

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

## **Część I. Badania możliwości wytworzenia przepony w opoce wapnistej i zaprawach**

**Maciej Trochonowicz**

*Katedra Konserwacji Zabytków, Wydział Budownictwa i Architektury,  
Politechnika Lubelska, e-mail: m.trochonowicz@pollub.pl*

**Streszczenie:** Stan wiedzy na temat możliwości stosowania iniekcji chemicznych w opoce wapnistej jest niezadowolający. Wynika to przede wszystkim z lokalności stosowania kamienia oraz jego drobnoporowatej budowy. 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. Pierwszy z dwóch artykułów poświęcony zostanie badaniom możliwości wytworzenia warstwy hydrofobowej w kamieniu i zaprawie oraz oceną jej skuteczności.

**Słowa kluczowe:** izolacje, przepony chemiczne, preparaty hydrofobizujące, opoka wapnista.

### **1. Wprowadzenie**

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.

Pierwszy z dwóch artykułów poświęcony zostanie badaniom możliwości wytworzenia warstwy hydrofobowej w opoce wapnistej i różnych rodzajach zapraw oraz ocenie skuteczności hydrofobizacji. Drugi z artykułów dotyczyć będzie badań nad możliwością wytworzenia przepony w murze

## 2. 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 iniekować 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. Szczegółowo badania czwartego z etapów omówione zostaną w drugim z artykułów.

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

Tabela 1. Zestawienie liczby pojedynczych badań wykonanych przy realizacji pracy.

Table 1. Summary of the number of individual studies carried out in the implementation of the work.

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
Suma		865

## 3. Badania właściwości materiałów przed hydrofobizacją

### 3.1. Charakterystyka cech fizyko – mechanicznych opoki

W ramach prowadzonych prac wykonano badania cech fizyko-mechanicznych opoki pochodzącej z trzech miejscowości: Piask, Trawnik 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. Materiał ten poddano badaniu cech istotnych dla materiałów konstrukcyjnych, czyli: wytrzymałości na ściskanie, nasiąkliwości, gęstości właściwej, gęstości pozornej, ścieralności, podciąganiu kapilarnemu, otwartej porowatości i szczelności.

Tabela 2. Oznaczenie wytrzymałości na ściskanie.

Table 2. Determination of compressive strength.

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

Tabela 3. Oznaczenie wytrzymałości na rozciąganie.

Table 3. Determination of tensile strength.

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

Tabela 4. Oznaczenie ścieralności.

Table 4. Determination of abrasion.

Złoże	Liczba próbek	Ścieralność [cm]
Kazimierz	3	0,85
Piaski	3	0,78
Trawniki	3	0,88

Tabela 5. Oznaczenie nasiąkliwości.

Table 5. Determination of water absorption.

Złoże	Liczba próbek	Nasiąkliwość [%]
Kazimierz	6	26,6
Piaski	6	29,5
Trawniki	6	25,6

Tabela 6. Oznaczenie gęstości pozornej.

Table 6. Determination of apparent density.

Złoże	Liczba próbek	Gęstość pozorna [g/cm <sup>3</sup> ]
Kazimierz	5	1,37
Piaski	3	1,37
Trawniki	3	1,53

Tabela 7. Oznaczenie gęstości właściwej.

Table 7. Determination of density.

Złoże	Liczba próbek	Gęstość właściwa [g/cm <sup>3</sup> ]
Kazimierz	5	2,43
Piaski	3	2,62
Trawniki	3	2,60

Tabela 8. Oznaczenie szczelności.

Table 8. Determination of leak.

Złoże	Liczba próbek	Szczelność [%]
Kazimierz	5	56,38
Piaski	3	52,23
Trawniki	3	59,15

Tabela 9. Oznaczenie porowatości.  
Table 9. Determination of porosity.

Złoże	Liczba próbek	Porowatość [%]
Kazimierz	5	43,62
Piaski	3	47,77
Trawniki	3	40,85

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

Wszystkie trzy opoki zaliczane są do skał tzw. lekkich, ich gęstość pozorna 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 Piaski wykazują niską wytrzymałość na ściskanie. Wyższe wyniki osiągnięte dla próbek z Trawniki 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.

W sposób analogiczny wykonano badania zapraw wapiennych wapiennych z dodatkiem cementu i trasowych.

## 4. Hydrofobizacja materiałów

### 4.1. Badania wstępne – 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.

Preparaty tłoczono za pomocą pompy membranowej z użyciem iniektorów wkręcanych i wbijanych. W sumie badaniom poddano 40 próbek, po 8 dla każdego z preparatów.

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. 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 zakwalifikowane do kolejnych badań.

## 4.2. Proces hydrofobizacji materiałów – opoka

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 przeprowadzono metodą grawimetryczną. Następnie otwór został dokładnie wyczyszczony sprężonym powietrzem, by uniknąć zatkania otworu, które nie pozwalałoby na głęboką penetrację przez preparat.

### 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 iniekowania próbek o zmniejszających się wilgotnościach również nie dały zadowalających efektów. Badania zakończono po wykonaniu 10 prób.

### 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.

## 4.3. Proces hydrofobizacji materiałów - zaprawy

Przy wyborze preparatu, warunkującego uzyskanie pozytywnych efektów podczas wykonywania przepon metodą iniekcji, autor pracy wyszedł z założenia, że 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.

**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 trasowy. Do zapraw trasowych nie udało się wprowadzić preparatu. Efektów również nie uzyskano mimo znacznemu zwiększeniu porowatości zaprawy. Szczelna struktura porów uniemożliwia penetrację preparatu.

## 5. 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).

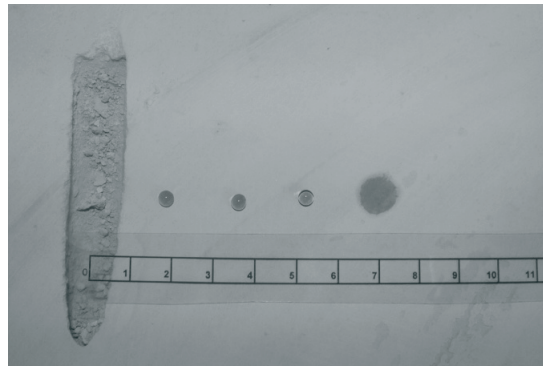
### Opoka

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

- Iniekcja preparatem I (krzemian modyfikowany silikonem) nie daje pożądanych rezultatów, promień penetracji jest znikomy, a badania absorpcji kroplą wody wykazują brak efektu hydrofobizacji.
- Iniekcja preparatem II (emulsja silikonowa) 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 (mikroemulsja silikonowa) 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.



Rys. 1. Zakończone niepowodzeniem tłoczenie preparatu I.  
Fig. 1. Failed preparation I stamping.



Rys. 2. Próbką III 10. Pomiar promienia penetracji preparatu w opoce.  
Fig. 2. Sample III 10. The radius of penetration measurement.

Tabela. 10. Przykładowa tabela zestawienie parametrów warunkujących skuteczność hydrofobizacji preparatu III.

Table 10. Example of a set of the parameters determining the effectiveness of waterproofing product.

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



## Zaprawy

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.

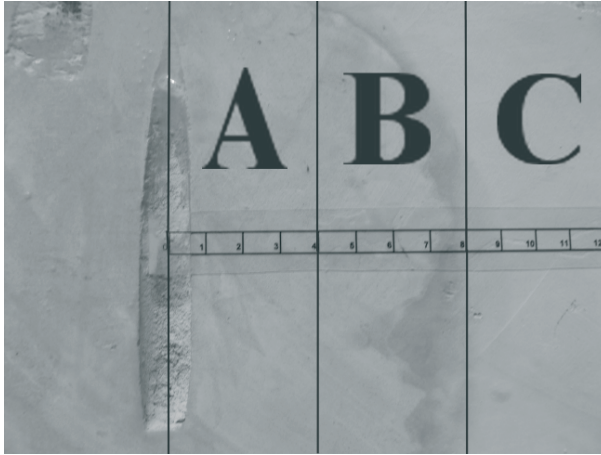
## 6. Charakterystyka cech fizyko – mechanicznych opoki po hydrofobizacji

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 zamrażanie, 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.

Ze względu na obszerność materiału poniżej przedstawione jedynie część wyników badań dla opoki. W sposób analogiczny do opisanego badania wykonano również dla próbek zapraw.

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 poniższym rysunkiem. 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. W analogiczny sposób przygotowano do badań próbki zapraw.



Rys. 3. Opoka. Podział kamienia na strefy pomiarowe.  
Fig. 3. Division of the stone into measuring zones.



Rys. 4. Wycięte i przygotowane do badań próbki strefy C.  
Fig. 4. Cut and prepared samples from zone C for test.

### Wytrzymałość na ściskanie

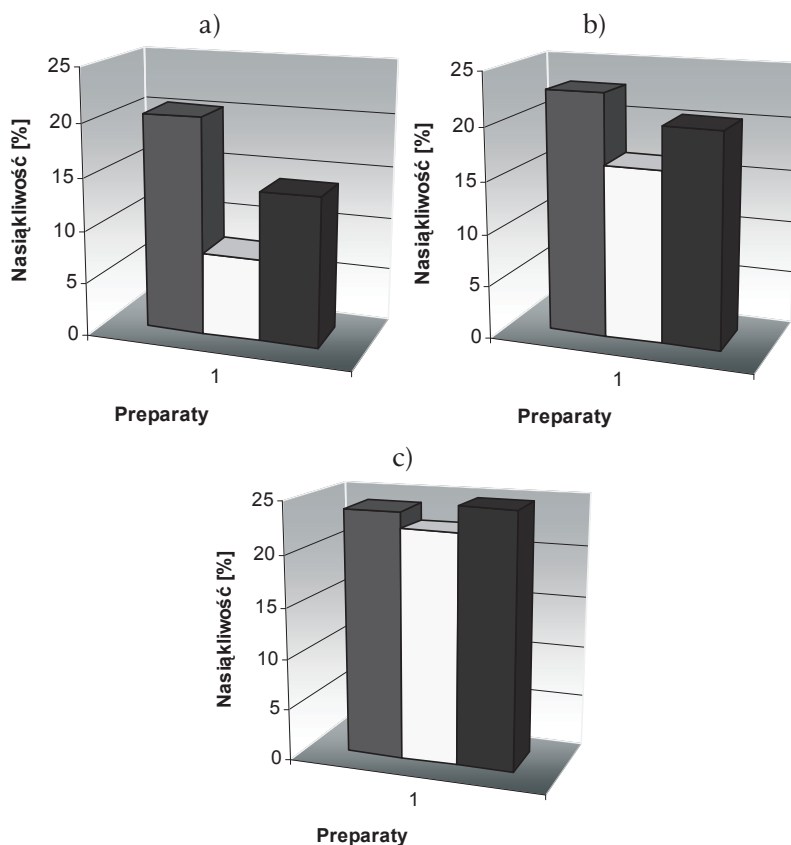
Badania wytrzymałości na ściskanie próbek z opoki hydrofobizowanej emulsją silikonową nie wykazały istotnych różnic w stosunku do opoki nie nasączonej. Pomiędzy strefami A i C różnica w średnich wartościach wynosi co prawda 4% na korzyść próbek zhydrofobizowanych, ale już w strefie B średnia wartość jest mniejsza niż dla strefy C.

### Nasiąkliwość

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. 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.

Tabela 11. Badania nasiąkliwości próbek z opoki zhydrofobizowanych preparatem II.  
 Table 11. Absorption studies of samples of rocks hydrophobized with preparation II.

Nr próbki	Strefa A	Strefa B	Strefa C
	Nasiąkliwość	Nasiąkliwość	Nasiąkliwość
	[%]	[%]	[%]
II 1	9,71	23,57	22,11
II 2	8,27	8,27	28,26
II 3	7,29	11,2	25,26
II 4	4,24	4,12	17,78
II 5	3,46	7,4	6,32
II 6	7,18	25,25	27,32
II 7	9,53	21,09	24,13
II 8	11,87	22,44	23,60
II 9	7,04	19,33	23,83
II 10	8,64	20,84	24,30
ΔAb	7,72	16,35	22,29



Rys. 5. Wykresy nasiąkliwości w zależności od zastosowanego preparatu: a) w strefie A, b) w strefie B, c) w strefie C. Odpowiednio kolor szary preparat I, biały II i czarny III.

Fig. 5. Graphs of absorption depending on the used preparation: a) in zone A, b) in zone B, c) in zone C. Respectively, the gray color – the preparation I, white – II and black – III.

### Oznaczenie kapilarnego podciągania

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 hydrofobizacją próbek. Podciąganie kapilarne odbywało się częścią nie zabezpieczoną preparatem.
- W przypadku próbek strefy C (próbki nie zhydrofobizowane) uzyskano największą wartość współczynnika C.

Tabela 12. Porównanie wyników średniej wartości arytmetycznej współczynnika nasiąkliwości kapilarnej próbek z opoki hydrofobizowanych emulsją silikonową.

Table 12. Comparison of the results of the arithmetic average value of the coefficient of capillary absorption from the rock samples hydrophobized with silicone emulsion

Strefa	Liczba próbek	$\Delta C$
		[g/m <sup>2</sup> *s <sup>0,5</sup> ]
A	16	18,290
B	16	86,820
C	8	111,408

### Metoda sorpcji par azotu – badanie tekstury

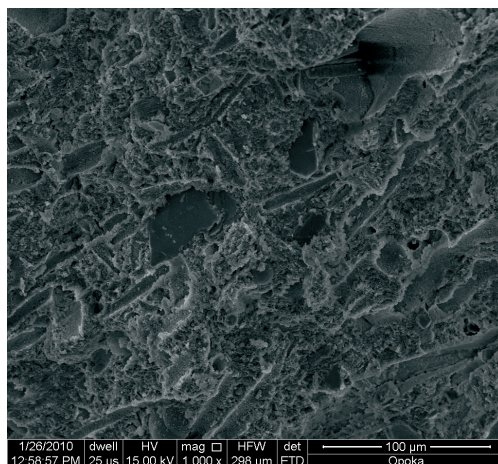
Charakterystyka parametrów tekstury badanych opok została przeprowadzona za pomocą niskotemperaturowej izotermi adsorpcji i desorpcji azotu w temperaturze ciekłego azotu 77° K na aparacie ASAP 2020 firmy Micromeritics.

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.

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

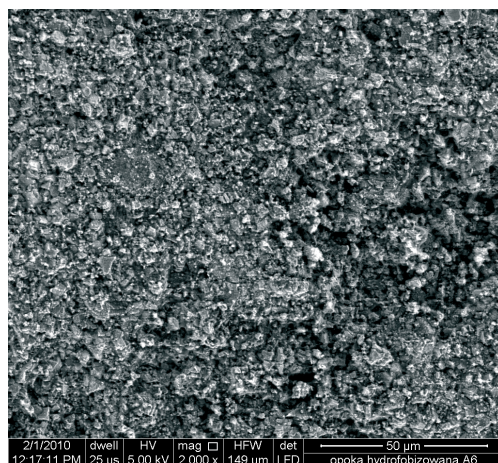
Badania opoki metodą SEM wykonano w Laboratorium Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Lubelskiej przy użyciu aparatu QUANTA 250. Badaniom poddano próbki opoki hydrofobizowane emulsją silikonową oraz materiał niezabezpieczony.

Proces hydrofobizacji zaciera 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.



Rys. 6. Obraz SEM opoki przed hydrofobizacją.

Fig. 6. SEM image of rocks before waterproofing.



Rys. 7. Obraz SEM opoki po hydrofobizacją.

Fig. 7. SEM image of rocks after waterproofing

## 7. 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.

## **8. 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.

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

### **Part I. The research of possibility of the diaphragm formation in the calcareous stone and mortar**

Maciej Trochonowicz

*Department of Historic Objects Conservation, Faculty of Building and Architecture,  
Lublin University of Technology, e-mail: m.trochonowicz@pollub.pl*

**Abstract:** State of knowledge about how to use chemical injection in calcareous rock is unsatisfactory. This results, primarily, from the locality using of the stone and its small porous structure. Companies offering preparations to carry out this type of insulation, usually focus on the walls made of widely used in construction materials. Offered measures have not been tested for their applicability in such an unusual and as it turns out, the „difficult” material. The first of two articles will be devoted to research the possibility of producing a hydrophobic layer in calcareous stone and mortar and an assessment of its effectiveness

**Keywords:** insulation, chemical diaphragm, waterproofing formulations, calcareous stone.