbki,

$V_a$  – objętość próbki.

#### Szczelność

Jest to parametr opisujący strukturę materiału. Wyraża procentową ilość materiału bez porów w jednostce objętości [18] [122][161].

$$s = \frac{\rho_0}{\rho} \quad (3.21)$$



Gdzie:

$\rho_o$  - gęstość pozorna [kg/m<sup>3</sup>, g/cm<sup>3</sup>],

$\rho$  - gęstość [kg/m<sup>3</sup>, g/cm<sup>3</sup>].

### Porowatość

Określa, jaką część objętości materiału zajmują pory. Wyrażona jest wzorem [18] [115][122] [161]:

$$p = 1 - s = 1 - \frac{\rho_o}{\rho} \quad (3.22)$$

Gdzie:

$\rho_o$  - gęstość pozorna [kg/m<sup>3</sup>, g/cm<sup>3</sup>],

$\rho$  - gęstość [kg/m<sup>3</sup>, g/cm<sup>3</sup>].

### Sorpcja

Jest to zdolność materiału do pochłaniania pary wodnej z otoczenia. Dzieli się na adsorpcję, która polega na pochłanianiu powierzchniowym pary wodnej, oraz absorpcję, polegającą na wnikaniu wody w głąb materiału. Zjawisko sorpcji zależy zawsze od rodzaju materiału, jego struktury oraz warunków ciepło-wilgotnościowych otoczenia. W sposób szczegółowy zjawisko sorpcji omówione zostało w punkcie „Formy występowania wilgoci w materiałach budowlanych”.

### Wilgotność

Wilgotność materiału to, względna zawartość wody w materiale, będąca wynikiem zarówno naturalnego stanu, jak i działania czynników zewnętrznych. Zjawisko zawilgocenia związane jest ściśle z budową materiałów porowatych. Rozróżniamy wodę związaną chemicznie (jest ona składnikiem struktury materiału), związaną fizyko-chemicznie (sorpcyjna lub błonkowa) oraz związaną fizyko-mechanicznie (na skutek działania sił kapilarnych). Wielkość  $w_m$  zwana wilgotnością masową [%] oznacza stosunek masy wody znajdującej się w materiale do masy suchego materiału, co może być przedstawione następująco [18] [115][122]:

$$w_m = \frac{m_w - m_s}{m_s} 100\% = \frac{m_{wody}}{m_s} 100\% \quad (3.23)$$

Gdzie:

$w_m$  - wilgotność masowa [%],

$m_w$  - masa próbki wilgotnej [kg, g],

$m_s$  - masa próbki o wysuszenia do masy stałej [kg, g],

$m_{wody}$  - masa wody znajdującą się w próbce [kg, g].

Symbolem  $w_o$  oznacza się wilgotność objętościową, tzn. stosunek objętości wody znajdującej się w materiale do objętości materiału suchego [18] [115].

$$w_0 = \frac{\frac{m_w - m_s}{\rho_w}}{\frac{m_s}{\rho_0}} 100\% \quad (3.24)$$

Gdzie:

$w_0$  - wilgotność objętościowa [%],

$m_w$  - masa próbki wilgotnej [kg, g],

$m_s$  - masa próbki o wysuszenia do masy stałej [kg, g],

$\rho_0$  - gęstość objętościowa danego materiału [kg/dm<sup>3</sup>, g/cm<sup>3</sup>],

$\rho_w$  - gęstość wody [kg/dm<sup>3</sup>, g/cm<sup>3</sup>].

### Higroskopijność

Jest to zdolność materiału do wchłaniania pary wodnej z otoczenia. Materiały charakteryzujące się tą właściwością mają zwilżane i łatwo nasycające się parą wodną kapilary. Wielkość tę oznaczyć można wzorem [18] [122]:

$$H = \frac{m_w - m_s}{m_s} 100\% \quad (3.25)$$

Gdzie:

$m_w$  - masa próbki wilgotnej [kg, g], zawilgoconej do stałej masy w eksykatorze nad wodą,

$m_s$  - masa próbki o wysuszenia do masy stałej [kg, g].

### Kapilarność

Jest to zjawisko związane ze zwilżaniem powierzchni kapilar przez ciecz, do którego dochodzi na skutek działania sił adhezji i napięcia powierzchniowego. Warunkiem wystąpienia zjawiska jest otwarty system połączonych ze sobą porów i kapilar oraz możliwość zwilżania powierzchni kapilar przez ciecz. Szczegółowo zagadnienie kapilarności omówione zostanie w części badawczej pracy.

### Nasiąkliwość

Jest to parametr określający ilość wody, którą materiał może wchłonąć i utrzymać. W praktyce stanowi maksymalną wilgotność materiału [18][115] [122].

$$n_m = \frac{m_n - m_s}{m_s} 100\% = \frac{m_{wody}}{m_s} 100\% \quad (3.26)$$

Gdzie:

$n_m$  - nasiąkliwość masowa [%],

$m_n$  - masa próbki w stanie nasycenia wodą [kg, g],

$m_s$  - masa suchej próbki [kg, g],

$m_{wody}$  - masa wody znajdującą się w próbce [kg, g].

Nasiąkliwość objętościowa  $n_o$  [%] oznacza stosunek objętości wody wchłoniętej przez próbkę do objętości próbki w stanie suchym [18] [122].

$$n_o = \frac{m_n - m_s}{V} 100\% \quad (3.27)$$

Gdzie:

- $n_o$  - nasiąkliwość objętościowa [%],
- $m_n$  - masa próbki w stanie nasycenia wodą [kg, g],
- $m_s$  - masa suchej próbki [kg, g],
- $V$  - objętość próbki w stanie suchym [ $m^3$ ,  $cm^3$ ].

### Przeiąkliwość

Charakteryzuje zdolność materiału do przepuszczania wody, dlatego zjawisko to można również określić, jako podatność materiału na przenikanie wody pod wpływem ciśnienia hydrostatycznego. Przeiąkliwość zazwyczaj oznaczana jest, jako ilość wody przechodząca przez określoną powierzchnie materiału w ciągu określonego czasu i przy określonym ciśnieniu. O podatności materiału na to zjawisko decyduje szczelność i rodzaj porowatości materiału.

Można tu jednak zauważyć pewną prawidłowość: materiały o otwartym systemie małych porów i kapilar, charakteryzują się intensywnym podciąganiem kapilarnym, przy małej przepuszczalności, i odwrotnie, obecność dużych porów powoduje niewielkie podciąganie kapilarne przy dużej przepuszczalności. Natomiast dla materiałów o zamkniętej strukturze porów nie występuje zjawisko podciągania kapilarnego, materiały te mogą wprawdzie nasiąkać wodą, ale są nieprzeiąkliwe [37][122].

### Dyfuzja pary wodnej

Parametr ten pozwala ocenić szczelność przegrody (warstwy). Istotą tego zjawiska jest „przechodzenie” cząstek pary wodnej przez przegrodę, na skutek różnicy stężeń po obu stronach przegrody. Zjawisko to definiuje współczynnik przepuszczalności pary wodnej  $\delta$  [18][113][122]:

$$\delta = \frac{m d}{F t \Delta p} \quad (3.28)$$

Gdzie:

- $\delta$  - współczynnik przepuszczalności pary wodnej,
- $m$  - masa pary wodnej [g] przenikającą przez przegrodę w czasie  $t$  [s],
- $d$  - grubość przegrody lub warstwy materiału [m],
- $F$  - powierzchnia przegrody [ $m^2$ ],
- $t$  - czas przenikania pary wodnej przez przegrodę [s],
- $\Delta p$  - różnica ciśnień [Pa] pary wodnej po oby stronach przegrody.

Parametr  $r_w$  zwany oporem dyfuzyjnym określa opór, jaki stawia parze wodnej przegroda o grubości  $d$  oraz współczynniku paroprzepuszczalności  $\delta$  [18][113][122].

$$r_w = \frac{d}{\delta} \quad (3.29)$$

Gdzie:

$r_w$  - opór dyfuzyjny,

$d$  - grubość przegrody[m],

$\delta$  - współczynnik przepuszczalności pary wodnej.

Współczynnik oporu dyfuzyjnego  $\mu$  to [18][113][122]:

$$\mu = \frac{\delta_p}{\delta} \quad (3.30)$$

Gdzie:

$\delta_p$  - współczynnik przepuszczalności pary wodnej powietrza,

$\delta$  - współczynnik przepuszczalności pary wodnej dla przegrody.

W praktyce współczynnik  $\mu$  zastępowany jest parametrem  $s_d$ , określającym grubość nieruchomej warstwy powietrza, cechującej się takim samym oporem dyfuzyjnym jak warstwa materiału (przegroda) o grubości  $d$  [18][113][122].

$$s_d = \mu d \quad (3.31)$$

Gdzie:

$s_d$  - zastępczy (porównawczy) współczynnik oporu dyfuzyjnego [m],

$\mu$  - współczynnik oporu dyfuzyjnego

$d$  - grubość przegrody [m].

Współczynnik  $\mu$ , jest wielkością bezwymiarową, sama jego znajomość nie mówi o zdolności przegrody do przepuszczalności pary wodnej. Dlatego tak istotne jest jego powiązanie z grubością przegrody i operowanie parametrem  $s_d$ , który jest wielkością porównywalną.

## 3.2. BADANIA BEZPOŚREDNIE WILGOTNOŚCI MATERIAŁÓW BUDOWLANYCH

Metody badań wilgotności materiałów można podzielić na takie, w których pomiar odbywa się w sposób bezpośredni lub pośredni. Pomiar bezpośredni to pomiar, którego wynik otrzymuje się na podstawie bezpośredniego wskazania narzędzia pomiarowego, wywzorcowanego w jednostkach miary mierzonej wielkości.

### 3.2.1. Metoda laboratoryjna – grawimetryczna

Metoda laboratoryjna obarczona wieloma ograniczeniami uważana jest za jedyny miarodajny sposób pomiaru wilgoci. Badanie wymaga posiadania zaplecza laboratoryjnego oraz odpowiedniego sprzętu do pobierania próbek. Badania wilgotności metodą laboratoryjną wykonywane powinny być w oparciu o normę PN-EN ISO 12570 Ciepłno-wilgotnościowe właściwości materiałów i wyrobów budowlanych. Określanie wilgotności przez suszenie w podwyższonej temperaturze.

Aparatura badawcza powinna zawierać:

- Suszarkę zdolną do utrzymywania temperatury suszenia minimum 105°C z dokładnością +/- 2°C i wilgotności względnej na poziomie mniejszym niż 10%; w przypadku gorącego i wilgotnego powietrza lub niskiej temperatury suszenia konieczne może się okazać dostarczenie powietrza suszącego dla zapewnienia właściwej wilgotności względnej.
- Wagę pozwalającą na ważenie próbek do badań z niepewnością nie większą niż 0,1% ich masy.
- Eksykator.

Przed suszeniem należy zważyć próbki do badań z dokładnością do 0,1% ich masy. Następnie należy suszyć próbki do stałej masy w temperaturze określonej w stosownej normie wyrobu. Stała masa jest osiągnięta, gdy zmiana pomiędzy trzema kolejnymi ważeniami wykonanymi w ciągu 24h wynosi mniej niż 0,1% całkowitej masy. Próbki należy studzić w eksykatorze i ważyć je po osiągnięciu temperatury od 30°C do 40°C z tą samą dokładnością jak opisano wyżej. Próbki waży się przed ich całkowitym wystudzeniem, aby zminimalizować powtórna absorpcję wilgoci [206].

Wilgotność materiału  $W_m$  określa się stosunkiem masy wody zawartej w badanym materiale do jego masy w stanie suchym wg wzoru:

$$W_m = \frac{m_w - m_s}{m_s} * 100\% \quad (3.32)$$

Gdzie:

$W_m$  - wilgotność masowa,  
 $m_w$  - masa próbki wilgotnej,  
 $m_s$  - masa próbki suchej.

### 3.2.2. Wytyczne do pobierania materiału

Wielu ograniczeniom podlega sposób i miejsce poboru próbek z tego też powodu zagadnienia te zostaną omówione dokładnie.

Szczególną uwagę należy przykładać do miejsca i sposobu pobrania próbek. W Polsce brak jest norm określających ilość, miejsce i sposób pobierania próbek do badań wilgotności metodą laboratoryjną. W związku z brakiem wiarygodnych źródeł, wysokość i głębokość pobierania próbek oraz ich liczba często opiera się na własnym doświadczeniu wykonujących badania. Podstawowe zasady dotyczące próbkowania [3][4][115]:

- Próbki pobierane powinny być z głębokości  $1/3 - 1/4$  grubości muru. Materiał do badań musi pochodzić z całej długości otworu.
- W przypadku gdy przegrody wysychają w jednym kierunku głębokość powinna wynosić  $1/2$  grubości muru.
- Podczas próbkowania nie można przegrzać pobieranego materiału.
- W celu określenia rozkładu zawilgocenia w zależności od wysokości muru badanie należy wykonać w poziomie posadzki (wewnątrz obiektu) lub terenu (na zewnątrz) oraz przynajmniej jeden pomiar powyżej pierwszego (np. na wysokości 1m). W miejscach gdzie wysokość została zmieniona każdorazowo należy dokonać jej pomiaru.
- Materiał przeznaczony do badań należy umieścić w szczelnym opakowaniu. W przypadku konieczności długotrwałego transportu powinien być przechowywany w lodówce. Przy kilkudniowych badaniach na obiekcie próbki można zamrozić i w takim stanie przewozić do laboratorium.
- Otwory, z których pobierany jest materiał do badań należy uzupełnić materiałem zgodnym z pobranym z muru.
- Należy wykonać dodatkową dokumentację fotograficzną miejsc poboru. Umożliwi to późniejsze naniesienie punktów na dokumentację rysunkową.

Istnieje dość duży problem z przyjęciem miarodajnej liczby próbek, które należy pobrać z obiektu (w Polsce brak jest norm). Uwzględniona musi zostać przede wszystkim wielkość obiektu, powierzchnia podpiwniczenia, zmienność materiału w obrębie badanych murów oraz wizualny stan badanych przegród. Na podstawie wieloletnich badań prowadzonych przez autora wysnuto następujące wnioski dotyczące minimalnej liczby próbkowań i miejsc poboru. Zgodnie z nimi materiał należy pobrać z:

- wszystkich ścian zewnętrznych piwnic stykających się z gruntem,
- przynajmniej jednej ściany wewnętrznej konstrukcyjnej w poziomie piwnic,
- wszystkich ścian zewnętrznych w poziomie parteru od zewnątrz i od wewnątrz.

Jeżeli uwzględnimy, że każdorazowo pobieramy materiał z dwóch wysokości, to nawet dla obiektu podpiwniczonego o niewielkiej powierzchni zabudowy, daje liczbę ponad dwudziestu próbek. Założenia te nie uwzględniają wspomnianej powyżej zmienności materiałów w ścianach i długości ścian.

Niestety dość często ze względów finansowych przyjmowana jest zbyt mała liczba próbek, co utrudnia właściwą ocenę stanu wilgotnościowego. W opracowaniach technicznych, dość często można się spotkać, z oceną stanu wilgotnościowego obiektów wielkowymiarowych na podstawie zaledwie kilku punktów pomiarowych.

Niezwykle istotną sprawą jest technika pozyskiwania materiału do badań. Źródła literaturowe wskazują konieczność odkuwania lub stosowania wybijaaków rurowych [206]. Niestety obydwa sposoby, w przypadku badania przegród, nie są możliwe do zastosowania. W przypadku odkuć na tak dużą głębokość, uszkodzeniu uległby duży fragment muru. Zastosowanie wybijaaków rurowych ogranicza się jedynie do poboru próbek na niewielkiej głębokości i dotyczy materiałów o niskiej wytrzymałości. Przy pobieraniu z większych głębokości problemem jest usunięcie wybijaka z materiałem i zachodzi konieczność odkuwania materiału wokół wybijaka. W jednym i drugim przypadku uszkodzenia badanej przegrody są zbyt rozległe. Z tego też powodu najczęściej próbki pobierane są metodą odwiertów. Przy pozyskiwaniu materiału za pomocą odwiertów istnieje realne niebezpieczeństwo przegrzania zwierciny, co wpływa niekorzystnie na wynik (obniża). Powoduje to konieczność stosowania wiercenia wolnoobrotowego lub wiertnic z koronami niechłodzonymi wodą.

### **3.2.3. Badania własne – Wpływ techniki poboru próbek na wynik badania wilgotności**

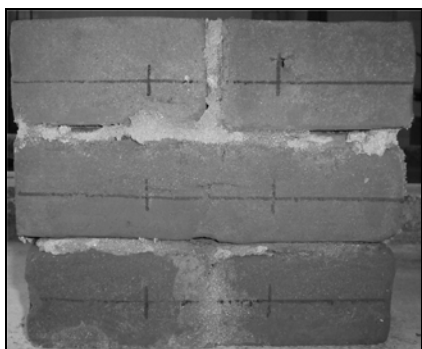
Bez względu na technikę odwiertów podczas pobierania materiału do badań dochodzi do przesuszenia zwierciny. Ubytek masy próbki wilgotnej powinien zostać uwzględniony podczas obliczeń wilgotności. Badania własne autora pozwoliły na opracowanie poprawek uwzględniających technikę pobierania materiału. Celem badań było wykazanie różnicy w wilgotnościach tych samych próbek przy różnych technikach poboru w stosunku do wartości uznanej za bazową, czyli odkuwania. Ze względu na to, że najczęściej wykorzystywane przy tego typu badaniach jest wiercenie, ocenie poddano dwie metody poboru zwierciny z muru:

- wiercenie urządzeniem udarowym szybkoobrotowym
- wiercenie urządzeniem udarowo – obrotowym o niskiej prędkości wiercenia

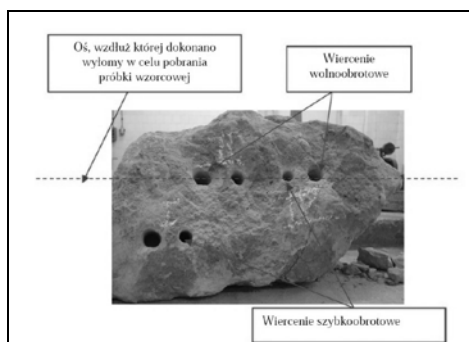
Podczas badań wyznaczone zostały tabele poprawek dla czterech różnych materiałów budowlanych. Do badań wybrano następujące materiały:

- cegła pełna palona, klasy 100,
- pustak z betonu komórkowego, odmiana M 600,
- skała węglanowa – opoka,
- zaprawa cementowo – wapienna.

Przygotowane wcześniej próbki poddano procesom zawilgocenia tak, aby uzyskać różne wilgotności. Proces był monitorowany z użyciem mierników bazujących na pomiarach pośrednich, po uprzednim wprowadzeniu właściwych charakterystyk materiałowych.



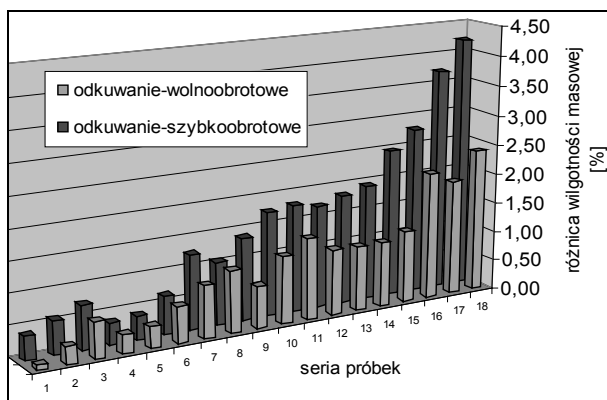
Fot. 3.4 Próbką z cegły ceramicznej przygotowaną do badań



Fot. 3.5 Otwory w opoce, z których została pobrana do badania zwierzcina

Następnie z poszczególnych próbek został pobrany materiał przy pomocy odwiertów szybko i wolnoobrotowych. Odwierty wykonano w odległości około 4-6 cm. Materiał pomiędzy otworami został odkuty wzdłuż osi poziomej otworów, dzięki czemu została pobrana próbka wzorcowa. Kolejnym etapem było oznaczenie wilgotności metodą laboratoryjną. Ze względu na obszerność materiału poniżej przedstawiono jedynie wyniki końcowe badań dla cegły ceramicznej i opoki. Z 6 brył opoki pobrano 72 próbki w 24 cyklach badawczych. W przypadku cegły ceramicznej badania wykonano na 6 murkach, z których pobrano 54 próbki w 18 cyklach badawczych. Jeden cykl obejmował wiercenia wolnoobrotowe, wiercenie szybkoobrotowe oraz odkuwanie.

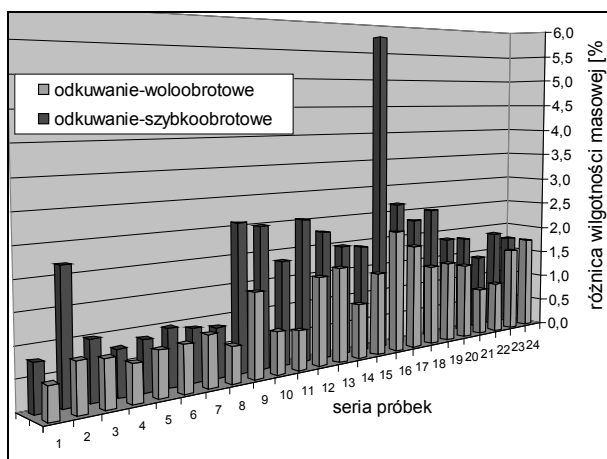




Fot. 3.6 Wykres rozkładu wilgotności masowej w stosunku do techniki poboru próbki dla cegły ceramicznej

Tab. 3.1 Różnica w wilgotności masowej cegły ceramicznej przy poborze za pomocą odwiertu w stosunku do odkuwania

Przedział wilgotności	Średnia wartość różnic wilgotności masowej pomiędzy odkuwaniem, a wierceniem szybkoobrotowym	Średnia wartość różnic wilgotności masowej pomiędzy odkuwaniem, a wierceniem wolnoobrotowym
0-3 %	0,51 %	0,38 %
3-10%	1,36 %	0,78 %
10-15%	2,15 %	1,16 %
15-20%	3,58 %	1,86 %



Fot. 3.7 Wykres rozkładu wilgotności masowej w stosunku do techniki poboru próbki dla opoki

Tab. 3.2 Różnica w wilgotności masowej opoki przy poborze za pomocą odwiertu w stosunku do odkuwania

Przedział wilgotności	Średnia wartość różnic wilgotności masowej pomiędzy odkuwaniem, a wierceniem szybkoobrotowym	Średnia wartość różnic wilgotności masowej pomiędzy odkuwaniem, a wierceniem wolnoobrotowym
0-5 %	1,45 %	0,64 %
5-10%	2,23 %	1,03 %
10-36%	3,44 %	1,51 %

W zamieszczonych powyżej tabelach przedstawione zostały poprawki, jakie należy dodać do osiągniętych wyników wilgotności w zależności od użytej techniki poboru oraz przedziału wilgotności. Podobne tabele opracowane zostały dla pozostałych wymienionych wcześniej materiałów.

W pracy niniejszej wystąpiła konieczność wielokrotnego używania tych samych próbek do badania wilgotności. Wykluczało to pobieranie materiału do badań metodami odkucia, zdecydowano, więc o stosowaniu wiercenia wolnoobrotowego. Wyznaczenie poprawek było konieczne ze względu na minimalizację błędów związanych z przesuszaniem zwierzyny.

### 3.3. METODY POŚREDNIE BADANIA WILGOTNOŚCI

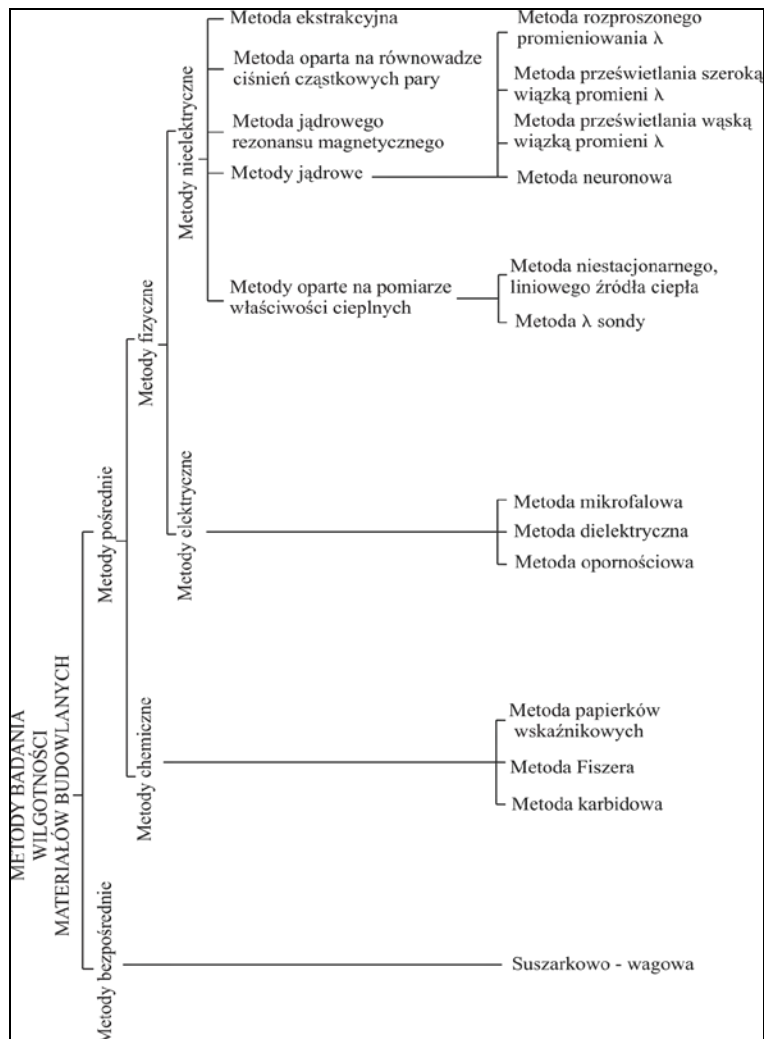
Pomiary pośrednie wykorzystują właściwości fizyczne i chemiczne wody, która znajduje się w materiałach budowlanych. Wynik otrzymuje się na podstawie bezpośredniego pomiaru innych wielkości, opierając się na znanej zależności między tymi wielkościami, a wielkością mierzoną.

Obecnie na polskim rynku dostępnych jest wiele urządzeń pomiarowych działających na następujących zasadach [2]:

- pomiaru ciśnienia acetylenu powstałego wewnątrz hermetycznego pojemnika w wyniku reakcji wody pochodzącej z zawilgoconego materiału z węglikiem wapnia (metoda karbidowa);
- pomiaru wilgotności względnej powietrza w głębi wywierconego otworu i ustaleniu tzw. wilgotności relatywnej na podstawie krzywej sorpcji danego materiału;
- pomiaru oporu elektrycznego (mierniki elektrooporowe), w których wykorzystuje się zależność przewodnictwa elektrycznego materiału od jego wilgotności;
- pomiaru zmiany stałej dielektrycznej lub tangensa kąta stratności dielektrycznej materiału (mierniki dielektryczne);
- pomiaru prądów wirowych.

Na zamieszczonym poniżej rysunku przedstawiono schemat podziału metod pośrednich badania wilgotności. W dwóch grupach chemicznych i fizycznych znajduje się kilkanaście metod pomiarowych. W rzeczywistości w budownictwie stosowanych jest zaledwie kilka z nich.

W dalszej części pracy w sposób szczegółowy zostaną omówione te metody, które znalazły powszechne zastosowanie w budownictwie. Należą do nich wszystkie trzy metody elektryczne (mikrofalowa, opornościowa, dielektryczna) oraz z metod chemicznych – karbidowa.



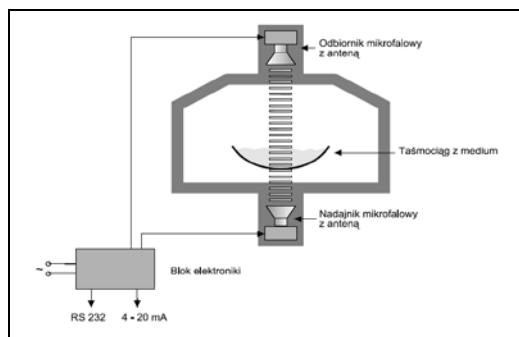
Fot. 3.8 Podział metod badania wilgotności materiałów budowlanych [148]

### 3.3.1. Metody elektryczne

Z grupy metod elektrycznych przy pomiarach wilgotności najczęściej stosowane są metody opornościowa i dielektryczna. W ofercie firm oferujących tego typu mierniki są urządzenia bazujące na jednej z metod lub też coraz częściej wielofunkcyjne.

### Metoda mikrofalowa

Jest to metoda bezkontaktowego pomiaru wilgotności (zawartości wody) pomiar jest realizowany w oparciu o zjawiska tłumienia amplitudy i przesunięcia fazy mikrofal przenikających przez produkt. Na podstawie obu tych wielkości urządzenie oblicza zawartość wody w mierzonej substancji.



Fot. 3.9 Schemat działania miernika mikrofalowego LB 456 [210]

Układ pomiarowy składa się zawsze z jednostki sterującej, anteny nadawczej i odbiorczej oraz kabli łączących wysokiej częstotliwości. Dodatkowo układ może być wyposażony w izotopowy układ kompensacji gęstości. Najczęściej jest stosowany układ pomiarowy dla produktu na taśmociągu. Anteny są montowane nad i pod taśmociągiem tak, że prześwietlają transportowany materiał. W razie zastosowania izotopowego układu korekcji gęstości, detektor promieniowania jest montowany nad, a pojemnik ochronny ze źródłem - pod taśmociągiem. Mikrofalowy pomiar wilgotności może być stosowany do produktów nieprzewodzących. Metoda jest bezpieczna w stosowaniu, ponieważ natężenie wiązki mikrofalowej jest kilkakrotnie niższe od dopuszczalnych norm.

Zestaw pomiarowy składa się z nadajnika i odbiornika mikrofalowego, bloku elektronicznego do analizy sygnału oraz programu na PC do rejestracji, obróbki i archiwizacji danych pomiarowych, oraz kalibracji systemu [210].

### Metoda dielektryczna

Metoda polega na wykorzystaniu zjawisk zmiany pojemności elektrycznej materiału wraz ze zmianą zawartości wilgoci. Istnieje, bowiem związek między wilgotnością materiału a jego stałą dielektryczną. Dzięki dużej różnicy między wartością stałej dielektrycznej wody i bezwodnych substancji można przyjąć proporcjonalność między wilgotnością materiałów a ich stałą dielektryczną. Zaletą tej metody jest brak inwazyjności oraz łatwość i szybkość pomiaru. Największym mankamentem niewielka głębokość pomiaru zwykle do kilkudziesięciu milimetrów.

### Metoda opornościowa

Metodę opornościową zaliczamy do metod niszczących, gdyż pomiar polega na wykonaniu niewielkich otworów w badanym materiale. Zakres ingerencji jest na tyle mały, że może być ona z powodzeniem stosowana również w obiektach zabytkowych. Pomiar bazuje na pomiarze rezystancji zawilgoconego materiału pomiędzy układem dwóch elektrod. Zdecydowanie częściej mierniki opornościowe wykorzystywane są do pomiaru wilgotności materiałów drewnianych i drewnopochodnych. Przy pomiarach metodami opornościowymi należy także pamiętać, że w przypadku występowania zasolenia dochodzi do wypaczenia wyników.

Z powodu niewielkiej głębokości pomiaru, wpływu zasolenia, pomiary metodami elektrycznymi mogą mieć jedynie charakter informacyjny. Pozwalają natomiast na dość sprawne wyszukiwanie miejsc zawilgoconych oraz są niezwykle pomocne przy tworzeniu tzw. „map zawilgocenia” obrazujących rozkład zawilgoceń na powierzchni przegród.



Fot. 3.10 Wilgotnościomierz dielektryczny LB-795



Fot. 3.11 Wilgotnościomierz opornościowy

### 3.3.2. Metoda chemiczna

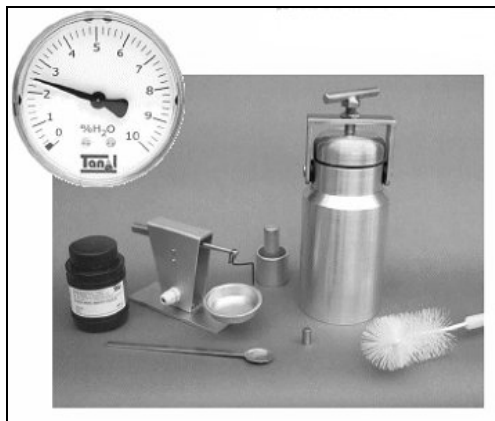
Metoda karbidowa jest metodą chemiczną i polega na pobraniu próbek z przegrody przez wywiercenie i wprowadzenie jej wraz z ampulką zawierającą węgiel wapnia (karbid) do szczelnego ciśnieniowego naczynia stalowego, wyposażonego w manometr. Przez lekkie wstrząsanie naczynia następuje rozbicie ampulki oraz zmieszanie zawartości. Zachodząca reakcja powoduje wydzielanie

się acetyleny i wzrost ciśnienia w butli, którego wartość ustala się po pewnym czasie. Wilgotność próbki odpowiadająca wytworzonemu ciśnieniu można odczytać z dołączonej do urządzenia tabelki. Dokładność pomiaru wynosi  $\pm 3\%$ .

Reakcja zachodzi według wzoru:



Masa próbki badanego materiału, zakres pomiarowy manometru i wymiary komory pomiarowej zostały tak dobrane, że manometr jest wyskalowany bezpośrednio w procentach wilgotności względnej. Manometr znajduje się pod dnem pojemnika pomiarowego.



Fot. 3.12 Wilgotnościomierz karbidowy WK-1

Stosując metodę karbidową przy pomiarach zawilgocenia przegród w obiektach istniejących należy uwzględnić zanieczyszczenie badanej próbki innymi związkami chemicznymi np. występujące wykwity solne lub zagrzybienie materiału. Rzeczywiste zawilgocenie materiału może nieznacznie odbiegać od odczytanego z manometru stopnia zawilgocenia jeśli struktura badanego materiału była zanieczyszczona higroskopijnymi solami.

Dwuznaczność która może nastąpić podczas interpretowania odczytów wilgotności w zanieczyszczonym materiale można zmniejszyć przez mierzenie faktycznej wilgotności materiału oraz badanie wilgotności powietrza otaczającego badany materiał przy pomocy higrometru aby otrzymać względną wilgotność materiału [148].

### 3.3.3. Charakterystyka pośrednich metod pomiarowych

W poniższej tabeli zestawione zostały podstawowe dane dotyczące metod pośrednich badania wilgotności stosowanych w budownictwie. Kolejno podano zakres stosowania, dokładność i głębokości pomiarów oraz stopień ingerencji

w strukturę badanego materiału. Dodatkowo w kolumnie uwagi podane zostały wady i zalety omawianych we wcześniejszym punkcie metod.

Tab. 3.3 Charakterystyka metod pomiarowych

Metoda pomiaru	Zakres badanej wilgotności [%]	Dokładność pomiaru [%]	Głębokość pomiaru [mm]	Inwazyjność	Zastosowane zaplecze laboratoryjne	Uwagi
Grawimetryczna	0-100	-	dowolna	tak	tak	ZALETY: bardzo duża dokładność wyników, WADY: próbki muszą być pozyskiwane przez wiercenie na sucho względnie przez dutowanie a dokładność pomiaru zależy od umiejętności, bez strat wody przeniesienia próbek do laboratorium, czasochołonne badania, inwazyjność
Karbidowa	0,14-22,9	$\pm 3$	dowolna	tak	nie	ZALETA: dokładna metoda pomiaru, WADY: inwazyjność, wykwitły solne i zagrzybenia mają wpływ na uzyskiwane wyniki, wysoki koszt ampulek karbidowych
Dielektryczna	0-100	w zależności od kalibracji	30-50	nie	nie	ZALETY: nieinwazyjność, WADY: wymaga przeprowadzenia dodatkowego skalowania z wykorzystaniem metod bardziej dokładnych, wpływ na uzyskiwane wyniki ma zasolenie badanego materiału i siła docisku elektrod
Opornościowa	0-100	w zależności od kalibracji	głębokość wkręcenia sondy	tak	minimalna	ZALETY: pomiar na głębokości wkręcenia sond, WADY: metoda inwazyjna, wymaga przeprowadzenia dodatkowego skalowania z wykorzystaniem metod bardziej dokładnych, wpływ na uzyskiwane wyniki ma zasolenie badanego materiału
Mikrofalowa	0-100	$\pm 3$	min. 100mm	tak	nie	ZALETY: nieinwazyjna metoda, pomiar niezależny od temperatury, gęstości i koloru badanego materiału, WADY: pomiar ograniczony do sypkich materiałów nieprzewodzących, główne zastosowanie ma na taśmociągach i silosach

### 3.3.4. Badania własne – Kalibracja urządzeń pomiarowych

W pracy wykorzystano metody dielektryczną i opornościową pomiaru wilgotności. Badania prowadzono za pomocą wilgotnościomierza materiałów LB-795. Wilgotnościomierz daje możliwość zaprogramowania 150 materiałów użytkownika (po 50 dla każdej metody pomiarowej). Programowanie polega na odpowiedniej zmianie charakterystyki pomiarowej zapisanej w pamięci wilgotnościomierza poprzez zapisanie czterech punktów kalibracyjnych do wilgotnościomierza. Przed rozpoczęciem pracy na materiale który nie został ujęty w spisie dostępnych w pamięci wilgotnościomierza należy zaprogramować go odpowiednio. Kolejno należy:

- przyporządkować nowemu materiałowi odpowiednią nazwę,
- ustalić metodę pomiarową, na której odbędzie się programowanie np. sonda igłowa,
- ustalić wartości punktów kalibracyjnych: H1w - wilgotność wzorcowa pierwszego punktu kalibracyjnego, H1m - wilgotność zmierzona pierwszego punktu kalibracyjnego, H2w - wilgotność wzorcowa drugiego punktu kalibracyjnego, H2m - wilgotność zmierzona drugiego punktu kalibracyjnego.

Aby wyznaczyć wartości H1w, H1m, H2w, H2m należy wilgotność danego materiału zmierzyć przy pomocy wilgotnościomierza LB-795 oraz przy pomocy innego urządzenia uznanego przez użytkownika za wzorcowe (np. metodą grawimetryczną suszarko-wagową wg PN-EN ISO 12570 - dla materiałów i wyrobów budowlanych) dla dwóch różnych wilgotności materiału. Najlepiej, gdy wartości mierzonych wilgotności są oddalone od siebie tzn. mierzy się materiał uznany raz np. za prawie suchy (ale nie całkowicie suchy) i drugi raz za wilgotny, (ale nie maksymalnie wilgotny).

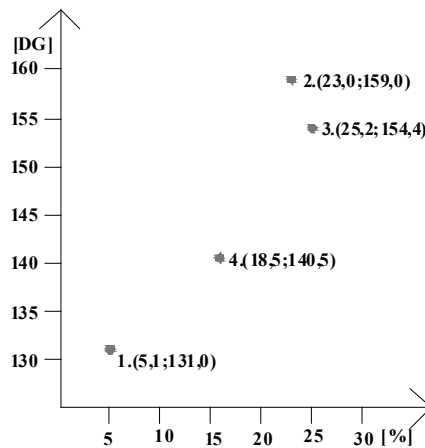
W pracy do kalibracji miernika zostały użyte po cztery próbki kamienne (dla każdej z metod) i cztery próbki zapraw. W celu uniknięcia błędu pomiarowego wynikającego z możliwości występowania warstw uzależnienia. Wybierano próbki o różnym stopniu zawilgocenia. Do kalibracji metodą opornościową wywiercono w każdej z nich dwa otwory w odległości od siebie 50mm i głębokości 70mm. W wywierconych otworach zostały zamontowane sondy igłowe które następnie lekko dobito młotkiem. Po odczekaniu 24 godzin w celu wyrównania wilgotnościowego materiału w całej objętości przeprowadzono pomiary. Po ich wykonaniu rozbito próbki i pobrano materiał znajdujący się pomiędzy sondami igłowymi. Następnie przeprowadzono badanie wilgotności metodą grawimetryczną. Ze względu na obszerność materiału poniżej przedstawione zostały wyniki badań dla opoki (kalibracja metody opornościowej).



Tab. 3.4 Zestawienie pomiarów miernika LB-795 i wilgotności z pomiaru metodą laboratoryjną

Nr Próbkki - Opoka	1	2	3	4
Pomiar miernika przed kalibracją	131	159,5	140,5	154,4
Wilgotność laboratoryjna [%]	5,1	23	18,5	25,2

Po otrzymaniu wyników wilgotności sporządzony został wykres „krzywej kalibracji” dla badanego materiałów.



Fot. 3.13 Punkty otrzymane z pomiarów

Ponieważ punkty nie leżą liniowo, nie można wyznaczyć jednej prostej, która na pewno byłaby tą prawdziwą. W celu wyznaczenia prostej rzeczywistej zdecydowano wyznaczyć pięć prostych przechodzących przez poszczególne pary punktów 1,2,3,4 (prosta przechodząca przez punkty 2,3 została odrzucona albowiem jej zwrot jest niezgodny z przyrostem wilgotności) i dokonać pomiaru sprawdzającego. Na podstawie otrzymanych wyników sporządzono wykresy „linii kalibracyjnych” dla kolejnych przedziałów wilgotności.

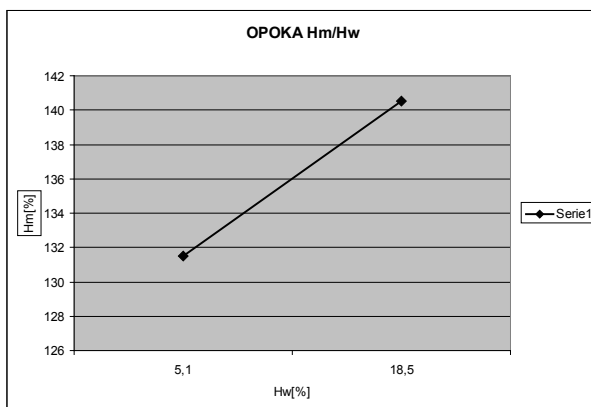
Tab. 3.5 Zestawienie punktów kalibracyjnych dla poszczególnych prostych

Nr Prostej	1	2	3	4	5
Punkty, na których oparta jest prosta	1 (5,1;131,0) 4(18,5;140,5)	1 (5,1;131,0) 3(25,2;154,4)	1(5,1;131,0) 2(23,0;159,0)	4(18,5;140,5) 3(25,2;154,4)	4(18,5;140,5) 2(23,0;159,0)

Następnie zaprogramowano miernik na pięciu pozycjach. Wykonano dodatkowe pomiary na czterech próbkach przygotowanych jak do pierwszego pomiaru. Po wykonaniu pomiaru i analizie wyników przyjęto, jako prostą rzeczywistą linię przechodzącą przez punkty 1,3.

Tab. 3.6 Zestawienie pomiarów wilgotności sprawdzających poprawność kalibracji miernika LB-795 – pomiar opornościowy

Nr Próbkki	1	2	3	4
Wilgotność wg miernika po kalibracji [%]	1,7	2,1	28,2	15,8
Wilgotność laboratoryjna [%]	1,9	2,3	27,7	15,0



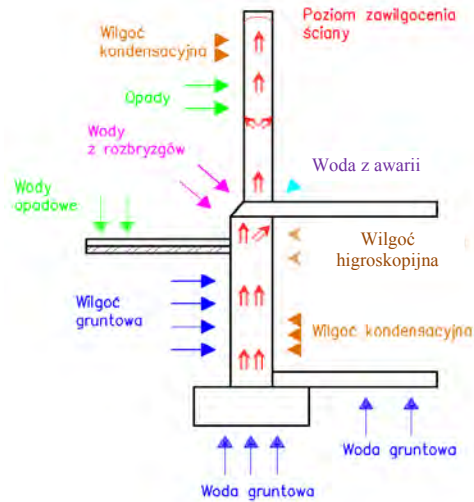
Fot. 3.14 Wzorcowanie miernika - charakterystyka pomiarowa dla opoki – pomiar opornościowy

W sposób analogiczny prowadzono badania dla pozostałych materiałów wykorzystywanych w dalszej części badań (zaprawy wapienne, wapienno – cementowe i trasowe).

### 3.4. ŹRÓDŁA ZAWILGOCENIA OBIEKTÓW BUDOWLANYCH

Dokładne określenie przyczyn (źródeł) zawilgocenia jest dość skomplikowane i często niemożliwe bez przeprowadzenia szczegółowych badań. Wpływ ma na to przede wszystkim fakt, że w obiektach zawilgoconych niezmiernie rzadko mamy do czynienia jedynie z jednym źródłem. Najczęściej stan podwyższonej wilgotności to efekt jednoczesnego pojawienia się kilku różnych przyczyn. Do najważniejszych źródeł wilgoci występującej w budynkach możemy zaliczyć wodę znajdującą się w gruncie, wodę opadową, wodę i wilgoć pochodzącą z instalacji, wilgoć kondensacyjną i sorpcyjną oraz wilgoć technologiczną.

Uwzględniając inne kryterium, źródła zawilgocenia możemy podzielić na: zawilgocenia strukturalne (ze zwierciadła wody gruntowej i tzw. wody rozproszonej), zawilgocenia powierzchniowe (na skutek kondensacji pary wodnej zwierciadła i higroskopijnego poboru wilgoci). W sposób schematyczny źródła wody obrazuje Rys. 3.14.



Fot. 3.15 Źródła zawilgocenia budynków i obiektów

### **Woda znajdująca się w gruncie**

Ściany fundamentów i piwnic oraz posadzki bezpośrednio na ziemi są zagrożone wilgocią gruntową, a także wodami gruntowymi, (jeśli występują one na małej głębokości). Wody znajdujące się w gruncie, które działają na podziemnej części murów występują w postaci: błonkowej (stanowi ona otoczkę poszczególnych ziaren gruntu) oraz kapilarnej (wypełnia pory między ziarnami gruntu w wyniku działania napięcia powierzchniowego). Całkowite wypełnienie porów występuje w pobliżu poziomu wody gruntowej, wilgotność gruntu wynosi tam 100 % [18]. Zawilgocenie zagraża nie tylko podziemnym częściom budynku. Może ono zostać przeniesione na wyższe, leżące ponad ziemią części budynku na skutek zjawiska podciągania kapilarnego. Podciąganie kapilarne polega na transportowaniu wody i powolnym nasiąkaniu obszarów materiału niemających bezpośredniego kontaktu ze źródłem wilgoci. Podciąganie kapilarne z fundamentów i piwnic może być powodem zawilgocenia ścian do wysokości kilku metrów. Wysokość podciągania kapilarnego zależy od struktury porów i kapilar materiału, i jest odwrotnie proporcjonalna do ich średnicy. Oznacza to, że w materiałach drobno porowatych podciąganie jest najwyższe. Dla grubych murów wzniesionych z cegły ceramicznej może sięgać nawet kilku metrów powyżej poziomu wody gruntowej. W murach z kamienia wysokość podciągania uzależniona jest przede wszystkim od rodzaju skały. W przypadku skał osadowych (wapień, piaskowce) jest ono zdecydowanie wyższe niż dla skał magmowych, gdzie jest minimalne lub też nie występuje. Nie oznacza to, że w murach ze skał magmowych, czy też metamorficznych pochodzenia magmowego, nie ma zjawiska podciągania kapilarnego[126]. W związku z tym, że mur składa się również

z zaprawy woda jest podciągana w wyższe partie muru siecią spoin. Wysokość podciągania kapilarnego można wyrazić wzorem [18][37]:

$$H = l_{max} = \frac{2 \sigma \cos \Theta}{r \rho g} \quad (3.34)$$

Gdzie:

$\sigma$  - napięcie powierzchniowe cieczy,

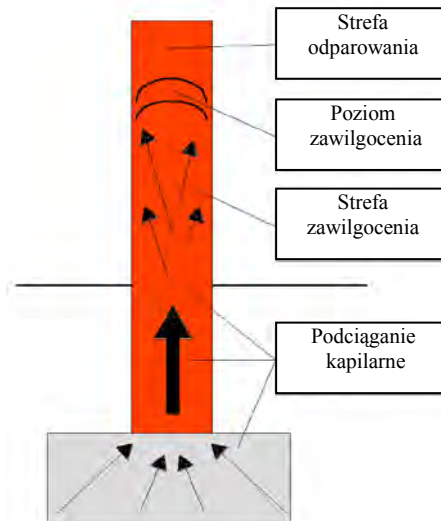
$\Theta$  - kąt zwilżania,

$r$  - promień kapilary,

$g$  - przyspieszenie ziemskie,

$\rho$  - gęstość cieczy.[18][37]

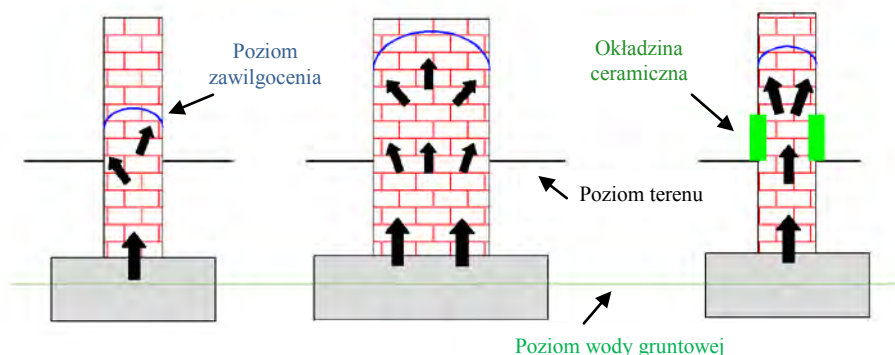
Jak łatwo zauważyć, zmiennymi niezależnymi od nas są  $\sigma$ ,  $g$  i  $\rho$ , natomiast możemy, poprzez mniejszą lub większą ingerencję w strukturę muru, wpływać jedynie na wartość parametrów  $r$  i  $\Theta$ . Obydwa te parametry mogą być zmienione poprzez stosowania materiałów iniekcyjnych o działaniu hydrofobizującym bądź uszczelniającym. W sposób szczegółowy ich działanie omówione zostanie w dalszej części pracy.



Fot. 3.16 Schematyczny podział muru na strefy: poboru wody, zawilgocenia i odparowania

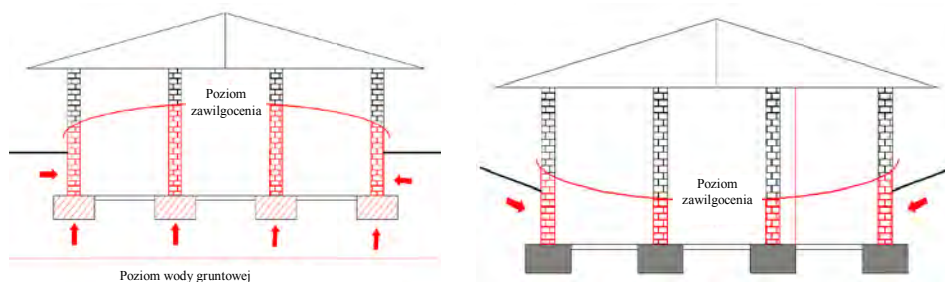
Na rysunku 3.15 przedstawiono schematyczny podział muru na strefy: poboru wody, zawilgocenia i odparowania. Wynika z tego, że w chwili równowagi (to jest przy stałym poziomie zawilgocenia) wydajność pochłaniania wody (czyli ilość dostarczonej wody), jest równa wydajności dyfuzyjnego parowania (ilość wyparowanej wody). Dlatego też w grubym murze wysokość podciągania kapilarnego jest większa niż w murze o mniejszym przekroju, powierzchnia odparowania musi zrównoważyć większą powierzchnię napływu. Wykonanie szczelnej

okładziny (ceramika, tynk cementowy) powoduje pogorszenie sytuacji, tworzy się coś w rodzaju komina, powodującego podciąganie wilgoci jeszcze wyżej. Sytuację tę obrazuje Rys 3.16.



Fot. 3.17 Schematyczna zależność poziomu zawilgocenia od grubości muru

Ponadto, w przypadku zawilgacania na skutek podciągania kapilarnego, wysokość zawilgocenia ścian wewnętrznych jest wyższa niż ścian zewnętrznych. Odwrotnie będzie w przypadku zawilgacania wodą rozproszoną (pochodzącą np. z opadów), tutaj poziom zawilgocenia ścian zewnętrznych będzie nieregularny i z reguły wyższy niż ścian wewnętrznych.



Fot. 3.18 Poziom zawilgocenia przy podciąganiu kapilarnym i oddziaływaniu wody rozproszonej

### Woda opadowa

Bezpośrednie oddziaływanie wód opadowych. Deszcz, śnieg, szron to czynniki, przed którymi bronili się budowniczowie historycznych, czy zabytkowych dziś już, obiektów. Daleko wysunięte okapy, strome dachy, to elementy kształtujące formy architektoniczne obiektów. Ładny dach stanowi ozdobę budynku, jednak im bardziej skomplikowany dach, tym większa możliwość przecieków i zalewania wnętrza budynku. Odpowiednie ukształtowanie i szczelność koszy, kalenic, połaci dachowych, stan rynien, rzygaczy i rur spustowych, dbałość o ich

stan techniczny i bieżące naprawy to podstawowy obowiązek mieszkańców lub użytkowników. Natomiast spływająca z połaci dachowych nieodprowadzona od budynku woda powoduje skutki opisane powyżej, tyle że szybciej zauważalne. Zacinanie deszczu nie stanowi zagrożenia, o ile woda nie wnika w grunt bezpośrednio przy ścianie lub pod izolację pionową ściany. Większe zagrożenie ma natomiast tzw. woda rozbryzgowa. Krople deszczu po odbiciu od opasek często zawilgacają niezabezpieczony pas przyziemia.

### **Wilgoć technologiczna**

Zawilgocenia powstają w wyniku naturalnej wilgoci wbudowywanych materiałów oraz prowadzenia robót mokrych. Źródło to ma szczególne znaczenie w przypadku budynków wznoszonych w technologii tradycyjnej z dużym udziałem procesów mokrych. W trakcie eksploatacji budynku przegrody te powinny stopniowo wysychać, a długość okresu wysychania zależy od rodzaju użytego materiału, konstrukcji obiektu i grubości przegrody oraz od temperatury i wilgotności względnej powietrza. Zwykle się przyjmuje, że czas wyprowadzania wilgoci technologicznej to okres około 1,5 roku.

Zmiany, jakie dokonały się na przestrzeni ostatnich lat w budownictwie wyznaczyły nowe przedziały czasu wyprowadzania wilgoci technologicznej z obiektów. Niestety okres ten uległ wyraźnemu wydłużeniu. Wpływ na to miały: zmiany w kolejności robót budowlanych oraz skrócenie czasu realizacji obiektów. Ze względu na sezonowość budownictwa, jeszcze przed nadejściem mokrych i chłodnych dni, niewykończone objekty są docieplane (najczęściej styropianem o dużym oporze dyfuzyjnym). Prace wykończeniowe, charakteryzujące się dużą ilością robót mokrych (tynkarskich, posadzkarskich, malarskich), wykonywane są w szczelnych najczęściej niedostatecznie wentylowanych obiektach. Terminowość realizacji wymusza oddawanie do użytkowania budynków, które bardzo często są wewnątrz jeszcze wilgotne. Niedostatecznie ogrzewane (w związku z kosztami), „opakowane” izolacją uniemożliwiająca odparowywanie wilgoci na zewnątrz, z wstawionymi szczelnymi elementami stolarki wysychają znacznie dłużej niż przez wspomniane 18 miesięcy.

### **Wilgoć kondensacyjna**

Związana z wykraplaniem się nadmiaru pary wodnej, występuje przede wszystkim w pomieszczeniach gdzie odbywają się procesy mokre (pranie, suszenie, gotowanie). Do podstawowych przyczyn kondensacji pary wodnej możemy zaliczyć: zbyt małą izolacyjność termiczną ścian, bardzo dużą bezwładność termiczną budynku oraz niewydolność instalacji wentylacyjnej.

W zimie ogrzane wewnątrz powietrze skrapla się w zetknięciu z zimnymi murami. W okresie wiosenno-letnim natomiast, masywne, grube ściany, stropy lub sklepienia nagrzewają się stosunkowo wolno, dlatego też napływające z zewnątrz cieplejsze powietrze (głównie w okresie wiosennym) w zetknięciu

z chłodną powierzchnią przegrody skrapla się. Problemy związane z inercją termiczną mogą dotyczyć zarówno poszczególnych elementów, jak i budynku.

### **Wilgoć sorpcyjna**

Higroskopijność materiałów budowlanych to zdolność pobierania z otoczenia pary wodnej. Związki takie wiążąc parę wodną ulegają rozpuszczeniu i powodują zawilgocenia. Ich objawem są nieregularne, wilgotne lub mokre plamy, pojawiające się i znikające w zależności od warunków atmosferycznych.

Porowate, mineralne materiały budowlane gromadząc cząstki wody na ściankach porów i oddając je, zależnie od względnej wilgotności powietrza, dążą do osiągnięcia stanu wilgotnościowej równowagi z otoczeniem. Ten proces jest niezależny od obecności soli i jest określany mianem sorpcji. W razie obecności soli, wchłaniają one wilgoć z otoczenia zgodnie ze swoimi higroskopijnymi właściwościami [18][37].

Obciążenie wilgocią higroskopijną ma miejsce, gdy w murze na jego powierzchni nagromadzone są większe ilości soli. Solami są przeważnie siarczany, chlorki i azotany, często razem tworzące złożone kompleksy. Sole wpływają na higroskopijność materiałów budowlanych, a więc ich zdolność do wiązania wody z fazy gazowej (pary wodnej).

Zawartość wilgoci w materiale budowlanym zależy zawsze od istniejącej wilgotności powietrza. W związku z tym mówi się i o tzw. wilgotności równowagowej. Nagromadzone w strukturze materiału sole mogą poziom tej wilgotności równowagowej bardzo podwyższyć. W jakim stopniu, to zależy od właściwości higroskopijnych soli, czyli ich zdolności wiązania wody. Największą higroskopijność posiadają szczególnie łatwo rozpuszczalne azotany, po nich wśród sprawców szkód budowlanych są chlorki. Najmniejsze własności higroskopijne wykazują siarczany. Silne zasolenie i tym samym higroskopijne obciążenie wilgocią muru może sprawiać wrażenie istnienia wilgoci podciąganej kapilarnie. Dlatego też poprzez sporządzenie bilansu wilgoci, w sensie analizy stanu budynku, należy określić stopień higroskopijnego przesiąknięcia wilgocią, tak, aby móc następnie zaplanować odpowiednie kroki naprawcze. Rozpoznanie szkód spowodowanych przez wilgoć higroskopijną sprawia zwykle problemy. Wskaźnikiem istnienia tego rodzaju obciążenia są plamy wilgoci z wykwitami solnymi na powierzchniach elementów budowlanych [37].

### **Pochodząca z awarii instalacji**

Przyczyną zawilgocenia przegród budowlanych, może być także woda pochodząca z awarii instalacji wodociągowej, CO czy też kanalizacyjnej. Do tego typu awarii dochodzi zarówno w nowych, jak i starszych budynkach. Starsze budynki są wyposażone w przewody sieci wodociągowej wykonane z rur stalowych i żeliwnych. Rury te najczęściej są już mocno skorodowane, co może prowadzić do powstawania przecieków i zalewania pomieszczeń. W przypadku

nowych sieci wodociągowych główną przyczyną zalewania mieszkań są najczęściej pęknięcia wszelkich elastycznych elementów instalacji.

### **3.5. NEGATYWNE SKUTKI ZAWILGOCENIA BUDYNKU**

W celu uzmysłowienia wagi problemu należy również w skrócie omówić, jakie są skutki nadmiernego zawilgocenia. Uszkodzenia substancji budowlanej, czy też szkody materiałowe, których sprawcą jest woda, można podzielić na trzy kategorie [37]:

- Fizyczne, na które wpływ mają: ruchy podłoża, uszkodzenia wywoływane przez mróz, zmiany temperatury, utrata ciepła, rysy skurczowe i powstające na skutek pęcznienia, zmiany materiałowe, przemoknięcia ścian.
- Chemiczne, na które składają się: wykwity solne, rozsadzanie na skutek pęcznienia, szkody powodowane przez mróz i sól używaną do topienia pokrywy śnieżnej i lodowej, wypłukiwanie wapna, plamy rdzy, korozja chemiczna.
- Biologiczne, czyli: mikroorganizmy, naloty glonów, porost mchu, obrosnięcie porostami, zagrzybienie, porost pleśni, zanieczyszczenia.

Te trzy rodzaje zniszczenia substancji materiałów budowlanych mają jeden wspólny mianownik: główną przyczyną zachodzenia tych procesów jest bezpośrednio lub pośrednio wilgoć. Negatywne oddziaływanie wilgoci nie ogranicza się jedynie do samych materiałów i elementów obiektu. Pośrednio wpływ ten jest równie istotny w przypadku ludzi przebywających w zawilgoconych pomieszczeniach. W tekście zamieszczonym poniżej scharakteryzowano najważniejsze problemy związane z nadmiernym zawilgoceniem.

#### **Obniżenie wytrzymałości materiałów**

Podstawowym problemem jest degradacja materiałów wykończeniowych: tynków, malatur, wszelkiego rodzaju materiałów okładzinowych oraz elementów drewnianych i drewnopochodnych. Na skutek ich niewielkiej odporności na wilgoć dochodzi często do nieodwracalnych zniszczeń. Nie bez znaczenia pozostaje również wpływ zawilgocenia na elementy konstrukcyjne obiektu.

W przypadku murów największe zniszczenia obserwujemy w przyziemiu (brak izolacji) i na koronie murów (w przypadku braku elementów osłaniających). Spływająca woda prowadzi również do uszkodzeń lica, efekt ten jest szczególnie widoczny w murach o zmiennej grubości. Zniszczeniom ulegają zarówno mury z ceramiki jak i kamienia.

Przemieszczanie się wilgoci w murze w pierwszym etapie powoduje rozpuszczanie substancji wiążących zapraw i uszkodzenie spoin lub też ich całkowite wymycie. Proces ten powoduje przede wszystkim woda opadowa spływająca w kierunku gruntu. W konsekwencji następuje obniżenie nośności pozbawio-



nych spoin partii muru. Kolejnym etapem jest systematyczne oddzielanie się cegieł, kamieni od muru. Przy intensywnej zmianie poziomu podciągania kapilarnego, wspomniane zjawisko może powodować również woda znajdująca się w gruncie.

Zawilgocone materiały ulegają przyspieszonemu niszczeniu również na skutek cyklicznego zamrażania i odmrażania wody zawartej w porach i kapilarach. Woda znajdująca się w porach materiału i kawernach muru zamarzając zwiększa swoją objętość, co powoduje zniszczenie materiału. Degradacja na skutek tzw. szkód mrozowych jest szczególnie widoczna na elewacjach południowych obiektów ze względu na wielokrotne powtarzanie się procesów zamarzania i odmrażania w ciągu jednego sezonu. Zawilgocenie materiałów powoduje również przyspieszenie korozji chemicznej elementów metalowych, które mogą znajdować się w murach.



Fot. 3.19 Zniszczenia korony murów z cegły ceramicznej spowodowane działaniem wód opadowych



Fot. 3.20 Zniszczenia korony murów z kamienia spowodowane działaniem wód opadowych

### **Obniżenie izolacyjności cieplnej przegrody**

Ochrona przed wilgocią i izolacja cieplna nie mogą być rozważane i oceniane w sposób odrębny, jako że niedostateczna izolacja przed wilgocią redukuje izolację cieplną, a to z kolei może prowadzić do szkód powodowanych przez wilgoć wskutek jej kondensacji. Wilgoć kondensacyjna występuje bowiem, przede wszystkim w pomieszczeniach ze zbyt wysoką wilgotnością powietrza, niezabezpieczonych albo niedostatecznie zabezpieczonych przed utratą ciepła, z zimnymi ścianami zewnętrznymi, niedostatecznie albo źle wietrzonych.

Wilgotny mur poddawany jest, zgodnie z naturą rzeczy, znacznym termicznym obciążeniami. W okresach mrozu powstaje w powierzchniowych obszarach zawilgoconego muru wysokie ciśnienie powodowane przez zamarzającą wodę. To prowadzi do stopniowego zniszczenia struktury, uszkodzeń tynku i kamienia oraz do powstawania pęknięć i rys, co z kolei powoduje zwiększenie wchłaniania

nia wody. Już niewielki stopień zawilgocenia muru powoduje drastyczne zmniejszenie izolacji cieplnej, jako że wilgoć zwiększa przewodnictwo cieplne i tym samym pogarsza ekonomiczną sytuację budynku na skutek wyższych kosztów energii [18][37][45].

Ciała kapilarno-porowate zmieniają swoje właściwości pod wpływem wody, która może wnikać w głąb materiału, wypełniając całkowicie lub częściowo jego pory. Następuje wzrost przewodności cieplnej materiału w stosunku do stanu suchego, ponieważ woda o przewodności cieplnej ok.  $0,54 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$  wchodzi na miejsce powietrza o przewodności cieplnej ok.  $0,024 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$ .

Już kilkuprocentowy wzrost zawilgocenia powoduje znaczne, dodatkowe straty ciepła i możliwość przemarzania zawilgoconych przegród. Przykładowo: cegła ceramiczna w warunkach średnio wilgotnych ma współczynnik przewodzenia ciepła  $\lambda=0,77 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$ , a dla wilgotności 15% wynosi on już około  $1,6 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$ . Ponad dwukrotny wzrost  $\lambda$ , w przypadku murów jednowarstwowych, powoduje analogiczne obniżenie oporu cieplnego muru [18].

### **Procesy niszczenia związane z występowaniem soli**

Sole rozpuszczalne w wodzie należą do najgroźniejszych czynników niszczących obiekty budowlane. Dość często można się spotkać ze stwierdzeniem, że to właśnie one są przyczyną największych zniszczeń w obrębie przyziemia budynku. Ich wysokie stężenia mogą prowadzić niekiedy do całkowitego zniszczenia zasolonych partii budynku. Nośnikiem soli w materiałach budowlanych jest woda, a zniszczenia powstają na skutek procesów krystalizacji soli podczas jej odparowywania. Dlatego też wysolenia w dużej mierze odpowiadają miejscom o podwyższonej wilgotności.

Do najczęściej występujących w obiektach soli zaliczyć można: siarczany, chlorki, azotany oraz węglany sodu, potasu, wapnia, amonu oraz żelaza. Pod względem mineralogicznym do najbardziej rozpowszechnionych soli należą: Halit, Sylwin, Bischofit (Chlorki); Nitronatryt, Nitrokalcyt, Nitrokalit, Nitromagnezyt (Azotany); Mirabilit, Arkanit, Epsomit, Kizeryt, Tenardyt, Gips (Siarczany); Termonatryt, Natron (Węglany). W obiekcie niezmiernie rzadko występuje tylko jeden rodzaj soli. W rzeczywistości najczęściej mamy do czynienia z kryształami o mieszanej budowie [50][130].

Z punktu widzenia chemicznego sole to substancje powstające w wyniku reakcji zobojętniania kwasu zasadą. Odczyn soli zależy od tego, jakie substancje brały udział w procesie jej tworzenia. W przypadku mocnego kwasu i zasady oraz słabego kwasu i zasady będzie on zbliżony do obojętnego. Sole mogą mieć również odczyny kwaśne przy mocnym kwasie i słabej zasadzie i zasadowe w układzie odwrotnym. Pamiętać należy, że związki te mogą wtedy reagować z materiałami budowlanymi tak jak odpowiadające im kwasy i zasady. Z punktu widzenia budownictwa największe znaczenie mają sole łatwo rozpuszczalne w wodzie, a więc takie, w których dość łatwo dochodzi do rozpadu na jony.

Skład chemiczny soli jest czynnikiem odpowiadającym za stopień zagrożenia. Ma on bezpośredni wpływ zakres oraz intensywność procesów niszczących związanych z obecnością tych związków w materiale.

Nadmierne zasolenie jest problemem przede wszystkim starych obiektów, które nie posiadają izolacji, a co za tym idzie narażonych na stały kontakt z wilgocią. Problem ten może dotyczyć jednak również obiektów zabezpieczanych, w których izolacje okazały się niedostateczne lub też użyte materiały posiadały wysokie zasolenie pierwotne. Pamiętać należy, że woda wnika, a następnie przemieszczająca się w materiałach jest pełna zanieczyszczeń. Takimi zanieczyszczeniami są również rozpuszczone w niej sole. Do źródeł o największym znaczeniu możemy zaliczyć sole:

- zawarte w materiałach budowlanych,
- podciągane w postaci rozpuszczonej z gruntu,
- trafiające wraz z opadami atmosferycznymi,
- wprowadzane podczas zabiegów konserwacyjnych i impregnacyjnych.

Surowce, z których wytwarzane są materiały budowlane zawierają określone ilości soli rozpuszczalnych. Dodatkowo w procesie wytwarzania materiałów oraz ich wbudowywania mogą powstawać kolejne związki. Dość duże stężenia soli budowlanych występują w spoiwach: cemente, gipsie i wapnie, ale również w materiałach murowych. W przypadku obiektów zabytkowych, duże ilości soli trafiają do murów wraz z wilgocią podciąganą z gruntu. W związku z tym, że w obrębie starych murów często znajdowały się doły z nieczystościami, zabudowania z inwentarzem, w gruncie znajdują się duże ilości azotanów, azotynów i chlorków. Rozkład obumarłej roślinności powoduje dalsze podwyższenie stężeń tych związków w obrębie obiektów. Duża ilość chlorków powodowana jest stosowaniem soli w okresie zimowym. Sól trafia wtedy wraz z wodą do gruntu, lub też w postaci „błota pośniegowego” bezpośrednio na mury przyziemia. Głównym źródłem soli z grupy siarczanów są reakcje materiałów z zanieczyszczonym powietrzem, oraz efekt tzw. kwaśnych deszczów. Woda deszczowa wraz z rozpuszczonymi tlenkami kwasowymi obecnymi w zanieczyszczonej atmosferze wnika w głąb cegieł, kamieni i zapraw umożliwiając przemiany chemiczne prowadzące do degradacji murów.

Również źle dobrane metody i środki stosowane w pracach konserwatorskich i mogą być przyczyną wtórnego zasolenia obiektów. Przykładem takich prac jest oczyszczanie elewacji murów środkami zawierającymi kwasy lub zasady.

Mechanizm korozyjnego działania soli opiera się na procesach chemicznych i fizycznych, a substancją warunkującą procesy niszczenia jest woda. Sole jako substancje stałe nie przemieszczają się samoczynnie w materiałach. Dlatego też w procesach korozyjnych udział mają te, które bardzo dobrze i dobrze rozpuszczają się w wodzie. Zjawisko przemieszczania się soli nazywamy migracją do powierzchni. W postaci roztworu docierają wszędzie tam gdzie transportowana

jest woda, po jej odparowaniu krystalizują. Do najgroźniejszych procesów związanych z solami zalicza się: krystalizację, higroskopijność, hydratację (uwodnienie), wzrost stężenia, zmianę odczynu roztworu.

Niszczące działanie soli opiera się na zjawisku związanym z krystalizacją i powiększaniem się ich objętości. Powstające ciśnienie jest wystarczające, by w materiale spowodować pękanie ścianek porów, rozluźnianie warstw powierzchniowych, a w następstwie prowadzić do jego rozpadu ziarnistego, łuszczenia się, pęknięcia i rozpadania. Dla znacznej grupy soli ciśnienie to ma wartość znacznie powyżej 1000 atm., a może sięgać nawet 2400. Siły towarzyszące procesowi krystalizacji są tak duże, że po kilku cyklach nawet najbardziej wytrzymałe cegły, kamienie i zaprawy ulegają niszczeniu [6][50][130].



Fot. 3.21 Korozja solna tynków w murze z kamienia wapiennego



Fot. 3.22 Korozja solna muru z kamienia wapiennego

Destrukcyjne działanie soli może mieć efekt wieloraki. Przy ciągłym transporcie roztworu soli, jej krystalizacja następuje na powierzchni elementu. Możemy wtedy mówić o mniejszym bezpośrednim zagrożeniu destrukcją, ale znacznym pogorszeniu estetyki powierzchni materiału. Sole na powierzchni materiału krystalizować mogą w postaci plam, zacieków, wykwitów, puszystych nalotów i szklistych powłok. Forma ta zależy rodzaju i ilości soli, a również od warunków, w jakich następuje krystalizacja.

W sytuacji, gdy prędkość dostarczania roztworu jest mniejsza, płaszczyzna odparowywania znajduje się wewnątrz muru. Sole krystalizują wówczas w warstwach tynku, na jego styku z murem lub wewnątrz materiału murowego. Do pewnego czasu brak jest widocznych efektów degradacji, następnie dochodzi do uszkodzeń znacznie poważniejszych niż w pierwszym przypadku. Uszkodzeniu ulegają wtedy całe fragmenty wypraw tynkarskich, czy też zewnętrznych powierzchni murów.

Pamiętać należy, że sole po procesie krystalizacji w porach, kapilarach i na powierzchni elementu pozostają nadal łatwo rozpuszczalne. Po dostarczeniu

niezbędnej ilości wilgoci przechodzą do roztworu, a przy zmianie warunków krystalizują po raz kolejny. Proces ten w zależności od warunków atmosferycznych może przebiegać kilkunastokrotnie powodując kolejne zniszczenia.

Większość soli wykazuje właściwości higroskopijne, tak więc do rozpuszczania nie potrzebuje wody w postaci ciekłej. Wystarczające jej ilości pobierają z wilgotnego powietrza. Efektem takiego procesu są lokalne zawilgocenia, widoczne na materiale murowym i tynkach, w formie ciemnych i wilgotnych plam. Materiały zawierające duże ilości soli pozostają wilgotne przez długi okres w ciągu roku.

Kolejną niekorzystną właściwością części soli budowlanych jest możliwość ich uwadniania. Takie same pod kątem chemicznym sole mogą tworzyć różne kryształy. Zmiana stopnia uwodnienia powoduje również zmianę objętości kryształów. W określonych warunkach temperaturowych nawet sole, które już wykryzalizowały mogą zmienić swoją objętość. Ciśnienie wspomnianej hydratacji jest na tyle wysokie, że powoduje podobne skutki jak przy krystalizacji [50][130].

Wpływ stężenia soli na procesy niszczenia jest oczywisty. Wraz z jego wzrostem rośnie ilość soli wypełniających kapilary. Mogą być one wypełnione szczelniej i wywierać na nie silniejszy nacisk.

Do oceny stopnia zagrożenia jakie niesie za sobą występowanie soli rozpuszczalnych stosuje się poniższą tabelę. Wyniki badań można przyporządkować trzem przedziałom. Na uwagę zasługują znacznie wyższe wartości dopuszczalne dla siarczanów. Związane to jest z obecnością tych związków już na etapie produkcji materiałów.

Tab. 3.7 Ocena stopnia zasolenia na podstawie stężenia soli [50]

Rodzaj soli	Niskie [%]	Średnie [%]	Wysokie [%]
<b>Chlorki</b>	< 0,2	0,2 – 0,5	> 0,5
<b>Azotany</b>	< 0,1	0,1 – 0,3	> 0,3
<b>Siarczany</b>	< 0,5	0,5 – 1,5	> 1,5

Uzyskane wyniki pozwalają wnioskować o zagrożeniu występującym w badanej partii muru, rozkładzie zasolenia, a także planować ewentualne działania naprawcze. Na ich podstawie projektuje się prace mające na celu odsolenie lub też ograniczenie procesów związanych z niszczącym działaniem soli.

### **Wzrost zagrożenia korozją biologiczną**

Pod pojęciem korozji biologicznej, zwanej też biodeterioracją, w budownictwie rozumiemy zróżnicowane formy niszczenia elementów budowli wywołane działaniem organizmów żywych, tzw. szkodników biologicznych. Są to głównie rośliny zielone, grzyby domowe, grzyby pleśniowe, owady, glony, porosty i bakterie. Podobnie jak w przypadku soli warunkiem występowania większości

wymienionych organizmów jest wilgoć. Jej podwyższony poziom odpowiada za intensyfikację procesów korozyjnych.

Kolejnym typem klasyfikacji jest podział na procesy odpowiedzialne za powstawanie zjawisk korozji materiałów i obiektów budowlanych. Gdzie wyróżnić możemy: chemiczną asymilacyjną i dysymilacyjną korozję biologiczną. Pierwsza jest najczęstszą formą tego procesu i ma miejsce wówczas, gdy materiał jest degradowany z racji swej wartości odżywczej. Druga chemiczna dysymilacyjna biodeterioracja (korozja) występuje, gdy metabolity drobnoustrojów uszkadzają materiał [34].

Kolejnym z podziałów jest klasyfikacja skutków, z jakimi mamy do czynienia w trakcie korozji budowlanej, na: higieniczno – sanitarne, techniczne i estetyczne. Skutki higieniczno – sanitarne, polegające na pogorszeniu zdrowotności przebywających w obiektach ludzi i zwierząt. Obecność wyżej wymienionych organizmów może powodować schorzenia dróg oddechowych, narządów wzroku, stawów oraz osłabienie odporności organizmu. Skutki techniczne polegają przede wszystkim, na obniżeniu wytrzymałości elementów i konstrukcji, co prowadzi do ich powolnej degradacji. Porażenie korozją biologiczną ma znaczenie również estetyczne, polegające na obniżeniu walorów estetycznych porażonych elementów.

## 4. INIEKCJE

Przez pojęcie iniekcja w murze rozumiemy wprowadzenie iniektu, który ma za zadanie wzmocnienie muru przez wypełnienie rys i pustek, lub wytworzenie przepony wodoszczelnej.

Iniektami nazywamy związki, które wprowadzone w dany ośrodek powodują, w wyniku zachodzących procesów wiązania, twardnienia lub żelowania, zmianę jego cech fizycznych [66]. Iniekcje zasadniczo możemy podzielić na: iniekcje wzmacniające i iniekcje blokujące kapilarny transport wody.

Iniekcje wzmacniające stosuje się w ścianach, szczególnie starych i zniszczonych, niejednorodnych w środku. Występują w nich również niewypełnione fugi, mikrorysy czy nawet większe pęknięcia, a także niejednorodności w budowie (wypełnienie drobnym kruszywem lub zaprawą środkowej części muru). Iniekcja w takiej sytuacji wymaga podjęcia pewnych środków zapobiegawczych: przede wszystkim trzeba zasklepić pustki i pęknięcia w murze. Do tego celu stosuje się specjalne, chłonne kapilarnie upłynnione zaprawy (suspensje), mające zdolność wypełniania niewielkich nawet pustek i rys czy też scalania luźnych składników muru [37][64][67][122].

Iniekcje mają na celu wytworzeniu przepony blokującej podciąganie wilgoci. Do tego rodzaju iniekcji dwa rodzaje stosowanych preparatów: uszczelniające i hydrofobizujące. Pierwsze zmniejszają promienie porów, kapilar i ograniczają podciąganie kapilarne. Natomiast preparaty hydrofobizujące ścianki porów i kapilar powodują zmianę kąta zwilżania do wartości powyżej 90°. Wówczas ruch wilgoci z dołu zostaje uniemożliwiony [5][110][134].

### 4.1. INIEKCJE CHEMICZNE – INFORMACJE PODSTAWOWE

Iniekcję wykonuje się w części cokołowej budynku, powyżej poziomu terenu, lub w ścianach fundamentowych, zarówno wewnętrznych, jak i zewnętrznych, powyżej poziomu obciążenia wodą pod ciśnieniem lub zalegającą wodą opadową. Iniekcji nie wolno przeprowadzać w obszarach muru narażonych na obciążenia wodą ciśnieniową [37][122].

Odstęp (zawsze osiowy) między otworami zależy od chłonności substancji muru, zdolności preparatu do penetracji w strukturę ściany oraz sposobu wykonywania iniekcji.

Im mniejszy odstęp otworów, tym większa pewność skutecznego wykonania przepony, jednakże należy brać tu pod uwagę także względy bezpieczeństwa budynku (zwłaszcza przy iniekcji wykonanej w słupach i filarach). Trzeba również pamiętać o konieczności usunięcia zniszczonego tynku do wysokości ok. 80 cm powyżej widocznej linii zawilgocenia [37][122].

Przy opracowywaniu projektu wykonania przepony poziomej należy brać pod uwagę tzw. czynniki niepewności (ryzyka), które trzeba uwzględnić i zminimalizować już na etapie projektu renowacji. Będą to: dobór preparatu iniekcyjnego (zależny m.in. od współczynnika przesiąknięcia wilgocią muru), rozstaw otworów (związany z ilością wilgoci w murze i zdolnością preparatu iniekcyjnego do penetracji), wspomnianą niejednorodność muru (występowanie rys) i pustek oraz sposób, w jaki preparat iniekcyjny przerywa podciąganie kapilarne [37][122].

#### **4.1.1. Historia stosowania iniekcji**

Początki metod iniekcyjnych sięgają lat 70-tych ubiegłego wieku. W Polsce zaczęto stosować iniekcję na większą skalę w latach 80-tych gdyż, jako zabieg stosunkowo prosty technicznie dawał możliwości osuszania murów lub wytwarzania w nich przepon przeciwwilgociowych. Z powodu, że większość obiektów wzniesionych do II Wojny Światowej nie posiadało w ogóle lub miało nieskuteczne poziome i pionowe izolacje przeciwwilgociowe ścian, techniki iniekcyjne stały się popularną metodą osuszania murów. Mimo teoretycznie poprawnych założeń tych metod w praktyce po wieloletnich badaniach wiele z nich okazało się nieskutecznych część mimo swej skuteczności zostało zastąpione przez metody prostsze albo bezpieczniejsze. Można tu przytoczyć przykład środka o nazwie handlowej Sarsil, który został wycofany z użycia gdyż wydzielał szkodliwe substancje lotne.

#### **Metoda Politechniki Krakowskiej**

Jest to metoda uszczelniająca i hydrofobizująca, ciśnieniowa. Preparat uszczelniający stanowi szkło wodne sodowe z wodą w stosunku 1:1 do 1:0,5 z dodatkiem fluorokrzemianu sodu w ilości 5-15% w stosunku do szkła wodnego. Preparat hydrofobizujący natomiast stanowią: żywica metylosilikonowa w ilości 10-15%, alkohol etylowy w ilości 50-60% i rozpuszczalnik organiczny zwykle w postaci benzyny łąkowej w ilości 30-35%. Kanały o średnicy 20 mm wierci się w rozstawie co 25 cm w dwóch rzędach przesuniętych względem siebie o połowę ich odległości. Rzędy znajdują się w odległości 10 cm. Preparat iniekcyjny wprowadza się pod ciśnieniem 0,4 MPa, zwiększając go w razie potrzeby. Najpierw wtłacza się środek uszczelniający, a następnie preparat hydrofobizujący. Fluorokrzemian przyspiesza twerdnienie. W wyniku odciągania przez alkohol wody od szkła wodnego następuje krystalizacja krzemianu sodowego [67].

#### **Termoiniekcja**

Metoda termoiniekcji jest metodą chemiczną hydrofobizującą, wytwarzającą przeponę i zapewniającą wstępne podsuszenie muru w krótkim czasie. Polega ona na nawierceniu w oznaczonym poziomie rzędu otworów co 15-20 cm o nachyleniu ok. 30° i następnie na skierowaniu do nich, specjalnym urządzeniem



termo-wentylacyjnym, ogrzewanego powietrza, co powoduje zmniejszenie zawilgocenia muru poniżej 9%. Następnie w nawiercone otwory wprowadza się preparat hydrofobizujący na ogół w sposób bezciśnieniowy. Proces poduszania muru trwa od jednej do kilku dób i zależy od pierwotnej wilgotności muru, a także jego grubości [99][100].

Do hydrofobizacji stosuje się zwykle roztwór żywicy metylosilikonowej w benzynie ląkowej, tzw. Sarsil H-1 4/R, lub roztwór tej żywicy w nietoksycznej izoparafinie (Sarsil H-15). Stosowanie niekiedy Ahydrosilu K, stanowiącego nietoksyczny roztwór tejże żywicy w ługu potasowym, jest niekorzystne ze względu na gorszą penetrację i długi czas twardnienia. Po wprowadzeniu preparatu hydrofobizującego mur poddaje się ponownie osuszaniu termodyfuzyjnym (z użyciem tych samych urządzeń) w celu odparowania rozpuszczalnika oraz przyspieszenia utwardzenia składników hydrofobizujących i dodatkowego obniżenia zawilgocenia hydrofobizowanej strefy [67][99][100].

### **Elektroiniekcja**

Metody te polegają na wykorzystaniu zjawiska elektroosmozy do wstępnego poduszania muru do wilgotności poniżej 10%. Tak przygotowany mur poddawany jest procesowi iniekcji bezciśnieniowej z użyciem preparatów hydrofobizujących. Wyróżnia się dwa etapy prac [109][111][119]:

- etap pierwszy - wstępne poduszanie muru do uzyskania wilgotności max 10%, uzyskiwane np. przez założenie instalacji elektrycznej zasilanej prądem stałym o napięciu 24V,
- etap drugi - wprowadzenie preparatów hydrofobizujących do wcześniej wykonywanych w murze kanałów. Jest nim m.in. SARSIL H-14 zawierający 20-50% żywicy metylosilikonowej, rozcieńczonej w rozpuszczalniku organicznym (zwykle w benzynie ląkowej) w stosunku 1:10 do 1:5. Ostatnio dla wyeliminowania toksycznej benzyny ląkowej stosuje się SARSIL H-15 na nietoksycznej izoparafinie.

Generalnie wśród metod elektroiniekcyjnych rozróżnić należy trzy zasadnicze: elektroosmozę z hydrofobizacją, elektroiniekcję dynamiczną i elektroiniekcję aktywną. Różnią się one między sobą technologią wykonania, a nadto tym, że w metodzie aktywnej stosuje się preparat ELUK również hydrofobizujący, a charakteryzujący się przewodzeniem prądu, co pozwala na wyeliminowanie spadku napięcia [82][109][111][119].

Biorąc pod uwagę długi i o ograniczonej skuteczności proces poduszania wstępnego metodą elektroosmozy jak i konieczność zakładania instalacji elektrycznej oraz wiercenia dodatkowych kanałów do osadzania elektrod obecnie nie zaleca się stosowania tych metod [82][109][111].

### **Iniekcja parafinowa**

Metoda opracowana przez metoda dr. inż. J. Wójcika z Olsztyna. Jest to odmiana iniekcji termicznej gdzie dzięki urządzeniu zwanemu termopaker możliwe jest nasączenie muru parafiną. W metodzie tej proces osuszania następuje równocześnie z samouszczelnianiem muru [146][147]. Ta metoda jest obecnie stosowana w firmowym systemie W-ART.

### **Iniekcje preparatami hydrofobowymi na bazie rozpuszczalników organicznych**

W skład płynów hydrofobowych stosowanych w latach 80-tych w naszym kraju wchodziła zawsze żywica metylosilikonowa, rozpuszczona zazwyczaj w benzynie lakowej. Płyny nosiły różne nazwy: Silak M 11, Silak M 114, , Sar-sil.

Po badaniach kontrolnych pod koniec lat 80-tych Państwowy Zakład Higieny zakazał używania płynów hydrofobowych zawierających lotne substancje szkodliwe dla zdrowia. Mogą one przenikać do pomieszczeń osuszanych budynków, zanieczyszczając powietrze w stopniu niebezpiecznym dla zdrowia innych użytkowników [82]. Stosowanie rozpuszczalników organicznych w iniekcji ma jeszcze jeden negatywny aspekt, powodują one bowiem pulweryzację spoiwa na skutek jego dehydratacji, co w efekcie prowadzi do osłabienia konstrukcji murów w strefie iniekcji. W celu zmniejszenia groźby niebezpiecznego zanieczyszczenia powietrza w pomieszczeniach węglowodorami aromatycznymi zawartymi w benzynie lakowej jedna z firm do sporządzania płynu hydrofobowego (płyn o nazwie Eluk) zastosowała alkohol etylowy zamiast benzyny [89].

Obecnie nie stosuje się środków hydrofobowych na bazie rozpuszczalników organicznych mimo ich dużej skuteczności, zostały one wyparte z rynku przez środki działające przy dużych wilgotnościach muru.

#### **4.1.2. Podział metod ze względu na działanie preparatu**

Jak już zostało wspomniane w punkcie 4 istnieją dwie grupy preparatów aplikowanych podczas wykonywania przepon metodami iniekcijnymi: uszczelniające i hydrofobizujące. Te pierwsze zmniejszają promienie porów, kapilar i ograniczają podciąganie kapilarne. Natomiast preparaty hydrofobizujące ścianki porów i kapilar powodują zmianę kąta zwilżania do wartości, przy której transport kapilarny jest niemożliwy.

#### **Preparaty hydrofobizujące**

Podstawowym kryterium przydatności określonego preparatu jest jego zdolność do hydrofobizacji materiału w wymaganym stopniu. Musi on jednocześnie wykazywać niezbędną zdolność penetracji w kapilarnie porowaty materiał, wykazujący mniejsze lub większe zawilgocenie. Preparat taki nie powinien ulegać w murze zmianom powodującym zanik jego właściwości hydrofobizujących. Efekt przepony uzyskuje się, gdy:

- preparat ma wymagane właściwości hydrofobizujące, jest rozpuszczalny w dobrym rozpuszczalniku i charakteryzuje się wymaganą zdolnością penetracji, co jest związane również z wielkością molekuł związku krzemorganicznego,
- materiał nasycony jest wystarczająco podatny na wnikanie preparatu hydrofobizującego, co jest związane z porowatością danego materiału oraz stopniem przesycenia,
- ilość użytego preparatu hydrofobizującego na 1 metr przekroju poprzecznego ściany jest wystarczająca.

Zostało potwierdzone doświadczalnie, że najlepsze efekty uzyskuje się stosując niskomolekularne substancje hydrofobizujące, rozpuszczone w dobrym rozpuszczalniku organicznym. Preparat taki dobrze się rozprzestrzenia w materiale, a żywica przyczepia się łatwo do podłoża i ulega pożądanej kondensacji. Preparaty, które po wprowadzeniu do muru mają działanie również uszczelniające, nie powinny zbyt szybko reagować, aby nie pojawiły się utrudnienia w ich penetracji. W związku z brakiem możliwości stosowania, w pomieszczeniach przeznaczonych do stałego pobytu ludzi, preparatów z rozpuszczalnikami organicznymi. Od kilkunastu lat powszechnie stosowane są preparaty rozcieńczane wodą [37][119] [122].

### **Preparaty uszczelniające**

Są to wodne suspensje różnych substancji mineralnych znajdujących się w stanie bardzo dużego rozdrobnienia, takich jak cementy, pyły krzemionkowe itp. Oczekiwane uszczelnienie materiału murowego trudno jest uzyskać. Przede wszystkim zdolność przemieszczania się w porach i kapilarach materiału zastosowanej substancji jest, jak można sądzić, niewielka, nawet wówczas, gdy ulega ona częściowemu rozpuszczeniu w wodzie.

Oczekiwanie, że rozpuszczone w wodzie składniki cementu i użyte dodatki złączą krystalizować w porach i kapilarach materiału i w ten sposób uszczelniać go, nasuwa wiele wątpliwości. Chodzi tu zarówno o zdolność rozprzestrzeniania się zastosowanej substancji w porowatym materiale, jak i fakt, że nawet w przypadku zaistnienia wzrostu kryształów pozostają mikropory stwarzające możliwość kapilarnego ruchu wody. Stosowanie w takich suspensjach, jako składnika dodatkowego wysokoalkalicznych związków, np. szkła wodnego itp., powoduje wprowadzanie do murów pierwiastków tworzących łatwo rozpuszczalne w wodzie sole, które mogą nie tylko dodatkowo zawilgacać mur, ale też powodują występowanie na jego powierzchni nieestetycznych, białawych wykwitów [37][101][109] [119] [111].

### **4.1.3. Podział metod pod względem wartości ciśnienia.**

Niezwykle istotnym parametrem jest ciśnienie robocze wykonywania iniekcji. W dużej mierze odpowiada ono za efekt wypełniania porów i kapilar w mu-

rze. Ze względu na jego wartość wyróżnia się trzy rodzaje iniekcji: grawitacyjną, niskociśnieniową, wysokociśnieniową. Rodzajem iniekcji niskociśnieniowej jest tzw. iniekcja impulsowa.

### **Metoda iniekcji grawitacyjnej**

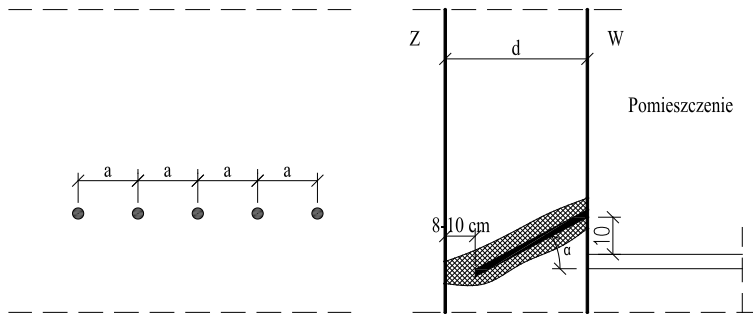
Metoda ta rozpowszechniona była w latach 70-tych XX wieku, obecnie zaś jest stosowana rzadziej. Do wykonywania iniekcji bezciśnieniowej nadają się preparaty o niskiej lepkości, takie jak silany, mikroemulsje silikonowe, preparaty na bazie krzemianów oraz ogrzane parafiny. Polega ona na wprowadzeniu środków chemicznych pod wpływem siły ciężkości w uprzednio wykonane otwory o średnicy 2 – 3cm, usytuowane pod kątem 15 – 45 °. Głębokość otworów sięga 3/4 przekroju ściany lub 8 – 10cm od powierzchni przeciwnej do nawierceń. Osiowy rozstaw otworów zależy od chłonności ściany, nie powinien on jednak przekraczać 10-12,5cm. Otwór taki powinien przecinać przynajmniej jedną spoinę poziomą. Przy grubościach ścian powyżej 60 cm zaleca się wykonywanie iniekcji dwustronnie, wówczas głębokość otworu winna się równać 2/3 grubości ściany. Roztwory wprowadza się przez perforowane końcówki węży gumowych osadzonych i uszczelnionych w murze. Węże są zakończone lejkiem, do którego wlewa się roztwory [35][59][66][109][149].

Doświadczenia praktyczne wskazują na możliwość wypełnienia tym sposobem makropor o średnicy większej od 0,1  $\mu\text{m}$ , a więc jedynie części porów transportujących kapilarnie wilgoć. Mimo że angielscy naukowcy S.J.J. Anson i W. D. Hoff w 1988r. opublikowali badania, w których udowodnili, że metoda iniekcji bezciśnieniowej jest mało skuteczna w porównaniu do metod ciśnieniowych, to do dzisiaj stosują ją uznani liderzy rynku izolacji [37][119][122].

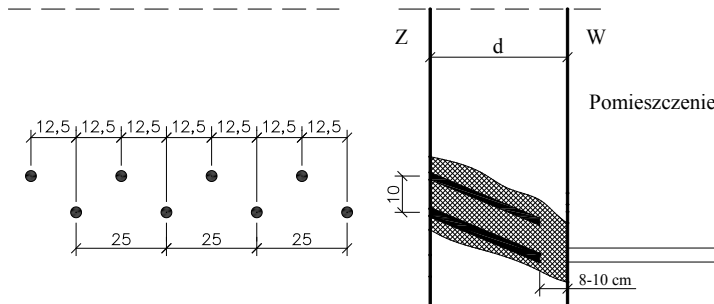
### **Metoda iniekcji niskociśnieniowej**

W odróżnieniu do poprzedniego sposobu wprowadzania iniektu podczas iniekcji niskociśnieniowej wykorzystuje się ciśnienie o wartości od 0,3 do 1,5 MPa. Trudno jest przy takim ciśnieniu liczyć na wypełnienie mikroporów kapilarnych o średnicy 0,01 – 0,1  $\mu\text{m}$ , mogą jedynie zostać wypełnione makropory kapilarne o średnicy większej niż 0,1  $\mu\text{m}$ . Zawartość makroporów w ceglach i zaprawach cementowych oraz cementowo-wapiennych jest duża. Dlatego też istnieje możliwość znacznego wypełnienia porów w przekroju przegrody budowlanej.

Odległość między otworami wykonanymi w dwóch rzędach wynosi 25cm, a pomiędzy rzędami 10cm. Przesunięcie otworów w rzędach wynosi 12,5cm. W innym rozwiązaniu, opartym na zagranicznych doświadczeniach praktycznych, proponuje się odległości pomiędzy otworami  $\varnothing$  12mm równą od 10 do 12cm, lub od 12 do 15cm, a odległość pomiędzy rzędami 8cm, w zależności od lepkości środka iniekcyjnego [119].



Fot. 4.1 Zalecenia geometryczne dotyczące iniekcji; przekrój przez ścianę zewnętrzną Z - środowisko zewnętrzne, W – środowisko wewnętrzne, d – grubość przegrody  $\alpha = 25^\circ$ , a – odległość między otworami 15-17cm, otwory średnicy 2-3 cm



Fot. 4.2 Rozmieszczenie dwóch rzędów otworów. Z - środowisko zewnętrzne, W – środowisko wewnętrzne, d – grubość przegrody

### Metoda iniekcji wysokociśnieniowej

Ten sposób uszczelniania dotyczy tylko murów o bardzo dużej wytrzymałości, gdyż podczas iniekcji jest wywierane duże ciśnienie, wynoszące od 1,5 do 10 MPa. Przeważnie stosuje się ciśnienie 2 –3 MPa. Do wypełniania kawern w murach i uszczelniania całych murów od strony gruntu wykorzystuje się piankę poliuretanową. Ogólnie przyjmuje się, że ciśnienie nie powinno być większe niż 1/3 wytrzymałości materiału na ściskanie, jednak w celu uzyskania większego niż 50 % wypełnienia porów wartość tę praktycznie przekracza się. Wartość wytrzymałości materiału na ściskanie powinna być, więc większa niż 4,5 MPa przy ciśnieniu 1,5 MPa i 30 MPa przy wartości maksymalnej ciśnienia równej 10 MPa. Dotyczy to przede wszystkim murów wykonanych z cegieł pełnych klasy, co najmniej 7,5, cegły klinkierowej lub klinkieru domowego [46][119][122].

Przy ciśnieniu przekraczającym 10 MPa sposób ten może być skuteczny w zakresie mikropilar o średnicy mniejszej niż 0,01  $\mu\text{m}$ . Popularnym środkiem iniekcyjnym było szkło wodne potasowe stosowane w ilości od 2 do 2,5

kg/m<sup>2</sup> przekroju. Produktami reakcji chemicznych są żel krzemionkowy i kwas metylokrzemowy. Stosuje się również poliuretany i epoksydy [119][122].

W murach starych, z którymi najczęściej jest do czynienia podczas wykonywania prac, iniekcja wysokociśnieniowa może spowodować lokalne zniszczenie słabej zaprawy wapiennej lub cegły [46][119][122].

### **Iniekcja impulsowa**

Iniekcja impulsowa polega na podawaniu pod ciśnieniem porcji środka iniekcyjnego, przy czym regulowane są: długość trwania impulsu (0,25 ÷ 2,5s), i przerwa pomiędzy impulsami (1min ÷ 10min). Zastosowana mikroemulsja silikonowo-siloksanowa wytwarza przeponę poziomą o grubości 25 ÷ 30 cm. Odwierty wykonuje się w odstępach 10÷12 cm, w jednym rzędzie, średnica otworów 18 ÷ 20 mm, a kąt nachylenia w stosunku do poziomu wynosi ok. 15°. Otwory mają długość o 5 cm mniejszą od grubości ściany. Odwierty oczyszcza się mechanicznie lub poprzez przedmuchiwanie sprężonym powietrzem. W wykonanych otworach mocuje się lance iniekcyjne lub iniektory [24].

Pompa do iniekcji pracuje automatycznie, niezbędne jest natomiast ustawienie częstości oraz czasu trwania impulsowego włączania preparatu iniekcyjnego. Czas trwania iniekcji uzależniony jest bezpośrednio od istniejących warunków fizycznych murów. Na początku procesu iniekcji ustawia się długie czasy iniekcji (impulsów) i krótkie przerwy pomiędzy nimi. Materiał na początku iniekowania jest w stanie przyjąć duże ilości preparatu. Wraz z upływem czasu impulsy są skracane i wydłużany jest czas przerw [24][37].

## **4.2. PREPARATY HYDROFOBOWE**

Środki do hydrofobizacji materiałów budowlanych były już stosowane dawna w budownictwie. Początkowo stosowano proste związki takie jak klej kostny, żelatynę, zaliczane do preparatów pochodzenia organicznego. Z czasem w użyciu znalazły się preparaty nieorganiczne: szkło wodne, kwas fluorowodorowy, woda barytowa. W niektórych przypadkach zastosowanie preparatu miało wręcz negatywny skutek na zabezpieczany materiał. Zachodzące procesy uboczne powodowały uszkodzenia struktury materiału, co sprawiało, że środki te były wykluczane z zastosowań konserwatorskich.

### **4.2.1. Związki krzemoorganiczne – Informacje ogólne i podział**

W związku z tym, że większość preparatów stosowanych do wytwarzania przepon, na zasadzie hydrofobizacji materiału, opiera się na związkach krzemoorganicznych w punkcie niniejszym omówione zostaną zasady powstawania i podział tych związków.

*Pierwszy związek krzemoorganiczny, otrzymał J. J. von Ebelmen w 1845 roku, a był to ester etylowy kwasu ortokrzemowego (tetraetoksysilan). W kolejnych latach 1863 – 1880 następował szybko rozwój syntezy związków krzemoorga-*

nicznych. W tym okresie Ch. Fridel i J. Craftis otrzymali pierwszy związek zawierający wiązanie krzemu z węglem (tetraetyloksysilan) :  $2\text{Zn}(\text{C}_2\text{H}_5)_2 + \text{SiCl}_4 \rightarrow 2\text{ZnCl}_2 + (\text{C}_2\text{H}_5)_4\text{Si}$ . Jednak największe zasługi w dziedzinie syntezy związków krzemoorganicznych ma F. S. Kipping, który w 1904 roku zastosował reakcję V. Grignarda do otrzymania związków krzemoorganicznych, dzięki czemu odkrył międzycząsteczkową kondensację silanoli. Reakcja ta, w następstwie prowadzi do otrzymania polisiloksanów, znanych jako związki polimerowe [75].

Krzem został zidentyfikowany, jako pierwiastek przez Antoine Lavoisiera w 1787. Humphry Davy, w 1800 r. błędnie uznał, że krzem jest związkiem chemicznym i opinia ta przetrwała aż do 1824 r. kiedy to Jöns Jacob Berzelius otrzymał czysty krzem z krzemionki  $\text{SiO}_2$ , przeprowadzając ją kwasem fluorowodorowym w  $\text{SiF}_4$  i redukując go potasem. Krzem w naturalnym środowisku występuje, jako krzemień. Krzemień - skała osadowa, skrytokrystaliczna, krzemionkowa (biochemiczna lub chemiczna), występująca w formie kulistych, bulwiastych, bochenkowatych lub soczewkowatych kongrecji w obrębie skał niekrzemionkowych reprezentowanych przez wapienie, margle, dolomity. Z utworami otaczającymi tworzy ostre granice, co odróżnia je od czertu. Zwykle jest pokryty jasną korą krzemionkową, bardziej miękką od samego krzemienia. Zawartość krzemionki w krzemieniu zwykle przekracza 90% masowych. Jest on zazwyczaj koloru czarnego, brunatnego lub szarego, zbity i bardzo twardy. Tworzy kongrecje (niekiedy skupienia warstwowe) głównie w wapieniach, marglach i opokach, zwłaszcza wieku kredowego i jurajskiego [55][63][68].

Krzem należy do tej samej grupy układu okresowego, co węgiel i ma do niego najbardziej zbliżone właściwości. Sam krzem jest pierwiastkiem czterowartościowym i jest mało aktywny chemicznie. W temperaturze pokojowej reaguje z fluorem, zaś po podgrzaniu reaguje z tlenem, tworząc krzemionkę (dwutlenek krzemu  $\text{SiO}_2$ ) oraz z fluorowcami. Występuje przeważnie w stopniu utlenienia +4, zaś sporadycznie, jako -4. Krzem tworzy łańcuchy krzem-krzem, krzem-azot-krzem oraz krzem-tlen-krzem. Istnieje bardzo liczna grupa związków krzemu (około 300.000), lecz jest ich znacznie mniej niż związków węgla, (który należy do tej samej grupy układu okresowego pierwiastków i posiada bardzo zbliżone właściwości) [75] [21] [54] [63][68].

Krzem nie ulega działaniu kwasów za wyjątkiem mieszaniny kwasu azotowego i fluorowodorowego w wyniku reakcji, tworzy się kwas fluorokrzemowy ( $\text{H}_2[\text{SiF}_6]$ ). Kwas ten po ogrzaniu rozkłada się w następujący sposób [21][54][75]:



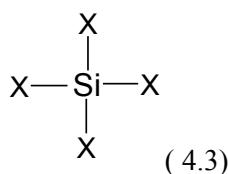
Sam krzem bardzo łatwo rozpuszcza się w alkaliach:



Związki krzemooorganiczne są to związki organiczne, których cząsteczki zawierają atom krzemu czterowartościowego związany z atomami wodoru, węgla, fluorowca, tlenu lub azotu. Związki krzemooorganiczne dzielimy na dwie grupy: związki zawierające w cząstce jeden atom krzemu – monomery oraz związki zawierające dwa lub więcej atomów krzemu – oligomery i polimery [21][54][75].

Monomery są głównie wykorzystywane do otrzymywania preparatów hydrofobizujących, gdyż samoczynnie lub w obecności katalizatora ulegają hydrolizie. W preparatach stosowanych do iniekcji monomery występujące w formie wolnej występują rzadko, częściej w ich skład wchodzi oligomery i polimery siloksanowe.

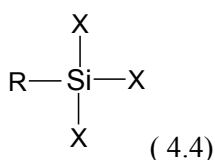
Tab. 4.1 Grupy funkcyjne monomerów [75].



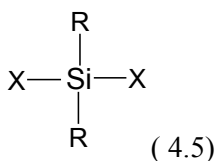
Czterofunkcyjne – związki, w których występują cztery grupy mogące wchodzić w reakcję tworząc polimery usieciowane przestrzennie

Gdzie:

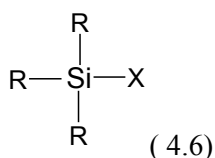
X – F, Cl, Br, J lub grupa alkoksylova, aryloksylova lub acetoksylova.



Trójfunkcyjne, czyli związki, w których występują trzy grupy reaktywne, w wyniku ich polikondensacji otrzymujemy polimery przestrzenne usieciowane



Dwufunkcyjne, czyli związki o dwóch grupach reaktywnych i dwóch rodnikach węglowodorowych, tworzą one polimery liniowe



Jednofunkcyjne, o jednej grupie reaktywnej zdolne do tworzenia dwusiloksanów lub wykorzystywane do zakończenia łańcuchów polisiloksanów

Związki zawierające w cząstce jeden atom krzemu – monomery [75]:

- Związki zawierające wiązanie Si-C
  - Alkilo- i arylosilany o ogólnym wzorze  $\text{R}_n\text{SiH}_{4-n}$
  - Alkilo- i arylochlorosilany o ogólnym wzorze  $\text{R}_n\text{Si}(\text{OH})_{4-n}$



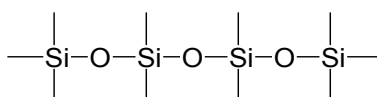
- Związki zawierające wiązanie Si – O – C
  - Alkoksy- i aryloksysilany o ogólnym wzorze  $(RO)_4Si$
  - Alkoksy- i aryloksychlorosilany o ogólnym wzorze  $(RO)_nSiCl_{4-n}$
  - Alkoksy i aryloksysilanole o ogólnym wzorze  $(RO)_nSi(OH)_{4-n}$

Związki wielkocząsteczkowe takie jak oligomery i polimery otrzymujemy z monomerów pochodnych silanu. Do najczęściej stosowanej metody zaliczamy metodę opartą na hydrolizie grup funkcyjnych, która prowadzi do powstania grup silanowych przy atomie krzemu. Polimery są to substancje chemiczne o bardzo dużej masie cząsteczkowej, które składają się z wielokrotnie powtórzonych jednostek zwanych merami. Podobnie jak oligomery, lecz z jedną małą różnicą oligomery zawierają mniej fragmentów [21][54] [75].

Szybkość hydrolizy zależy od liczby rodników węgłowodnorodowych, polarności wiązania Si-X oraz liczby grup funkcyjnych. Jej szybkość wzrasta wraz ze wzrostem polarności wiązania oraz wraz ze wzrostem liczby grup funkcyjnych, maleje natomiast wraz ze wzrostem wielkości i objętości rodnika węgłowodorowego [21][54] [75].

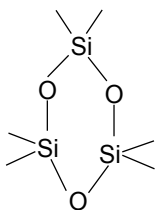
Związki zawierające dwa lub więcej atomów krzemu – oligomery i polimery [75]:

- Związki o wiązaniu Si – Si,
- Związki o wiązaniu Si - O – Si czyli siloksany,
  - Siloksany łańcuchowe



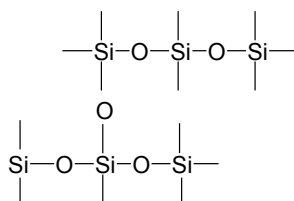
( 4.7)

- Siloksany pierścieniowe



( 4.8)

- Siloksany rozgałęzione



( 4.9)

Obecnie najbardziej popularne są środki krzemoorganiczne na bazie alkoksylanów i żywic silikonowych oraz metylosilikonianów sodu lub potasu. Jednak nawet te najbardziej popularne i najczęściej używane środki również posiadają wady. W przypadku alkoksylanu udział wody w reakcji kondensacji oraz powolny przebieg tej reakcji powoduje iż efekty uzyskujemy dopiero po kilku tygodniach od zastosowania preparatu na bazie alkoksylanów. Może to spowodować, iż część alkoksylanu nie wniknie w materiał ale odparuje. Środki na bazie żywic silikonowych stosowane w postaci roztworów w rozpuszczalnikach, penetrują na bardzo małą głębokość. Preparaty na bazie metylosilikonianów mają duże skłonności do zwiększenia zasolenia w materiale, co skutkuje tym, iż po impregnacji mogą powstawać naloty na powierzchni [21] [54].

#### **4.2.2. Typy preparatów stosowanych do iniekcji hydrofobizujących**

Szczegółowe zapoznanie się ze środkami iniekcyjnymi, stosowanymi w praktykach konserwatorskich, wydaje się być sprawą nader ważną. Zrozumienie mechanizmów chemicznych, jakie występują podczas działania takich środków, nie może obyć się bez poznania ich składników. Do iniekcji hydrofobizujących stosowane są preparaty o bazie: alkalisilikatowej, alkalimetylosilikonatowej, związków propylu, silanów, siloksanów, silikonianów, żywic silikonowych, mikroemulsji silikonowych, wieloskładnikowej (kombinowanej).

##### **Alkalisilikaty ( krzemiany alkaliczne)**

Alkalisilikaty, silikaty sodowe i potasowe, potocznie nazywane szkłem wodnym, stosowane są już od dziesięcioleci do osuszania murów. Silikaty są solami kwasu krzemowego, wytwarzanymi przykładowo w wyniku reakcji kwarcu z ługiem sodowym albo potasowym w wysokich temperaturach. Jeśli amorficzny albo krystaliczny silikat (krzemian) zostanie stopiony z węglanem potasu, krzemianowe wiązanie zostanie poprzerywane jonami potasu i powstanie krzemian potasowy. O ile dawniej stosowano przeważnie związki sodu, o tyle dziś, nawet, jeśli rzadko, to stosowane są głównie krzemiany potasu albo szkło wodne potasowe. Te produkty są wytwarzane z silnie alkalicznego, wodnego roztworu. Często do iniektu dodawane są stabilizatory i inne dodatki pomocnicze [21][37][122].

Wprowadzone do systemu porów alkalisilikaty wytwarzają z wolna żel krzemionkowy (silikażel), który zwęża kapilary materiału budowlanego (promień kapilar  $\rightarrow$  0). W ten sposób ulega, przynajmniej teoretycznie, redukcji kapilarne podciąganie. Z powodu wyparowania wody zachodzi jednak kurczenie i zanikanie silikażelu, a w efekcie pojawiają się tzw. wtórne kapilary. To może prowadzić do ponownego pojawienia się aktywności kapilarnej po całkowitym wyschnięciu silikażelu. Na skutek, czego zachodzić może ponownie kapilarne podciąganie i zawilgocenie materiału budowlanego. Ponadto wraz z silikatami sodu i potasu wprowadza się do muru znaczące ilości alkaliów, które tworzą na drodze reakcji z dwutlenkiem węgla zawartym w powietrzu duże ilości węglanu

potasu ewentualnie sody. Te łatwo rozpuszczalne, uszkadzające materiały budowlane sole dodatkowo obciążają mur. Dlatego też, w celu ograniczenia tworzenia się soli stosowane są przeważnie ubogie w alkalia związki krzemu. Na powierzchni muru związki soli tworzą wielkopowierzchniowe wykwyty, natomiast w murze po prostu wykrystalizowują, czego efektem może być ponowne pojawienie się higroskopijnej wilgoci. Z tego powodu zastosowanie czystych roztworów szkła wodnego, jako środka iniekcyjnego do wypełniania odwiertów budzi szereg wątpliwości [21][37][54].

### **Alkalimetylosilikonaty**

Już od końca lat 40-tych ubiegłego wieku znajdują zastosowanie w renowacji budynków wysokoalkaliczne, mieszające się z wodą w każdym stosunku, alkalimetylosilikonaty. Są to rozpuszczalne w wodzie sole kwasu alkalkrzemowego, przy czym znaczenie ma tu przede wszystkim kwas metylokrzemowy. Metylosilikonat potasowy stosowany jest, jako środek iniekcyjny albo bezpośrednio, albo w kombinacji z krzemianem potasowym. Taka kombinacja umożliwia uszczelnienie kapilar i hydrofobizację materiału budowlanego. Zwężenie kapilar, pojawiające się na początku na skutek tworzenia silikażelu, skutkuje redukcją zawilgocenia, co poprawia z kolei wysychanie materiału hydrofobowego. Alkalimetylosilikonaty reagują w murze podobnie jak alkalisilikaty: wiążąc dwutlenek węgla z powietrza tworzą nawilżany przez wodę polisiloksan, przy jednoczesnym strąceniu kwasu polimetylokrzemowego (kąąt zwilżania  $>90^\circ$ ). Jako produkt uboczny tej reakcji chemicznej powstają jednakże alkaliczne węglany - sodowy i potasowy. W wyniku tego, przy zastosowaniu produktów zawierających dużą ilość alkaliów, tworzą się w murze albo bezpośrednio wokół odwiertu sole. Na skutek higroskopijności soli mur ulega dodatkowemu zawilgoceniu.

Ponieważ alkalimetylosilikonaty mogą tworzyć hydrofobowy kwas polimetylokrzemowy tylko w obecności dwutlenku węgla, toteż jasne stają się granice zastosowania tej metody i jednocześnie jej wady. Otóż te środki iniekcyjne mogą być stosowane tylko do określonego, dość niskiego stopnia zawilgocenia i tylko w murach o ograniczonej grubości. Wartościami granicznymi dla zapewnienia wystarczającego czasu reakcji i tym samym rozwinięcia się mechanizmów działania iniektu są tutaj mury o grubości poniżej 0,5 m i stopniu przesiąknięcia wilgocią ponad 50% [21][37][54].

### **Związki propylu**

Jeśli zamiast silikatów metylowych zastosujemy związki propylu, odpadną wady wyżej omówionych alkalimetylosilikonatów, związane z ich mechanizmem reakcji. Tworzą one kwas polimetylokrzemowy także bez udziału dwutlenku węgla, a więc mogą być stosowane również w murach o wysokim stopniu przesiąknięcia wilgocią i grubych ścianach. Wadą tych produktów jest również tworzenie soli, jako produktów ubocznych reakcji chemicznej oraz stosunkowo szybkie przebieganie mechanizmu ich działania (reakcji). Substancja aktywna

zaczyna ujawniać swoje hydrofobowe właściwości zależnie od alkaliczności podłoża, jednak zawsze stosunkowo szybko po wprowadzeniu do muru. Co z jednej strony może być uznane za zaletę produktu, z drugiej strony może być oceniane krytycznie: szybkie funkcjonowanie mechanizmu działania iniektu sprawia, że często nie może on rozłożyć się w murze i tym samym posiada ograniczoną penetrację [21][37][54].

### **Silany**

Silan jest związkiem małowcząsteczkowym, krzemowym analogiem metanu. Silany stanowią jednostki konstytucyjne (mery) dla siloksanów i żywic silikonowych. Od niego wywodzą się substancje stosowane do syntezy polimerów krzemoorganicznych określanymi mianem silikonów. Cechą charakterystyczną tych związków jest ich specyficzna hydroliza oraz reakcje po niej następujące. W zetknięciu z wodą atomy chlorowca i grupy alkoksylowe zostają podstawione grupami wodorotlenowymi, podczas gdy podstawniki alkilowe i arylowe pozostają nietknięte. Zależnie od ilości atomów chlorowca lub grup alkoksylowych hydroliza prowadzi do silanoli z różną ilością grup wodorotlenowych, a od tej z kolei zależą dalsze przemiany i budowa produktu końcowego. Silany rozpuszczają się w węglowodorach i alkoholach, a nieduża wielkość ich cząsteczek sprawia, że posiadają dużą zdolność penetracji, także w materiałach budowlanych o dużej gęstości [37][54].

Chociaż przy zastosowaniu silanów nie tworzą się żadne sole albo inne produkty uszkadzające materiały budowlane, a i ich rozprowadzanie (penetracja) w silnie zawilgoconych materiałach budowlanych jest dobre, to jednak posiadają wadę: muszą zostać rozpuszczone w rozpuszczalnikach organicznych. Zastosowanie tych produktów powoduje nie tylko ekstremalne obciążenie zapachowe, ale w razie braku możliwości wietrzenia może pojawić się także zagrożenie wybuchem. Ze względów ekologicznych i zapachu udział silanów w rynku obniżył się w ciągu ostatnich lat do minimalnego poziomu [21][37].

### **Siloksany**

Siloksany są to związki krzemowe zawierające ugrupowanie Si-O-Si. Silikony i silany wykorzystywane do hydrofobizacji obiektów budowlanych można podzielić na trzy grupy:

- monomeryczne alkiloalkoksylsilany,
- oligomeryczne alkiloalkoksylsiloksany,
- polimeryczne siloksany (żywice metylosilikonowe).

Wszystkie te związki mają zdolność tworzenia trwałych sieci przestrzennych. Dzięki podobieństwu chemicznemu, po zetknięciu z powierzchnią mineralną substancja hydrofobizująca tworzy trwałe i wytrzymałe wiązania z grupami silanowymi obecnymi w hydrofilowych materiałach budowlanych. Jednocześnie grupy alkilowe orientują się na zewnątrz powierzchni i tworzą hydrofobową

warstwę chroniącą przed przenikaniem do wnętrza materiału budowlanego wilgoci.

Środki iniekcyjne na siloksanach, które są rozpuszczalne w organicznych rozpuszczalnikach (jak benzyna lakowa albo alkohole), posiadają wyłącznie hydrofobowe właściwości: (kąąt zwilżania  $>90^\circ$ ). A to oznacza, że wprowadzenie tego rodzaju substancji nadaje ściankom kapilar hydrofobowość, a napięcie powierzchniowe wody ulega podwyższeniu. W ten sposób zostaje przerwana kapilarność materiału budowlanego.

W zależności od budowy chemicznej siloksany w zetknięciu z materiałami budowlanymi zachowują się w różny sposób. Polisiloksany tworzą warstwę na powierzchni pokrywanego materiału, co może powodować zmiany wyglądu (powierzchnia ciemniej i sprawia wrażenie mokrej). Natomiast silany o małym ciężarze cząsteczkowym oraz oligomeryczne siloksany mają zdolność wnikania w głąb porowatej struktury materiału budowlanego, dzięki czemu zmniejszają absorpcję kapilarną wody. Dlatego też zabezpieczenie niskocząsteczkowymi silanami i oligomerycznymi siloksanami praktycznie nie wpływa na wygląd powierzchni materiału budowlanego [37][54].

Preparaty na bazie siloksanów posiadają identyczne wady jak silany. Z tego też powodu ich stosowanie w ostatnich latach ma znaczenie marginalne.

### **Mikroemulsje silikonowe**

Mikroemulsje różnią się od emulsji zarówno na poziomie makro jak i na poziomie mikro. Różnica polega głównie na tym, że emulsje są mlecznobiałe, natomiast mikroemulsje są przezroczyste i mają jedynie nieznaczną, charakterystyczną opalescencję. Wynika to stąd, że na stosunkowo dużych cząstkach występujących w emulsjach ( $10^{-8}$ - $10^{-9}$  m) zachodzi silne rozpraszanie światła. Wielkość promienia cząsteczek w mikroemulsjach wynosi ok.  $10^{-9}$  do  $10^{-10}$  m. Są one o rząd wielkości mniejsze niż cząsteczki pozostałych emulsji, są więc szczególnie drobnocząsteczkowe i jako środek iniekcyjny najbardziej odpowiednie.

W porównaniu do innych środków iniekcyjnych mikroemulsje silikonowe stanowią novum w tym obszarze produktów. Stosowane są od początku lat 90-tych, przełom nastąpił jednak dopiero pod koniec lat 90, wraz z publikacją nowej instrukcji WTA i ogólnej dyskusji dotyczącej wysokojakościowych systemów iniekcyjnych. Z powodu możliwości ich różnorodnego zastosowania, jak również szeregu zasadniczych zalet materiałowych w porównaniu do klasycznych materiałów iniekcyjnych, używa się dzisiaj często terminu technologii SMK, dla oznaczenia bezwodnych i niezawierających rozpuszczalników koncentratów mikroemulsji silikonowych. SMK posiadają niską lepkość, są przejrzystymi, bezwodnymi i wolnymi od rozpuszczalników płynami, które po wlaaniu do wody tworzą drobnocząsteczkowe i stabilne mikroemulsje silikonowe.

W wyniku fizycznego wysychania ulegają one kondensacji (przy wydzieleniu alkoholu) tworząc nieulegający ponownej reemulgacji polisiloksan. Jego chemiczna struktura sprawia, że z jednej strony wiąże się on z podłożem, z drugiej zaś wykazuje właściwości hydrofobowe, nie wpływając na właściwości dyfuzyjne materiału budowlanego. Zasadowość przyspiesza sieciowanie. Ponadto uważa się, że mikroemulsje silikonowe, będące wodnymi środkami iniekcyjnymi, mogą mieszać się z wodą kapilarną materiału budowlanego nawet przy wysokim stopniu zawilgocenia możliwa jest duża głębokość wnikania i dobre rozprzewodzenie materiału [37][54].

### **4.3. TECHNOLOGIE WYKONYWANIA IZOLACJI METODAMI INIEKCJI**

Obecnie na polskim rynku spotkamy wiele technologii i materiałów stosowanych do wykonywania izolacji metodami iniekcyjnymi. Środki te produkowane są przez szereg firmy z branży chemii budowlanej. Do najbardziej popularnych w Polsce należą: Schomburg, Ceresit Henkel, Webac, Deiterman, Remmers, Isolit, MC-Bauchemie, Sto, itp. W zależności od firmy, która produkuje dany środek, jaki i samego środka uzależniona jest technologia wykonania izolacji. Przyjęło się nazwę metody wywodzić od nazwy firmy produkującej dany materiał. Ze względu na fakt, że podane wyżej firmy (technologie) dominują na rynku do dalszej oceny przyjęto technologie firm wiodących na rynku.

W ramach prowadzonych badań literaturowych stwierdzono bardzo duże rozbieżności w jakości przygotowania i szczegółowości dokumentacji technicznych poszczególnych technologii. Dość podobnie wygląda sytuacja z kartami technicznymi samych preparatów. Z tego powodu przed rozpoczęciem prac badawczych została opracowana własna, w postaci kart, dokumentacja dotycząca stosowanych preparatów. Karty opracowane zostały na podstawie informacji znajdujących się: w instrukcjach i kartach technicznych, kartach charakterystyki, materiałach firmowych oraz na podstawie korespondencji z firmami

W celu dokładniejszej analizy poniżej dokonano zestawienia tabelarycznego metod. Ze względu na obszar zagadnienia w pracy przedstawione zostały technologie najbardziej popularne i uważanych za najskuteczniejsze. Na podstawie opracowanych danych oraz badań własnych wyciągnięte zostały wnioski dotyczące rozstawu i średnicy otworów, stosowanych ciśnień i ograniczeń związanych z wykonywaniem iniekcji.

Tab. 4.2 Porównanie metod do wykonywania izolacji wtórnych metodami iniekcji cz 1

Firma produkująca preparat	Nazwa środka iniekcijnego	Rodzaj iniekcji		Średnica otworów [mm]	Rozstaw otworów [cm]	Kąt nachylenia otworów	Głębokość otworów	Zużycie
		Sposób iniekcji	Cisnienie robocze					
Schomburg	AquaFin - F	grawitacyjna	-	30	max co 15	30 – 45 °	Grubość muru minus 5 cm	15 kg/m <sup>2</sup> przekroju poziomego muru
		ciśnieniowa	1,0 MPa	18	10 – 12,5	30 °		
	AquaFin - SMK	grawitacyjna	-	30	max co 15	30 – 45 °	Grubość muru minus 5 cm	1,5-2,0 l/m <sup>2</sup> przekroju poziomego muru
		ciśnieniowa	1,0 MPa	18	10 – 12,5	30 °		
Ceresit Henkel	Ceresit CO 81	grawitacyjna	-	30	12	30 – 45 °	Grubość muru minus 5 cm	-----
		ciśnieniowa	0,2 – 0,7 MPa	12 - 18	8 - 12	0 - 30 °		
Deiterman	Adexin HS	grawitacyjna	-	30	10 - 12 max 15	25 – 45 °	Grubość muru minus 5 cm	6-10 l/m muru grubości 30cm
		nisko-ciśnieniowa	1,0 MPa	12	10 – 12 max 15	poziomo		
	Adexin HS 2	grawitacyjna	-	30	10 - 12 max 15	25 – 45 °	Grubość muru minus 5 cm	8-20 l/m muru grubości 40 cm
		nisko-ciśnieniowa	1,0 MPa	12	10 - 12	poziomo		
Remmers	Aida Kiesol	grawitacyjna	-	30	10 - 12	25 – 45 °	Grubość muru minus 5 cm	4,0 kg/m ściany grubości 24cm
		nisko-ciśnieniowa	0,4 – 0,8 MPa	18	12	poziomo		

Tab. 4.3 Porównanie metod do wykonywania izolacji wtórnych metodami iniekcji cz II

Firma produkująca preparat	Nazwa środka iniekcyjnego	Rodzaj iniekcji		Średnica otworów [mm]	Rozstaw otworów [cm]	Kąt nachylenia otworów	Głębokość otworów	Zużycie
		Sposób iniekcji	Ciśnienie robocze					
ISOLIT	ISOLIT-Kieselsaure	ciśnieniowa	-	20 – 25	7 szt. na 1 mb ściany	20°	80 % grubości muru	2,5 kg/mb muru grubości 30 cm
		grawitacyjna	-	min 20	10	30 – 45°	5-10 cm mniej niż grubość muru	1,6 – 3,2 kg/m ściany grubości 10 cm
MC-Bauchemie	Oxal HSP	nisko-ciśnieniowa	Max 1,0 Mpa	18	10 – 12	30 – 45°	5-10 cm mniej niż grubość muru	2,0 – 4,0 l/m ściany grubości 10 cm
		grawitacyjna	-	min 20	10	30 – 45°	5-10 cm mniej niż grubość muru	2,0 – 4,0 l/m ściany grubości 10 cm
STO	Sto Murisol Micro	nisko-ciśnieniowa	max 1,0 Mpa	18	10 – 12	10 – 15°	Grubość muru minus 5 cm	-
		grawitacyjna	-	18 – 20	10 – 12	10 – 15°	Grubość muru minus 5 cm	-
IZOMUR	Izomur	grawitacyjna	-	18 – 23	25	< 15°	3/4 grubości muru	-
Metoda iniekcji krystalicznej		grawitacyjna	-	20	-15	15 – 30°	Grubość muru minus 15 cm	-



### 4.3.1. Analiza metod iniekcyjnych ze względu na stosowane ciśnienie.

Podczas prac związanych z wykonywaniem poziomej przepony znaczącym parametrem jest zastosowane ciśnienie robocze, gdyż preparat może być aplikowany grawitacyjnie lub pod niskim czy wysokim ciśnieniem. W ocenie wzięto pod uwagę informacje zawarte: w kartach technicznych, kartach charakterystyki, literaturze oraz dane uzyskane podczas badań własnych. Na tej podstawie stwierdzono że:

- Grawitacyjne wykonywanie iniekcji nie gwarantuje w pełni całkowitego i dokładnego wypełnienia porów i kapilar, co może prowadzić do nie uzyskania zakładanego promienia penetracji,
- Czas wykonywania iniekcji w metodzie grawitacyjnej jest znacznie dłuższy niż w przypadku metod ciśnieniowych.
- W większości metod ciśnieniowych stosowany jest bardzo zbliżony zakres ciśnień roboczych.
- Metody ciśnieniowe wymagają stosowania specjalnych pomp, kompresorów oraz tzw. osprzętu dodatkowego.
- Metody ciśnieniowe wymagają stałej kontroli podczas prowadzenia prac związanych z tłoczeniem preparatów. Podawanie preparatu powinno odbywać się przy jednakowym ciśnieniu we wszystkich węzłach,
- Metody ciśnieniowe stosowane mogą być w murach mokrych, gdyż powodują one wypieranie wody z porów i zastępowanie jej wprowadzonym środkiem.
- Zużycie preparatu w metodzie ciśnieniowej jest znacznie większe niż w metodzie grawitacyjnej.
- Przekraczanie ciśnienia skutkuje uszkodzeniem materiałów o niejednorodnej budowie i niskiej wytrzymałości.

### 4.3.2. Analiza metod ze względu na średnicę i rozstaw otworów.

W większości metod dana technologia narzuca stosowanie określonych średnic, rozstawów i kątów nachylenia otworów. W wielu przypadkach jest to nie do końca uzasadnione, co potwierdziły badania własne autora. Na podstawie zebranych danych zawartych w materiałach firmowych oraz literaturze, stwierdza się, co następuje:

- Średnica otworów mieści się w przedziale od 12 do 30mm, a większe średnice przewiduje się dla metod grawitacyjnych.
- W przypadku części metod w sposób automatyczny przeniesiono średnice z iniekcji grawitacyjnych na ciśnieniowe. Jest to nie do końca zrozumiałe, gdyż duże średnice otworów powodują zwiększenie kosztów wiercenia i wydłużają jego czas.

- Część technologii iniekcji ciśnieniowych dopuszcza zmianę średnicy odwiertów na większe lub mniejsze.
- Rozmieszczenie i rozstaw otworów iniekcyjnych powinny być uzależnione przede wszystkim od iniektowanego materiału oraz warunków wilgotnościowych przegrody stanu i rodzaju muru,
- Technologie części firm dopuszczają, dla metody niskociśnieniowej, wykonywanie otworów poziomo. Ułatwia to wykonanie odwiertów oraz obniża koszt iniekcji (mniejsza długość otworów).
- Warunkiem szczelności przepony jest równoległość w pionie i poziomie wykonanych otworów.
- Blisko rozstawione otwory o większych średnicach mogą powodować osłabienie przegrody.

## 5. OPOKA

Polska jest krajem zasobnym w złoża skał wapiennych i pokrewnych, ale występowanie tych złóż jest nierównomierne. Koncentruje się głównie w południowej części kraju, a w innych regionach występują w znacznie mniejszych ilościach. Ze względu na temat pracy ich dokładna charakterystyka ograniczana została do opok wapnistych.

Opoka jest skałą powstającą w wyniku nagromadzenia węglanu wapnia (kalcyt) i krzemionki pochodzącej z igieł gąbek (występującej w postaci opalu i chalcedonu) wraz z domieszkami glaukonitu oraz substancji ilastych. Skała ta powstała na powierzchni ziemi, jako skała osadowa z produktów wietrzenia innych skał budujących litosferę oraz ze szczątków organizmów zwierzęcych i roślinnych, a także z różnych soli strąconych w zbiornikach wodnych [63].

Opokami nazywamy skały przejściowe między skałami węglanowymi a krzemionkowymi. Charakteryzują się one znaczną ilością rozproszonej krzemionki skrytokrystalicznej oraz zawierają 5-75% krzemionki autogenicznej w postaci opalu lub chalcedonu. Skała ta trawiona w kwasie solnym nie rozpada się dzięki obecności szkieletu krzemionkowego. Najczęściej występują opoki wapniste zawierające 28,0-42,0% CaO i 25-50% SiO<sub>2</sub> [63][68].

Ze względu na wspomniane wyżej bardzo duże różnice w zawartości krzemionki w skale klasyfikuje się opoki na wapniowe, zawierające od 5 do 25% krzemionki, opoki wapniste od 25 do 50% krzemionki i opoki od 50 do 75% tego składnika. Obecność dodatków często wpływa na barwę skały. Najbardziej barwiącym pierwiastkiem jest żelazo, które w zależności od stopnia utlenienia, może powodować dużą różnorodność zabarwień od koloru żółtego do czerwono-brunatnego. Zabarwienie dają również związki tytanu, chromu, miedzi i niklu [68][118].

### 5.1. ZŁOŻA OPOKI W POLSCE

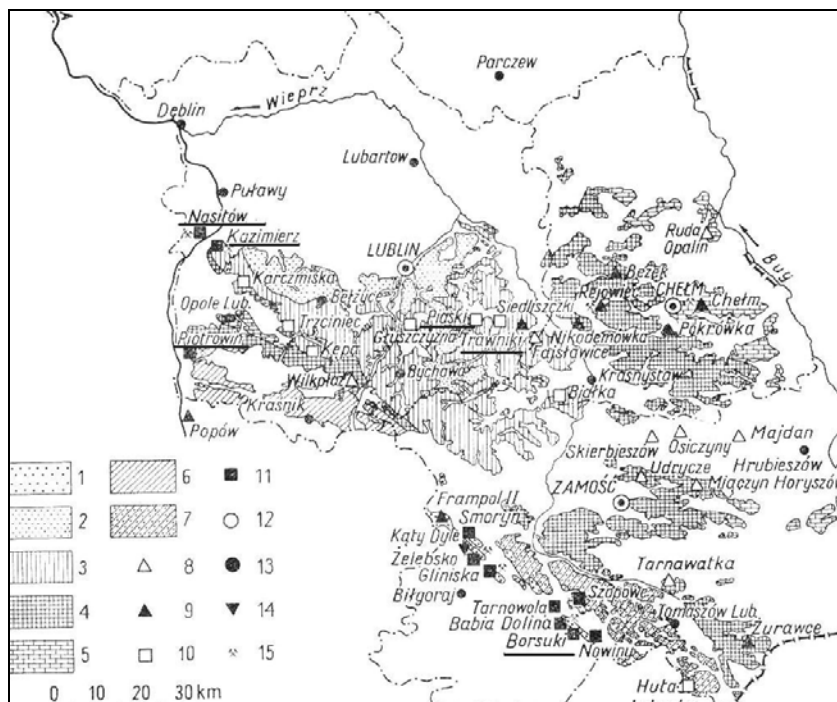
W Polsce opoki występują na Wyżynie Lubelskiej, w okolicach Radomia i Łodzi oraz w niecce Nidziańskiej [16].

W okolicach Radomia opoki turonu dolnego eksploatowane są w dużych ilościach w okolicach Ożarowa. W Janikowie od dawna wydobywany jest kamień dla celów rzeźbiarskich i budowlanych. Po II wojnie światowej otwarty został w Karsach duży kamieniołom, w którym wydobywa się wapień lekki. Skała ta określona została, przez jako wapień detrytyczny. Opoki z Kars należą technologicznie do grupy wapieni lekkich. Są to najłżejsze i najłatwiej obrabialne kamienie budowlane Polski [63]. Kamień po wydobyciu jest miękki i podobnie jak w przypadku opoki kazimierskiej daje się piłować piłą ciesielską i obrabiać siekierą. Po wyschnięciu (utracie wody) opoki uzyskują wyższe wytrzymałości i obróbka jest znacznie trudniejsza.

Opoki kredowe eksploatowane są również w niecce mogileńsko-łódzkiej, w okolicach Roźniatowa, Poddębic i Balina. Największe znaczenie mają opoki z okolic Roźniatowa (Czepów, Zaborów, Świnice, Kraski). Na podstawie licznej fauny wiek tej opoki określony został na dolny mastrycht. Mniejszy obszar występowania opok mastrychtu znajduje się w okolicy Poddębic na prawym brzegu Neru. Trzeci, najmniejszy obszar znajduje się na południe od Uniejowa w okolicy wsi Balin [63].

W omawianych obszarach występują trzy typy opok: porowata, częściowo odwapniona i zwięzła. Opoka porowata jest lekka, barwy kremowej, łatwa w obróbce. Zawartość CaO nie wykazuje większych zmian. Ten typ skały jest głównie przedmiotem obecnej eksploatacji. Eksploatacja prowadzona jest do głębokości 6 m, do poziomu wody gruntowej. Niżej występuje opoka częściowo odwapniona o zawartości około 30% CaO, przechodząca ku dołowi w opokę zwięzłą [63].

Na Wyżynie Lubelskiej opoki wapniste zajmują znaczne obszary i tworzą grube serie w mastrychcie, kampanie, santonie i turonie. Na rysunku 5.3 przedstawiono mapę geologiczną Lubelszczyzny z zaznaczonymi nazwami miejscowości gdzie pozyskiwano lub nadal wydobywa się kamień.



Fot. 5.1 Mapa geologiczna Lubelszczyzny [63]

Najstarsze opoki turońskie odsłaniają się w okolicach Annapola. Występują tu dwa rodzaje opok: opoki z przerostami czertów i konkrecji lub ławicami krzemieni oraz gruboławicowe opoki z pojedynczymi czertami [63][116]. Szczegółowe badania w skarpie doliny Wisły na odcinku od Opoczki do Jakubowic wykazały dużą różnorodność typów litologicznych pośrednich między marglami i opokami, o zróżnicowanym składzie chemicznym i własnościach fizycznych. Zawartość CaO w badanych opokach wynosi 30-48%, SiO<sub>2</sub> 5-46%, przy czym czerty zawierają 45-62% SiO<sub>2</sub>. Wyższą zawartość węglanów zawierają opoki bogate w czerty i krzemienie. Natomiast w opokach gruboławicowych ubywa węglanów na korzyść krzemionki. Oba rodzaje opok należą do skał o małej wytrzymałości na ściskanie w stanie suchym, zróżnicowanej porowatości 28-50% i dużej nasiąkliwości [63][68].

Bardziej jednorodne opoki z czertami występują w santonie. Badania prowadzone w drugiej połowie lat sześćdziesiątych opok santonickich wykazały nieznaczne wahania zawartości CaO 23-31% i SiO<sub>2</sub> 36-43%, Również wytrzymałość na ściskanie jest wyższa i mniej zróżnicowana. W budownictwie stosowane są w ograniczonych ilościach ze względu na słabe odsłonięcia. [63][68]

Opoki kampańskie tworzą gruboławicowy jednolity kompleks litologiczny ze sporadycznymi skupieniami czertów, dobrze odsłonięty w profilu Wisły i w południowo-zachodniej Lubelszczyźnie. Opoki występujące na odcinku od Sulejówka do Józefowa charakteryzują się zawartością CaO 25-37% i SiO<sub>2</sub> 22-36%. Maksymalna porowatość tych opok wynosi 47%. Opoki kampańskie były dość powszechnie stosowane w budownictwie.

Rozległe wychodnie opok mastrychtu sprzyjają ich powszechnemu wykorzystaniu w budownictwie mimo dużego zróżnicowania litologicznego. Oprócz opok o małej wytrzymałości na ściskanie, występują opoki osiągające najwyższe wytrzymałości, jakie były notowane w seriach opok od turonu do kampanu. Opoki te charakteryzują się również najwyższą porowatością rzędu 37- 52% i bardzo wysoką nasiąkliwością objętościową [63][68].

Tab. 5.1 Skład chemiczny opok w złożach. MK – moduł krzemianowy, MG – moduł glinowy, \* wartość średnia. Na podstawie [63]

Parametr	Piotrowin	Kazimierz	Nasiłów	Trawniki
CaO, %	25,3—34,4	34,0—42,7	19,6—45,2	34,9—42,2
	28,4*	38,3	37,1	38,9
MgO, %	0,2—3,3	0,7—0,9	0,4—1,1	0,2—1,6
	1,4	0,8	0,7	0,6
SiO <sub>2</sub> , %	29,6—46,2	17,1—31,9	14,5—51,6	18,4—33,0
	39,7	24,5	25,9	24,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	0,8—3,1	0,8	1,1—3,9	0,2—1,3
	1,2		1,7	1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	1,2—5,2	1,3—2,0	1,0—4,1	1,0—4,1
	3,9	1,7	1,9	2,4
CaCO <sub>3</sub> + MgCO <sub>3</sub> , %	53,4	70,9	67,4	70,5
MK	7,8	9,8	7,2	7,4
MG	3,2	2,1	1,1	2,4
Liczba analiz	25	2	28	32

Tab. 5.2 Właściwości opok w złożach. \* wartość średnia. Na podstawie [63]

Parametr	Piotrowin	Kazimierz	Nasiłów	Trawniki
Gęstość [g/cm <sup>3</sup> ]	2,2—2,6	2,4—2,6	2,5—2,6	2,4—2,6
	2,5*	2,5	2,6	2,5
Gęstość pozorną [g/cm <sup>3</sup> ]	1,1—1,5	1,3—1,7	1,3—1,6	1,4—1,6
	1,3	1,5	1,4	1,5
Nasiąkliwość wagowa [%]	22,7—36,8	14,1—29,6	10,5—30,1	17,1—27,4
	31,7	23,2	23,2	23,6
Nasiąkliwość objętościowa [%]	—	—	10,7—50,0	27,3—38,1
			26,7	35,2
Porowatość [%]	37,9—50,6	35,4—50,1	40,4—51,1	38,7—42,8
	46,5	42,3	46,2	39,1
Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	7,5—19,2	4,7—22,6	2,3—37,9	
	13,6	15,5	14,7	
na sucho [MPa]	—	2,6—19,0	1,5—18,0	—
na mokro [MPa]	—	11,8	9,7	
Ścieralność na tarczy Bohmego [cm]	0,8—1,8	0,4—1,3	0,5—1,8	—
	1,2	0,8	1,1	
Mrozoodporność [cykle]	3—25	12—25	3—22	—
	13	21	13	
Liczba badań	25	14	16	10

## 5.2. OPOKA JAKO MATERIAŁ BUDOWLANY.

Złóża opoki na terenach Polski od wielu wieków eksploatowano do celów budowlanych. Stosunkowo dobre parametry fizyczne, a przede wszystkim dostępność materiału i łatwość jego pozyskania na znacznym terenie Lubelszczyzny, stały się powodem masowego stosowania opoki, jako materiału murowego. W czasach bliższych współczesności, zastosowanie wydobywanego w regionie materiału miało coraz większy zakres. Skalę zaczęto stosować w drogownictwie, a w ostatnich dziesięcioleciach jako materiał okładzinowy o charakterze dekoracyjnym. Opoki znalazły również zastosowanie jako surowiec do produkcji cementu. Po wyeksploatowaniu margli znajdujących się blisko powierzchni, cementownie zaczęły wydobywać opoki. Zaliczane są one do bardzo dobrych surowców mimo wysokich modułów MK i MG. Na bazie tego surowca rozpoczęto produkcję specjalnych wysokowytrzymałościowych cementów [63].

### 5.2.1. Zalety opoki

Na masowe wykorzystywanie do celów budowlanych opoki, wpływ miało wiele czynników, związanych z właściwościami materiału, obróbką kamienia, kosztami eksploatacji złóż i transportem.

Wysoka jak na skały, średnio ok. 42%, porowatość opoki wpływa in plus na opór cieplny murów z tego kamienia. Współczynnik przewodności cieplnej w przybliżeniu wynosi  $\lambda=0,61 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Wartość ta zbliża ten materiał do właściwości ceramiki budowlanej i lekkich betonów. Świadomi tej cechy ludzie już przed wiekami nazywali opokę wapnistą „ciepłym kamieniem”.

Materiał ten charakteryzuje się stosunkowo małym ciężarem właściwym, wartość średnia dla badanych złóż (Tab. 5.3) wynosi ok.  $1,4 \text{ g/cm}^3$ . Dzięki temu nawet dość duże gabarytowo bloki mogły być przenoszone i obrabiane z wykorzystaniem siły fizycznej człowieka. Cecha ta była również istotna dla murarzy, ponieważ dzięki niej tempo wznoszenia muru było szybkie.

Dodatkową charakterystyczną zaletą opok jest to, że świeżo wydobyte dają się obrabiać nawet za pomocą najprostszymi narzędzi (pił, siekier, szpadli). Proste metody obróbki umożliwiały modyfikację faktury muru w zależności od upodobań.

Wysoka estetyka murów z opoki, jest następną z cech wpływających na popularność tego materiału dawniej i w czasach teraźniejszych. Jego cechy takie jak: naturalny rysunek, jasna kolorystyka, łatwość utrzymania w czystości (brud jest łatwo zmywalny przez wody opadowe) wpłynęły na to, że tworzone z niego budynki były bardzo rzadko tynkowane. Zdobienie naroży i ościeżnic przy użyciu cegły ceramicznej, dawało kontrast, a tym samym ciekawy efekt wizualny.

Na popularność opoki, jako materiału murowego, największy wpływ miały jednak nie właściwości skały, a jej dostępność. W wielu miejscach złoża opoki zalegają płytko bezpośrednio pod warstwą humusu. Liczne odkrywki i mniejsze

kopalnie zwane „kamieniakami” rozsiane na terenie występowania złóż, nie zmuszały ludzi do ponoszenia wysokich kosztów przy wydobyciu i transporcie. Często zdarzało się tak, że gdy tylko było to możliwe zakładano urobisko opoki w niedalekim sąsiedztwie budowy. Wtedy kamień był na bieżąco wydobywany i poddawany obróbce na terenie budowy. Do dziś przy niektórych budynkach lub w ich niedalekim otoczeniu pozostały opuszczone kopalnie lub częściowo zostały zasypane.

Bardzo duże znaczenie dla popularności budownictwa z opoki na Lubelszczyźnie miała jej cena. Do niedawna była ona wielokrotnie niższa niż innych materiałów murowych (np. cegły ceramicznej). Niski koszt zakupu obrobionego materiału, pozwalał na wznoszenie z opoki również poza miejscami jej wydobycia. Najlepszym przykładem jest miasto Lublin gdzie do dziś istnieje przynajmniej kilkadziesiąt budynków wzniesionych z opoki lub przy jej znacznym udziale.

### 5.2.2. Wady opoki

Opoka oprócz szeregu zalet, o których wspomniano w punkcie 5.1.1. ma również swoje minusy. Część z nich jest podobna do wad innych materiałów kamiennych, kilka wynika z charakteru samej opoki. Do najważniejszych wad ograniczających lub uniemożliwiających stosowanie opoki należą:

Konieczność sezonowania kamienia, polegająca na przezimowaniu kamienia w przyzmacz na wolnym powietrzu. Opoka, bezpośrednio po wydobyciu ze złoża, nie nadaje się do wykorzystania jako materiał murowy czy też okładzinowy. Duża ilość materiału ulega spękaniu i częściowemu zniszczeniu.

Wytrzymałość na ściskanie materiału, jak na kamień, jest bardzo niska. Kolejnym mankamentem jest olbrzymi rozrzut wyników podczas badań, w zależności od złoża opoka może mieć wytrzymałość nawet w przedziale 2,3-37,9 MPa (opoka z kamieniołomu w Nasiłowie). Dodatkowo wytrzymałość na ściskanie próbek nasyconych wodą obniża się często o przeszło 50% [63]. Wszystko to powoduje dużą nieprzewidywalność opoki, szczególnie zbyt krótko sezonowanej, przy dużych obciążeniach murów.

Opoki charakteryzują się stosunkowo wysoką ścieralnością, znacznie większą niż w przypadku innych skał wapiennych. Właściwość ta wyklucza wykorzystywanie skał, jako materiału posadzkarskiego.

Kolejną z wad kamienia jest jego duża nasiąkliwość, w przypadku opok wapnistych sięgająca nawet 50 %. Wysoka porowatość w połączeniu ze strukturą porów powoduje, że w opoce dochodzi nawet do 90% wypełnienia wodą. Problem ten jest szczególnie istotny w starszych obiektach, pozbawionych izolacji wodochronnych. Możliwość przyjmowania tak dużych ilości wody przy dość długim okresie odsychania jest dodatkowo problematyczna ze względu na niewielką mrozoodporność materiału.



Niezalecane jest również stosowanie opok w budownictwie drogowym ze względu na wspomnianą powyżej dużą ścieralność, nasiąkliwość i niewielką mrozoodporność, ale z braku innego surowca są używane jako kamień łamany na drogi lokalne.

### **5.3. BUDOWNICTWO Z OPOKI NA TERENIE LUBELSZCZYZNY**

Jednoznaczne określenie chociażby przybliżonego okresu czasu, w którym po raz pierwszy zastosowano opokę, jako kamień budowlany, na ziemiach województwa lubelskiego, jest jak na razie niemożliwe. Uważane za jedne z najstarszych zachowanych budowli z opoki na ziemi lubelskiej, czyli zamek w Kazimierzu Dolnym i zamek w Janowcu, datuje się na XVI wiek. Jednak całkiem logicznym wydaje się przypuszczenie, że początki budownictwa z tego kamienia sięgają X wieku, a być może czasów jeszcze wcześniejszych [116].

W czasach obecnych, opoka staje się powoli materiałem luksusowym. Z powodu zamknięcia wielu kamieniołomów, cena metra sześciennego kamienia wzrosła kilkukrotnie. Problem ten widoczny jest zwłaszcza w rejonie Kazimierza, gdzie legalnie dostępna jest właściwie tylko, jako materiał pozyskany z rozbiorów starych budowli. Należy nadmienić, że właśnie w okolicach Kazimierza Dolnego nad Wisłą oraz Nałęczowa, popyt na opokę jest największy, z racji intensywnego rozwoju tych miejscowości oraz mody na tradycyjne budownictwo i sam materiał.

#### **5.3.1. Elementy murowe z opoki**

Wyroby z kamienia naturalnego, przystosowane kształtem i wymiarami do określonych funkcji nazwano kamiennymi elementami budowlanymi. Norma PN-B-11210:1996 dzieli bryły kamienia pod względem kształtu i sposobu wykonania muru z kamienia łamanego. Kolejna norma (PN-EN 771-6:2002) różni podział elementów kamiennych gotowych do wykorzystania w konstrukcji murowej. Elementy kamienia o kształcie zbliżonym do prostopadłościanu nazwano kamieniem łupanym.

Tradycyjne polskie budownictwo dzieli kamień na łupany [103][127]:

- Niesortowany – będący skalnymi odłamkami, których wymiar był większy niż 5cm i nie przekracza 50cm. Mur wykonany z takich elementów nazwany jest murem nieregularnym z kamienia niesortowanego lub po prostu „dzikim”. Nieregularny kształt elementów i powierzchnie wsporne odbiegające niekiedy pod znacznym kątem od poziomu sprawiają, że mur ten ma mniejszą wytrzymałość konstrukcyjną.
- Sortowany – elementy kamienia o zbliżonych wymiarach, przypominających graniastosłup, najczęściej nie mniejsze niż 15cm i nie większe niż

35cm. Mur taki nazywano „cyklopowym”. Układ taki daje lepszy efekt wizualny i nieco lepszą wytrzymałość konstrukcyjną.

- Przyniany – jest to mur wykonany z kamienia łamanego sortowanego, poddany najprostszej obróbce ręcznej. Lico każdego elementu przycinane jest tak by tworzyło wielobok a krawędzie jego były ostre. Dawało to efekt pajęczyny lub plastra miodu. Wytrzymałość konstrukcyjna jest taka sama jak w murze „cyklopowym”.

Kamień łupany wykorzystywany w murach dzielony jest na [103] [127]:

- Warstwowo łupany – wydobywany kamień dobierano tak by powierzchnie wsporne były do siebie równoległe, obróbce poddawano zazwyczaj tylko powierzchnię licową, tak by jej kształt był zbliżony do prostokąta. Wymiary elementów są różne, wysokość jednego elementu może być nawet kilka razy większa niż sąsiedniego. Dzięki równoległemu ułożeniu powierzchni wspornych, mur taki ma dużo większą wytrzymałość.
- Rzędowo łupany – powierzchnie wsporne powinny być prostopadłe do lica a cały element jak najbardziej przypominać prostopadłościan. Wszystkie elementy powinny być do siebie zbliżone wymiarowo, a najbardziej te znajdujące się w jednym poziomym rzędzie. Wysokości rzędów mogą nieznacznie się różnić. Mur taki zachowuje prawidłowe wiązanie między rzędami, podobnie jak mury ceglane, i tak jak one mają dużą wartość konstrukcyjną.

### 5.3.2. Budownictwo z opoki

Na terenie Lubelszczyzny budownictwo zabytkowe i tradycyjne z wykorzystaniem opoki stanowi dość znaczny procent. Na przestrzeni wieków rozwinęło się wiele ośrodków, gdzie znaczna część zabudowy powstała z tego materiału. Oczywiście najbardziej znanymi są Kazimierz nad Wisłą i Janowiec, należy jednak pamiętać, że z opoki budowano również w miejscowościach na wschód i południe od Lublina (Piaski, Trawniki, Biskupice, Gardzienice itp.). Obiekty wzniesione całkowicie lub częściowo z tego kamienia spotkać można również w większych miastach jak Lublin i Chełm. Z surowca o dość podobnej budowie powstawały również obiekty na terenie Zamojszczyzny. Powodowane to było dostępnością materiału, łatwością w jego pozyskaniu i obróbce oraz ą wysoką estetyką. Duże znaczenie miała również dość wysoka izolacyjność cieplna murów z opoki.

W celu uzasadnienia podjętej tematyki pracy zdecydowano o przeprowadzeniu szeregu wizji lokalnych w miejscowościach o znacznym udziale obiektów z opoki. Do badań polowych wybrano budynki z Kazimierza nad Wisłą, Piaski i Trawniki. Wybór tych miejscowości spowodowany był procentowo największym udziałem opoki jako materiału murowego w obiektach zabytkowych i tradycyjnych. Dodatkowo w okolicach tych miejscowości zlokalizowane są

mniejsze i większe kamieniołomy, z których pobrano materiały do badań laboratoryjnych. Poniżej zamieszczono krótką charakterystykę budynków i zabudowy z opoki na wybranym terenie.

### **Kazimierz Dolny nad Wisłą**

W okolicach Kazimierza Dolnego spotkać się można z największą różnorodnością obiektów wzniesionych z opoki. W samym mieście i niewielkiej odległości od niego znajdują się trzy zamki (Kazimierz, Janowiec, Bochothnica). Na terenie rynku wzniesiono kilkanaście kamienic w zabudowie zwartej. Pozostałe budynki centrum to wolnostojące obiekty mieszkalne i użyteczności publicznej. Poza wymienionymi budynkami można napotkać charakterystyczne dla Kazimierza Dolnego spichlerze zbożowe, które wzniesiono wzdłuż brzegu rzeki Wisły. Po za ścisłym centrum i w okolicznych miejscowościach przeważającą część stanowi zabudowa zagrodowa.

### **Piaski**

W związku z bliskością kamieniołomów w samych Piaskach i na terenie gminy znajduje się znaczna ilość obiektów wzniesionych z opoki. Przeważa zabudowa zagrodowa, jedynie w centrum miejscowości znajduje się kilkanaście budynków piętrowych o zabudowie pierzejowej. Większość budynków z opoki została wzniesiona pod koniec XIX i w pierwszej połowie XX w. W najstarszych budynkach nie przykładano dużej wagi do dbałości o formę i kształt kamienia, przeważają mury warstwowe z kamienia łamanego o różnej wielkości. W późniejszym okresie stosowano materiał obrabiany ręcznie, zmniejszyły się wymiary stosowanych bloków, a spoiny stały się regularne. W tym czasie zaczęto też stosować czerwoną cegłę do wykonywania naroży i nadproży oraz obmurowywania nią strefy funkcjonalne budynku. W ten sposób obiekty wznoszono, aż do schyłku budownictwa z opoki, czyli lat 60-tych XX w.

### **Trawniki**

Na terenie gminy Trawniki znajduje się ponad 100 budynków, których materiałem konstrukcyjnym jest opoka. Najwięcej z nich znajduje się w dwóch największych miejscowościach tej gminy, czyli w Biskupicach i Trawnikach. W większości przypadków są to niewielkie domy jednorodzinne oraz budynki inwentarskie. Najstarsze obiekty pochodzą z XIX, część z nich to obiekty o charakterze zabytkowym. Na terenie gminy między innymi znajdują się: młyn typu holenderskiego i obora w Oleśnikach, budynki byłej cukrowni, młyn wodny w Siostrzotowie



## 6. METODYKA BADAŃ

Badania nad skutecznością preparatów do hydrofobizacji wgłębnej prowadzone były w Polsce w kilku ośrodkach. Wśród najważniejszych należy wymienić Politechnikę Krakowską, Wrocławską i Warszawską oraz Wojskową Akademię Techniczną. Na przestrzeni lat prowadzono próby z zastosowaniem szeregu metod oceny głębokości penetracji preparatów i skuteczności efektu hydrofobizacji. Promień penetracji próbowano badać za pomocą ultradźwięków, przy zastosowaniu porozymetrii rtęciowej oraz metodami elektrochemicznymi [94]. Kontrolę szczelności przepon miała umożliwiać metoda pomiaru ciepła zwilżenia [90]. W praktyce w większości przypadków metody te nigdy nie znalazły szerszego zastosowania. W chwili obecnej pomimo pojawienia się na rynku szeregu nowych preparatów, badania na dużą skalę nie są kontynuowane.

Zdecydowanie lepiej wygląda sytuacja związana z badaniami nad skutecznością preparatów stosowanych do hydrofobizacji powierzchniowej. W większości przypadków są to materiały o wysokim poziomie merytorycznym i opracowane kompleksowo. Badania prowadzone są przez Zakład Konserwacji Elementów i Detali Architektonicznych UMK w Toruniu, Instytut Chemii Przemysłowej w Warszawie, Instytut Techniki Budowlanej w Warszawie, oraz szereg ośrodków akademickich na terenie całego kraju.

Ze względu na temat pracy autor zdecydował się na krótką charakterystykę metod badania skuteczności preparatów stosowanych do iniekcji wgłębnych. Najwyższy poziom merytoryczny mają metodyki badań opisane w niemieckiej instrukcji WTA 4-4-04 oraz badania prowadzone przez Politechnikę Krakowską.

### **Badania WTA 4-4-04**

W najnowszej instrukcji WTA 4-4-04 [153] zawarto informacje dotyczące wykonywania iniekcji i oceny skuteczności w murach zawilgoconych. Zgodnie z nią prowadzone są badania przede wszystkim w Niemczech, w Polsce nie jest ona stosowana obligatoryjnie.

Z analizy autora wynika, że na dzień dzisiejszy jest to jedno z najlepszych opracowań traktujących o przeponach wykonywanych metodami iniekcji. W najnowszej instrukcji zamieszczono szereg informacji i metod badań dotyczących nie tylko skuteczności preparatów ale także ich trwałości w czasie. Jest to o tyle istotne, że w literaturze przedmiotu dotychczas problem trwałości raczej pomijano. Poniżej zamieszczone zostało streszczenie metodyki badań zgodnie z WTA 4-4-04.

Badania narzucają konieczność wzniesienia murów testowych i prowadzone są dla trzech przedziałów przesiąknięcia wilgocią tzw. DFG. Instrukcja zaleca prowadzenie badań dla DFG równego 60%, 80% oraz 95%. Badania skuteczności preparatu iniekcyjnego wymagają wykonania trzech testowych murków.

W dwóch prowadzi się iniekcje, trzeci ma charakter porównawczy. WTA szczególnie definiuje wymogi odnośnie cegieł i zapraw użytych do wykonania murów. [153]

Określono dwa kryteria, które muszą być spełnione w trakcie badań certyfikacyjnych [153]:

- Wilgotność masowa murów po 90 dniach od wykonania iniekcji musi, w stosunku do trzeciej próbki, spaść przynajmniej o 50 %.
- Wilgotność muru porównawczego nie może wzrastać w czasie przeprowadzania badań.

W instrukcji WTA zawarto opis badań preparatów stosowanych do iniekcji grawitacyjnych oraz niskociśnieniowych. Ze względu na tematykę pracy autor pominął w streszczeniu część dotyczącą iniekcji beziśnieniowej.

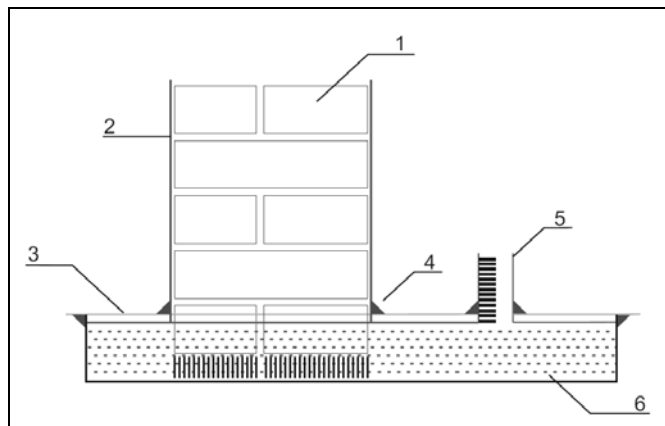
Każdy z trzech murów testowych musi składać się z 7 warstw cegieł. Grubość spoin poziomych musi wynosić 12mm, a pionowych 10mm. Pierwszą warstwę cegieł układa się na specjalnym ruszcie umożliwiającym przemieszczanie muru. Murki należy sezonować przez minimum 28 dni w temperaturze 23°C przy 50% wilgotności względnej powietrza. Następnie wykonuje się odwierty, tak aby nie zostały uszkodzone spoiny. Otwory wykonuje się w jednym lub dwóch rzędach, poziomo lub pod kątem (maksymalnie 45°). Stosuje się rozstaw osiowy otworów od 10 do 12,5cm. Po wykonaniu otworów wewnątrz należy odpylić [153].

Kolejnym etapem jest ustalenie stopnia przesiąknięcia wilgocią. Murki należy podgrzać do temperatury 60°C i przechowywać w tej temperaturze do uzyskania stałej masy. Kolejną czynnością jest studzenie i nawilżanie wodą do wysycenia. Ilość wody potrzebnej do wysycenia próbek oznaczana jest wagowo lub objętościowo. Następnie obliczeniowo określa się ilość wody niezbędną do uzyskania właściwego współczynnika DFG. Po kolejnym wysuszeniu nasycy się murki właściwą ilością wody. Po zakończeniu procesu próbki zabezpiecza się paroszczelną powłoką. Po 30 - 90 dniowym sezonowaniu (wyrównanie zawilgocenia w objętości próbki) mur jest gotowy do dalszych badań [153].

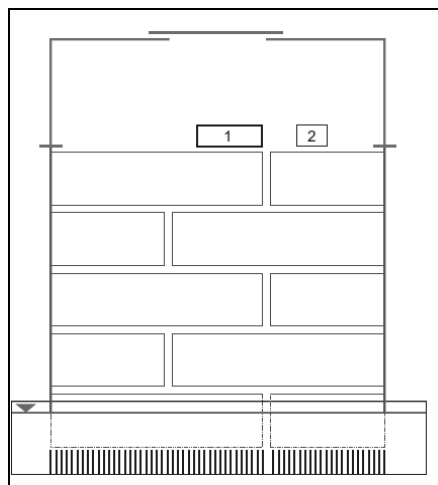
Iniekcję wykonuje się, zgodnie z danymi producenta preparatu iniekcyjnego. Po iniekcji w murze o DFG równym 95% natychmiast mur umieszcza się w pojemniku z wodą, tak aby połowa grubości dolnej warstwy cegieł znajdowała się w wodzie. Podobnie postępuje się z murem porównawczym. Powierzchnie próbki zabezpiecza się warstwą paroszczelną. Skuteczność przepony określana jest nie później, niż 14 dni po iniekcji. W murach o DFG 80% lub 60% bezpośrednio po iniekcji powierzchnie zostają pokryte warstwą paroszczelną. Oznaczanie skuteczności wykonuje się zgodnie z wytycznymi producenta iniektu, jednak nie później, niż 28 dni po wykonaniu iniekcji [153].

Skuteczność wykonanej przepony określana jest jedną z trzech metod:

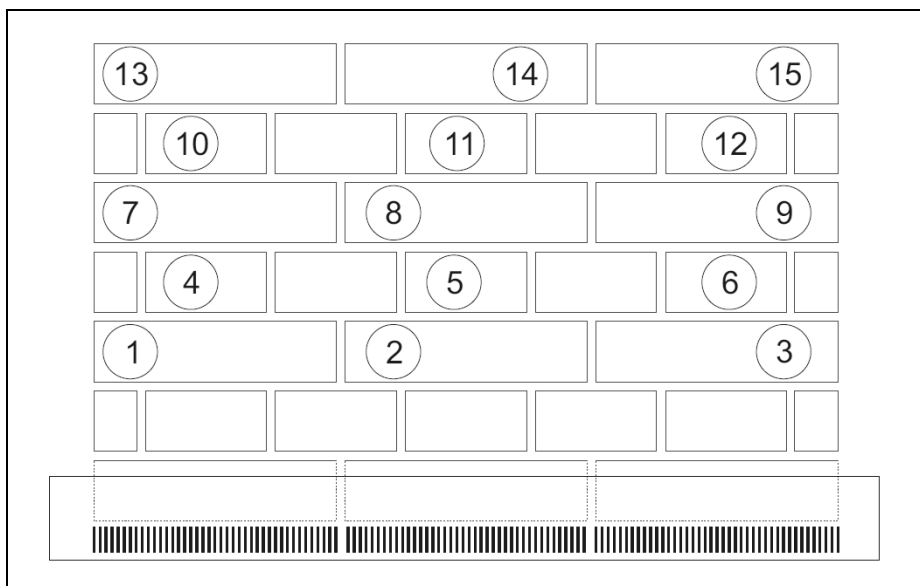
- pomiar objętości wody odparowanej z powierzchni przekroju poprzecznego próbki,
- pomiar ilości odparowanej wilgoci,
- pomiar wilgotności za pomocą mikrofal.



Fot. 6.1 Schemat sposobu badania skuteczności preparatu do iniekcji przez pomiar ilości objętości wody odparowanej z powierzchni przekroju poprzecznego próbki [153]. 1- murek, 2- powłoka paroszczelna, 3- zbiornik z zamknięciem, 4-uszczelnienie, 5- cylinder pomiarowy z podziałką, 6 – woda. Rys. na podstawie [153]



Fot. 6.2 Schemat sposobu badania skuteczności preparatu do iniekcji przez pomiar ilości odparowanej wilgoci [153]. 1 – pojemnik z żelazem pobierającym wilgoć z otoczenia, 2- rejestrator parametrów cieplno-wilgotnościowych. Rys. na podstawie [153]



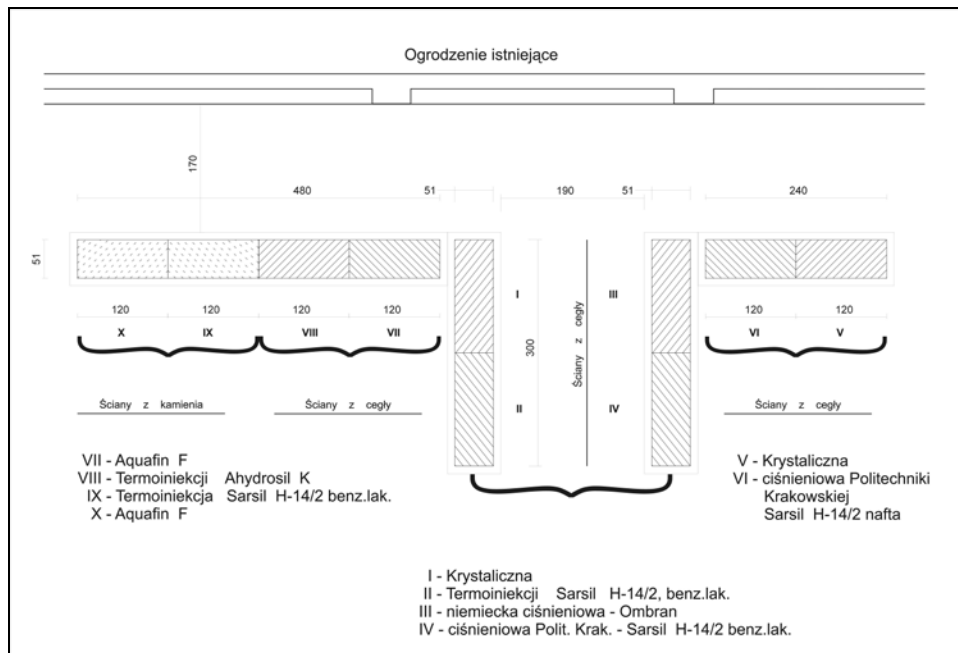
Fot. 6.3 Schemat sposobu badania skuteczności preparatu do iniekcji przez pomiar wilgotności za pomocą mikrofal. Usytuowanie punktów pomiarowych. Rys. na podstawie [153]

### **Badania metodą Politechniki Krakowskiej**

W latach 1992-1994 Politechnika Krakowska, w ramach umowy z Komitetem Badań Naukowych prowadziła prace badawcze, których celem była analiza skuteczności metod osuszania. Prace podzielono na trzy etapy, w których badano skuteczność technologii w obiektach eksploatowanych, na próbkach w laboratorium oraz na ścianach doświadczalnych. Badania dotyczyły preparatów i technologii, które obecnie nie są już stosowane. Dodatkowym problemem przy próbie adaptacji metodyki badań (Politechniki Krakowskiej) jest fakt, że badań tych nie ukończono i uzyskanie końcowych wyników było niemożliwe. Ze względu na to, autor zdecydował się na przytoczenie jedynie sposobu badań dla ścian doświadczalnych.

Badanie miało na celu sprawdzenie przydatności różnych metod osuszania w specjalnie stworzonych warunkach. Wzniesiony został zespół murów doświadczalnych, w których wykonano iniekcje różnymi metodami. Szkic ścian i stosowanych technologii zamieszczono na rysunku 6.4 [109].





Fot. 6.4 Szkic sytuacyjny ścian doświadczalnych i zastosowane metody osuszania. Rys. na podstawie [109]

Badania skuteczności preparatów wykonano metodą tradycyjną, pobierając próbki w dwóch pionach na długości każdego muru. Materiał do badań pozyskiwano za pomocą odwiertów rdzeniowych oraz w postaci zwierciny, od strony odwiertów iniekcyjnych. Próbkowanie odbywało się na głębokości 20cm, pod przeponą, w przeponie i 15cm nad przeponą. Na pobranych próbkach oznaczono nasiąkliwość. Na podstawie opracowanych wyników końcowych można domniemywać, że o skuteczności przepony miał świadczyć stosunek wilgotności pod przeponą do wyników nad przeponą [109].

W dostępnych materiałach brak jest informacji dotyczących sposobu nasączenia murów wodą, wstępnej wilgotności materiału podczas iniekcji oraz czasu sezonowania przed przystąpieniem do badań.



## **7. PROGRAM BADAŃ WŁASNYCH**

Celem badań jest określenie możliwości wykonania i skuteczności działania hydrofobizacji wgłębnej w murach z opoki. Na chwilę obecną brak jest jednolitych materiałów opisujących w sposób kompleksowy tego typu badania. W związku z tym, autor zdecydował o wykorzystaniu metodyki badań polecanej przez kilka różnych ośrodków badawczych. Całość badań została podzielona na cztery etapy.

### **I Etap**

W pierwszym etapie prowadzono badania opoki i zapraw przed procesem hydrofobizacji. Wykonano badania cech fizyko – mechanicznych opok pochodzących z trzech kamieniołomów w okolicach Piask, Trawnik i Kazimierza Dolnego nad Wisłą. Badaniu poddano również kilka rodzajów zapraw: wapienną, wapienno-cementową, trasową i trasową modyfikowaną pianą. Wprowadzenie do badań zaprawy trasowej, podyktowane było coraz częstszym jej stosowaniem, jako wypełniacza pustek i kawern, przed wykonywaniem przepony. W ramach prac I Etapu wykonano również badania struktury opoki. Zastosowano mikroskopię optyczną, analizę składu mineralnego metodą XRD i metodą termiczną DTA/TG oraz skaningową mikroskopię elektronową SEM. Dodatkowo wykonano szereg badań związanych z kalibracją urządzeń pomiarowych.

### **II Etap**

W drugim etapie wykonano kolejno badania związane z doбором preparatów hydrofobizujących, przeprowadzono proces hydrofobizacji oraz badania promienia penetracji preparatu. Ze względu na przyjęte założenie, że trudniej iniektować jest kamień niż zaprawę spoin, badaniom wstępnym (dobór preparatów) poddano opokę. W badaniach II Etapu wykorzystano ciosy kamienne pochodzące z okolic Kazimierza Dolnego nad Wisłą. Kamień pochodził z rozbiórki, co wyeliminowało konieczność jego sezonowania. Podczas tych badań wybrano trzy środki, które udało się wtłoczyć w kamień. Przy zastosowaniu wybranych preparatów wykonano iniekcje w dużej ilości ciosów kamiennych i próbek zapraw. Po wbudowaniu preparatu sprawdzono skuteczności hydrofobizacji.

### **III Etap**

Trzeci z etapów badań polegał na wyznaczeniu cech fizyko – mechanicznych opoki i zapraw po hydrofobizacji. W przypadku opoki wykonano badania: wytrzymałości na ściskanie, nasiąkliwości wodą, kapilarnego podciągania, odporności na zamarzanie, odporności na krystalizację soli oraz zasolenia. W zaprawach wykonano badania: nasiąkliwości, kapilarnego podciągania oraz kapilarnego podciągania przez pomiar wilgotności masowej. Wykonano również badania struktury opoki. Do badania zmian w strukturze opoki po hydrofobizacji

zastosowano skaningową mikroskopię elektronową SEM oraz metodę sorpcji par azotu.

#### IV Etap

Czwarty z etapów dotyczył hydrofobizacji murów. Badania prowadzono na trzech murach badawczych, wzniesionych w Laboratorium Budownictwa i Architektury Politechniki Lubelskiej. Właściwe oznaczenia poprzedzono badaniami możliwości wykonania iniekcji w blokach wielkowymiarowych z opoki i szybkości podciągania kapilarnego wody w murach z opoki. Iniekcję wykonano trzema metodami. W murze nr 1 wykonano iniekcję dwustronną w murze, w murze nr 2 i iniekcję jednostronną z wypełnieniem rys i spękań zaprawą na bazie trasu, w murze nr 3 iniekcję jednostronną. Na zakończenie przeprowadzono badania skuteczności przepony chemicznej w murze z opoki.

W sumie na przestrzeni trzech lat, realizując kolejne etapy badań, wykonano ponad tysiąc oznaczeń. W tabeli poniżej zamieszczono tabelaryczne zestawienie liczby badań.

Tab. 7.1 Zestawienie liczby pojedynczych badań wykonanych przy realizacji pracy

Grupa badań	Etap badań	Liczba oznaczeń
Badania kalibracyjne urządzeń pomiarowych	I	68
Badania cech opoki przed hydrofobizacją	I	102
Badania cech zapraw przed hydrofobizacją	I	257
Dobór preparatu	II	40
Iniekcja opoki	II	30
Iniekcja zapraw	II	60
Badania cech opoki po hydrofobizacji	III	120
Badania cech zapraw po hydrofobizacji	III	288
Hydrofobizacja murów	IV	226
<b>Suma</b>		<b>1091</b>

## 8. BADANIA WŁAŚCIWOŚCI MATERIAŁÓW PRZED HYDROFOBIZACJĄ

### 8.1. CHARAKTERYSTYKA CECH FIZYKO – MECHANICZNYCH OPOKI

W ramach prowadzonych prac wykonano badania cech fizyko-mechanicznych opoki pochodzącej z trzech miejscowości: Piask, Trawniki i Kazimierza Dolnego nad Wisłą. Ze względu na temat pracy (iniekcje w murach) zrezygnowano z materiału pochodzącego bezpośrednio ze złoża. We wszystkich przypadkach materiał do badań pochodził z rozbiórek istniejących obiektów. Próbkę przygotowano docinając ciosy kamienne do wymiarów zgodnych z wymaganiami poszczególnych norm. Łączna liczba przygotowanych próbek wyniosła 360 po 120 sztuk z każdej z miejscowości.

Badania były prowadzone w Laboratorium Politechniki Lubelskiej od lutego do maja 2008 roku. Materiał ten poddano badaniu cech istotnych dla materiałów konstrukcyjnych, czyli: wytrzymałości na ściskanie, nasiąkliwości, gęstości właściwej, gęstości pozornej, ścieralności, podciągania kapilarnego, otwartej porowatości i szczelności. Ze względu na obszerność materiału poniżej zamieszczone zostały wyniki końcowe poszczególnych badań.

Tab. 8.1 Oznaczanie wytrzymałości na ściskanie

Złoże	Liczba próbek	Wartość średnia wytrzymałości na ściskanie [MPa]
Kazimierz	14	15,88
Piaski	6	11,44
Trawniki	6	20,70

Tab. 8.2 Oznaczanie wytrzymałości na rozciąganie

Złoże	Liczba próbek	Wartość średnia wytrzymałości na rozciąganie [MPa]
Kazimierz	6	3,55
Piaski	6	2,44
Trawniki	6	4,32

Tab. 8.3 Oznaczanie ścieralności

Złoże	Liczba próbek	Wartość średnia ścieralności [cm]
Kazimierz	3	0,85
Piaski	3	0,78
Trawniki	3	0,88

Tab. 8.4 Oznaczanie nasiąkliwości

Złoże	Liczba próbek	Wartość średnia nasiąkliwości [%]
Kazimierz	6	26,6
Piaski	6	29,5
Trawniki	6	25,6

Tab. 8.5 Oznaczanie gęstości pozornej

Złoże	Liczba próbek	Wartość średnia gęstości pozornej [g/cm <sup>3</sup> ]
Kazimierz	5	1,37
Piaski	3	1,37
Trawniki	3	1,53

Tab. 8.6 Oznaczanie gęstości właściwej

Złoże	Liczba próbek	Wartość średnia gęstości właściwej [g/cm <sup>3</sup> ]
Kazimierz	5	2,43
Piaski	3	2,62
Trawniki	3	2,60

Tab. 8.7 Oznaczanie szczelności

Złoże	Liczba próbek	Wartość średnia gęstości szczelności [%]
Kazimierz	5	56,38
Piaski	3	52,23
Trawniki	3	59,15

Tab. 8.8 Oznaczanie porowatości

Złoże	Liczba próbek	Wartość średnia gęstości porowatości [%]
Kazimierz	5	43,62
Piaski	3	47,77
Trawniki	3	40,85

Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych próbek opok z Trawnik, Piask i Kazimierza Dolnego nad Wisłą stwierdzono, że:

- Wszystkie trzy opoki zaliczane są do skał tzw. lekkich, ich gęstość pozorną wynosi od 1,37 do 1,53 g/cm<sup>3</sup>.
- Żadna z badanych skał nie wyróżnia się pod względem ciężaru właściwego. Osiągnięte wyniki są porównywalne do wyników innych złóż w Polsce.
- Opoki z kamieniołomów w Kazimierzu Dolnym nad Wisłą i Piask wykazują niską wytrzymałość na ściskanie. Wyższe wyniki osiągnięte dla próbek z Trawnik nie przekraczają wartości zbadanych dla złóż z poza regionu.
- Ze względu na porowatość, skały ze wszystkich trzech badanych złóż zaliczamy do bardzo porowatych.

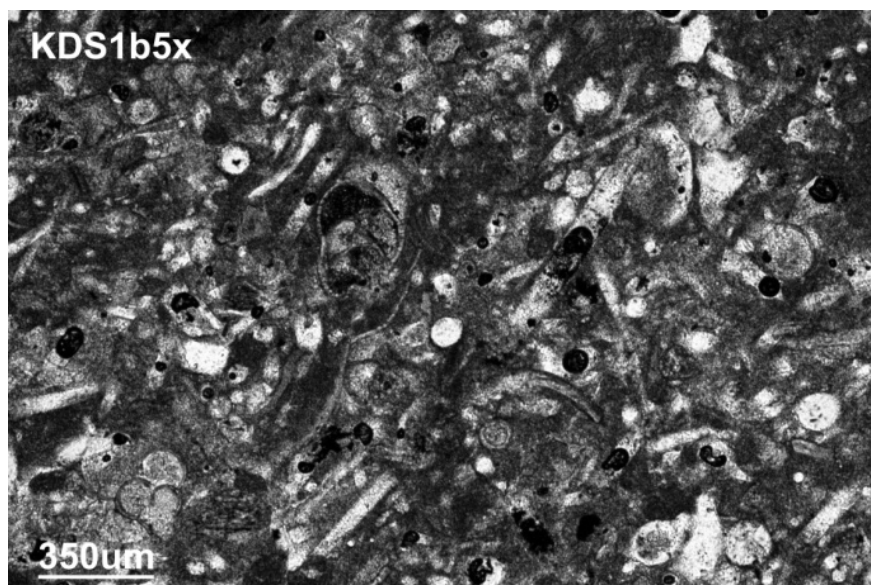
- Na podstawie badań opoki z Lubelszczyzny zakwalifikowano jako skały bardzo nasiąkliwe.
- Wyniki uzyskane na tarczy Bohemego, dla wszystkich trzech złóż, wykazały dużą ścieralność opok.

## 8.2. BADANIA STRUKTURY OPOKI

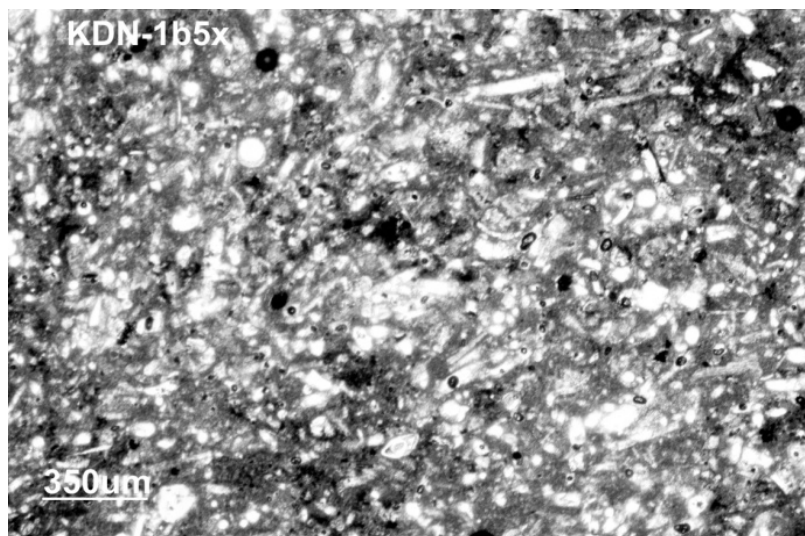
W ramach prowadzonych prac wykonano analizę mineralogiczno - petrograficzną opoki. Do badań wybrano opokę z Kazimierza Dolnego nad Wisłą. Badania wykonano przy pomocy mikroskopii optycznej, mikroskopii skaningowej (SEM), rentgenowskiej analizy fazowej (XRD) oraz termicznej analizy różnicowej.

### 8.2.1. Mikroskopia optyczna

Badania mikroskopowe w świetle przechodzącym przeprowadzono przy użyciu mikroskopu typu Nikon. Zdjęcia wykonano używając obiektywów o powiększeniu 5, 10, 20 i 40 razy. Poniżej zamieszczono przykładowe fotografie opoki z Kazimierza Dolnego nad Wisłą.



Fot. 8.1 Mikrostruktura opoki w mikroskopii optycznej



Fot. 8.2 Mikrostruktura opoki w mikroskopii optycznej

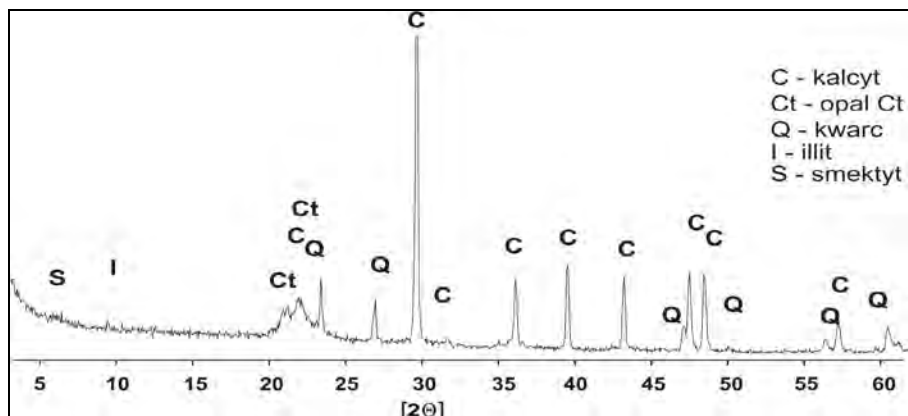
Obserwacje mikroskopowe wykazały bioorganodetryczną strukturę badanej opoki. W drobnoziarnistej masie skalnej można zauważyć węglanowe fragmenty planktonu morskiego oraz krzemionkowe, mocno pokruszone, szkielety igieł gąbek. Na fotografiach wyraźnie widoczne są również trawiasto-zielone ziarna glaukonitu oraz ceglasto-czerwone skupiska wodorotlenków żelaza.

### **8.2.2. Analiza składu mineralnego opoki metodą XRD (Rentgenowska analiza fazowa) oraz metodą termiczną DTA/TG**

Ze względu na drobnoziarnisty charakter badanej opoki (brak możliwości dokładnej oceny na podstawie mikroskopii optycznej) zdecydowano o wykonaniu badań uzupełniających. Analizę składu mineralnego skały wykonano w oparciu o metody XRD (Rentgenowska analiza fazowa) oraz metodę termiczną DTA/TG.

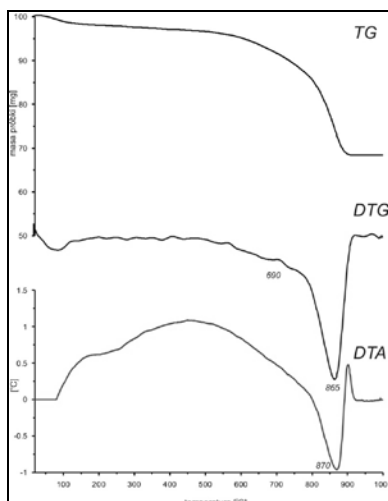
Na podstawie badań metodą XRD stwierdzono, że w składzie mineralnym badanej skały dominuje kalcyt, któremu towarzyszy skrytokrystaliczna krzemionka oraz niewielkie ilości kwarcu. Skład mineralny uzupełniają minerały ilaste smektyt i illit. Przykładowy wynik badań za pomocą rentgenowskiej analizy fazowej zamieszczono na Rys. 8.5.





Fot. 8.3 Wyniki analizy opoki metodą XRD

Badania metodą termiczną DTA/TG potwierdziły wcześniej zbadany skład mineralny. Pozwoliły również na ocenę ilościową składu. Zawartość głównego składnika mineralnego, jakim jest kalcyt wynosi 63%. W badanych próbkach stwierdzono również obecność krzemionki - ok. 15%, minerałów ilastych - ok. 11%. Kwarc i pozostałe minerały stanowią około 11%. Przykładowy wynik badań za pomocą metody DTA/TG zamieszczono na Rys. 8.6.

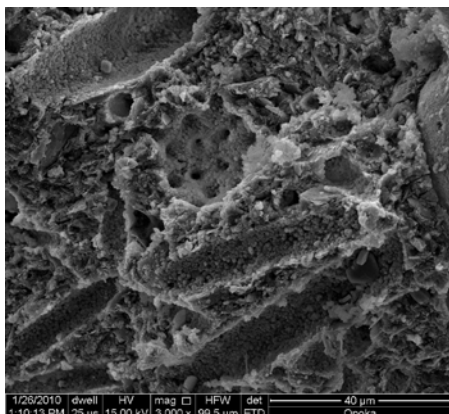


Fot. 8.4 Wyniki analizy opoki metodą DTA/TG

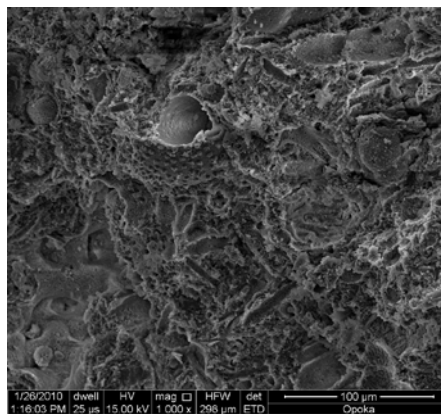
### 8.2.3. SEM -Skaningowa Mikroskopia Elektronowa

Badania opoki metodą SEM wykonano w Laboratorium Wydziału Budownictwa i Architektury PL przy użyciu aparatu QUANTA 250. Obserwacje w mikroskopie elektronowym wykazały wyraźnie porowaty charakter badanej opoki. Widoczne na zamieszczonych poniżej fotografiach pory, związane są

z pozostałościami po krzemionkowych igłach gąbek. Miejsca po igłach tworzą pory o podłużnym, walcowatym kształcie. Bardzo duża ilość tego typu porów wpływa na wysoką wartość podciągania kapilarnego w opoce.



Fot. 8.5 Obraz SEM opoki z Kazimierza Dolnego nad Wisłą



Fot. 8.6 Obraz SEM opoki z Kazimierza Dolnego nad Wisłą

### 8.3. CHARAKTERYSTYKA CECH FIZYKO - MECHANICZNYCH ZAPRAW

W ramach prowadzonych prac zdecydowano o wykonaniu badań zapraw używanych do wznoszenia murów z opoki. Oznaczeniom poddano zaprawę wapienną (dominującą w tego typu murach) oraz zaprawy wapienne z dodatkiem cementu (zaprawy wykorzystywane współcześnie). Dodatkowo wykonano badania dla zapraw trasowych ze względu na coraz częstsze stosowanie tych materiałów (jako wypełnienie pustek i kawern) w iniekowanych murach. W związku, z uzyskiwaną wysoką wytrzymałością na ściskanie zaprawy trasowej, zdecydowano o wykonaniu dodatkowych badań. Dodatek piany miał na celu napowietrzenie mieszanki trasowej, a co za tym idzie obniżenie wytrzymałości na ściskanie.

#### 8.3.1. Przygotowanie próbek do badań

Próbki do badań zostały przygotowane w Laboratorium Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Lubelskiej. Do celów badawczych wykonano próbki z trzech rodzajów zapraw:

- Zaprawy wapienne (w proporcji 1:1,5 w proporcji wapno-piasek )
- Zaprawy wapienne z dodatkiem cementu (1:0,25:2 w proporcji wapno-cement-piasek),
- Zaprawy trasowe (bez i z dodatkiem piany w proporcjach 1:1; 1:0,5; 1:0,4 w proporcji zaprawa trasowa -piana).

Zaprawy wapienne i wapienno-cementowe przygotowane zgodnie z PN-B\85-04500. Zaprawy trasowe przygotowane zgodnie z instrukcjami producentów. Zaprawę trasową napowietrzono preparatem na bazie białka kurzego (dostarczonym przez producenta gotowej zaprawy trasowej). Preparat białkowy został wymieszany z wodą i rozrobiony do uzyskania sztywnej piany. Kolejnym krokiem było wymieszanie piany z zaprawą trasową w odpowiednim stosunku objętościowym.

Do badań cech fizyko-mechanicznych zapraw wykonano próbki w postaci graniastoslupa o wymiarach  $40 \times 40 \times 160$  mm, w całkowitej liczbie 172 beleczek dla wszystkich typów użytych w badaniach zapraw. W sumie w ramach prowadzonych badań wykonano ponad 300 prób.

### 8.3.2. Oznaczanie cech fizyko - mechanicznych stwardniałych zapraw.

Próbki zapraw poddano badaniu: wytrzymałości na ściskanie, nasiąkliwości, gęstości właściwej, gęstości pozornej, podciągania kapilarnego, otwartej porowatości i szczelności. Ze względu na obszerność materiału poniżej zamieszczone zostały wyniki końcowe poszczególnych badań.

Tab. 8.9 Oznaczanie wytrzymałości na ściskanie, nasiąkliwości i kapilarności

Zaprawa	Wartość średnia wytrzymałości na ściskanie [MPa]	Wartość średnia nasiąkliwości [%]	Wartość średnia kapilarności [%]
Wapienna	1,2	15,9	15,6
Wapienno-cementowa	2,0	20,9	19,9
Trasowa	30,5	25,9	13,6
Trasowa z pianą 1:1	3,6	31,3	11,4
Trasowa z pianą 1:0,5	12,8	28,8	12,5
Trasowa z pianą 1:0,4	15,8	27,8	11,7

Badania wytrzymałości na ściskanie przyjętych zapraw wykazały bardzo dużą wartość dla zaprawy trasowej. Próby zwiększenia porowatości poprzez dodanie piany pozwoliły na wyraźne obniżenie uzyskiwanych wytrzymałości do wartości, przy których zaprawa trasowa mogłaby zostać zastosowana, jako wypełnienie pustek i kawern w murze.

Z przeprowadzonego badania wynika, że zaprawa wapienno-cementowa wykazuje większą nasiąkliwość niż zaprawa wapienna. W przypadku zapraw trasowych zwiększenie porowatości poprzez dodanie piany spowodowało kilku procentowe zwiększenie nasiąkliwości.

Z pośród badanych największą kapilarność zmierzono dla zaprawy wapienno-cementowej. Zaprawa trasowa wykazała niższą wartość kapilarności niż zaprawy tradycyjne.

Tab. 8.10 Oznaczanie gęstości pozornej i właściwej

Zaprawa	Wartość średnia gęstości pozornej [g/cm <sup>3</sup> ]	Wartość średnia gęstości właściwej [g/cm <sup>3</sup> ]
Wapienna	1,61	2,58
Wapienno-cementowa	1,59	2,52
Trasowa	1,55	2,40
Trasowa z pianą 1:1	0,76	
Trasowa z pianą 1:0,5	1,19	
Trasowa z pianą 1:0,4	1,28	

Badanie gęstości pozornej dało zbliżone wyniki dla zapraw wapiennej, wapienno-cementowej i trasowej. Modyfikowane zaprawy trasowe posiadają znacznie mniejszą gęstość, co jest wynikiem zwiększenia porowatości przy pomocy piany. Badanie gęstości właściwej metodą piknometryczną dało zbliżone wyniki dla zapraw wapiennej i wapienno-cementowej. Zaprawy trasowe czyste i modyfikowane pianą uzyskały identyczną wartość.

Tab. 8.11 Oznaczanie szczelności i porowatości

Zaprawa	Wartość średnia szczelności [%]	Wartość średnia porowatości [%]
Wapienna	62	38
Wapienno-cementowa	61	39
Trasowa	65	35
Trasowa z pianą 1:1	32	68
Trasowa z pianą 1:0,5	50	50
Trasowa z pianą 1:0,4	53	47

Zaprawy niemodyfikowane pianą uzyskały zbliżone porowatości. Zgodnie z zamierzeniami dodatek piany spowodował zwiększenie porowatości poszczególnych rodzajów zapraw trasowych.

## 9. HYDROFOBIZACJA MATERIAŁÓW

Badania poświęcone możliwości wytworzenia przepony chemicznej metodą iniekcji w materiałach wchodzących w skład murów z opoki podzielono na trzy etapy. Pierwszy etap badań polegał na doborze preparatów. Ze względu na przyjęte założenie, że trudniej iniekować jest kamień niż zaprawę spoin, badaniom poddano opokę wapnistą. W drugim etapie wykonano iniekcje ciosów kamiennych i próbek zapraw. Trzeci miał na celu sprawdzenie skuteczności hydrofobizacji.

### 9.1. DOBÓR PREPARATÓW HYDROFOBIZUJĄCYCH

W badaniach użyto kamień rozbiórkowy z Kazimierza Dolnego nad Wisłą. Próbkę o wymiarach 0,3x0,3x0,15-0,20m docięto w zakładzie kamieniarskim. Do próby tłoczenia wybrano pięć różnych typów preparatów stosowanych w iniekcjach wgłębnych hydrofobizujących. Zastosowano kolejno: żywicę akrylową, mieszaninę krzemianu i estru, krzemian modyfikowany silikonem, emulsję silikonową oraz mikroemulsję silikonową.

#### 9.1 Wyniki iniekcji z użyciem żywicy akrylowej

Nr próbki	Średnica [mm]	Wilgotność [%]	Ciśnienie [bar]	Uwagi
1	14	3,1	10	Przyjęła małą ilość preparatu
2	14	8,2	10	Przyjęła małą ilość preparatu
3	14	8,8	10	Przyjęła małą ilość preparatu
4	14	16,4	10	Przyjęła małą ilość preparatu
5	14	14,5	15	Przyjęła małą ilość preparatu
6	14	9,6	15	Mała ilość preparatu- uszkodzenie próbki
7	14	11,2	25	Mała ilość preparatu- uszkodzenie próbki
8	14	19,4	25	Mała ilość preparatu- uszkodzenie próbki

#### 9.2 Wyniki iniekcji z użyciem mieszaniny krzemianu i estru

Nr próbki	Średnica [mm]	Wilgotność [%]	Ciśnienie [bar]	Uwagi
1	14	4,23	10	Przyjęła małą ilość preparatu
2	14	4,45	10	Przyjęła małą ilość preparatu
3	14	15,7	10	Przyjęła małą ilość preparatu
4	14	16,3	10	Przyjęła małą ilość preparatu
5	14	9,1	15	Mała ilość preparatu- uszkodzenie próbki
6	14	7,8	15	Przyjęła małą ilość preparatu
7	14	9,6	15	Mała ilość preparatu- uszkodzenie próbki
8	14	11,2	25	Mała ilość preparatu- uszkodzenie próbki

## 9.3 Wyniki iniekcji z użyciem krzemianu modyfikowanego silikonem

Nr próbki	Średnica [mm]	Wilgotność [%]	Ciśnienie [bar]	Uwagi
1	14	6,1	8	Zakończone po wypiętrzeniu preparatu
2	14	6,9	10	Mała ilość preparatu- uszkodzenie próbki
3	14	17,5	8	Zakończone po wypiętrzeniu preparatu
4	14	16,5	8	Zakończone po wypiętrzeniu preparatu
4	14	17,8	10	Mała ilość preparatu- uszkodzenie próbki
5	14	18,0	15	Mała ilość preparatu- uszkodzenie próbki
6	14	9,6	15	Mała ilość preparatu- uszkodzenie próbki
7	14	11,2	25	Uszkodzenie po zwiększeniu ciśnienia
8	14	19,4	25	Uszkodzenie po zwiększeniu ciśnienia

## 9.4 Wyniki iniekcji z użyciem emulsji silikonowej

Nr próbki	Średnica [mm]	Wilgotność [%]	Ciśnienie [bar]	Uwagi
1	14	6,12	10	Zakończone po wypiętrzeniu preparatu
2	14	6,98	10	Zakończone po wypiętrzeniu preparatu
3	14	17,53	10	Zakończone po wypiętrzeniu preparatu
4	14	17,84	10	Mała ilość preparatu- uszkodzenie próbki
5	14	18,03	15	Zakończone po wypiętrzeniu preparatu
6	14	7,8	15	Zakończone po wypiętrzeniu preparatu
7	14	9,6	20	Uszkodzenie po zwiększeniu ciśnienia
8	14	11,2	20	Uszkodzenie po zwiększeniu ciśnienia

## 9.5 Wyniki iniekcji z użyciem mikroemulsji silikonowej

Nr próbki	Średnica [mm]	Wilgotność [%]	Ciśnienie [bar]	Uwagi
1	14	6,15	10	Zakończone po wypiętrzeniu preparatu
2	14	7,25	10	Zakończone po wypiętrzeniu preparatu
3	14	9,9	10	Zakończone po wypiętrzeniu preparatu
4	14	13,3	10	Zakończone po wypiętrzeniu preparatu
5	14	14,6	15	Zakończone po wypiętrzeniu preparatu
6	14	15,9	15	Zakończone po wypiętrzeniu preparatu
7	14	14,3	15	Mała ilość preparatu- uszkodzenie próbki
8	14	16,5	25	Uszkodzenie po zwiększeniu ciśnienia

Część próbek uległa zniszczeniu pod wpływem przyłożonego ciśnienia. Zniszczenie takie nastąpiło przez przekroczenie wytrzymałości na rozciąganie materiału. Podczas badań ciosy kamienne leżały swobodnie na stole, w murze panuje inny stan naprężeń. Elementy murowe są ściskane pionowo, ponadto mają ograniczoną swobodę odkształceń w kierunku poziomym wzdłuż muru. W takim stanie naprężenia możliwość przejścia naprężeń rozciągających jest większa i próbki te w murze niekoniecznie musiałyby ulec zniszczeniu.

Na podstawie uzyskanych wyników i obserwacji podczas badań stwierdzono, że dwa z pięciu zastosowanych preparatów (żywica akrylowa oraz mieszanina krzemianu i estru) nie warunkuje możliwości wykonania przepony. Substancji tych, ze względu na budowę (wielkość cząsteczek) nie udało się wtłoczyć

w opokę. Cząsteczki żywicy akrylowej są o rząd wielkości większe od dominujących średnic porów opoki. Dlatego też próby ich wtłoczenia zakończyły się całkowitym brakiem efektu. Cząsteczki szkła wodnego metakrzemianu sodowego lub potasowego są niewielkich rozmiarów mają około jednego nanometra. Jednak produkt który jest tłoczony to zoll w związku z tym jest zhydrolizowany i już na tym etapie cząsteczki są wyraźnie większe (micele mają powyżej  $10^{-7}$  m). Wspomniane micele są więc porównywalnej wielkości jak dominujące średnice porów opoki. Dodatkowo w momencie tłoczenia zollu powstaje metakrzemian wapnia  $\text{CaSiO}_3$  (związek trudno rozpuszczalny), który zasklepia pory i uniemożliwia dalsze tłoczenie substancji.

Pomimo niejednoznacznych wyników, uzyskanych dla krzemianu modyfikowanego silikonem, preparat przyjęto do dalszych badań. Pozostałe preparaty (emulsja silikonowa oraz mikroemulsja silikonowa) dały zdecydowanie najlepsze efekty i zostały zakwalifikowano do kolejnych badań.

## 9.2. PRZYGOTOWANIE PRÓBEK DO INIEKCJI HYDROFOBIZUJĄCEJ

Badania możliwości hydrofobizacji opoki prowadzono na ciosach kamiennych pozyskanych z materiału rozbiórkowego. Badany kamień pochodził z Kazimierza Dolnego nad Wisłą. W przeciwieństwie do badań wstępnych (dobór preparatów) nie zdecydowano się na docinanie ciosów do próbek regularnych. Podyktowane to było kosztami cięcia oraz dużymi stratami materiału. W sumie z zakupionego materiału ( $5 \text{ m}^3$ ) do badań wybrano 60 bloków kamiennych. Pozostały materiał został wykorzystany do budowy murów badawczych oraz do ewentualnej kolejnej serii badań.

W ramach prowadzonych badań hydrofobizacji zapraw przygotowano w sumie 60 próbek walcowych o wymiarach  $300 \times 300\text{-}350\text{mm}$ . Próbki formowano zaprawą przygotowaną zgodnie z recepturami zamieszczonymi w punkcie „Przygotowanie próbek do badań”. Wykonano po 15 próbek z zapraw wapiennej, wapienno cementowej i trasowej oraz po 5 próbek dla każdego rodzaju zaprawy trasowej modyfikowanej pianą.

Formy zostały dokładnie oczyszczone ze wszelkich zanieczyszczeń i pokryte olejem w celu zabezpieczenia próbek przed uszkodzeniem w czasie rozformowywania. Po zaobserwowaniu efektu związania zaprawy wapiennej (najdłuższy czas wiązania) próbki rozformowano.

Obserwacje wykazały jedynie przypowierzchniowe związanie próbek wapiennych. W celu przyspieszenia wiązania zaprawy wapiennej poddano je procesowi karbonizacji. Wykonano szczelny namiot z żelaznego stelażu i folii budowlanej, a następnie włożone zostały próbki z zaprawy wapiennej i przeprowadzono uszczelnienie klapy namiotu karbonizującego. Do środka namiotu wpuszczono dwutlenek węgla, po czym otwór wlotowy zamknięto. Proces karbonizacji

prowadzono przez 90 dni uzupełniając dwutlenek węgla, co dwie doby. Następnie próbki poddano procesowi sezonowania przez 9 miesięcy.

Przed przystąpieniem do wykonywania iniekcji hydrofobizującej wglębnej, w opoce oraz w zaprawach, próbki poddano procesowi nasączenia wodą. Próbki zostały umieszczone w wannach tak, aby woda sięgała do mniej więcej  $\frac{1}{4}$  ich wysokości. Próbki z opoki obracano co 12 godziny tak, aby w wodzie znalazły się wszystkie powierzchnie. Próbki zapraw poddano nasączeniu zgodnie z normą [166]. Po nasączeniu próbki wyjęto z wanien. W celu uzyskania różnych wilgotności masowych (wymogi badań) stale monitorowano wilgotność próbek. Wraz ze spadkiem wilgotności kolejne partie poddawano procesowi iniekcji. Od wilgotności najwyższych do najniższych. Pomiary wilgotności prowadzono miernikiem opornościowym z wprowadzonymi kalibracjami dla opoki i zapraw użytych w badaniach. Opis kalibracji miernika przedstawiono w rozdziale „Badania własne – Kalibracja urządzeń pomiarowych”.

### 9.3. PROCES HYDROFOBIZACJI MATERIAŁÓW

Przed przystąpieniem do iniekcji w każdej próbce został wywiercony otwór iniekcyjny o średnicy 12mm. Zwiercina z otworu wywierconego wolnoobrotową wiertarką udarową posłużyła do zbadania poziomu wilgotności każdej z próbek. Badanie wilgotności przeprowadzano metodą grawimetryczną. Następnie otwór został dokładnie wyczyszczony sprężonym powietrzem, by uniknąć zatkania otworu, które nie pozwalałoby na głęboką penetrację przez preparat. Do iniekcji użyto pompę pneumatyczną DITTMANN Uniprese D2 napędzaną kompresorem SCHNEIDER i pompę ręczną DESOI MZP-30. Podczas prac iniekcyjnych stosowano iniektory stalowe wielorazowego użytku z kalamitką spiczastą i iniektory plastikowe z główką płaską, o średnicy 12mm.

#### 9.3.1. Opoka

Do iniekcji próbek przeznaczono wybrane w badaniach wcześniejszych trzy typy preparatów. W celu ułatwienia analizy oznaczono je, jako: preparat I (na bazie krzemianu modyfikowanego silikonem), preparat II (na bazie emulsji silikonowej), preparat III (na bazie mikroemulsji silikonowej). Próbki hydrofobizowano wglębnie ze zmiennym ciśnieniem do 10 bar. Za koniec procesu iniekcji uznawano moment, w którym nie nastąpił znaczący spadek ciśnienia w okresie jednej godziny. W przypadku każdego z preparatów dla części bloków z opoki wykonano próby tłoczenia przy zwiększonym ciśnieniu. Przy preparatach II i III stosowano zmienne stężenia iniektów w zależności od uzyskanych wilgotności zgodnie z proporcjami podanymi przez producentów.

#### **Preparat I - krzemian modyfikowany silikonem**

Po wykonaniu pierwszych pięciu prób okazało się, że iniekcja preparatem jest stosunkowo trudna i powolna, a zużycie preparatu niewielkie. Próby inie-



kowania próbek o zmniejszających się wilgotnościach również nie dały zadowalających efektów. Badania zakończono po wykonaniu 10 prób badawczych, a materiał pozostawiono do dalszych badań.

### **Preparat II – emulsja silikonowa**

W początkowym okresie badań z użyciem preparatu II, wykonano iniekcje w blokach kamiennych o małej lub średniej wilgotności. Próbki stosunkowo dobrze przyjmowały preparat nie zaobserwowano jednak wypiętrzania się iniektu na powierzchni. Zastosowanie preparatu II w próbkach o wyższych wilgotnościach, optycznie przyniosło doskonały skutek. Podczas iniekcji próbki wydalały z siebie bardzo duże ilości wody, oraz dobrze przyjmowały preparat. Procesowi iniekcji poddano w sumie 20 próbek.

### **Preparat III – mikroemulsja silikonowa**

Podczas tłoczenia preparatu III zaobserwowano podobne zjawiska jak przy wcześniejszym badaniu z użyciem emulsji silikonowej. Procesowi iniekcji poddano w sumie 20 próbek wariantując stężenie preparatu oraz ciśnienie robocze.

## **9.3.2. Zaprawy**

Przy wyborze preparatu, warunkującego uzyskanie pozytywnych efektów podczas wykonywania przepon metodą iniekcji, autor pracy wyszedł z następującego założenia. Dobór iniektu uzależniony powinien być od możliwości wprowadzenia go w strukturę opoki. Uznano zatem, że możliwość wtłoczenia środka w kamień jest jednoznaczna z możliwością wtłoczenia w zaprawę. Ze względu na najlepsze wyniki uzyskane przy hydrofobizacji opoki do iniekcji zapraw wybrano preparat II (emulsję silikonową).

Podczas iniekcji stosowano zmienne ciśnienie zależnie od wcześniej zbadanej wytrzymałości danej zaprawy. W badaniach stosowano zmienne stężenia preparatu w zależności od uzyskanych wilgotności zgodnie z proporcjami podanymi przez producentów. Za koniec procesu iniekcji uznawano moment, w którym nie nastąpił znaczący spadek ciśnienia w okresie jednej godziny. Prowadząc proces wypełniania próbek preparatem kontrolowano jego zużycie.

### **Zaprawa wapienna**

Podczas iniekcji zapraw wapiennych wykonano 15 prób badawczych na próbkach o różnej wilgotności. Z uwagi na niewielką wytrzymałość zaprawy nie można było od razu stosować ciśnień dedykowanych do wykonywania iniekcji w murach (10 bar). Zastosowano ciśnienia w przedziale od 1-6 bar. Iniekcja próbek przy wilgotności powyżej 10% była utrudniona, ponieważ przy stosowaniu tak niewielkich ciśnień nie można wypchnąć tak dużej ilości wody z porów materiału. Z tego też powodu proces tłoczenia trwał znacznie dłużej niż w przypadku pozostałych zapraw. Pomimo tych ograniczeń udało się wtłoczyć prepa-

rat do 11 z 15 próbek. W przypadku pozostałych 3 zostały uszkodzone na samym początku tłoczenia i jedna pod koniec aplikacji.

### **Zaprawa wapienno-cementowa**

Niezadawalającymi wynikami zakończyły się próby wtłoczenia preparatu do próbek z zaprawy wapienno-cementowej. W zaprawach tych, dzięki zbadanej większej wytrzymałości tłoczono preparat z ciśnieniem dochodzącym do 10 bar. Proces wypełniania trwał znacznie dłużej, a ilości zużytego preparatu były wyraźnie mniejsze niż w przypadku zaprawy wapiennej. Próby zwiększenia ciśnienia do 10 bar pod koniec tłoczenia kończyły się uszkodzeniem próbki.

### **Zaprawy trasowe**

Zdecydowanie najgorsze rezultaty przy tłoczeniu iniektu odnotowano w przypadku czystych zapraw trasowych. Do zapraw trasowych nie udało się wprowadzić preparatu. Efektów również nie uzyskano mimo znacznego zwiększenia porowatości zaprawy. Szczelna struktura porów uniemożliwia penetrację preparatu.

## **9.4. WSTĘPNE BADANIA SKUTECZNOŚCI HYDROFOBIZACJI MATERIAŁÓW**

Próbki opoki oraz zapraw po wykonaniu iniekcji hydrofobizujących przechowywano w warunkach laboratoryjnych przez okres 60 dni. Czas ten był niezbędny do wysuszenia próbek i zakończenia procesu hydrofobizacji wewnątrz materiału. Odrzucono możliwość przyspieszenia suszenia w sposób sztuczny. Istniała obawa, że podwyższona temperatura zakłóci proces wbudowywania preparatu. Po upływie dwóch miesięcy próbki przecięto na połowy wzdłuż osi wykonanych podczas iniekowania otworów. Następnie przeprowadzono pomiary uzyskanych promieni penetracji (opoka i zaprawy) oraz wykonano badania absorpcji kroplą wody (opoka).

### **9.4.1. Opoka**

Badania promienia penetracji preparatu w próbkach polegały na pomiarze z dokładnością do 1mm strefy, która uległa hydrofobizacji. Początkowe próby wprowadzenia wraz z preparatem pigmentu, który przebarwiłby hydrofobizowany materiał, zakończyły się niepowodzeniem. Częsteczki barwnika okazały się znacznie większe niż średnice porów opoki. Barwnik pozostał na ściankach otworu w próbce. Problem wyznaczenia zasięgu wbudowania preparatu rozwiązano nanosząc na przecięte próbki krople wody. Efekt tego postępowania widoczny jest w zamieszczonej na końcu rozdziału dokumentacji fotograficznej. Dodatkowo wykonano badanie skuteczności hydrofobizacji metodą absorpcji kropli wody. [234] Test ten zalecany jest, jako wstępny test laboratoryjny dla hydrofobizowanej i niehydrofobizowanej powierzchni materiału.

Tab. 9.6 Zestawienie parametrów warunkujących skuteczność hydrofobizacji preparatu I

Nr próbki	Ciśnienie [bar]	Wilgotność [%]	Promień penetracji [cm]	Badanie absorpcji kroplą wody		
				Efekt hydrofobizacji tak/nie		
				3cm	6cm	9cm
I 1	10	9,04	0,3	nie	nie	nie
I 2	10	11,12	0,2	nie	nie	nie
I 3	10	10,88	0,1	nie	nie	nie
I 4	10	12,43	0,2	nie	nie	nie
I 5	15	14,78	1,1	nie	nie	nie
I 6	15	18,07	1,1	nie	nie	nie
I 7	15	17,26	0,9	nie	nie	nie
I 8	15	20,86	0,8	nie	nie	nie
I 9	15	23,24	1,0	nie	nie	nie
I 10	15	23,35	0,8	nie	nie	nie

Tab. 9.7 Zestawienie parametrów warunkujących skuteczność hydrofobizacji preparatu II

Nr próbki	Ciśnienie [bar]	Stężenie	Wilgotność [%]	Promień penetracji [cm]	Badanie absorpcji kroplą wody		
					Efekt hydrofobizacji tak/nie		
					3cm	6cm	9cm
II 1	10	1:10	8,12	5,2	tak	tak/nie	nie
II 2	10	1:10	9,65	5,6	tak	tak/nie	nie
II 3	10	1:10	12,24	5,5	tak	tak/nie	nie
II 4	15	1:8	16,13	5,9	tak	tak	nie
II 5	10	1:8	19,55	6,1	tak	tak	nie
II 6	10	1:8	18,12	5,8	tak	tak	nie
II 7	10	1:5	20,87	5,2	tak	tak/nie	nie
II 8	10	1:5	19,59	8,1	tak	tak	nie
II 9	15	1:5	23,34	9,4	tak	tak	tak
II 10	15	1:5	24,12	10,7	tak	tak	tak

Tab. 9.8 Zestawienie parametrów warunkujących skuteczność hydrofobizacji preparatu III

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

### Dokumentacja fotograficzna



Fot. 9.1 Zakończone niepowodzeniem tłoczenie preparatu I



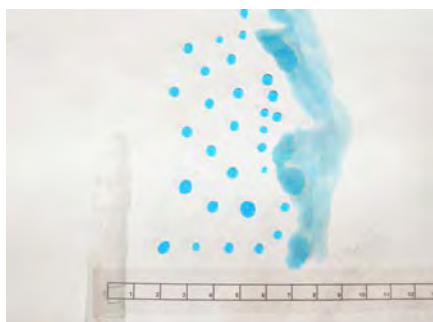
Fot. 9.2 Czop z krzemianu modyfikowanego silikonem wyjęty z otworu.



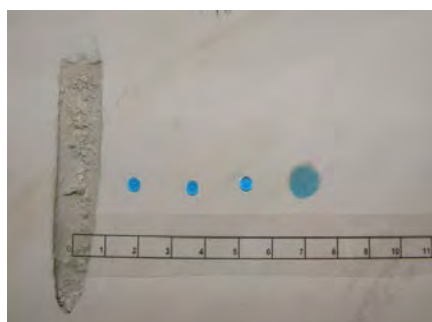
Fot. 9.3 Próbką II 10. Widoczny efekt hydrofobizacji na powierzchni przecięcia.



Fot. 9.4 Próbką III 6. badanie skuteczności hydrofobizacji metodą absorpcji kropli wody



Fot. 9.5. Próbką III 4. Pomiar promienia penetracji preparatu w opoce



Fot. 9.6 III 10. Pomiar promienia penetracji preparatu w opoce

Z badań wstępnych skuteczności i możliwości wytworzenia warstwy hydrofobowej w opoce wynika:

- Iniekcja preparatem I (krzemian modyfikowany silikonem) nie daje pożądaných rezultatów, promień penetracji jest znikomy, a badania absorpcji kroplą wody wykazują brak efektu hydrofobizacji.
- Iniekcja preparatem II przyniosła wymierne efekty. Po przecięciu próbek dokładnie widać duży promień penetracji, wynoszący średnio powyżej 5cm, a oznaczenie absorpcji kropli wody dało efekt pozytywny.
- Iniekcja preparatem III przyniosła połowiczne efekty. Udało się wprowadzić preparat i doszło do procesu hydrofobizacji materiału. Niestety częściowo niezadawalający jest uzyskany promień penetracji.
- Zarówno w przypadku preparatu II jak i III najlepsze efekty osiągnięto dla próbek o podwyższonej wilgotności, przy ciśnieniu 10 bar.

#### 9.4.1. Zaprawy

Badania promienia penetracji preparatu w próbkach polegały na pomiarze z dokładnością do 1mm strefy, która uległa hydrofobizacji. W przeciwieństwie do opoki dodany do iniektu barwnik swobodnie migrował wraz z preparatem w pory zapraw. Zmiana barwy pozwoliła na stosunkowo dokładny pomiar promienia penetracji. Z uwagi na porowatą strukturę zapraw wapiennych nie można było określić promienia penetracji preparatu metodą absorpcji kropli wody. Dokładne badania skuteczności wytworzonej warstwy hydrofobowej zawarto w dalszej części pracy.

W zamieszczonych poniżej tabelach przedstawiono wyniki badań i pomiarów dokonanych w ramach prowadzonej hydrofobizacji. Zamieszczono dane dotyczące: użytego ciśnienia, stężenia preparatu, wilgotności próbek oraz ilości wchłoniętego przez próbki preparatu.

Tab. 9.9 Zestawienie parametrów warunkujących możliwość wykonania hydrofobizacji zaprawy wapiennej

Nr próbki	Ciśnienie [bar]	Stężenie preparatu	Wilgotność [%]	Ilość preparatu [ml]	Promień penetracji [cm]	Uwagi
1	1-4	1:10	6,6	250	2,5	uszkodzenie próbki
2	1-6	1:10	9,0	150	3,0	uszkodzenie próbki
3	1-4	1:10	11,2	400	7,0	-
4	1-5	1:10	12,6	250	3,5	uszkodzenie próbki
5	1-6	1:8	15,6	700	8,0	-
6	1-6	1:8	17,4	750	7,0	-
7	1-6	1:8	18,8	500	5,5	-
8	1-6	1:8	16,6	600	5,5	-
9	1-6	1:7	22,8	600	6,0	-
10	1-6	1:7	23,7	650	5,5	-
11	1-6	1:7	21,5	550	5,0	uszkodzenie próbki
12	1-6	1:7	22,6	600	5,5	-
13	1-5	1:6	24,5	800	7,5	-
14	1-6	1:6	23,8	800	8,0	-
15	1-6	1:6	25,6	850	7,5	-

Tab. 9.10 Zestawienie parametrów warunkujących możliwość wykonania hydrofobizacji zaprawy wapienno-cementowej

Nr próbki	Ciśnienie [bar]	Stężenie preparatu	Wilgotność [%]	Ilość preparatu [ml]	Promień penetracji [cm]	Uwagi
1	4-8	1:10	7,2	450	3	-
2	4-8	1:10	9,0	300	2,5	-
3	4-10	1:10	8,6	250	2	uszkodzenie próbki
4	4-8	1:8	12,0	300	3,5	-
5	4-8	1:8	11,9	300	3	-
6	4-10	1:8	13,6	250	2	-
7	4-10	1:8	12,5	200	2	-
8	4-8	1:7	18,3	250	2	uszkodzenie próbki
9	4-10	1:7	17,6	300	3,5	-
10	4-8	1:7	19,6	200	1,5	uszkodzenie próbki
11	4-8	1:8	16,3	100	0,5	uszkodzenie próbki
12	4-10	1:7	23,6	250	2	-
13	4-8	1:7	22,3	200	1,5	uszkodzenie próbki
14	4-8	1:7	21,9	100	0,5	-
15	4-10	1:7	25,6	250	2	uszkodzenie próbki

Tab. 9.11 Zestawienie parametrów warunkujących możliwość wykonania hydrofobizacji zaprawy trasowej

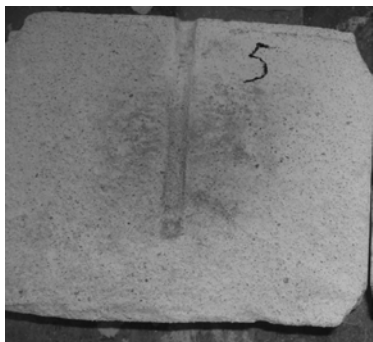
Nr próbki	Ciśnienie [bar]	Stężenie preparatu	Wilgotność [%]	Ilość preparatu [ml]	Promień penetracji [cm]	Uwagi
1	10-20	1:7	20,3	50	0,5	uszkodzenie próbki
2	10-20	1:7	15,6	20	0,3	-
3	10-20	1:7	24,5	20	0,3	uszkodzenie próbki
4	10-30	1:7	16,8	20	0,3	uszkodzenie próbki
5	10-20	1:7	18,1	40	0,5	-
6	10-20	1:7	20,0	20	0,3	-

Tab. 9.12 Zestawienie parametrów warunkujących możliwość wykonania hydrofobizacji zaprawy trasowej modyfikowanej pianą

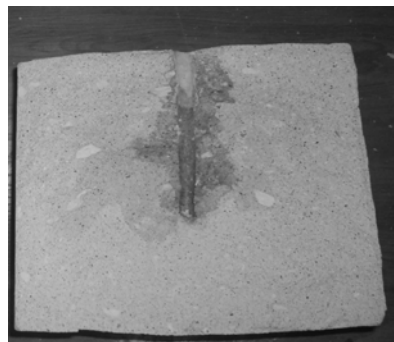
Nr próbki	Proporcja wymieszania z pianą	Ciśnienie [bar]	Stężenie preparatu	Wilgotność [%]	Ilość preparatu [ml]	Promień penetracji [cm]	Uwagi
1	1:1	10-20	1:7	21,2	20	0,5	uszkodzenie
2		10-20	1:7	23,0	20	0,5	-
3		10-20	1:7	18,6	0	0,5	uszkodzenie
4	1:0,5	10-20	1:7	24,2	20	0,3	-
5		10-20	1:7	21,6	20	0,5	-
6		10-20	1:7	20,4	50	0,5	-
7	1:0,4	10-20	1:7	21,8	20	0,3	-
8		10-20	1:7	20,2	20	0,5	-
9		10-20	1:7	22,0	20	0,5	uszkodzenie

Z badań wstępnych skuteczności i możliwości wytworzenia warstwy hydrofobowej w zaprawach (wapiennej, wapienno-cementowej i trasowych) wynika:

- Zadawalające efekty uzyskano tylko w zaprawie wapiennej. Podczas iniekcji przy zmiennym ciśnieniu 1-6 bar uzyskano średnio 5-8 cm penetracji preparatu. Pozwala to na stwierdzenie, że w zaprawach wapiennych można wytworzyć warstwę hydrofobową.
- Dodatek cementu do zaprawy wapiennej spowodował zmianę struktury porów a tym samym uniemożliwił wytworzenie większych promieni penetracji porów. Maksymalny promień penetracji wyniósł 3cm. Oznacza to, że w tego typu materiale, przy zalecanych w instrukcjach ciśnieniach roboczych wykonanie hydrofobizacji jest praktycznie niemożliwe.
- Do zapraw trasowych nie udało się wprowadzić preparatu, a co za tym idzie zhydrofobizować ich. Podobny brak efektów odnotowano w przypadku zapraw trasowych modyfikowanych pianą. Pomimo bardzo wysokiej porowatości nie udało się wtłoczyć wystarczającej ilości preparatu.



Fot. 9.7 Próbka z zaprawy wapiennej po procesie tłoczenia emulsji silikonowej



Fot. 9.8 Próbka z zaprawy wapienno-cementowej po procesie tłoczenia emulsji silikonowej

## 9.5. CHARAKTERYSTYKA CECH FIZYKO – MECHANICZNYCH OPOKI PO HYDROFOBIZACJI

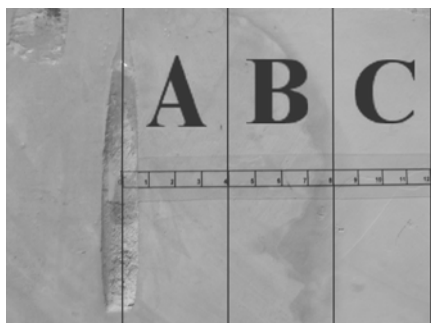
Badania cech fizyko-mechanicznych opoki po hydrofobizacji wykonano po 90 dniach od zakończenia procesu tłoczenia preparatu. W ramach prowadzonych badań wykonano oznaczenia wytrzymałości na ściskanie, nasiąkliwości wodą, kapilarnego podciągania, odporność na zamarzanie, odporność na krystalizację soli. Dodatkowo wykonane zostały badania wpływu hydrofobizacji na zmianę zasolenia próbek solami budowlanymi (siarczany, chlorki, azotany).

Szczegółowe badania cech fizyko-mechanicznych opoki po hydrofobizacji przeprowadzono dla próbek nasączanych emulsją silikonową. Ze względu na brak efektów przy nasączaniu kamieni krzemianem modyfikowanym silikonem oraz niewystarczające efekty przy mikroemulsji silikonowej badania tych próbek ograniczono do pomiaru nasiąkliwości. W badaniach przyjęto założenie, że strefy A i B uległy hydrofobizacji natomiast strefa C, nie została nasączona preparatem. Pozwala to na traktowanie materiału ze strefy C, jako opoki nie hydrofobizowanej. Przyjęcie takiego założenia pozwala na porównywanie zmieniających się właściwości w obrębie tego samego bloku kamiennego, co biorąc pod uwagę ogólną niejednorodność opoki pochodzącej z tego samego złoża jest kluczowe.

### 9.5.1. Przygotowanie próbek

Materiał do badań pobrano z wcześniej poddanych hydrofobizacji próbek opoki. Na pile stołowej z każdego bloku hydrofobizowanego wycięto próbki ze stref A, B i C o wymiarach 40x40x160mm zgodnie z Rys. 9.17. Dodatkowo wycięto próbki sześciennie przeznaczone do badań odporności na krystalizację soli. W sumie do wszystkich typów badań przygotowano 450 próbek po 150 z każdej ze stref.





Fot. 9.9 Opoka. Podział kamienia na strefy pomiarowe



Fot. 9.10 Wycięte i przygotowane do badań próbki strefy C

### 9.5.2. Oznaczanie wytrzymałości na ściskanie

Miejsce przeprowadzenia badania: Laboratorium Politechniki Lubelskiej. Badanie zostało przeprowadzone zgodnie z normą nr: PN-EN 1926:2001.

Tab. 9.13 Badania wytrzymałości na ściskanie próbek z opoki po hydrofobizacji preparatem II

Nr Próbki	Strefa A Wytrzymałość [MPa]	Strefa B Wytrzymałość [MPa]	Strefa C Wytrzymałość [MPa]
1	18,24	18,6	18,42
2	18,1	17,47	17,87
3	19,89	20,11	19,69
4	17,25	18,36	16,95
5	14,69	13,25	14,63
6	12,5	12,9	13,19
7	22,9	20,36	21,55
8	14,85	15,6	15,9
9	17,2	16,95	14,53
10	15,49	16,02	15,32
11	18,25	16,32	17,28
12	17,01	15,39	17,63
13	14,56	11,25	13,92
14	20,1	18,65	18,87
$R_{sr}$	17,22	16,52	16,84

Badania wytrzymałości na ściskanie próbek z opoki hydrofobizowanej emulsją silikonową nie wykazały istotnych różnic w stosunku do opoki nienasączonej. Pomiedzy strefami A i C różnica w średnich wartościach wynosi, co prawda 4% na korzyść próbek zhydrofobizowanych, ale już w strefie B średnia wartość jest mniejsza niż dla strefy C. Podobne wyniki uzyskano w przypadku próbek hydrofobizowanych preparatami I i III.

### 9.5.3. Oznaczenie nasiąkliwość wodą

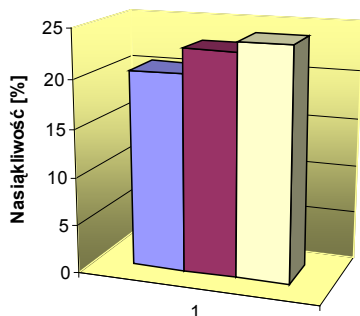
Badania nasiąkliwości wodą opoki po procesie hydrofobizacji wykonane zostały dwukrotnie. Pierwsze przeprowadzono po 90 dniach od zakończenia tłoczenia i dotyczyły próbek, hydrofobizowanych preparatami I, II, III.

Badanie zostało przeprowadzone zgodnie z normą nr: PN-EN 13755.

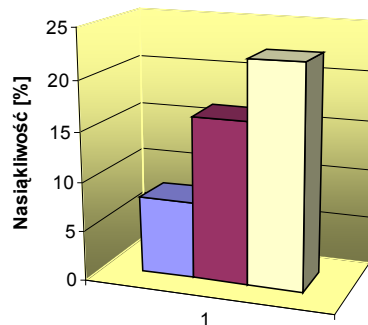
Tab. 9.14 Badania nasiąkliwości próbek z opoki zhydrofobizowanych preparatami I, II i III

Preparat	Strefa A	Strefa B	Strefa C
	Nasiąkliwość [%]	Nasiąkliwość [%]	Nasiąkliwość [%]
$A_{b\acute{s}r}$	20,41	22,88	23,86
$A_{b\acute{s}r}$	7,72	16,35	22,29
$A_{b\acute{s}r}$	12,48	19,26	23,46

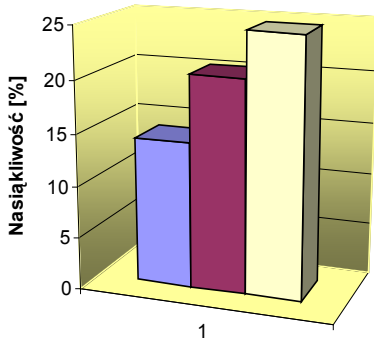
Zależności nasiąkliwości materiału od odległości od otworu, którym tłoczony był preparat przedstawiono na rysunkach



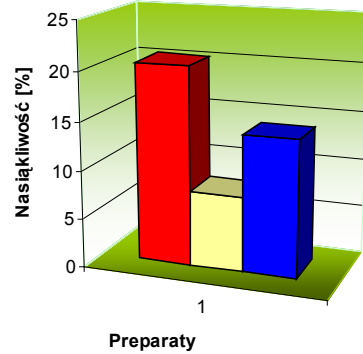
Rys. 9.1 Wykres zależności nasiąkliwości od odległości materiału od otworu iniekcyjnego dla preparatu I. Odpowiednio kolor niebieski strefa A, fioletowy strefa B, kremowy C



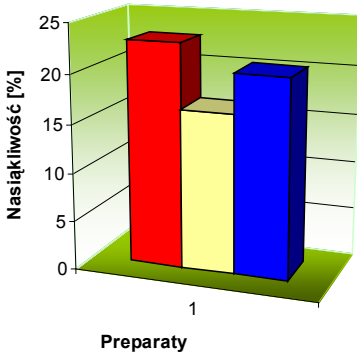
Rys. 9.2 Wykres zależności nasiąkliwości od odległości materiału od otworu iniekcyjnego dla preparatu II. Odpowiednio kolor niebieski strefa A, fioletowy strefa B, kremowy C



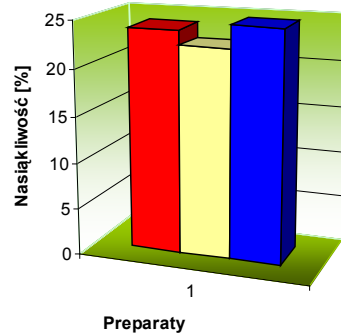
Rys. 9.3 Wykres zależności nasiałkiwości od odległości materiału od otworu iniekcyjnego dla preparatu III. Odpowiednio kolor niebieski strefa A, fioletowy strefa B, kremowy C



Rys. 9.4 Wykres nasiałkiwości w strefie A w zależności od zastosowanego preparatu. Odpowiednio kolor czerwony preparat I, żółty II i niebieski III



Rys. 9.5 Wykres nasiałkiwości w strefie B w zależności od zastosowanego preparatu. Odpowiednio kolor czerwony preparat I, żółty II i niebieski III



Rys. 9.6 Wykres nasiałkiwości w strefie C w zależności od zastosowanego preparatu. Odpowiednio kolor czerwony preparat I, żółty II i niebieski III

Po zakończeniu badań, próbki opoki hydrofobizowanej emulsją silikonową pozostawiono w warunkach laboratoryjnych na okres 18 miesięcy. Drugie badania przeprowadzono po upływie 18 miesięcy i objęły one próbki nasączone preparatem II (emulsja silikonowa). Celem badań w drugim etapie było określenie wpływu czasu na zachowanie efektu hydrofobizacji.

Tab. 9.15 Badania nasiąkliwości próbek z opoki zhydrofobizowanych preparatem II

Nr próbki	Strefa A	Strefa B	Strefa C
	Nasiąkliwość [%]	Nasiąkliwość [%]	Nasiąkliwość [%]
II 1	9,51	23,14	22,09
II 2	7,79	8,2	28,24
II 3	7,11	11,12	25,29
II 4	4,14	3,96	17,88
II 5	3,23	6,98	6,42
II 6	7,19	25,02	27,46
II 7	9,49	20,98	24,03
II 8	11,12	22,23	23,36
II 9	6,69	19,23	23,53
II 10	8,65	20,69	24,39
<b>A<sub>bśr</sub></b>	<b>7,49</b>	<b>16,16</b>	<b>22,27</b>

Z zakończonych badań nasiąkliwości próbek z opoki hydrofobizowanych preparatami I, II i III oraz powtórnych opoki hydrofobizowanej preparatem II wynika:

- Brak istotnych różnic w nasiąkliwości pomiędzy strefami A, B i C próbek opoki hydrofobizowanych preparatem I (krzemian modyfikowany silikonem).
- Zmniejszenie nasiąkliwości w strefie A średnio o 70 % i strefie B o blisko 35% w stosunku do nasiąkliwości materiału w strefie C próbek opoki hydrofobizowanych preparatem II (emulsja silikonowa).
- Zmniejszenie nasiąkliwości w strefie A średnio o blisko 60 % i strefie B o około 15% w stosunku do nasiąkliwości materiału w strefie C próbek opoki hydrofobizowanych preparatem III (mikroemulsja silikonowa).
- Sezonowanie zhydrofobizowanych próbek przez 18 miesięcy nie przyniosło większych zmian w uzyskiwanej nasiąkliwości. W przypadku stref A i B nastąpił minimalny spadek nasiąkliwości odpowiednio o 0,23% i 0,19%. W przypadku strefy niehydrofobizowanej różnica była na poziomie 0,2%.

#### 9.5.4. Oznaczenie kapilarnego podciągania

Oznaczenie kapilarnego podciągania opoki po procesie hydrofobizacji wykonane zostało po 120 dniach od zakończenia tłoczenia i dotyczyło próbek hydrofobizowanych preparatem II. Ze względu na bardzo złe i niezadawalające efekty w przypadku preparatów I i III (potwierdzone wcześniejszymi oznaczeniami) odstąpiono od ich dalszych badań.

Badanie zostało przeprowadzone w Laboratorium Wydziału Budownictwa i Architektury PL zgodnie z normą: PN-EN 1925 : Metody badań kamienia natu-

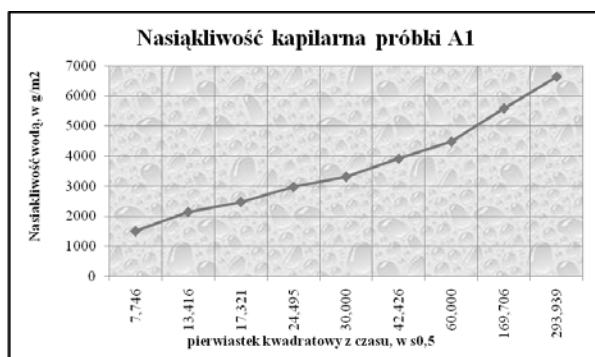
ralnego. Oznaczenie współczynnika nasiąkliwości kapilarnej. Do badań przeznaczono po 16 próbek z każdej strefy hydrofobizowanych kamieni. Ze względu na obszerność materiału poniżej zamieszczone zostały wyniki końcowe badań oraz przykład opracowania graficznego wyników.

### Próbka A1

Tab. 9.16 Obliczenia współczynnika nasiąkliwości kapilarnej próbki A1

$m_d$ [g]	$m_i$ [g]	$m_i - m_d$ [g]	A [m <sup>2</sup> ]	$\sqrt{t_i}$ [s]	C1	Y g/m <sup>2</sup>	X $\sqrt{t}$ [s]
337,78	340,08	2,300	0,001528	7,746	194,325	1505,236	7,746
337,78	341,05	3,270	0,001528	13,416	159,510	2140,052	13,416
337,78	341,56	3,780	0,001528	17,321	142,826	2473,822	17,321
337,78	342,33	4,550	0,001528	24,495	121,566	2977,749	24,495
337,78	342,84	5,060	0,001528	30,000	110,384	3311,518	30,000
337,78	343,76	5,980	0,001528	42,426	92,245	3913,613	42,426
337,78	344,62	6,840	0,001528	60,000	74,607	4476,440	60,000
337,78	346,31	8,530	0,001528	169,706	32,895	5582,461	169,706
337,78	347,92	10,140	0,001528	293,939	22,577	6636,126	293,939

$m_i$  - kolejne masy próbki do badania, w gramach,  $m_d$  - masa suchej próbki do badania, w gramach, A - powierzchnia zanurzona w wodzie, w metrach kwadratowych,  $t_i$  - czas, który upłynął od początku badania do momentu, w którym wykonano pomiar kolejnej masy próbki  $m_i$  w sekundach,  $C_1$  - współczynnik nasiąkliwości kapilarnej wodą, zmierzony w kierunku prostopadłym do płaszczyzny anizotropii kamienia, w gramach na m<sup>2</sup> i na s<sup>0,5</sup>,  $C_2$  - współczynnik nasiąkliwości kapilarnej wodą, zmierzony w kierunku równoległym do płaszczyzny anizotropii kamienia, w gramach na m<sup>2</sup> i na s<sup>0,5</sup> Y - nasiąkliwość wodą w g/m<sup>2</sup> X - pierwiastek kwadratowy z czasu w s<sup>0,5</sup>



Rys. 9.7 Wykres dla kapilarnego podciągania opoki (A1 – próbki, które uległy hydrofobizacji)



Fot. 9.11 Badanie kapilarnego podciągania opoki strefa A po godzinie badania



Fot. 9.12 Badanie kapilarnego podciągania opoki strefa B po godzinie badania



Fot. 9.13 Badanie kapilarnego podciągania opoki strefa C po godzinie badania

Tab. 9.17 Porównanie wyników średniej wartości arytmetycznej współczynnika nasiąkliwości kapilarnej próbek z opoki hydrofobizowanych emulsją silikonową

Strefa	Liczba próbek	$C_{sr} [g/m^2*s^{0,5}]$
A	16	<b>18,290</b>
B	16	<b>86,820</b>
C	8	<b>111,408</b>

Z zakończonych badań kapilarnego pociągania próbek opoki hydrofobizowanej emulsją silikonową (preparat II) wynika:

- Zastosowany preparat w próbkach strefy A zatrzymał podciąganie kapilarne i osiągnięty został bardzo niski współczynnik C.
- W próbkach strefy B wartość współczynnika C była 4 krotnie większa niż w strefie A. Niezadawalający efekt związany jest z jedynie częściową hy-

drofobizacją próbek. Podciąganie kapilarne odbywało się częścią niezabezpieczoną preparatem.

- W przypadku próbek strefy C (próbki nie zhydrofobizowane) uzyskano największą wartość współczynnika C.

### 9.5.5. Odporność na zamarzanie

Badanie zostało przeprowadzone zgodnie z normą: PN-EN 12371 : Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczenie mrozoodporności.[180] Badania wykonano na 24 próbkach, po 8 z każdej strefy (A, B, C), po 180 dniach od wykonanej hydrofobizacji.

W punkcie niniejszym przedstawiono wyniki końcowe po 56 cyklach zamarzania.

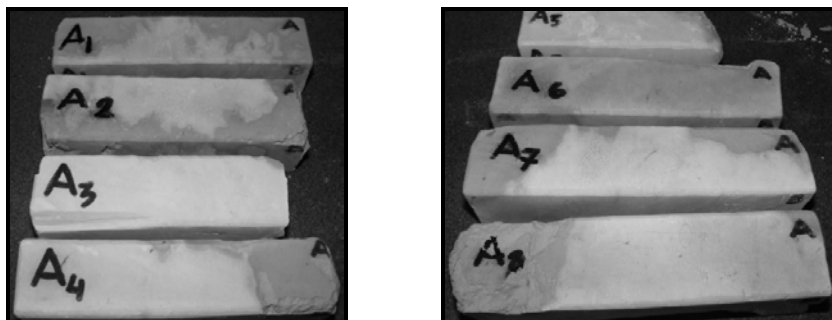
Przy ocenie wizualnej stosujemy następującą skalę :

- 0 – próbka do badań nienaruszona
- 1 – bardzo małe zniszczenia, nie powodują dezintegracji próbki
- 2 – jedno lub kilka małych pęknięć, oddzielenie małych fragmentów  $\leq 10\text{mm}^2$
- 3 – jedno lub kilka pęknięć, oddzielenie fragmentów  $\geq 10\text{mm}^2$
- 4 – próbka do badania przelamana na dwie części lub ze znacznymi pęknięciami
- 5 – próbka do badań w kawałkach

Osiągnięcie punktu 3 skali powoduje zaklasyfikowanie próbki jako zniszczonej.

Tab. 9.18 Wyniki pomiarów objętości próbek strefy A po 56 cyklach

Nr próbki	$M_{s0}$ [g]	$M_{h0}$ [g]	$V_{b0}=(M_{s0}-M_{h0})$ [ml]	$M_{sn}$ [g]	$M_{hn}$ [g]	$V_{bn}=(M_{sn}-M_{hn})$ [ml]	$\Delta V_b$ [%]
A1	388,12	135,37	252,75	380,08	132,74	247,34	<b>2,14</b>
A2	443,24	155,8	287,44	416,14	146,22	269,92	<b>6,10</b>
A3	389,46	130,08	259,38	379,03	128,05	248,28	<b>4,4</b>
A4	382,69	132,93	249,76	379,45	132,07	247,38	0,95
A5	382,84	127,75	205,09	310,94	109,13	200,98	<b>2,00</b>
A6	376,71	134,56	242,15	372,62	133,60	239,02	<b>1,29</b>
A7	406,31	140,7	265,61	405,36	140,86	264,50	0,42
A8	437,01	155,83	281,18	424,01	152,61	271,40	<b>3,48</b>

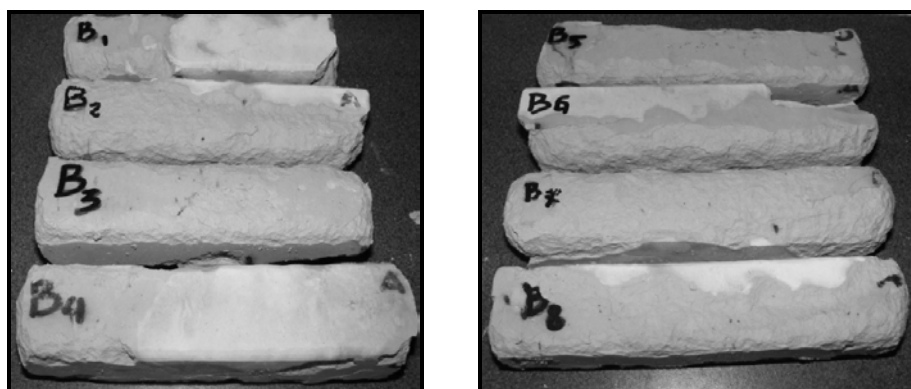


Fot. 9.14 Próbkki A. Fotografia wykonana po 56 cyklu rozmrażania próbek z opoki

Tab. 9.19 Wyniki pomiarów objętości próbek strefy B po 56 cyklach

Nr próbki	$M_{so}$ [g]	$M_{ho}$ [g]	$V_{bo}=(M_{so}-M_{ho})$ [ml]	$M_{sn}$ [g]	$M_{hn}$ [g]	$V_{bn}=(M_{sn}-M_{hn})$ [ml]	$\Delta V_b$ [%]
B1	417,07	173,83	243,24	345,23	142,46	202,77	<b>16,64</b>
B2	437,83	185,14	252,69	400,25	169,01	231,24	<b>8,49</b>
B3	446,5	195,28	251,22	382,90	165,22	217,68	<b>13,35</b>
B4	478,18	203,28	274,90	452,19	190,32	261,87	<b>4,74</b>
B5	442,03	191,85	250,18	393,45	171,45	222,00	<b>11,26</b>
B6	470,6	199,41	271,19	440,33	182,40	257,93	<b>4,89</b>
B7	454,24	194,99	259,25	420,57	179,42	241,15	<b>6,98</b>
B8	409,26	174,91	234,35	395,11	168,41	226,70	<b>3,26</b>

Uwagi : Wszystkie próbki zostały zakwalifikowane, jako uszkodzone, osiągnęły powyżej 1 % spadku objętości.



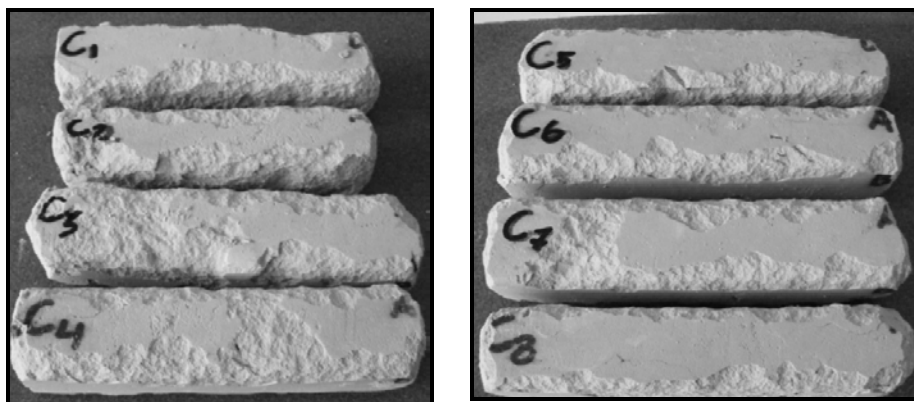
Fot. 9.15 Próbkki B. Fotografia wykonana po 56 cyklu rozmrażania próbek z opoki



Tab. 9.20 Wyniki pomiarów objętości próbek strefy C po 56 cyklach

Nr próbki	M <sub>so</sub> [g]	M <sub>ho</sub> [g]	V <sub>bo</sub> =(M <sub>so</sub> - M <sub>ho</sub> ) [ml]	M <sub>sn</sub> [g]	M <sub>hn</sub> [g]	V <sub>bn</sub> =(M <sub>sn</sub> -M <sub>hn</sub> ) [ml]	ΔV <sub>b</sub> [%]
C1	449,17	194,63	254,54	411,47	177,23	234,24	<b>7,98</b>
C2	424,38	182,51	241,87	364,21	156,58	207,63	<b>14,16</b>
C3	453,51	196,39	257,12	421,87	182,68	239,19	<b>6,97</b>
C4	428,95	187,96	240,99	411,96	180,51	231,45	<b>3,96</b>
C5	488,65	212,94	275,71	462,21	199,74	262,47	<b>4,80</b>
C6	455,30	198,65	256,65	432,37	187,22	245,15	<b>4,48</b>
C7	490,28	213,51	276,77	464,14	202,20	261,94	<b>5,36</b>
C8	406,49	176,62	229,87	388,89	168,96	219,93	<b>4,32</b>

Uwagi : Wszystkie próbki zostały zakwalifikowane, jako uszkodzone, osiągnęły powyżej 1 % spadku objętości.



Fot. 9.16 Próbki C. Fotografia wykonana po 56 cyklu rozmrażania próbek z opoki

Na podstawie uzyskanych wyników badań i obserwacji stwierdzono :

- Po 56 cyklach zamrażania na próbkach strefy A dwie uznano za nieuszkodzone w pozostałych spadek masy był na poziomie około 4%.
- Pomiar objętości wykazał, iż próbki B i C uznano za uszkodzone już po 28 cyklu (osiągnęły ubytek objętości większy niż 1 %)
- Próbki B nie wykazały zniszczeń jedynie w części nasączonej preparatem.
- Emulsja silikonowa nie pogorszyła właściwości mrozoodpornych opoki, a wręcz przeciwnie zabezpieczyła ją przed destrukcyjnym działaniem niskich temperatur.

### 9.5.6. Odporność na krystalizację soli

Badanie zostało przeprowadzone zgodnie z normą: PN-EN 12370 : Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczenie odporności na krystalizację soli [179]. Badania wykonano po 180 dniach od wykonanej hydrofobizacji.

Badanie normowe dotyczy obciążania próbek roztworem soli siarczanowych  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (siarczan sodu). Autor pracy zdecydował o przeprowadzeniu badań w szerszym zakresie, badając odporność na krystalizację soli chlorkowych i azotanowych.

Próbki sześciennie o boku (40mm) powinny być wycięte piłą diamentową, a jedna z powierzchni powinna być oszlifowana, cały luźny materiał powinien być zmyty z powierzchni próbki pod bieżącą wodą. Próbki do badania należy wysuszyć do stałej masy w suszarce w temp. 105 ° C. Próbki należy trwale oznakować i zważyć z dokładnością do 0,01g.

Badanie składa się z 15 cykli, na jeden cykl składa się 2 godzinne nasiąkanie w roztworze soli i co najmniej 16 godzinne suszenie w suszarce w temp. 105°C.

- Wysuszone próbki należy umieścić w pojemniku i pokryć 14 % roztworem soli do głębokości 10mm nad powierzchnią próbki. Minimalna odległość między próbkami ma wynosić 10mm, a brzegami pojemnika 20mm. Próbki należy nasączać przez 2 godziny (temp. 20°C) pod przykryciem, aby uniknąć parowania.
- Po nasączeniu próbki umieścić w suszarce, na co najmniej 16 godzin w temp. 105°C. W początkowym etapie suszenia, aby uzyskać dużą wilgotność względną należy (jeszcze przed włożeniem próbek) umieścić w zimnej suszarce kувety z wodą i włączyć ogrzewania na 30 minut.
- Po każdym z 15 cykli próbki przechowuje się w wodzie o temp. 23 ° C przez 24 godziny, następnie suszy do stałej masy i waży [179].

Wyniki należy przedstawić stosując wzór [179]:

$$\Delta M = \frac{M_1 - M_{d1}}{M_d} \times 100 \quad (9.1)$$

Gdzie:

$M_d$  – masa suchej próbki do badania [g],

$M_{d1}$  - masa wysuszonej i oznakowanej próbki do badania przed pierwszym cyklem [g],

$M_1$  – masa wysuszonej i oznakowanej próbki do badania po 15 cyklach [g],

$\Delta M$  - względna różnica mas przed i po badaniu ( strata lub przyrost masy ) [%].

W przypadku, gdy próbka uległa zniszczeniu lub pękła w czasie badania, należy podać całkowitą liczbę cykli.

**Siarczan sodu**Stężenie soli ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) : 14% stosunek wagowyTab. 9.21 Różnica mas próbek A po przeprowadzonych cyklach zasolenia siarczanem sodu ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )

Nr próbki	Masa próbki suchej [g]	Masa próbki po 15 cyklach [g]	Różnica mas [g]	Różnica mas [%]
A1	81,965	81,889	-0,076	-0,1
A2	82,026	81,972	-0,054	-0,1
A3	76,27	75,859	-0,411	-0,5
A4	75,906	75,857	-0,049	-0,1
A5	76,238	75,123	-1,115	-1,5
A6	93,816	93,434	-0,382	-0,4

Uwagi : na próbkach zabezpieczonych preparatem brak uszkodzeń, zanotowano nieznaczny ubytek masy.

Tab. 9.22 Różnica mas próbek B po przeprowadzonych cyklach zasolenia siarczanem sodu ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )

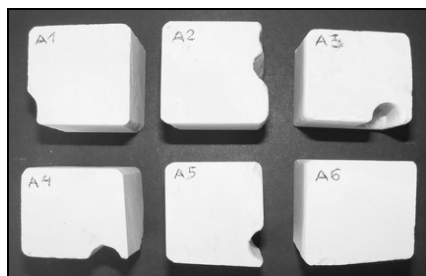
Nr próbki	Masa próbki suchej [g]	Masa próbki po 15 cyklach [g]	Różnica mas [g]	Różnica mas [%]
B1	86,615	32,84	-53,775	-62,1
B2	77,374	zniszczona po 4 cyklu	-	-
B3	94,332	zniszczona po 4 cyklu	-	-
B4	96,415	zniszczona po 3 cyklu	-	-
B5	83,59	zniszczona po 3 cyklu	-	-
B6	90,653	38,445	-52,208	-57,6

Uwagi : na próbkach widoczne zniszczenia na styku zabezpieczonej powierzchni z niezabezpieczoną.

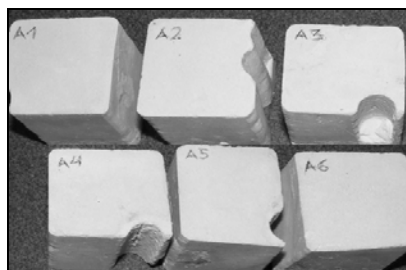
Tab. 9.23 Różnica mas próbek C po przeprowadzonych cyklach zasolenia siarczanem sodu ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )

Nr próbki	Masa próbki suchej [g]	Masa próbki po 15 cyklach [g]	Różnica mas [g]	Różnica mas [%]
C1	84,244	zniszczona po 13 cyklu	-	-
C2	84,863	zniszczona po 13 cyklu	-	-
C3	86,313	zniszczona po 4 cyklu	-	-
C4	88,454	zniszczona po 10 cyklu	-	-
C5	88,491	zniszczona po 13 cyklu	-	-
C6	87,907	zniszczona po 13 cyklu	-	-

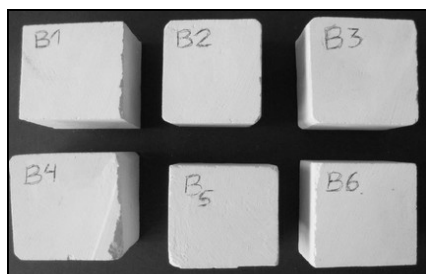
Uwagi : próbki poddane roztworowi soli zostały całkowicie zniszczone, ich objętość z każdym cyklem malała, aż uzyskały postać pyłu, na koniec badania nie można było zanotować ich masy.



Fot.9.17 Początkowy stan próbek strefy A przed zasoleniem siarczanem sodu



Fot.9.18 Próbki strefy A po 15 cyklach zasolenia w roztworze 14 % siarczanu sodu.



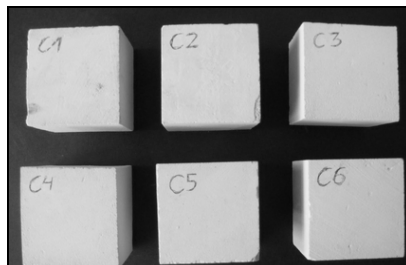
Fot.9.19 Początkowy stan próbek strefy B przed zasoleniem siarczanem sodu



Fot.9.20 Próbki strefy B po 2 cyklu zasolenia w roztworze 14 % siarczanu sodu



Fot.9.21 Próbki strefy B po 15 cyklu zasolenia w roztworze 14 % siarczanu sodu



Fot.9.22 Początkowy stan próbek strefy C przed zasoleniem siarczanem sodu



Fot.9.23 Próbki strefy C po 2 cyklu zasolenia w roztworze 14 % siarczanu sodu



Fot.9.24 Próbki strefy C po 10 cyklu zasolenia w roztworze 14 % siarczanu sodu

**Chlorek sodu**

Stężenie soli (NaCl): 14% stosunek wagowy

Tab. 9.24 Różnica mas próbek A po przeprowadzonych cyklach zasolenia chlorkiem sodu (NaCl)

Nr próbki	Masa próbki sucha [g]	Masa próbki po 15cyklach [ g ]	Różnica mas [ g ]	Różnica mas [%]
A1	90,394	90,674	0,280	0,310
A2	85,316	85,661	0,345	0,404
A3	75,112	75,293	0,181	0,241

Uwagi : Przebieg badania jest zgodny z normą, zamiast soli normowej zastosowano chlorek sodu. Brak widocznych uszkodzeń, nieznaczny przyrost masy.

Tab. 9.25 Różnica mas próbek B po przeprowadzonych cyklach zasolenia (NaCl)

Nr próbki	Masa próbki sucha [g]	Masa próbki po 15cyklach [ g ]	Różnica mas [ g ]	Różnica mas [%]
B1	91,183	zniszczona 10	-	zniszczona 10 cykl
B2	74,663	zniszczona 13	-	zniszczona 13 cykl
B3	77,432	zniszczona 8 cykl	-	zniszczona 8 cykl

Uwagi : Przebieg badania jest zgodny z normą, zamiast soli normowej zastosowano chlorek sodu. Na próbkach widoczne zniszczenia na styku zabezpieczonej powierzchni z niezabezpieczoną, oddzielenie i zniszczenie niezabezpieczonej części.

Tab. 9.26 Różnica mas próbek C po przeprowadzonych cyklach zasolenia (NaCl)

Nr próbki	Masa próbki sucha [g]	Masa próbki po 15cyklach [ g ]	Różnica mas [ g ]	Różnica mas [%]
C1	88,749	89,980	1,231	1,387
C2	87,125	87,639	0,514	0,590
C3	87,758	88,859	1,101	1,255

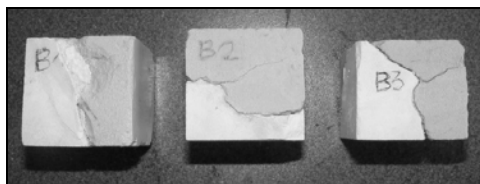
Uwagi : Przebieg badania jest zgodny z normą, zamiast soli normowej zastosowano chlorek sodu. Brak widocznych uszkodzeń, na powierzchni próbki osadza się sól co przyczyniło się do wzrostu masy próbki po 15 cyklu badania.



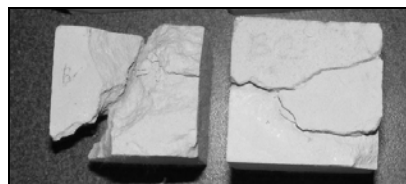
Fot.9.25 Początkowy stan próbek strefy A przed zasoleniem chlorkiem sodu



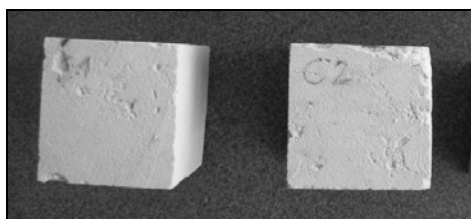
Fot.9.26 Próbki strefy A po 15 cyklach zasolenia w roztworze 14 % chlorku sodu



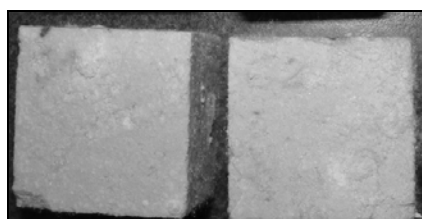
Fot.9.27 Próbkki strefy B po 8 cyklu zasolenia w roztworze 14 % chlorku sodu



Fot.9.28 Próbkki strefy B po 10 cyklu zasolenia w roztworze 14 % chlorku sodu



Fot.9.29 Próbkki strefy C po 8 cyklu zasolenia w roztworze 14 % chlorku sodu



Fot.9.30 Próbkki strefy C po 15 cyklu zasolenia w roztworze 14 % chlorku sodu

## Azotan sodu

Stężenie soli ( $\text{NaNO}_3$ ): 14% stosunek wagowy

Tab. 9.27 Różnica mas próbek A po przeprowadzonych cyklach zasolenia azotanem sodu ( $\text{NaNO}_3$ )

Nr próbki	Masa próbki sucha [g]	Masa próbki po 15 cyklach [ g ]	Różnica mas [ g ]	Różnica mas [%]
A1	79,244	79,523	0,279	0,352
A2	90,920	91,260	0,340	0,374
A3	83,129	83,470	0,341	0,410

Uwagi : Przebieg badania jest zgodny z normą, zamiast soli normowej zastosowano azotan sodu. Brak widocznych uszkodzeń, nieznaczny przyrost masy spowodowany powierzchniowym osadzeniem się soli.

Tab. 9.28 Różnica mas próbek B po przeprowadzonych cyklach zasolenia azotanem sodu ( $\text{NaNO}_3$ )

Nr próbki	Masa próbki sucha [g]	Masa próbki po 15 cyklach [ g ]	Różnica mas [ g ]	Różnica mas [%]
B1	86,658	zniszczona 10 cykl	-	-
B2	86,621	zniszczona 9 cykl	-	-
B3	73,462	zniszczona 12 cykl	-	-

Uwagi : Przebieg badania jest zgodny z normą, zamiast soli normowej zastosowano azotan sodu. Przelamanie próbki w miejscu styku powierzchni zabezpieczonej preparatem z niezabezpieczoną, destrukcja części próbki.

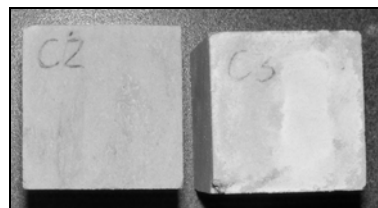
Tab. 9.29 Różnica mas próbek C po przeprowadzonych cyklach zasolenia azotanem sodu ( $\text{NaNO}_3$ )

Nr próbki	Masa próbki sucha [g]	Masa próbki po 15 cyklach [g]	Różnica mas [g]	Różnica mas [%]
A1	81,965	81,889	-0,076	-0,1
A2	82,026	81,972	-0,054	-0,1
A3	76,27	75,859	-0,411	-0,5

Uwagi : Przebieg badania jest zgodny z normą, zamiast soli normowej zastosowano azotan sodu.



Fot.9.31 Próbkki strefy A po 15 cyklach zasolenia w roztworze 14 % azotanem sodu



Fot.9.32 Próbkki strefy C po 15 cyklach zasolenia w roztworze 14 % azotanem sodu



Fot.9.33 Próbkki strefy B po 9 cyklach zasolenia w roztworze 14 % azotanem sodu

Podsumowanie badania :

- Próbkki strefy A bez względu na zastosowaną sól po 15 cyklach pozostały nieuszkodzone.
- Charakter zniszczeń próbek strefy B dla każdej z soli miał identyczny przebieg. W pierwszych cyklach pojawiały się pęknięcia na styku materiału hydrofobizowanego i nie hydrofobizowanego, a następnie dochodziło do rozwarstwiania się skały i destrukcji materiału niezabezpieczonego (przy badaniach  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ).
- Próbkki strefy C okazały się całkowicie nieodporne na działanie  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , uległy całkowitej degradacji, nie dotrwały do końca cykli. W pozostałych badaniach nie stwierdzono uszkodzeń materiału.
- Zastosowany preparat zabezpieczył próbki przed destrukcyjnym działaniem soli

### 9.5.7. Badanie zasolenia

Badanie obciążenia solami budowlanymi próbek po hydrofobizacji wykonano przy użyciu gotowych testów firmy MERCK [207][208][209]. Miało ono na celu stwierdzenie, czy zastosowany preparat nie wpłynie na wzrost zasolenia materiału. Oznaczenia wykonano dla siarczanów, chlorków i azotanów.

Tab. 9.30 Ocena stopnia zasolenia na podstawie stężenia soli [50]

[%]	Niskie	Średnie	Wysokie
Chlorki	< 0,2	0,2 – 0,5	> 0,5
Azotany	< 0,1	0,1 – 0,3	> 0,3
Siarczany	< 0,5	0,5 – 1,5	> 1,5

Tab. 9.31 Wyniki badania zawartości soli budowlanych na próbkach opoki poddanej procesowi hydrofobizacji emulsją silikonową (Preparat II)

Rodzaj próbki	Zawartość chlorków [%]	Zawartość siarczanów [%]	Zawartość azotanów [%]
A1	0,04	0,15	0,01
A2	0,05	0,2	0,01
B1	0,04	0,34	0,01
B2	0,04	0,1	0,03
C1	0,06	0,25	0,02
C2	0,05	0,34	0,02

W badanych próbkach opoki nie stwierdzono podwyższonych ilości soli budowlanych. Zawartości chlorków, siarczanów i azotanów w materiale stref A i B są porównywalne do wartości uzyskanych w strefie C (materiał nie nasączony emulsją silikonową).

## 9.6. BADANIA STRUKTURY OPOKI PO HYDROFOBIZACJI

W rozdziale niniejszym zamieszczono wyniki badań struktury opoki po hydrofobizacji emulsją silikonową (preparat II). Badania wykonano metodą sorpcji par azotu oraz przy użyciu Skaningowej Mikroskopii Elektronowej SEM. Badania wykonano po upływie 180 dni od nasączania próbek. Oznaczenia wykonano w Laboratorium Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Lubelskiej.

### 9.6.1. Metoda sorpcji par azotu – badanie tekstury

Charakterystyka parametrów tekstury badanych opok została przeprowadzona za pomocą niskotemperaturowej izotermy adsorpcji i desorpcji azotu w temperaturze ciekłego azotu 77° K na aparacie ASAP 2020 firmy Micromeritics.



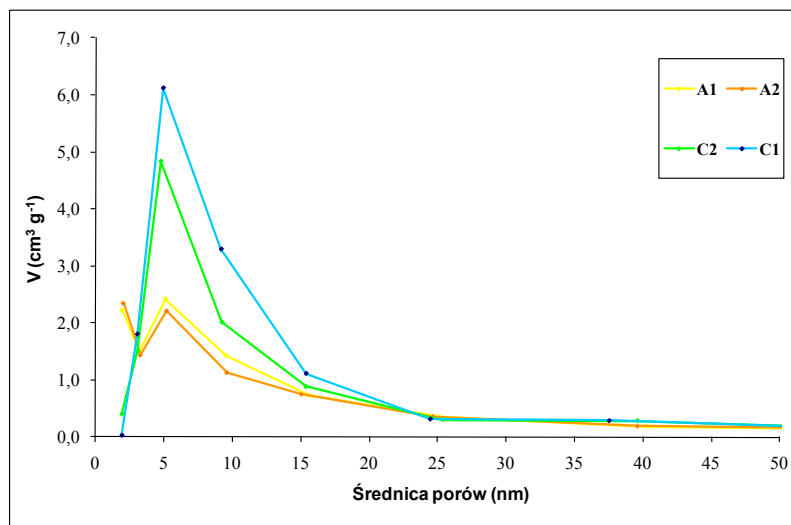
Próbki przed analizą były odgazowywane pod niskim ciśnieniem w temperaturze 250°C przez 6 godzin. Dzięki takiemu przygotowaniu możliwy był pomiar ciśnienia względnego z dokładnością do 0,00001 mmHg, oraz ilości zaadsorbowanego gazu na powierzchni.

Z zależności tych dwóch wartości zostały określone izotermi adsorpcji i desorpcji, będące podstawą do dalszych obliczeń właściwości powierzchniowych badanych skał.

Otrzymane dane adsorpcyjne zostały użyte do określenia powierzchni właściwej wyznaczonej metodą BET,  $S_{BET}$ , z wykorzystaniem niskotemperaturowej izotermi azotu (77°K – 78°K) i całkowitej pojemności porów,  $V_v$ , przy ciśnieniu względnym  $p/p_0=0,98$ .

W celu scharakteryzowania wielkości porów, wykorzystano metodę Barreta, Joynera i Halendy (BJH). Służy ona do obliczenia funkcji rozkładu porów względem ich promienia tzw. *Pore Size Distribution* (PSD)

Wyniki badań opoki hydrofobizowanej emulsją silikonową (Preparat II)

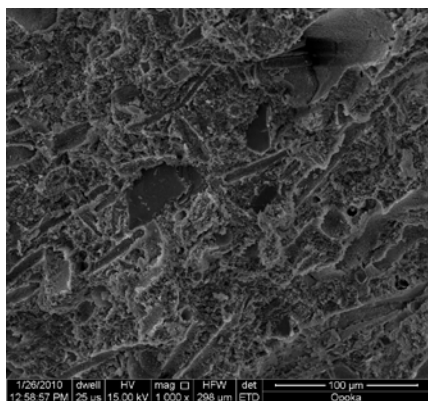


Rys. 9.8 Wykres ilustrujący strukturę i objętość porów opoki przed i po hydrofobizacją. Próbki C1 i C2 opoka niehydrofobizowane, próbki A1 i A2 opoka po hydrofobizacji

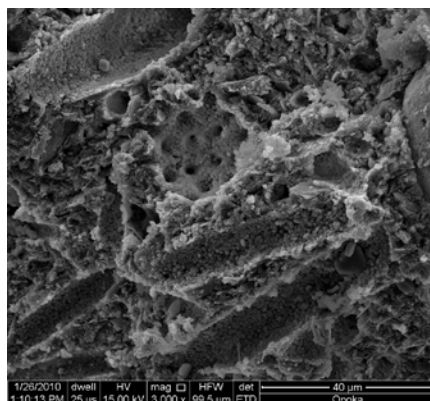
Wraz z efektem hydrofobizacji wyraźnie zmienia się rozkład struktury porów. Opoka staje się mniej porowata, co objawia się zmianą wartości objętości porów. Dla próbek naturalnych mieści się w granicach 5-6 cm<sup>3</sup>/g, a dla próbek hydrofobizowanych wartość objętości porów zmniejsza się do ok. 2 cm<sup>3</sup>/g. Zmiana objętości porów znajduje odzwierciedlenie również w ich wielkości. Pory próbek naturalnych o średnicach 6,5 nm zostają „zasklepienie” do rzędu 4,8 nm, zaś pory o promieniu 14 nm zmniejszają się do 8,5 nm – czyli wyraźnie środek hydrofobizujący „uszczelnia” porowatą strukturę opoki.

### 9.6.2. SEM (Skaningowa Mikroskopia Elektronowa) – zmiana struktury po hydrofobizacji

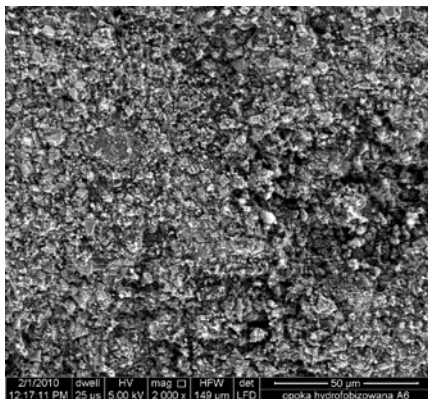
Badania opoki metodą SEM wykonano w Laboratorium Wydziału Budownictwa i Architektury PL przy użyciu aparatu QUANTA 250. Badaniom poddano próbki opoki hydrofobizowane emulsją silikonową oraz materiał niezabezpieczony



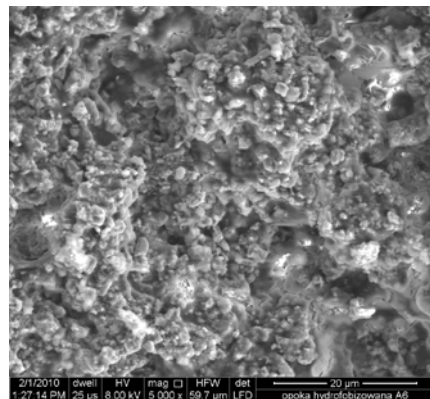
Fot. 9.34 Obraz SEM opoki przed hydrofobizacją



Fot. 9.35 Obraz SEM opoki przed hydrofobizacją



Fot. 9.36 Obraz SEM opoki po hydrofobizacją



Fot. 9.37 Obraz SEM opoki po hydrofobizacją

Proces hydrofobizacji zacierza w sposób znaczący pierwotną bardzo porowatą strukturę skały. Powierzchnię zabezpieczoną charakteryzują ziarniste agregaty emulsji silikonowej. Rozkład tych agregatów jest w znaczącej części regularny. Miejscowo widoczne są skupiska o charakterze pól skrytokrystalicznych.

### 9.6.3. Wnioski dotyczące badań opoki po hydrofobizacji

- Opoka jest materiałem, w którym możliwe jest wykonywanie hydrofobizacji wgłębnej
- Pomimo identycznego sposobu przygotowania próbek i prowadzenia hydrofobizacji uzyskano różne promienie nasączenia. Z zastosowanych trzech preparatów, największy promień penetracji uzyskiwano przy zastosowaniu emulsji silikonowej (preparat II)
- Analiza struktury metodami sorpcji par azotu oraz SEM wykazały występowanie efektów hydrofobizacji większych porów i doszczelnienia porów o mniejszych średnicach.
- Badania normowe nasiąkliwości i kapilarności potwierdziły skuteczność hydrofobizacji opoki. Badania mrozoodporności i odporności na krystalizację wykazały poprawę odporności hydrofobizowanej opoki na wymienione czynniki.
- Promień penetracji preparatu hydrofobizującego w opoce zależy od: rodzaju preparatu, wilgotności skały i ciśnienia z jakim podawany jest preparat. Badania wykazały, że najlepsze efekty uzyskano przy maksymalnym dopuszczalnym ciśnieniu 10 bar.

## 9.7. CHARAKTERYSTYKA CECH FIZYKO – MECHANICZNYCH ZAPRAW PO HYDROFOBIZACJI

Badania cech fizyko-mechanicznych zapraw po hydrofobizacji wykonano po 90 dniach od zakończenia procesu tłoczenia preparatu. W ramach prowadzonych badań wykonano oznaczenia nasiąkliwości wodą oraz kapilarnego podciągania metodą zgodną z normą i metodą poprzez pomiar wilgotności masowej. Z racji obszerności materiału w podrozdziałach zamieszczono wyniki końcowe oznaczeń.

### 9.7.1. Przygotowanie próbek

Dlatego w celu zbadania skuteczności hydrofobizacji zapraw, próbki w kształcie walców, na których uzyskano najlepsze wyniki pocięto piłą ręczną na graniastosłupy, o wymiarach jak najbardziej zbliżonych do wymiarów  $40 \times 40 \times 160$  mm zgodnie z załączonymi fotografiami. Podczas cięcia wydzielono trzy strefy A, B i C. W dalszych badaniach materiał stref A i B traktowano jako zhydrofobizowany. Próbkę strefy C, które nie uległy hydrofobizacji uznano za kontrolne.



Fot. 9.38 Próbką zaprawy wapiennej z podziałem na strefy



Fot. 9.39 Rozkład stref poboru próbek z walca hydrofobizowanej zaprawy wapiennej

### 9.7.2. Oznaczanie nasiąkliwości

Badania nasiąkliwości próbek zapraw po procesie hydrofobizacji wykonane zostały po 150 dniach od zakończenia tłoczenia i dotyczyły próbek hydrofobizowanych emulsją silikonową (preparat II). Badanie zostało przeprowadzone w Laboratorium Wydziału Budownictwa i Architektury PL zgodnie z normą: PN-85 B-04500. Oznaczenie nasiąkliwości [166].

Do badań przeznaczono po 12 próbek z każdej strefy hydrofobizowanych zapraw wapiennej i wapienno-cementowej oraz odpowiednio po 6 i 4 dla zaprawy trasowej i trasowej modyfikowanej pianą. Ze względu na obszerność materiału poniżej zamieszczone zostały wyniki końcowe.

Tab. 9.32 Wyniki badania nasiąkliwości próbek zapraw po hydrofobizacji emulsją silikonową

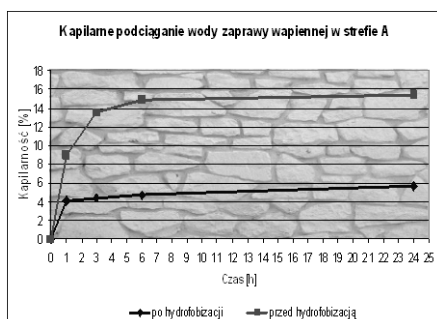
Lp.	Rodzaj zaprawy	Wartość średnia nasiąkliwości [%]			
		A	B	C	
1	Zaprawa wapienna	15,2	16,5	16,5	
2	Zaprawa wapienno - cementowa	21,9	22,3	22,3	
3	Zaprawa trasowa	23,4	24,2	23,9	
4	Zaprawa trasowa spieniona	1 ; 1	31,5	31,3	31,6
		1 ; 0,5	28,6	28,3	28,3
		1 ; 0,4	26,3	26,0	26,0

Zgodnie z oczekiwaniami w żadnej z grupy badanych zapraw nie nastąpiła istotna zmiana nasiąkliwości. Tylko w zaprawie wapiennej w strefie A możemy zaobserwować minimalne różnice w nasiąkliwości w porównaniu ze strefami B i C. Ta różnica może być wynikiem częściowego doszczelnienia porów preparatem.

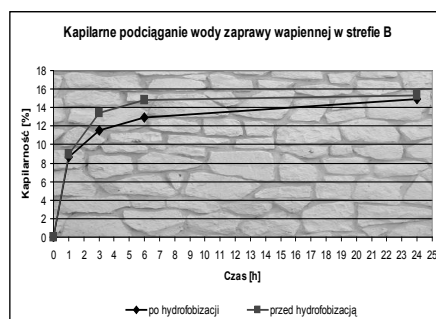
### 9.7.3. Oznaczanie kapilarnego podciągania

Badanie zostało przeprowadzone w Laboratorium Wydziału Budownictwa i Architektury PL zgodnie z normą: PN-85 B-04500. Oznaczenie współczynnika nasiąkliwości kapilarnej. Podobnie jak w przypadku nasiąkliwości do badań przeznaczono po 12 próbek z każdej strefy hydrofobizowanych zapraw wapiennej i wapienno-cementowej oraz odpowiednio po 6 i 4 dla zaprawy trasowej i trasowej modyfikowanej pianą. Poniżej zamieszczone zostały wyniki końcowe badań.

Na podstawie wyników badań zaprawy wapiennej wykonano wykresy kapilarnego podciągania wody dla strefy A i B.

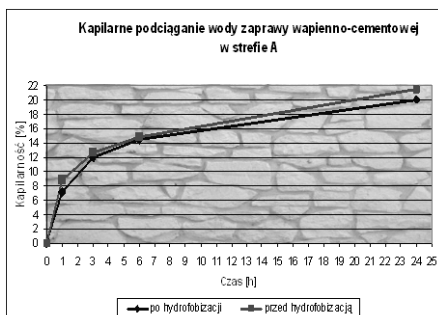


Rys. 9.9 Kapilarnie podciąganie wody zaprawy wapiennej w strefie A

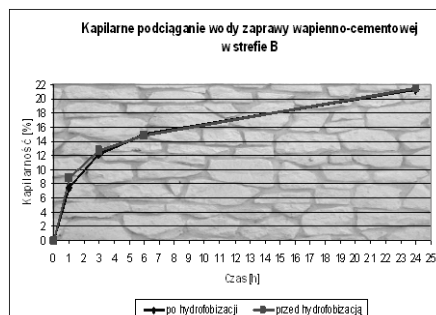


Rys. 9.10 Kapilarnie podciąganie wody zaprawy wapiennej w strefie B

Na podstawie wyników badań zaprawy wapienno-cementowej wykonano wykresy kapilarnego podciągania wody dla strefy A i B.



Rys. 9.11 Kapilarnie podciąganie wody zaprawy wapienno-cementowej w strefie A



Rys. 9.12 Kapilarnie podciąganie wody zaprawy wapienno-cementowej w strefie B

Tab. 9.33 Wyniki badania nasiąkliwości próbek zapraw po hydrofobizacji emulsją silikonową

Lp.	Rodzaj zaprawy	Wartość średnia kapilarności [%]			
		A	B	C	
1	Zaprawa wapienna	5,7	14,9	15,3	
2	Zaprawa wapienno - cementowa	20,1	21,3	21,4	
3	Zaprawa trasowa	12,1	13,1	13,2	
4	Zaprawa trasowa spieniona	1 ; 1	12,3	12,4	12,4
		1 ; 0,5	12,3	12,4	12,4
		1 ; 0,4	12,9	12,9	12,8

Z przebadanych zapraw znaczące zmniejszenie kapilarności uzyskano jedynie na zaprawie wapiennej. W strefie A nastąpiło prawie trzykrotne zmniejszenie kapilarności w stosunku do strefy C (zaprawa nienasączona preparatem). Na podstawie tego wyniku można przyjąć, że efektywne wytworzenie warstwy hydrofobowej nastąpiło, w co najmniej 4 centymetrowej odległości od otworu. Zarówno w zaprawie wapienno-cementowej, trasowej jak i trasowych modyfikowanych pianą nie odnotowano zmiany kapilarności.

#### 9.7.4. Oznaczanie kapilarnego podciągania przez pomiar wilgotności masowej

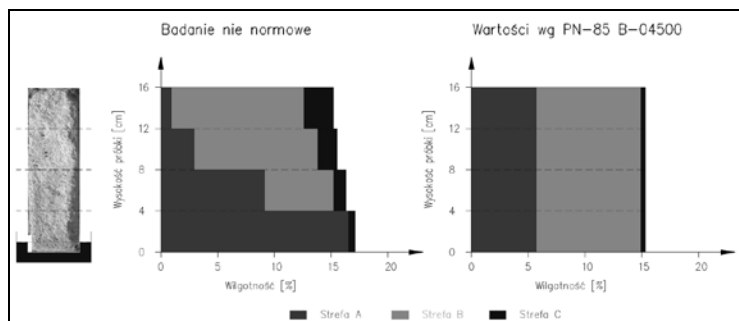
Z uwagi na bardzo porowatą strukturę zaprawy wapiennej i wapienno-cementowej autor pracy stwierdził, że wyniki badania kapilarnego podciągania wody wg normy PN-85 B-04500 dla próbek poddanych hydrofobizacji nie do końca oddają rzeczywistość. Powodem takiego wniosku było spostrzeżenie, iż próbki wykazywały duże zawilgocenie w pasie zanurzenia w wodzie a powyżej próbka pozostawała sucha. Dlatego uznano, że zostanie określona wilgotność a tym samym wysokość kapilarnego podciągania wody przez określenie wilgotności na poszczególnych wysokościach beleczki. Badanie te potraktowano, jako dodatkowe o charakterze informacyjnym i wykonano je dla zaprawy wapiennej (hydrofobizacja odniosła skutek).

W celu wykonania oznaczania wilgotności po określeniu kapilarnego podciągania, beleczki pocięto na cztery części, co 4cm. Następnie tak powstałe próbki sześciennie zważono z dokładnością do 1 g. Beleczki wysuszono do uzyskania stałej masy i określono wilgotność w sposób zgodny z badaniem wilgotności masowej materiałów [206].

Na Rys. 9.65 widać znaczne różnice wilgotności badanych beleczek w strefie A. Badanie normowe obrazuje wyniki średnie dla całej beleczki. Pocięcie beleczki i określenie wilgotności dla poszczególnych wysokości daje wyraźny obraz rozkładu wilgoci. Do wysokości 4cm występuje duże zawilgocenie spowodowane zanurzeniem beleczki w wodzie. W przedziale 4-8cm widać zmniejszenie zawilgocenia o niemal połowę a powyżej 8cm zawilgocenie jest nieznaczne.

Tab. 9.34 Wartości średnie wilgotności zaprawy wapiennej po badaniu kapilarności dla poszczególnych stref

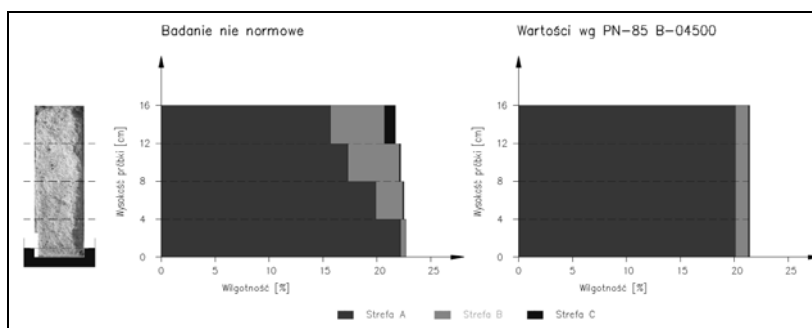
Wysokość próbki	Wilgotność średnia (badanie nienormowe) [%]			Wartość średnia kapilarności wg normy [%]		
	A	B	C	A	B	C
16	0,9	12,6	15,2	5,7	14,9	15,3
12	2,9	13,8	15,5			
8	9,1	15,2	16,3			
4	16,5	17,1	17,1			



Rys. 9.13 Średnia wilgotność beleczek z zaprawy wapiennej na wyznaczonych wysokościach

Tab. 9.35 Wartości średnie wilgotności zaprawy wapienno-cementowej po badaniu kapilarności dla stref A, B i C

Wysokość próbki	Wilgotność średnia (badanie nie normowe) [%]			Wartość średnia kapilarności wg normy [%]		
	A	B	C	A	B	C
16	15,7	20,7	21,7	20,1	21,3	21,4
12	17,3	21,1	22,2			
8	19,9	22,4	22,5			
4	22,2	22,7	22,7			



Rys. 9.14 Średnia wilgotność beleczek z zaprawy wapienno-cementowej na wyznaczonych wysokościach

Uzyskano znaczące ograniczenie kapilarności w skrajnych przypadkach do całkowitego zahamowania podciągania wody. Skuteczność iniekcji zależy przede wszystkim od wilgotności zaprawy i od ciśnienia roboczego.

W zaprawach wapienno-cementowych nie uzyskano dużych promieni penetracji, a co za tym idzie zaledwie ok. 25% spadek kapilarności. Taki wynik nie jest zadawalający, dlatego nie należy wykonywać warstw hydrofobowych w zaprawach wapienno-cementowych albo należy przebadać tą zaprawę pod kątem hydrofobizacji preparatem o innym składzie chemicznym.

Do zapraw trasowych nie udało się wprowadzić preparatu z uwagi na szczelną strukturę. Nawet zdecydowane zwiększenie porowatości nie zwiększyło uzyskiwanych promieni penetracji. Dlatego należy zadać pytanie czy stosowanie zapraw trasowych jest wskazane przy iniekcji.

#### **9.7.5. Wnioski dotyczące badań w zaprawach**

- Istnieje możliwość wprowadzenia preparatu i wytworzenia warstwy hydrofobizującej w zaprawie wapiennej przy zastosowaniu emulsji silikonowej.
- Nie uzyskano zadawalających efektów podczas prób tłoczenia preparatu w zaprawy wapienno-cementowych, pomimo wyższych wartości nasiąkliwości i kapilarności w stosunku do zapraw wapiennych.
- Badania wykazały brak możliwości wprowadzenia preparatu do zapraw trasowych. Efektów nie odnotowano pomimo zwiększenia porowatości (modyfikacja pianą) i wzrostu ciśnienia podawania preparatu.
- Brak efektów w zaprawach trasowych oraz niedostateczne w wapienno-cementowej związane są zamkniętą strukturą porów w tych zaprawach.
- Promień penetracji preparatu hydrofobizującego w zaprawie wapiennej zależy od jej wilgotności i ciśnienia z jakim tłoczony jest preparat.
  - Najlepsze efekty uzyskiwano przy wilgotnościach zaprawy powyżej 10%.
  - Zadawalający promień penetracji w przypadku zapraw wapiennych uzyskano przy ciśnieniach niższych od maksymalnych dla iniekcji niskociśnieniowej. Tłoczenie prowadzono przy ciśnieniu do 6 bar. Próby zwiększenia ciśnienia prowadziły do zniszczenia próbki.



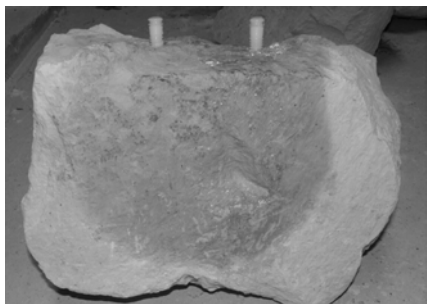
## **10. HYDROFOBIZACJA MURÓW**

Uzyskane pozytywne wyniki hydrofobizacji opoki i zaprawy wapiennej wymusiły konieczność rozszerzenia zakresu badań. Zdecydowano o przeprowadzeniu prób wykonania przepony metodą iniekcji w murach. Ze względu na brak możliwości przeprowadzenia badań polowych zdecydowano o wzniesieniu murów w Laboratorium Budownictwa i Architektury Politechniki Lubelskiej. W uprzednio wykonanych wannach wzniesione zostały trzy murki badawcze. Wykonano je z opoki pochodzącej z Kazimierza Dolnego nad Wisłą na zaprawie wapiennej. Ze względu na pochodzenie rozbiórkowe, kamień użyty do murów nie wymagał sezonowania. Z powodu długiego czasu wiązania spoiwa wapiennego murki poddano karbonizacji i sezonowano przez okres 12 miesięcy.

### **10.1. BADANIA MOŻLIWOŚCI WYKONANIA INIEKCJI W BŁOKACH WIELKOWYMIAROWYCH Z OPOKI**

W murach z opoki wapnistej stosunkowo często wykorzystywano duże bloki kamienne. W ramach prowadzonych badań polowych autor spotykał się z ciosami o długości nawet ponad 1 metra. Wmurowywano je najczęściej w pasie przyziemi, czyli na wysokości wykonywania przepony. Zgodnie z literaturą przepona powinna być prowadzona w pasie spoin. Ze względu na ich gabaryty (brak możliwości obejścia spoinami) zachodziłaby konieczność wykonywania przynajmniej dwóch otworów w jednym bloku. Skłoniło to autora, w ramach badań przedwstępnych do wykonania serii iniekcji w dużych blokach kamiennych. Otwory wywiercono w linii najdłuższego boku kamienia. Na podstawie wcześniejszych wyników, promienia nasycenia opoki, przyjęto rozstaw otworów 12cm. Procesowi hydrofobizacji poddano 6 bloków kamiennych. Po trzy z dwoma i trzema otworami w linii. Zastosowano iniektory jednorazowe z tworzywa sztucznego. Tłoczenie prowadzono naprzemiennie we wszystkich otworach. Po upływie miesiąca bloki zostały przecięte na pile stołowej. Następnie zmierzono uzyskane promienie nasączenia opoki preparatem.

We wszystkich próbkach promień penetracji wynosił powyżej 6 cm. Osiągnięte wyniki nie odbiegały od uzyskanych wcześniej, w próbkach z jednym otworem. Dokumentacja fotograficzna z badań zamieszczona została poniżej.



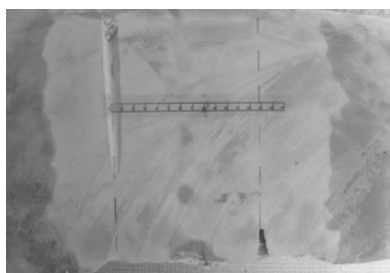
Fot. 10.1 Blok opoki po procesie tłoczenia preparatu II. Widok z boku



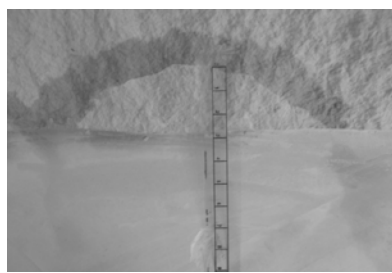
Fot. 10.2 Blok opoki po procesie tłoczenia preparatu II. Widok z góry



Fot. 10.3 Proces tłoczenia preparatu



Fot. 10.4 Przy rozstawie 12 cm strefy hydrofobizowanej dwoma otworami opoki stykają się.



Fot. 10.5 Pomiar promienia penetracji preparatu w opoce

## 10.2. WYKONANIE MURÓW Z OPOKI

W celu zbadania skuteczności przepony chemicznej na murach z opoki wapiastej zostały wykonane trzy mury doświadczalne o wymiarach 150cm x 120cm x 50cm. Do wzniesienia murów wynajęto murarzy z Bochofnicy (gmina Kazimierz Dolny), specjalizujących się w obróbce i wznoszeniu murów z kamienia. Mury zostały wzniesione z opoki na zaprawie wapiennej w proporcji 1:1,5

(wapno-piasek). Zostało użyte wapno suchogaszone CL90, wcześniej poddane zabiegowi zlasowania oraz piasek drobnoziarnisty płukany o frakcji mniejszej niż 2mm. Murki doświadczalne wykonano w wannach z blachy ocynkowanej, obłożonej szczelnie folią budowlaną. Mury zostały wykonane w temperaturze 15°C i wilgotności 45%.

W celu przyspieszenia wiązania w murach poddano je procesowi karbonizacji. Wykonano szczelne kołnierze z folii budowlanej, założono na murki, następnie powtórnie uszczelniono. Do środka kołnierzy wpuszczono dwutlenek węgla, po czym otwór wlotowy zamknięto. Proces karbonizacji prowadzono przez 60 dni cyklicznie uzupełniając stężenie gazu.



Fot. 10.6 Proces wznoszenia murów



Fot. 10.7 Ukończony mur nr 2



Fot. 10.8 Widok muru w kołnierzu podczas procesu karbonizacji



Fot. 10.9 Widok ukończonych 3 murów z przyjętą do badań numeracją

### 10.3. BADANIE SZYBKOŚCI PODCIĄGANIA KAPILARNEGO NA MURACH Z OPOKI

Po okresie sezonowania wilgotność murów badawczych spadła do bardzo niskiego poziomu. Jest logicznym, że przepony wykonuje się przede wszystkim w murach zawilgoconych. Ze względu na to, zaszła konieczność podwyższenia ich wilgotności. Wykorzystując okres nasączania wodą (70 dni), autor prowadził cykliczne badania wilgotności murów.

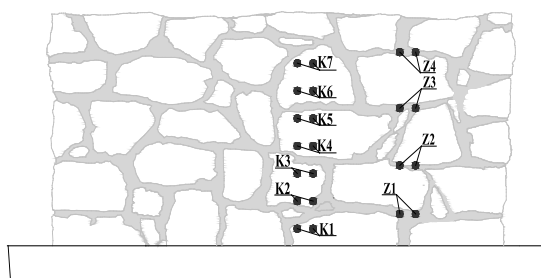
Pomiary wilgotności murów, których celem było określenie szybkości i wysokości podciągania kapilarnego w murach wykonano za pomocą miernika LB-795. [212] Urządzenie zostało wcześniej skalibrowane co umożliwiło pomiary metodą opornościową opoki i zaprawy wapiennej w murach. W murach doświadczalnych zamontowano sondy pomiarowe o długości 15cm. Zostały one rozmieszczone w parach co 10cm w kamieniu, oraz w każdej poziomej spoinie z zaprawy wapiennej. Ze względu na objętość i dodatkowy charakter badań, poniżej zamieszczono jedynie dokumentację fotograficzną, schemat rozmieszczenia sond i przykładowe wykresy.



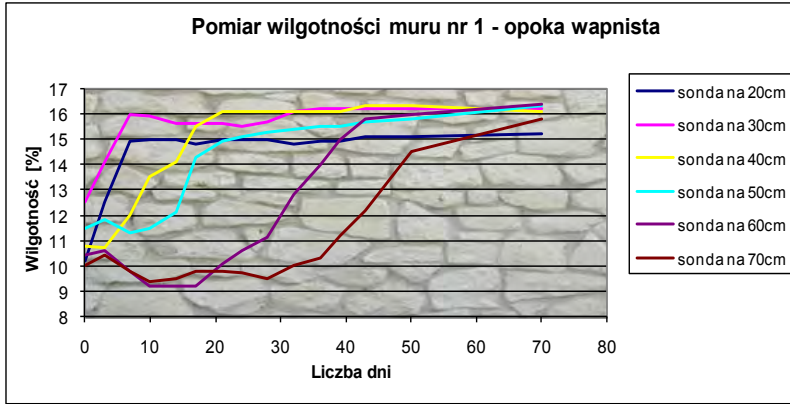
Fot. 10.10 Widok zamontowanych sond igłowych w murze



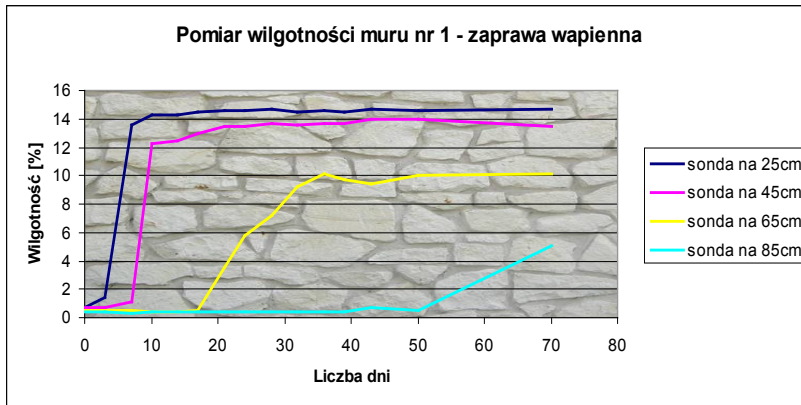
Fot. 10.11 Pomiar wilgotności miernikiem LB-795



Rys. 10.1 Oznaczenia sond do pomiaru wilgotności w murze K - sondy w opoce, Z - sondy w zaprawie



Rys. 10.2 Wykres ilustrujący kapilarne podciąganie wody przez opokę w murze nr 1



Rys. 10.3 Wykres ilustrujący kapilarne podciąganie wody przez zaprawę wapienną w murze nr 1

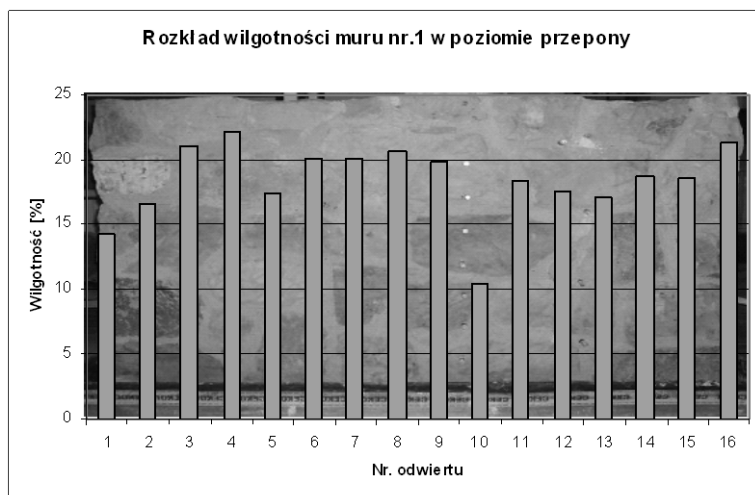
We wszystkich trzech murach kapilarne podciąganie wody, zarówno dla zaprawy wapiennej jak i dla opoki, przebiega w sposób bardzo podobny. Na sondach umieszczonych w kamieniu, od początku uzyskiwano podwyższone wilgotności, pomimo stosunkowo długiego okresu sezonowania (odsychania). W przypadku opoki, w ciągu 70 dniowego okresu badań na wszystkich wysokościach uzyskano przyrost wilgotności do mniej więcej takiego samego poziomu. Po osiągnięciu około 15-16% dalszy przyrost jest wyraźnie wolniejszy. W przypadku spoin z zaprawy wapiennej na wysokościach do 50cm wyraźny skok wilgotności uzyskano po 4-5 dobach. Woda transportowana kapilarnie do sond zamontowanych na wysokości ok. 65 i 85 cm dotarła odpowiednio po 18 i 50 dobach.

## 10.4. INIEKCJA MURÓW

Na podstawie wcześniej wykonanych badań zdecydowano, że we wszystkich murach zastosowany zostanie ten sam preparat (emulsja silikonowa). Przepony wykonano z zastosowaniem trzech technologii. W murze nr 1 wykonano iniekcję dwustronną, w murze nr 2 iniekcję jednostronną z wypełnieniem rys i spękań zaprawą na bazie trasy, a w murze nr 3 iniekcję jednostronną. Iniekcje wykonano zgodnie z informacjami zawartymi w instrukcji WTA 4-4-04D [153] oraz informacjami zawartymi w karcie produktu.

Biorąc pod uwagę wyniki badań promieni hydrofobizacji zaprawy wapiennej i opoki, przyjęto 10-12cm rozstaw otworów. W celu zapewnienia równoległości odwiertów przygotowano stelaż pod młotowiertarką.

Zwierzcina z otworów posłużyła do ustalenia poziomu wilgotności muru na wysokości przepony. Badania były niezbędne do przyjęcia stężenia emulsji silikonowej. Badanie wilgotności przeprowadzono metodą grawimetryczną [206]. We wszystkich murach odnotowano porównywalne zawilgocenie w granicach 15-20%.

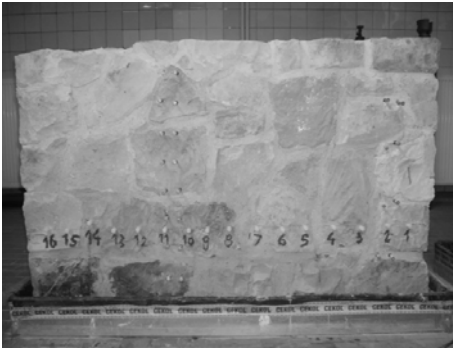


Rys. 10.4 Rozkład wilgotności muru nr 1 w poziomie otworów wykonywanej przepony

Następnie otwór został dokładnie oczyszczony sprężonym powietrzem. Czyszczenie odwiertów miało na celu wyeliminowanie możliwości wymieszania preparatu z pyłem, a w rezultacie uszczelnienia otworu i zahamowania procesu iniekcji. Podczas prac iniekcyjnych zastosowano iniektory plastikowe z główką płaską, o średnicy 12-14mm. Iniektory zostały wbite w otwory iniekcyjne przy pomocy pobijaka z tworzywa sztucznego. Do iniekcji użyto pompy pneumatyczną DITTMANN Uniprese D2 napędzaną kompresorem. W murach nr 1 i 2 tłoczono do momentu, w którym materiał przy maksymalnym dopuszczalnym

ciśnieniu (10 bar) nie przyjmował preparatu. Podczas badań kontrolowano zużycie emulsji silikonowej.

W murze nr 2 wykonano doszczelnienie rys i spękań zaprawą trasową o podwyższonej zdolności do samopłynięcia. Zaprawę pompowano przy pomocy pompy membranowej Uniprese D2. Tłoczenie zawiesiny odbywało się przy ciśnieniu do 3 bar. Podyktowane to było chęcią wypełnienia pustek i bez doszczelnienia porów zaprawy w spoinach. Jako koniec procesu wypełniania uznawano moment w którym pompa przestawała tłoczyć zaprawę albo, kiedy dochodziło do wycieków zaprawy ze spękań. Po stwardnieniu zaprawy otwory zostały przewiercone jeszcze raz wiertłem o średnicy 14mm. Zastosowanie większej średnicy wiertła podyktowane było koniecznością całkowitego usunięcia trasy z otworów. Zachodziła (podyktowana wynikami badań) obawa, że tras w otworach uniemożliwi migrację preparatu. Po oczyszczeniu sprężonym powietrzem w otworach zamontowano iniektory plastikowe z główką płaską i rozpoczęto tłoczenie.



Fot. 10.12 Widok muru przygotowanego do tłoczenia



Fot. 10.13 Tłoczenie zaprawy trasowej



Fot. 10.14 Wyciek zaprawy trasowej z muru



Fot. 10.15 Iniekcja muru emulsją silikonową

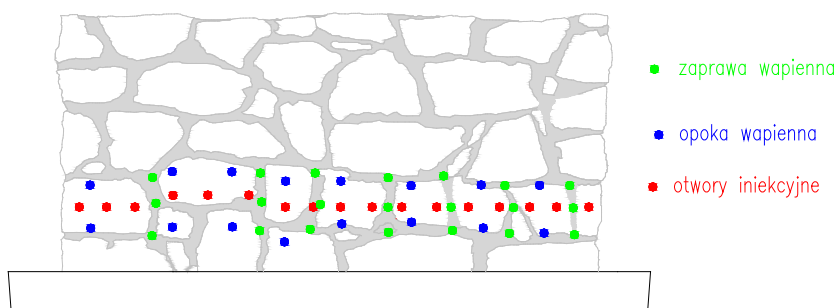
Tab. 10.1 Zestawienie parametrów charakteryzujących iniekcje w murach z opoki wapiastej

Nr muru	Rodzaj iniekcji	Liczba otworów iniekcyjnych	Ciśnienie [bar]	Stężenie preparatu	Powierzchnia muru [m <sup>2</sup> ]	Ilość preparatu [l]	Zużycie na 1m <sup>2</sup>
1	Dwustronna	31	1-10	1:10	0,79	19,9	25
2	Jednostronna z wypełnieniem	15	1-8	1:10	0,75	20	27
3	Jednostronna	15	1-5	1:10	0,85	20,5	24

We wszystkich trzech murach proces tłoczenia preparatu zakończył się powodzeniem. Stosowane ciśnienia nie odbiegały od przyjętych dla technologii iniekcji emulsją silikonową, a rzeczywiste zużycie preparatu mieściło się w zakresie zalecanym przez producenta.

## 10.5. BADANIE SKUTECZNOŚCI PRZEPONY CHEMICZNEJ W MURZE Z OPOKI

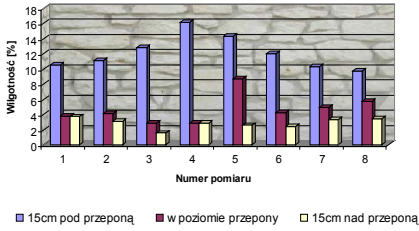
Po przeprowadzeniu iniekcji odczekano 14 dni do czasu wbudowania preparatu w strukturę materiału. Następnie zalano wodą wanny, w których znajdowały się murki w celu sprawdzenia szczelności wykonanej przepony. Po okresie czterdziestu dni pobrano próbki do określenia poziomu zawilgocenia muru. Próbki zaprawy pobrano w trzech rzędach: pod przeponą, w pasie przepony oraz nad przeponą. Próbki opoki odwiercono w dwóch rzędach: pod przeponą oraz nad przeponą. Rys. 10.22 ilustruje miejsca poboru materiału do badań wilgotności masowej. Badania wykonano metodą grawimetryczną [206].



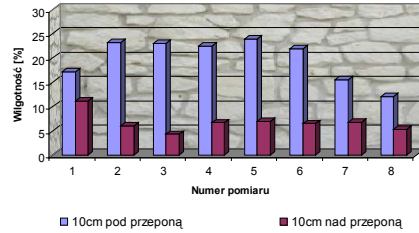
Rys. 10.5 Przykładowy rozkład punktów pomiaru wilgotności muru po hydrofobizacji

Poniżej znajdują się wykresy rozkładu wilgotności w poszczególnych murach doświadczalnych. Dla muru nr 1 wykonano pomiary po obu stronach przepony, pomiary od strony frontowej oznaczono jako nr 1a pomiary od strony tylnej jako nr 1b.

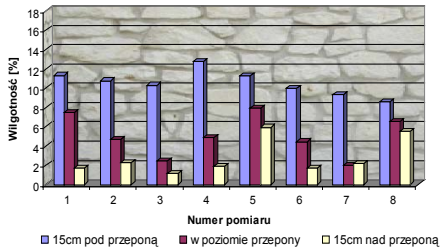




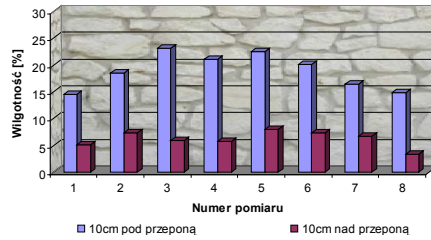
Rys. 10.6 Badania wilgotności muru nr 1 strona „a” wyniki dla zaprawy wapiennej



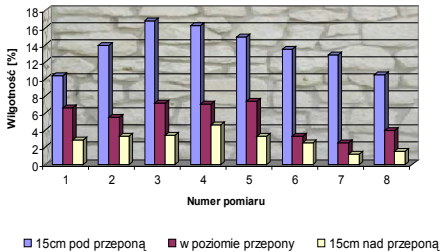
Rys. 10.7 Badania wilgotności muru nr 1 strona „a” wyniki dla opoki



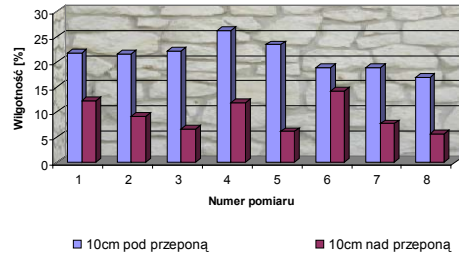
Rys. 10.8 Badania wilgotności muru nr 1 strona „b” wyniki dla zaprawy wapiennej



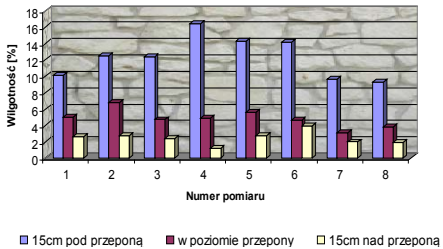
Rys. 10.9 Badania wilgotności muru nr 1 strona „b” wyniki dla opoki



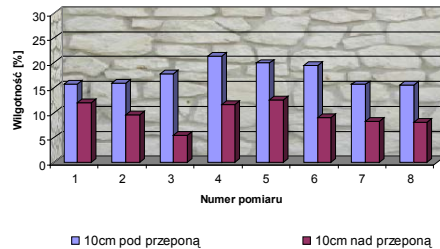
Rys. 10.10 Badania wilgotności muru nr 2 wyniki dla zaprawy wapiennej



Rys. 10.11 Badania wilgotności muru nr 2 wyniki dla opoki



Rys. 10.12 Badania wilgotności muru nr 3 wyniki dla zaprawy wapiennej



Rys. 10.13 Badania wilgotności muru nr 3 wyniki dla opoki

Niniejsze badania przeprowadzone w warunkach laboratoryjnych na murach z opoki miały na celu sprawdzenie skuteczności przepony chemicznej wykonanej preparatem na bazie emulsji silikonowej. Przeprowadzone badania udowodniły, że wykonane przepony zatrzymały transport kapilarny wody, mimo utrzymywania stałego poziomu wody w pojemnikach.

Ocenę skuteczności oparto na wymaganiach instrukcji WTA 4-4-04D [153], w związku z brakiem innych wiarygodnych źródeł. Po 40 dniach od wykonania przepony we wszystkich murach odnotowano spadek zawilgocenia o ponad 50%. Zgodnie z wspomnianą instrukcją potwierdza to skuteczność preparatu na bazie emulsji silikonowej w tego typu murach. W momencie badania do wymaganych 90 dni pozostało jeszcze 50. Można przyjąć, więc dalszy spadek wilgotność.

## **10.6. WNIOSKI DOTYCZĄCE BADAŃ NA MURACH Z OPOKI WAPNISTEJ**

- W przypadku wszystkich wariantów wykonania izolacji metodą iniekcji niskociśnieniowej z użyciem emulsji silikonowej wytworzono skuteczną przepone.
- Obserwacje podczas iniekcji oraz wyniki badań wykazały przewagę iniekcji obustronnej w odniesieniu do pozostałych dwóch wariantów (minimalizacja ucieczki preparatu oraz możliwość stosowania wyższych ciśnień).
- W przypadku stosowania iniekcji jednostronnej w związku z niejednorodnością w budowie murów z opoki wapnistej (kawerny, szczeliny) mury wymagają doszczelnienia.
- Doszczelnienia otworów trasem może powodować utrudnienia w tłoczeniu preparatów hydrofobizujących. Rozwiązaniem jest podawanie trasy przy minimalnym ciśnieniu (zdolność do samopłynięcia gwarantuje wypełnienie pustek i kawern), a następnie rozwiercanie otworów wiertłem o większej średnicy. Innym rozwiązaniem jest podawanie zaprawy trasowej drugim rzędem otworów poniżej planowanej przepony.
- Uzyskanie roboczego ciśnienia powyżej 5 bar było możliwe jedynie podczas iniekcji dwustronnej oraz w murze doszczelnionym.
- Zużycie preparatu na 1m<sup>2</sup> mieściło się w zakresie podanym w karcie technicznej (20-30l).

## 11. WNIOSKI KOŃCOWE

Przeprowadzone badania doświadczalne prowadzą do sformułowania następujących wniosków:

1. Istnieje możliwość hydrofobizacji wgłębnej opoki.
2. Na podstawie analizy statystycznej stwierdzono, że promień penetracji preparatu hydrofobizującego w opoce zależy od: rodzaju preparatu, wilgotności skały i ciśnienia podawania preparatu.
3. W trakcie badań najlepsze efekty uzyskano przy maksymalnym dopuszczalnym ciśnieniu 10 bar z użyciem emulsji silikonowej.
4. Analiza struktury metodami sorpcji par azotu oraz SEM wykazały występowanie efektów hydrofobizacji większych porów i doszczelnienia porów o mniejszych średnicach.
5. Analiza statystyczna wyników badań nasiąkliwości i kapilarności potwierdziła skuteczność hydrofobizacji opoki. Badania mrozoodporności i odporności na krystalizację wykazały poprawę odporności hydrofobizowanej opoki na wymienione czynniki.
6. Wykazano możliwość wykonania przepony chemicznej w murze z opoki na zaprawie wapiennej.
7. Nie wykazano możliwości wykonania przepony w murach z opoki na zaprawie wapienno-cementowej i trasowej. Wniosek został sformułowany na podstawie niedostatecznych efektów hydrofobizacji próbek z tych zapraw.
8. Na podstawie analizy statystycznej wyznaczono zależności regresyjne pomiędzy wielkością promienia penetracji, a wilgotnością opoki i ilością zużytego preparatu w odniesieniu do zaprawy.
9. W przypadku wszystkich wariantów iniekcji niskociśnieniowej (jednostronna, jednostronna z doszczelnieniem i dwustronna) w murach z opoki na zaprawie wapiennej wytworzono skuteczną przeponę.
10. Istnienie skutecznej przepony potwierdzono wynikami badań wilgotności nad i pod przeponą. We wszystkich murach po 40 dniach wilgotność masowa nad przeponą była o ponad 50% niższa.
11. Najlepszą skuteczność tworzonej przepony uzyskano przy iniekcji dwustronnej z rozstawem otworów 11-12cm, ciśnieniu do 10 bar z użyciem emulsji silikonowej.
12. Proponuje się kontynuację badań nad wykonywaniem przepon w murach z wariantowaniem zapraw i materiałów murowych.



## 12. BIBLIOGRAFIA

### Czasopisma i monografie

- [1] Adamek R., Ptak J., *Górnictwo cz.1 – Górnictwo surowców skalnych*, Gliwice, Politechnika Śląska, 1984.
- [2] Adamowski J., Matkowski Z., *Ocena skuteczności osuszania ścian murowanych*, Materiały Budowlane, 4/1999.
- [3] Adamowski J., *Metodyka badań zawilgoconych murów*, Materiały Budowlane, 7/2005.
- [4] Adamowski J., *Problemy osuszania budynków murowanych*, Materiały Budowlane, 4/1999.
- [5] Adamowski J., *Przegląd i ocena metod osuszania murów*, Renowacje, 10/2000.
- [6] Adamsom A., *Chemia fizyczna powierzchni*, Warszawa, PWN, 1980.
- [7] Barnat – Hunek D., Franus W., *Stan zachowania murów zabytkowego Spichlerza Ulanowskich w Kazimierzu Dolnym nad Wisłą*, Konf. Naukowa: Postęp i nowoczesność w konserwacji zabytków. Problemy, perspektywy, Lublin, Politechnika Lubelska, 2005.
- [8] Barnat-Hunek D., Sobczuk H., Suchorab Z., *Pomiary wilgotności murów z kazimierskiej opoki wapnistej przy zastosowaniu metody TDR*, Budownictwo i Architektura, 2/2008.
- [9] Barnat-Hunek D., Szmygin B., *Ocena efektywności preparatów do powierzchniowej hydrofobizacji opoki wapnistej z Kazimierza Dolnego nad Wisłą*, Problemy remontowe w budownictwie ogólnym i obiektach zabytkowych, Wrocław, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, 2006.
- [10] Barnat-Hunek D., *Ocena skuteczności hydrofobizacji murów z opoki wapnistej na podstawie analizy parametrów wilgotnościowych*, Rozprawa doktorska, Lublin, 2007.
- [11] Bear J., Bachmat Y., *Introduction to Modeling of Transport Phenomena In Porus Media*, Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [12] Bezpalko N., Sobczuk H., *Określenie właściwości wilgotnościowych materiałów budowlanych za pomocą metody TDR*, Nowe osiągnięcia nauki i techniki w budownictwie, Rzeszów, Wydawnictwo Politechniki Rzeszowskiej, 2005.
- [13] Bodnar M., Fiertak M., *Ocena skuteczności preparatów hydrofobizacyjnych do zabezpieczania elewacji w obiektach zabytkowych*,

- IV Konferencja Naukowo-Techniczna Rew-Inż., Kraków, 1998.
- [14] Bolewski A., Manecki A., *Mineralogia szczegółowa*, Warszawa, Polska Agencja Ekologiczna, 1993.
- [15] Bolewski A., Parachoniak W., *Petrografia*, Warszawa, Wydawnictwa Geologiczne, 1982.
- [16] Brogowski Z., Retman G., *Characterization of Opoka as a Basis for its Use in Wastewater Treatment*, Polish Journal of Environmental Studies Vol. 13, 1/2004.
- [17] Broniewski T., Fiertak M., *Chemia budowlana. Materiały pomocnicze do ćwiczeń laboratoryjnych*, Wydanie czwarte, Kraków, Politechnika Krakowska, 2002.
- [18] *Budownictwo ogólne Fizyka budowli. T.2*, Praca zbiorowa pod kierunkiem Klema P., Warszawa, Wydawnictwo „Arkady”, 2005.
- [19] *Budownictwo ogólne. Materiały i wyroby budowlane. T.1*, Praca zbiorowa pod kierunkiem Stefańczyka B., Warszawa, Wydawnictwo „Arkady”, 2005.
- [20] Carroll B.J., *The Stability of Emulsions and Mechanisms of Emulsion Breakdown in E. Matijevic (ed.)*, Surface and Colloid Science, 9/1976.
- [21] Ciabach J., *Właściwości żywic sztucznych stosowanych w konserwacji zabytków*, Toruń, Wydawnictwo UMK, 1997.
- [22] Czarnecki L., Broniewski T., Henning O., *Chemia w budownictwie*, Warszawa, Arkady, 1996.
- [23] Czeremiński J., Iwasiewicz A., Paszek Z., Sikorski A., *Metody statystyczne w doświadczeniach chemicznych*, Warszawa, PWN, 1970.
- [24] Czerny D., *Wykonywanie izolacji poziomej za pomocą Impuls-System*, Materiały budowlane, 8/2002.
- [25] Diamond S., *Long-term hardened status of calcium hydroxide saturation of pore solutions In hardened cements*, Cement and Concrete Research, 6/1975.
- [26] Dohnalik M., Flaga K., *Zabezpieczenie murów od wilgoci gruntowej metoda wgłębnej hydrofobizacji*, Inżynieria i Budownictwo, 5/1971.
- [27] Domasłowski W., *Badania nad strukturalną hydrofobizacją wapienia pińczowskiego*, Biuletyn Informacyjny Konserwatorów dzieł sztuki, 6/1995.

- [28] Domasłowski W., *Profilaktyczna konserwacja kamiennych obiektów zabytkowych*, Toruń, Wydawnictwo Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, 1993.
- [29] Domasłowski W., *Zasady konserwacji murów ceglanych i kamiennych detali architektonicznych*, Toruń, Wydawnictwo Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, 1993.
- [30] Domasłowski W., *Zasady Konserwacji murów ceglanych i kamiennych detali architektonicznych*, *Ochrona Zabytków*, 1/2005.
- [31] Domin T., Pieniążek Z., *Skuteczność osuszania ścian – metody oraz problemy teoretyczne i praktyczne*, *Inżynieria i Budownictwo*, 10/1993.
- [32] Duc E., Dyczkowski J., *Ocena skuteczności działania instalacji elektroosmotycznej*, *Inżynieria i Budownictwo*, 6/1975.
- [33] Dziedziczki A., *Iniekcyjne systemy Webac*, *Materiały Budowlane*, 6/1997.
- [34] *Encyklopedia techniki - Chemia*, Warszawa, WNT, 1966.
- [35] Francke B., *Iniekcyjne metody wykonania izolacji poziomej murów*, *Materiały Budowlane*, 8/2002.
- [36] Franus W., Trochonowicz M., *Cegła ceramiczna jako „izolacja przeciwwodna”*, *Ceramika Budowlana*, 01/2006.
- [37] Frossel F., *Osuszanie murów i renowacja piwnic*, Warszawa, Polcen, 2007.
- [38] Futryn S., *Kartki z dziejów "Ochrony" im. A. Żeromskiego w Nałęczowie*, *Gazeta Nałęczowska*, 2/2002.
- [39] Garecki M., *Sporządzanie ekspertyz zawilgoconych budynków*, *Materiały Budowlane*, 8/2002.
- [40] Gasewicz J., *Iniekcje przeciw wilgoci podciąganej kapilarnie*, *Materiały budowlane*, 4/1999.
- [41] Gawin D., Koniarczyk M., *Model zjawisk cieplnowilgotnościowych i transportu soli w materiałach budowlanych*, Konferencja Naukowa Krynica, Tom IV, Warszawa-Krynica, 2004.
- [42] Gerdes A., *Transport Und chemische Reaktion siliciumorganischer Verbindungen in der Betonrandzone*, *Building Materials Reports No 15*, Aedificatio Verlag, 2002.
- [43] Górecki A., *Problemy zawilgocenia, pomiarów wilgotności i osuszania obiektów zabytkowych*, *Ochrona Zabytków*, 1/1985.
- [44] Hassanizadeh S. M., Leijnse A., *A non – lineal theory of high – concentration – gradient dispersion in porous media*, *Water Resour*, 1995.

- [45] Hoła J., Hoła B., *Skutki długotrwałego zawilgocenia ścian z cegły*, Materiały budowlane, 6/2001.
- [46] Hoła J., Makowski Z., Pawlonka A., *Niektóre problemy wykonywania zabezpieczeń przeciwwilgociowych ścian obiektów zabytkowych*, Przegląd Budowlany, 2/1998.
- [47] Hoła J., Makowski Z., *Zabezpieczenia przeciwwilgociowe murowanych ścian budynku zabytkowego*, Materiały Budowlane, 11/2003.
- [48] Ickiewicz I., Ickiewicz J., Sarosiek W., *Fizyka budowli. Wybrane zagadnienia*, Białystok, 2000.
- [49] Idzikowski P., *Technologia osuszania murów*, Atlas budowlany, 84/2006.
- [50] Jasieńko J., Matkowski Z., *Zasolenie i zawilgocenie murów ceglanych w obiektach zabytkowych – diagnostyka, metodyka badań, techniki rehabilitacji*, Wiadomości konserwatorskie, 14/2003.
- [51] Jasieńko J., Matkowski Z., Bednarz Ł., *Problemy w projektowaniu zabezpieczeń przeciwwilgociowych na przykładzie zabytkowego kościoła św. Jakuba w Nysie*, Konferencja REMO, Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, 2002.
- [52] Jasieńko J., Matkowski Z., Marek A., *Problemy w wykonywaniu zabezpieczeń przeciwwilgociowych murów obiektów zabytkowych na przykładzie zespołu klasztorowego w Henrykowie*, Konferencja REMO, Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, 2002.
- [53] Jasieńko J., Matkowski Z., *Problemy wykonywania zabezpieczeń przeciwwilgociowych w dotkniętych powodzią obiektach śródmiejskich Wrocławia*, V Konferencja Naukowo-Techniczna „Rew-Inż.”, Kraków, 2000.
- [54] Jasiński T., *Związki krzemoorganiczne*, Warszawa, PWN, 1955.
- [55] *Kamienie budowlane i drogowe*, Praca zbiorowa pod redakcją Mariana Kamińskiego i Włodzimierza Skalmowskiego, Warszawa, Wydawnictwa Geologiczne, 1957.
- [56] Kamiński K., Stefaniak P., *Analiza zawilgocenia i zasolenia ścian murowanych z cegły po 10 latach od wykonania izolacji poziomej*, Wrocław, Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, 2002.
- [57] Kierej W., Czajewska H., *Ocena mikrostruktury i cech fizyko – mechanicznych podstawowych typów litologicznych wapieni*, Prace Instytutu Techniki Budowlanej, 1981.



- [58] Kilian W., *Osuszanie budynków zawilgoconych podczas powodzi*, Materiały Budowlane, 1/1999.
- [59] Kisielewicz B., Królak E., Pieniążek Z., *Izolacje wodochronne w budownictwie*, Kraków, Politechnika Krakowska, 1999.
- [60] *Fizyka materiałów i konstrukcji budowlanych*, Praca zbiorowa pod red. Klemm P., Wybrane modele i metody badań. T. I, Łódź, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, 1993.
- [61] Konarski B., Jabłoński R., *Zabezpieczenia obiektów budowlanych przed zawilgoceniem a skuteczność osuszania metodami iniekcyjnymi*, Ochrona Zabytków, 1/2000.
- [62] Kozłowski R., Olesiak J., *Wilgoć w budowlach zabytkowych*, Renowacje, 4/2000.
- [63] Kozłowski S., *Surowce skalne Polski*, Warszawa, Wydawnictwa Geologiczne, 1986.
- [64] Kramarz K., *Izolacje poziome i pionowe w budownictwie, wykonywane metodą iniekcji ciśnieniowej*, Ochrona Zabytków, 4/2004.
- [65] Kramarz K., *Iniekcja ciśnieniowa*, Kalejdoskop Budowlany, 4/2002.
- [66] Kramarz K., *Nowa technologia iniekcji ciśnieniowe*, Materiały Budowlane, 8/2002.
- [67] Królak E., Pieniążek z., *Osuszanie ścian z wilgoci podciąganej kapilarnie*, Kraków 1999.
- [68] Krzowski Z., Pawlik P., Wójtowicz U., *Surowce skalne regionu lubelskiego*, Lublin, Wydawnictwo Uczelniane PL, 1979.
- [69] Krzywobłocka – Laurów R., Rościszewski P., Zielecka M., *Badanie trwałości zabezpieczeń hydrofobowych środkami krzemooorganicznymi obiektów zabytkowych.*, ITB.
- [70] Krzywobłocka – Laurów R., *Koncepcja oceny stanu kamiennych obiektów zabytkowych*, Ochrona Zabytków, 1/1998.
- [71] Kubik J., *Przepływy wilgoci w materiałach budowlanych*, Opole, Politechnika Opolska, 2000.
- [72] Künzel H., *Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components. One and Two Dimensional Calculation using Simple Parameters*, IRB Verlag, 1995.
- [73] Kuska Z., *Analiza metod pomiaru wilgotności przegród budowlanych*, Wrocław, Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, 12/1974
- [74] Leśniewska M., Pogorzelski J. A., *Badania ruchu kapilarnego wody w niektórych materiałach budowlanych*, Arch. Inż. Łąd., 2/1976.

- [75] Łukaszewicz J. W., *Badania i zastosowanie związków krzemorganicznych w konserwacji zabytków kamiennych (Investigation and application of the organosilicon compounds in conservation of stone monuments)*, Toruń, Wydawnictwo UMK, 2002.
- [76] Łukaszewicz J. W., *Konserwacja murów ceglanych - wzmocnienie*, Ogólnopolska Konferencja Konserwacja murów ceglanych. Badania i praktyka, Toruń, 1/1999.
- [77] Łukaszewicz J. W., *Współczesne materiały używane w pracach konserwatorskich przy zabytkach architektury. Problemy remontowe w budownictwie ogólnym i obiektach zabytkowych*. Praca zbiorowa pod redakcją Jasieńki J., Wrocław, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, 2006.
- [78] Łukaszewicz J. W., *Związki krzemorganiczne w konserwacji kamiennych obiektów zabytkowych*, Ochrona Zabytków, 1/1996.
- [79] Machalski M., *Late Maastrichtian and earliest Danian scaphitid ammonites from central Europe: Taxonomy, evolution, and extinction*, Acta Palaeontologica Polonica, 50 (4).
- [80] Majdowski A., *Zastosowanie metod iniekcyjnych w praktyce budowlano - konserwatorskiej*, Ochrona Zabytków, 3,4/1985.
- [81] Matkowski Z., Pawlonka A., *Skutki zawilgocenia budynków murowanych zalanych wodą powodziową*, Przegląd Budowlany, 9/1998.
- [82] Maziarka S., *Zanieczyszczenia powietrza w budynkach osuszanych metodą elektroiniekcji z użyciem płynów hydrofobowych*, Materiały Budowlane, 3/1990.
- [83] Meier – Grolmann F. W., Dietrich H., *Der offene Porenraum und Einfluss chemischer und mineralischer Zusätze*, Zement Kalk Gips, 4/1969.
- [84] *Metody i technologie osuszeń*, opracowanie redakcyjne, Renowacje i Zabytki, 4/2007.
- [85] Mirowski R., *Nowa metoda nasycania kamiennych obiektów zabytkowych*, Ochrona Zabytków, 3/1990.
- [86] Nawrot W., *Badania wpływu hydrofobowych związków kompleksowych na zdolność oddychania betonu, piaskowca i wapienia*, Rocznik Przedsiębiorstwa Państwowego Pracowni Konserwacji Zabytków, 1985.
- [87] Nawrot W., *Iniekcyjna metoda wytwarzania blokady przeciwwilgociowej w murach*, Przegląd Budowlany, 7/1985.

- [88] Nawrot W., *Kryteria wyboru środków do iniekcji przeciwwilgociowej murów*, Rocznik Przedsiębiorstwa Państwowego Pracowni Konserwacji Zabytków, 1985.
- [89] Nawrot W., *Metoda iniekcji krystalicznej i jej skuteczność techniczna w porównaniu z innymi metodami osuszania budowli*, Warszawa, Ochrona i Konserwacja Zabytków, 6/1997.
- [90] Nawrot W., *Metoda kontroli szczelności przepon hydrofobowych w zawilgoconych murach*, Przegląd Budowlany, 10,11/1983.
- [91] Nawrot W., *O skuteczności (lub nie) metod osuszania*, Renowacje, 7/2001.
- [92] Nawrot W., *Ocena skuteczności nowoczesnych metod osuszania budowli*, Przegląd Budowlany, 8,9/1986.
- [93] Nawrot W., *Osuszanie budynków zabytkowych metoda przepon wytwarzanych droga iniekcji*, Rocznik Przedsiębiorstwa Państwowego Pracowni Konserwacji Zabytków, 1985.
- [94] Nawrot W., *Sposób osuszania budowli z wilgoci podciąganej z gruntu metoda iniekcji krystalicznej*, Przegląd Budowlany, 6/1987.
- [95] Nawrot W., *Wysychanie murów po wytworzeniu przepon hydrofobowych droga iniekcji*, Rocznik Przedsiębiorstwa Państwowego Pracowni Konserwacji Zabytków, 1985.
- [96] Niemcewicz P., *Zabezpieczenie powierzchni wapienia dębnickiego przed działaniem czynników niszczących*, Ochrona Zabytków, 1/1996.
- [97] Olifierowicz J., Kaliszuk-Wietecha A., *Metody osuszania ścian budynków istniejących*, Materiały Budowlane, 7/2005.
- [98] Olifierowicz J., *Materiały do izolacji przeciwwilgociowych i przeciwwodnych*, Materiały Budowlane, 6/1997.
- [99] Olifierowicz J., *Termoiniekcja – metoda osuszania i przeciwwilgociowego zabezpieczania murów budynków istniejących*, Przegląd Budowlany, 10/1994.
- [100] Olifierowicz J., *Termoiniekcja – metoda osuszania i przeciwwilgociowego zabezpieczenia murów budynków*, Warszawa, Ochrona i Konserwacja Zabytków, 5/1997.
- [101] Olifierowicz J., *W sprawie niektórych metod osuszania murów*, Inżynieria i Budownictwo, 5/1994.
- [102] ONORM-B 3355-1/2006-03-01, *Trockenlegung von Feuchten Mauerwerk/ Bauwerkdiagnostik und Planungsgrundlagen*.

- [103] Osiecka E., *Materiały budowlane- kamień, ceramika, szkło*, Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2003.
- [104] Ostterholz F. D., Pohl E. R., *Kinetics of the hydrolysis and condensation of organofunctional alkoxy silanes: a review*, Journal of Adhesion Science Technology, 6/1992.
- [105] Oterman S., *Skąły węglanowe w kamieniarstwie*, Materiały Budowlane, 4/1983.
- [106] Parosa R., Reszke E., *Izolacje poziome w zawilgoconych murach – opis metody*, Renowacje, 4/2000.
- [107] Pawlonka A., Batog A., *Nowe materiały w zabezpieczeniach wodochronnych*, Przegląd Budowlany, 10/1995.
- [108] Pieniążek Z., Królak E., *Analiza metod osuszania ścian*, Materiały Budowlane, 6/1999.
- [109] Pieniążek Z., Sasiadek S., Królak E., *Analiza i ocena skuteczności stosowanych metod osuszania ścian*, Inżynieria i Budownictwo, 9/1995.
- [110] Pieniążek Z., Sasiadek S., Królak E., *Nowe metody osuszania ścian Materiały Budowlane*, 6/1997.
- [111] Pieniążek Z., Sasiadek S., Królak E., *Przegląd i ocena metod osuszania ścian*, Przegląd Budowlany, 4/1997.
- [112] Płoński W., Pogorzelski J. A., Zwoliński W., *Ochrona cieplna budowli. Materiały do projektowania*, Warszawa, ITB, 1973.
- [113] Płoński W., *Badania dyfuzji i kondensacji pary wodnej w przegrodach i elementach warstwowych*, Warszawa, ITB, 1965.
- [114] Pogorzelski J. A., *Fizyka cieplna budowli*, Warszawa, PWN, 1976.
- [115] Pogorzelski J.A., *Stan wilgotnościowy przegród budowlanych*, Materiały Budowlane, 4/2001.
- [116] Pożaryska K., Pożarski W., *Przewodnik geologiczny po Kazimierzu i okolicy*, Warszawa, Wydawnictwo Muzeum Ziemi, 1951.
- [117] *Kamienie budowlane i drogowe*, Praca zbiorowa pod red. Kamińskiego M., Skalmowskiego W., Warszawa, Wydawnictwa Geologiczne, 1957.
- [118] *Historia i współczesność górnictwa na terenie Lubelszczyzny*, Praca zbiorowa pod red. Krzowski Z., Politechnika Lubelska.
- [119] *Ochrona budynków przed korozją biologiczną* Praca zbiorowa pod redakcją Ważnego J., Karysia J. , Warszawa, Arkady, 2001.
- [120] *Problemy remontowe w budownictwie ogólnym i obiektach zabytkowych*, Praca zbiorowa pod redakcją Jasieńko J., Klimek A., Mat-

- kowski Z., Schabowicz K., Wrocław, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, 2006.
- [121] Rajczyk R., Rajczyk M., *Technologia robót kamieniarskich*, wydaw. Politechnika Częstochowska, 1997.
- [122] Rokieli M., *Hydroizolacje w budownictwie*, Warszawa, Wydawnictwo Medium, 2009.
- [123] Rokieli M., *Instrukcja WTA nr 4-4-04 Iniekcje przeciw kapilarnie podciąganej wilgoci*, Izolacje, 10/2005.
- [124] Rościszewski P., Zielecka M., *Podstawy teoretyczne i wytyczne praktyczne hydrofobizacji materiałów budowlanych*, Materiały Budowlane, 1/1990.
- [125] Rydz Z., Turowski R., *Hydrofobizacja strukturalna mas tynkarskich i zapraw budowlanych za pomocą Hydrolitu*, Materiały Budowlane, 3/1989.
- [126] Skalmowski W., *Naturalne i sztuczne materiały kamienne w budownictwie*, Warszawa, Wydawnictwo Budownictwo i Architektura, 1965.
- [127] Skalmowski W., *Technologia materiałów budowlanych*, Warszawa, Wydawnictwo Arkady, 1972.
- [128] Skarbek-Kowalski B., *Techniki iniekcyjne*, Izolacje, 2/2007.
- [129] Skibiński S., Jagodziński L., *Metoda badań i monitorowania stanu zawilgocenia murów*, Warszawa, Ochrona i Konserwacja Zabytków, 6/1997.
- [130] Skibiński S., *Udział soli rozpuszczalnych w wodzie w procesach niszczenia kamiennych obiektów zabytkowych oraz konserwatorskie sposoby ograniczania ich działania*, Ochrona Zabytków, 3-4 1985.
- [131] Szmygin B., *Ocena skuteczności zabezpieczenia murów przed nadmiernym zawilgoceniem na przykładzie domku gotyckiego w Puławach*, Lublin, Politechnika Lubelska.
- [132] Trochonowicz M., Ostańska A., *Błędy projektowe i wykonawcze iniekcyjnych metod osuszania*, XI Konferencja Naukowo-Techniczna: Problemy remontowe w budownictwie ogólnym i obiektach zabytkowych, Wrocław-Zamek Kliczków, 2004.
- [133] Trochonowicz M., *Metody usuwania i neutralizacji soli w murach z materiałów ceramicznych (cz.2)*, Ceramika Budowlana, 01/2007.
- [134] Trochonowicz M., *Iniekcyjne osuszanie murów. Analiza błędów projektowych i wykonawczych*, Renowacja budynków i modernizacja obszarów zabudowy, Zielona Góra, 2005.

- [135] Trochonowicz M., *Korozja biologiczna w obiektach budowlanych*, Wybrane zagadnienia ochrony i konserwacji zabytków architektury, Lublin, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2007.
- [136] Trochonowicz M., *Osuszanie murów z zastosowaniem izolacji wtórnych w postaci przepon iniekcyjnych. Błędy projektowe, wykonawcze i eksploatacyjne*, Postęp i nowoczesność w konserwacji zabytków, Lublin, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2005.
- [137] Trochonowicz M., *Problematyka oceny stanu wilgotnościowego w obiektach adaptowanych do współczesnych funkcji, Adaptacja obiektów zabytkowych do współczesnych funkcji użytkowych*, Warszawa – Lublin, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2009.
- [138] Trochonowicz M., *Skuteczność osuszania murów metodami nieinwazyjnymi – Analiza wybranych przykładów*, Renowacja budynków i modernizacja obszarów zabudowy, Zielona Góra, 2006.
- [139] Trochonowicz M., *Wilgoć obiektach budowlanych*, Wybrane zagadnienia ochrony i konserwacji zabytków architektury, Lublin, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2007.
- [140] Trochonowicz M., *Wpływ soli rozpuszczalnych w wodzie na ceramiczne materiały budowlane*, Ceramika Budowlana, 04/2006.
- [141] Trochonowicz M., *Wpływ techniki poboru próbki na zniekształcenie wyniku pomiaru wilgotności*, Renowacja budynków i modernizacja obszarów zabudowy, Zielona Góra, 2007.
- [142] Trochonowicz M., *Zamek w Janowcu nad Wisłą. Ocena stanu wilgotnościowego i zasolenia murów*. Lublin, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2006.
- [143] Wesołowska M., *Badanie skuteczności nowej metody osuszania murów pod nazwą AQUASTOP*, Bydgoszcz, Zeszyty naukowe ATR w Bydgoszczy – Budownictwo, 1997.
- [144] Wesołowska M., *Elektrofizyczna metoda osuszania murów*, Materiały Budowlane, 6/1997.
- [145] Westfal L., *Skąły węglanowe Polski*, Renowacje i Zabytki, 3/2007
- [146] Wójcik R., *Metody mechaniczne wykonywania hydroizolacji poziomych w budynkach istniejących*, Materiały Budowlane, 4/1999.
- [147] Wójcik R., *Odtworzenie izolacji poziomych metoda parafinową W – ART*, Materiały Budowlane, 4/1999.
- [148] Wójcik R., *Pomiary wilgotności przegród budowlanych*, Materiały Budowlane, 8/2002.
- [149] Wróblewski K.: *Technologia iniekcji ciśnieniowej*, Izolacje, 10/2005.

- [150] WTA 1-2-91/D *Der Echte Hausschwamm. Erkennung, Lebensbedingungen, vorbeugende Maßnahmen, bekämpfende chemische Maßnahmen, Leistungsverzeichnis.*
- [151] WTA 2-9-04 *Sanierputzsysteme.*
- [152] WTA 3-11-97/D *Natursteinrestaurierung nach WTA III: Steingergängung mit Restauriermörteln und Steinersatzstoffen. Ersatz für Merkblatt 3-6-93/D.*
- [153] WTA 4-4-04 *Mauerwerksinjektion gegen kapillare Feuchtigkeit.*
- [154] WTA 4-5-99 *Beurteilung von Mauerwerk- Mauerwerkdiagnostik.*
- [155] WTA 4-6-05 *Nachtragliches Abdichtungen erdberührter Bauteile.*
- [156] WTA Merkblatt 4-11-02 *Messung der Feuchte von mineralischen Baustoffen.*
- [157] Wyrwał J., Świniarska J. *Problemy zawilgocenia przegród budowlanych*, Warszawa, PAN, 1998.
- [158] Wyrwał J., *Ruch wilgoci w porowatych materiałach i przegrodach budowlanych*, Opole, Studia i Monografie z.31, Wydawnictwo W.S.I. w Opolu, 1989.
- [159] Zakrzewski T., *Zagadnienia fizyczne w budownictwie*, Gliwice Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2003.
- [160] Żenczykowski W., *Budownictwo ogólne*, Tom I, Warszawa, Arkady, 1964.

### **Normy i akty prawne**

- [161] PN-66/B-04100 *Materiały kamienne. Oznaczenie gęstości objętościowej, gęstości, porowatości i szczelności*
- [162] PN-84/B-01080 *Kamień dla budownictwa i drogownictwa. Podział i zastosowanie według własności fizyczno-mechanicznych*
- [163] PN-84/B-04110 *Materiały kamienne. Oznaczenie wytrzymałości na ściskanie*
- [164] PN-84/B-04111 *Materiały kamienne. Oznaczenie ścieralności na tarczy Boehmego*
- [165] PN-85 B-04101 *Oznaczenie nasiąkliwości wodą*
- [166] PN-85 B-04500 *Zaprawy budowlane Badania cech fizycznych i wytrzymałościowych*
- [167] PN-85/B-04101 *Materiały kamienne. Oznaczenie nasiąkliwości wodą*

- [168] PN-85/B-04102 Materiały kamienne. Oznaczanie mrozoodporności metodą bezpośrednią
- [169] PN-85/B-06720 Pobieranie próbek materiałów kamiennych związanych
- [170] PN-88/B-04120 Kamień budowlany. Podział, pojęcia podstawowe, nazwy i określenia
- [171] PN-90 B-14501 Zaprawy budowlane zwykłe
- [172] PN-B-11200:1996 Materiały kamienne. Bloki, formaki, płyty surowe
- [173] PN-B-11209:1996 Materiały kamienne. Kamień łupany
- [174] PN-B-11210:1996 Materiały kamienne. Kamień łamany
- [175] PN-B-11211:1997 Materiały kamienne. Elementy kamienne łupane do licowania ścian
- [176] PN-B-11215:1998 Materiały kamienne. Metody pomiaru cech geometrycznych i właściwości fizycznych wyrobów z kamienia
- [177] PN-EN 1015-11:2001/A1:2007 Metody badań zapraw do murów - Część 11: Określenie wytrzymałości na zginanie i ściskanie stwardniałej zaprawy
- [178] PN-EN 1015-18:2003 Metody badań zapraw do murów - Część 18: Określenie współczynnika absorpcji wody spowodowanej podciąganiem kapilarnym stwardniałej zaprawy
- [179] PN-EN 12370:2001 Metody badań kamienia naturalnego - Oznaczanie odporności na krystalizację soli
- [180] PN-EN 12371:2002 Metody badań kamienia naturalnego - Oznaczanie mrozoodporności
- [181] PN-EN 12372:2001 Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie wytrzymałości na zginanie pod wpływem siły skupionej
- [182] PN-EN 12407:2001 Metody badań kamienia naturalnego - Badania petrograficzne
- [183] PN-EN 12440:2002 Kamień naturalny - Kryteria mianownictwa
- [184] PN-EN 12670:2002 Kamień naturalny – Terminologia
- [185] PN-EN 13161:2002 Metody badań kamienia naturalnego - Oznaczanie wytrzymałości na zginanie przy stałym momencie
- [186] PN-EN 13373:2004 Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie właściwości geometrycznych elementów.
- [187] PN-EN 13755:2002/AC:2004 Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie nasiąkliwości przy ciśnieniu atmosferycznym



- [188] PN-EN 13919:2004 Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie odporności na starzenie spowodowane działaniem SO<sub>2</sub> w obecności wilgoci
- [189] PN-EN 14066:2004 Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie odporności na starzenie spowodowane szokiem termicznym.
- [190] PN-EN 14146:2005 Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie dynamicznego modułu sprężystości (pomiar podstawowej częstotliwości rezonansowej)
- [191] PN-EN 14147:2004 Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie odporności na starzenie pod działaniem mgły solnej.
- [192] PN-EN 14157:2005 Kamień naturalny. Oznaczanie odporności na ścieranie
- [193] PN-EN 14205:2004 Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie twardości według Knoop.
- [194] PN-EN 14231:2004 Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie odporności na poślizg z użyciem przyrządu wahadłowego.
- [195] PN-EN 14579:2005 Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie prędkości rozchodzenia się dźwięku
- [196] PN-EN 14580:2005U Metody badań kamienia naturalnego - Oznaczanie statycznego modułu sprężystości
- [197] PN-EN 14581:2005U Metody badań kamienia naturalnego - Oznaczanie współczynnika liniowej rozszerzalności cieplnej
- [198] PN-EN 1468:2005 Kamień naturalny. Bloki surowe. Wymagania.
- [199] PN-EN 1925:2001 Metody badań kamienia naturalnego - Oznaczanie współczynnika nasiąkliwości kapilarnej
- [200] PN-EN 1926:2001 Metody badań kamienia naturalnego - Oznaczanie wytrzymałości na ściskanie
- [201] PN-EN 1936:2001 Metody badań kamienia naturalnego - Oznaczanie gęstości i gęstości objętościowej oraz całkowitej i otwartej porowatości
- [202] PN-EN 771-6:2002 Wymagania dotyczące elementów murowych - Część 6: Elementy murowe z kamienia naturalnego
- [203] PN-EN 772-11:2002 Metody badań elementów murowych - Część 11: Określenie absorpcji wody elementów murowych z betonu kruzywowego, kamienia sztucznego i kamienia naturalnego spowodowanej podciąganiem kapilarnym oraz początkowej absorpcji wody elementów murowych ceramicznych

- [204] PN-EN 772-4:2001 Metody badań elementów murowych - Część 4: Określenie gęstości, gęstości objętościowej oraz porowatości całkowitej i otwartej elementów murowych z kamienia naturalnego
- [205] PN-EN 998-2:2004/Ap1:2008 Wymagania dotyczące zapraw do murów - Część 2: Zaprawa murarska
- [206] PN-EN ISO 12570 Ciepłno-wilgotnościowe właściwości materiałów i wyrobów budowlanych. Określanie wilgotności przez suszenie w podwyższonej temperaturze.

## **Inne**

- [207] Instrukcja Aquamerck® 111106 test na chlorki
- [208] Instrukcja Aquamerck® 111170 test na azotany
- [209] Instrukcja Aquaquant® 14411 test na siarczany
- [210] Instrukcja obsługi miernika firmy Introl
- [211] Instrukcja obsługi wagosuszarki MAX 50/1
- [212] Instrukcja obsługi wilgotnościomierza materiałów LB-795
- [213] Instrukcja obsługi wilgotnościomierza materiałów LB-796
- [214] Instrukcja obsługi wilgotnościomierza Timbermaster®
- [215] Materiały firmy Aquapol Polska
- [216] Materiały firmy BOSCH
- [217] Materiały firmy Ceteco
- [218] Materiały firmy Deitermann
- [219] Materiały firmy DESOI
- [220] Materiały firmy Henkel
- [221] Materiały firmy HILTI
- [222] Materiały firmy HYDROSTOP
- [223] Materiały firmy Izomur
- [224] Materiały firmy Mapei
- [225] Materiały firmy MC Bauchemie
- [226] Materiały firmy Remmers
- [227] Materiały firmy Schomburg
- [228] Materiały firmy SIKA
- [229] Materiały firmy STO
- [230] Materiały firmy TIKAL
- [231] Materiały firmy WEBAC

- [232] ZUAT-15/IV.18/2005 Wyroby bitumiczno-mineralne przeznaczone do wykonywania powłok hydroizolacyjnych.
- [233] ZUAT-15/VI.11-2/2001 Preparaty do powierzchniowej hydrofobizacji wyrobów budowlanych. Cz. 2 : Wyroby ceramiczne.
- [234] ZUAT-15/VI.11-3/2003 Preparaty do powierzchniowej hydrofobizacji wyrobów budowlanych. Cz. 3: Kamienie budowlane.
- [235] ZUAT-15/VI.11-4/2005 Preparaty do powierzchniowej hydrofobizacji wyrobów budowlanych. Cz. 4: Zaprawy cementowe, cementowo-wapienne i wapienne.

## *Analiza skuteczności przepon wykonywanych metodami iniekcji chemicznej w murach z opoki*

### **STRESZCZENIE**

Na terenie makroregionu lubelskiego budownictwo zabytkowe i tradycyjne z wykorzystaniem opoki wapnistej stanowi dość znaczny procent. Powodowane to było dostępnością materiału, łatwością w jego pozyskaniu i obróbce oraz wysoką estetyką.

Pomimo istotnych zalet, materiał ma niestety szereg wad. Największa z nich jest wysoka podatność na destrukcyjny wpływ wody. Powoduje to konieczność właściwego zabezpieczenia obiektów z opoki wapnistej przed wpływem wody.

Ze względu na niejednorodność, niską wytrzymałość i dużą szerokość murów stosowanie sprawdzonych i skutecznych metod mechanicznych w większości przypadków jest niemożliwe. Alternatywą staje się, więc wykorzystanie przepon chemicznych wykonywanych metodą iniekcji.

Stan wiedzy na temat możliwości stosowania iniekcji chemicznych w opoce wapnistej jest niezadowalający. Wynika to przede wszystkim z lokalności stosowania kamienia. Firmy oferujące preparaty do wykonywania tego typu izolacji, skupiają się raczej na murach wykonanych z materiałów szeroko stosowanych w budownictwie. Oferowane środki nie zostały przebadane pod kątem możliwości ich zastosowania w tak nietypowym i jak się okazuje, "trudnym" materiale.

W związku z tym, niezwykle istotnym jest przeprowadzenie badań, które pozwolą na odpowiedź, czy w ogóle jest możliwe wykonanie przepon w murach z opoki, oraz jak powinna zostać dobrana technologia ich wykonania.

## *The efficacy analysis of the diaphragms made using the method of chemical injection in the walls of calcareous stones*

### **ABSTRACT/SUMMARY**

Within the Lublin macro-region the historical and traditional building using calcareous rocks is a relatively significant percentage. This was due to material availability, ease of its acquisition and processing, and high aesthetics.

Despite the significant advantages, the material has, unfortunately, a number of drawbacks. The biggest one of them is the high susceptibility to the destructive influence of water. This disadvantage necessitates the proper protection of structures made of calcareous stones against influence of water.

Due to the inhomogeneity, low resistance and large width of the walls, the application of proven and effective mechanical methods is impossible in most cases. Thus the alternative is the use of chemical diaphragms made by injection.

The state of the knowledge about the possibility of applying chemical injections in the calcareous stones is unsatisfactory. It results mostly from the localness of the stone application. Companies offering preparations for this type of isolation focus rather on the walls made of materials widely used in construction. Offered preparations have not been examined for the possibility of applying them in so untypical and, how it turns out, "difficult" material.

Therefore, it is extremely important to conduct research that will give the answer whether it is possible to make diaphragms in the calcareous walls, and how the technology should be chosen.