

Dominik Logoń*

orcid.org/0000-0003-3792-2634

Trwałość zapraw wapiennych z zastosowaniem powierzchniowej impregnacji lotexanem (silanem–siloksanem)

Durability of Lime Mortar With Lotexane (Silane-Siloxane) Surface Impregnation

Słowa kluczowe: lotexan, silan–siloksan, zaprawa wapienna, impregnacja, mrozoodporność, wytrzymałość na ściskanie, trwałość

Keywords: lotexane (silane-siloxane), lime mortar, impregnation, frost resistance, compressive strength, durability

Wprowadzenie

Ochrona dziedzictwa kulturowego, w tym obiektów sakralnych stanowiących istotny element europejskiego krajobrazu kulturowego, wymaga stosowania metod konserwatorskich zapewniających długotrwałą trwałość materiałów przy jednoczesnym zachowaniu ich autentyczności [Hughes, Callebaut 1999]. Degradacja zapraw wapiennych w obiektach zabytkowych prowadzi do postępującej utraty substancji historycznej, co stanowi nieodwracalną stratę zarówno dla materialnego dziedzictwa, jak i tożsamości kulturowej regionów. Zastosowanie odpowiednich technologii konserwatorskich, takich jak impregnacja powierzchniowa, pozwala na wydłużenie okresu użytkowania konstrukcji zabytkowych bez ingerencji w ich oryginalną strukturę. Jest to szczególnie istotne w wypadku adaptacji obiektów historycznych do współczesnych wymogów [Krukowiecka-Brzęczek, Logoń 2025]. Nowoczesne metody wzmacniania materiałów historycznych powinny łączyć wysoką skuteczność techniczną z zasadami minimalnej ingerencji oraz odwracalności zabiegów konserwatorskich, aby zapewnić zachowanie autentyczności obiektów dla przyszłych pokoleń [Laycock et al. 2019].

Poprawa właściwości fizycznych i mechanicznych tradycyjnych oraz historycznych zapraw wapiennych

Introduction

Protecting cultural heritage, including religious buildings that form an essential part of the European cultural landscape, requires conservation methods that ensure long-term material durability while preserving authenticity [Hughes, Callebaut 1999]. The degradation of lime mortars in historic buildings leads to progressive loss of historic fabric, representing an irreversible loss for both material heritage and regional cultural identity. Appropriate conservation technologies, such as surface impregnation, can extend the lifespan of historic structures without interfering with their original structure, which is particularly important when adapting historic buildings to contemporary requirements [Krukowiecka-Brzęczek, Logoń 2025]. Modern methods of strengthening historic materials should combine technical effectiveness with the principles of minimal intervention and reversible treatments to preserve the authenticity of buildings for future generations [Laycock et al. 2019].

Improving the physical and mechanical properties of traditional and historical lime mortars to enhance their durability is the primary objective of many scientific studies [Hughes et al. 2012]. The scope of application of additives [Jasieńko et al. 2016] and admix-

* dr inż., Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

* Ph.D. Eng., Wrocław University of Science and Technology, Faculty of Civil Engineering

Cytowanie / Citation: Logoń D. Durability of Lime Mortar With Lotexane (Silane-Siloxane) Surface Impregnation. *Wiadomości Konserwatorskie – Journal of Heritage Conservation* 2026, 86S:252–260

Otrzymano / Received: 13.01.2025 • **Zaakceptowano / Accepted:** 20.03.2026

doi: 10.48234/WK86SLOTEXANE

Praca dopuszczona do druku po recenzjach

Article accepted for publishing after reviews

w celu zwiększenia ich trwałości stanowi przedmiot licznych badań naukowych [Hughes et al. 2012; Silva et al. 2022]. Zakres stosowania dodatków [Jasieńko et al. 2016] oraz domieszek [Sepulcre-Aguilar, Hernández-Olivares 2010] wykorzystywanych do modyfikacji właściwości kruchych i porowatych kompozytów jest bardzo szeroki [Zawawi, Banfill 2006].

Prace naprawcze prowadzone przy historycznych zaprawach wapiennych wymagają zastosowania metod i materiałów, które nie wpływają istotnie na cechy takie jak barwa i struktura wzmacnianych materiałów [Forster 2010; Logoń et al. 2023]. Naukowcy nadal podejmują próby modyfikacji właściwości fizycznych i mechanicznych zapraw wapiennych [Silva et al. 2025; Kang et al. 2017]. Zgodność historyczna domieszek i dodatków z istniejącymi strukturami jest podstawowym wymogiem w procesie rekonstrukcji obiektów zabytkowych [Laycock et al. 2019; Hughes 2012].

Jednym z powszechnie stosowanych środków impregnujących w celu poprawy właściwości kompozytów jest szkło wodne (krzemian sodu) [Caprai et al. 2019]. Badania wskazują na zasadność stosowania krzemianu potasu w postaci ciekłej zamiast krzemianu sodu.

Głównym celem konserwacji kruchych kompozytów o niskiej wytrzymałości jest zwiększenie ich trwałości przy zastosowaniu metod niedestrukcyjnych [Chiari et al. 1996]. Iniekcja ciśnieniowa nie jest zalecana ze względu na ryzyko uszkodzenia struktury kruchych kompozytów [Padovnik et al. 2016; Pasian et al. 2018]. Nie zaleca się również stosowania do wzmacniania silnych polimerów ani żywic epoksydowych [Chen et al. 2002]. Metody charakteryzujące się wysoką skutecznością poprawy właściwości fizycznych i mechanicznych, łatwością aplikacji oraz relatywnie niskim kosztem pozostają ważnym przedmiotem badań [Palomar, Barluenga 2018]. Impregnacja powierzchniowa stanowi skuteczną metodę poprawy trwałości nasiąkliwych kompozytów.

Zastosowanie impregnacji powierzchniowej z wykorzystaniem estrów kwasu krzemowego w odniesieniu do różnych materiałów historycznych jest zagadnieniem stosunkowo nowym, szczególnie w przypadku ciekłego krzemianu potasu. Dotychczasowe badania koncentrowały się na wykorzystaniu ciekłego krzemianu potasu oraz estrów kwasu krzemowego jako środków impregnujących. Wyniki potwierdziły lepsze efekty impregnacji w przypadku zastosowania estrów kwasu krzemowego [Krukowiecka-Brzeczek, Logoń 2025].

Wpływ siloksanów na zaprawy cementowe i wapienne był badany z zastosowaniem hydrofobowych powłok ochronnych [Maravelaki-Kalaitzaki 2007]. Dobre właściwości hydrauliczne przypisano powlekanii kapilar przez siloksany bez blokowania porów, co potwierdziły analizy rozkładu wielkości porów.

W niniejszej pracy badano zaprawy wapienne poddane impregnacji powierzchniowej mieszaniną lotexanu (silanowo-siloksanową). Uzyskane wyniki porównano z wcześniej opublikowanymi danymi dotyczącymi impregnacji powierzchniowej z zastosowaniem ciekłego krzemianu potasu oraz estrów kwasu krzemowego,

tures [Sepulcre-Aguilar et al. 2010] used to modify the properties of brittle and porous composites is very wide [Zawawi et al. 2006].

Repair works on historical lime mortars require methods and materials that do not significantly affect properties such as the color and structure of the reinforced materials [Logoń et al. 2023]. Scientists continue to modify the physical and mechanical properties of limestone mortars [Silva et al. 2025]. Historical compatibility of admixtures and additives with existing structures is a basic requirement for reconstructing historic buildings [Laycock et al. 2019], [Hughes 2012].

One commonly used impregnation agent to improve composite properties is water glass (sodium silicate) [Caprai et al. 2019]. Studies have highlighted the advisability of using liquid potassium silicate instead of liquid sodium silicate.

The main objective in conserving brittle, low-strength composites is to increase their durability using non-destructive methods [Chiari et al. 1996]. Pressure injection is not recommended because it risks damaging the structure of brittle composites [Padovnik et al. 2016; Pasian et al. 2018]. Reinforcement using strong polymers or epoxies is also not recommended [Chen et al. 2002]. Methods that improve physical and mechanical properties, are easy to apply, and remain relatively low cost remain important research subjects [Palomar, Barluenga 2018]. Surface impregnation is an effective method for improving the durability of the outer layer of brittle and absorbent composites.

The application of surface impregnation using silicic acid esters to various historical materials is relatively new, particularly with liquid potassium silicate. Previous studies used liquid potassium silicate and silicic acid esters as impregnation agents. The results confirmed better impregnation effects when silicic acid esters were applied [Krukowiecka-Brzeczek, Logoń 2025].

The influence of siloxanes on cement and lime mortars has been investigated using water-repellent treatments [Maravelaki-Kalaitzaki 2007]. Pore size distribution analyses indicated that the siloxane coating improved hydraulic properties by filling capillaries without blocking pores.

This paper studied lime mortars surface-impregnated with a lotexane (silane-siloxane) mixture. The results were compared with previously published data on surface impregnation using liquid potassium silicate and silicic acid esters, demonstrating greater effectiveness in improving durability.

Experimental

The reference mortar (M0) was based on hydrated lime CL 90-S. The traditional mortar had a compressive strength of 0.9 MPa. The mortar components were mixed in a lime:sand ratio of 1:4.5. Tap water was added to achieve a consistent mortar consistency corresponding to a Novikow cone penetration of 6 cm.

wykazując większą skuteczność badanej metody w zakresie poprawy trwałości zapraw.

Badania

Zaprawa referencyjna (M0) została wykonana na bazie wapna hydratyzowanego CL 90-S. Wytrzymałość na ściskanie tradycyjnej zaprawy wynosiła 0,9 MPa. Proporcja masowa składników zaprawy, tj. wapna i piasku, wyniosła 1:4,5. Wodę wodociągową dodawano w celu uzyskania stałej konsystencji zaprawy, odpowiadającej zagłębieniu stożka Nowikowa równemu 6 cm.

Belki o wymiarach $40 \times 40 \times 160$ mm dojrzewały w komorze wilgotnościowej przez 28 dni. Następnie próbki przechowywano przez kolejne 28 dni w warunkach laboratoryjnych w temperaturze 20°C . Dla każdego oznaczenia wykorzystano po sześć próbek każdej z badanych zapraw, a uzyskane wyniki stanowią średnie arytmetyczne.

Zaprawa referencyjna M0 została poddana impregnacji powierzchniowej preparatem Keim Lotexan (lotexan: silan–siloksan) ML (tab. 1). Dodatkowo, w celach porównawczych, uwzględniono próbki impregnowane ciekłym krzemianem potasu (MS) oraz estrem kwasu krzemowego (MH) [Krukowiecka-Brzęczek, Logoń 2025]. Próbki przygotowano i badano według identycznej procedury.

Metody badań

Badanie wytrzymałości na zginanie w układzie trójpunktowym (f_{b}) przeprowadzono zgodnie z wytycznymi dla standardowych zapraw cementowych. Wytrzymałość na ściskanie (f_{c}) określono na połówkach belek uzyskanych po teście zginania w znormalizowanym rewersorze.

Badanie nasiąkliwości wodnej przeprowadzono przez ustawienie belek z zaprawy wapiennej o wymiarach $40 \times 40 \times 160$ mm w pozycji pionowej w kuwecie wypełnionej wodą do wysokości 10 mm. Próbki pozostawiono w wodzie przez godzinę. Wyniki przedstawiono jako procent masy zaabsorbowanej wody.

Badanie mrozoodporności przeprowadzono poprzez poddanie połówek belek z zaprawy wapiennej (uzyskanych po teście zginania trójpunktowego) cyklom zamrażania i rozmrażania. Przed rozpoczęciem badania mrozoodporności powierzchnie przełomów próbek zostały zaimpregnowane.

Jeden cykl badawczy polegał na zalaniu próbek wodą i przechowywaniu ich w wodzie o temperaturze 20°C przez 4 godziny. Następnie mokre próbki zamrażano w zamrażarce w temperaturze -20°C przez kolejne 4 godziny. Po upływie godziny od rozpoczęcia kolejnego cyklu (zalewania wodą) próbki wyjmowano z wody, poddawano ocenie wizualnej, ważono oraz dokumentowano fotograficznie. Następnie ponownie umieszczano je w wodzie i kontynuowano cykle zamrażania i rozmrażania.

Próbki, które uległy uszkodzeniu, wykazywały spękania lub charakteryzowały się ubytkiem masy przekraczającym 5%, uznawano za niespełniające kryteriów mrozoodporności.

Symbol Symbol	Zaprawa Lime mortar
M0	Zaprawa referencyjna reference mortar
MS	Zaprawa referencyjna impregnowana krzemianem potasu (S) ref. mortar impregnated with liquid potassium silicate (S)
MH	Zaprawa referencyjna impregnowana estrem kwasu krzemowego (H) ref. mortar impregnated with silicic acid ester (H)
ML	Zaprawa referencyjna impregnowana lotexanem (silan–siloksan) (L) ref. mortar impregnated with lotexane (silane/siloxane) (L)

Tab. 1. Charakterystyka badanych próbek zapraw wapiennych; wszystkie tabele i ryciny opracowane przez autora

Table 1. Lime mortar samples; all tables and figures prepared by the author

Beams measuring $40 \times 40 \times 160$ mm were placed in a humidity chamber for 28 days. The specimens were then stored for a further 28 days under laboratory conditions at 20°C . Six specimens of each tested mortar were used for each determination, and the results were presented as arithmetic means.

The reference mortar M0 was surface-impregnated with Keim Lotexan (lotexane: silane-siloxane) ML (Table 1). Additionally, specimens impregnated with liquid potassium silicate (MS) and silicic acid ester (MH) were included for comparison [Krukowiecka-Brzęczek, Logoń 2025]. The specimens were prepared and tested in the same manner.

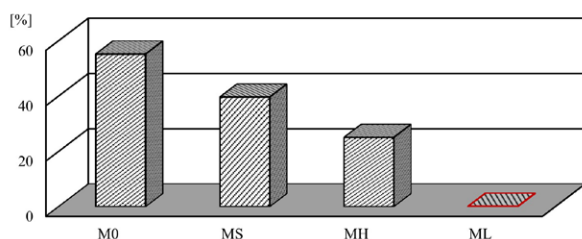
Methods

The three-point bending test (f_{b}) was performed according to the guidelines for standard cement mortar. The compressive strength test (f_{c}) was carried out on the beam halves obtained from the bending test.

The water absorption test was conducted by placing lime mortar beams ($40 \times 40 \times 160$ mm) vertically in a cuvette filled with water to a height of 10 mm. The specimens were left for 1 hour. The data are presented as the percentage of water absorbed by mass.

The frost resistance test involved subjecting lime mortar beam halves (obtained after the three-point bending test) to freeze–thaw cycles. Prior to the frost resistance test, the fracture surfaces of the specimens were impregnated.

One cycle consisted of flooding the specimens with water and storing them in water at 20°C for 4 hours. The wet specimens were then frozen in a freezer at -20°C for 4 hours. One hour after the start of the next cycle (flooding with water), specimens were removed from the water, visually assessed, weighed, and photographed. The specimens were then returned to the water, and the freeze–thaw cycle continued.



Ryc. 1. Wchłanianie wody [%] w stosunku do suchej masy
Fig. 1. Water absorption [%] relative to dry mass

Wyniki

Tabela 2 oraz ryciny 1–5 przedstawiają wyniki badań właściwości fizycznych i mechanicznych zapraw wapiennych wymienionych w tabeli 1. Zawartość zaabsorbowanej wody (%) obliczono w odniesieniu do masy suchej próbki. W tabeli podano również liczbę cykli zamrażania i rozmrażania poprzedzających pojawienie się pierwszej rysy. Dodatkowo uwzględniono wyniki badań wytrzymałości na zginanie w układzie trójpunktowym (f_{tb}) oraz wytrzymałości na ściskanie (f_c).

Rycina 1 przedstawia wyniki badania nasiąkliwości wodnej analizowanych zapraw wapiennych. Najniższą nasiąkliwość odnotowano w przypadku próbek ML, a następnie MH i MS. Największą zdolność absorpcji wody wykazała zaprawa referencyjna M0 (14,5%). Szczególnie istotna była impregnacja lotexanem, która ograniczyła nasiąkliwość zaprawy niemal do zera (0,03%).

Wyniki badania wytrzymałości na zginanie w układzie trójpunktowym przedstawiono na rycinie 2a, zaś rycina 2b pokazuje wyniki wytrzymałości na ściskanie. Jak wynika z tabeli 1 oraz ryciny 2, wpływ lotexanu na poprawę wytrzymałości na zginanie i ściskanie jest porównywalny do efektów uzyskanych w próbkach MS i MH.

Ryciny 3 i 4 przedstawiają wyniki badania mrozoodporności. Jak można zaobserwować, zastosowanie impregnacji lotexanem zwiększyło mrozoodporność czternastokrotnie.

Specimens that were damaged, cracked, or showed weight loss greater than 5% were considered to have failed the frost resistance test.

Results

Table 2 and Figures 1–5 present the physical and mechanical property results for the lime mortars listed in Table 1. The water content (%) was calculated with reference to the dry mass of the specimen. The table also presents the number of freeze–thaw cycles until the first crack appears. The table also includes the results of the three-point bending test (f_{tb}) and compressive strength test (f_c).

Figure 1 shows the water absorption of the tested lime mortars. The ML samples showed the best results, followed by MH and MS. The reference mortar M0 recorded the highest water absorption (14.5%). Particularly noteworthy is the lotexane impregnation, which reduced water absorption to almost zero (0.03%).

The results of the three-point bending test are shown in Fig. 2a, while Fig. 2b presents the compressive strength results. As shown in Table 1 and Fig. 2, the effect of lotexane on flexural and compressive strength is comparable to that of MS and MH samples.

Figures 3 and 4 present the frost resistance test results. As shown, lotexane impregnation increased frost resistance fourteen times.

Figure 4 shows the frost resistance of the reference mortar M0 and impregnated mortars MS, MH, and ML. Photographs of the first destructive cracks are presented on the left: M0 – 1 cycle, MS – 3 cycles, MH – 7 cycles, and ML – 14 cycles. The destruction process is shown on the right: M0 – after 9 cycles, MS – after 9 cycles, MH – after 9 cycles, and ML – after 15 cycles.

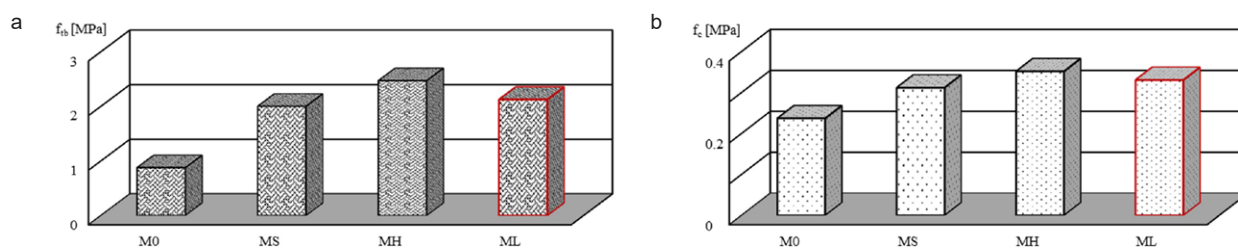
In the reference specimen M0, the first cracks appeared after the first cycle. Specimens MS showed initial destruction after 3 cycles, while specimens MH exhibited damage after 7 cycles. Lime mortar impregnated with lotexane ML showed the best results, with the first crack appearing after 14 cycles.

Specimens M0 and MS, which exhibited lower frost resistance, also showed a faster complete destruc-

Próbka	Woda abs. [g]	Woda abs. [%]	Mrozoodporność [cykle]	Siła zginająca [N]	Siła ściskająca [N]	Wytrzymałość na zginanie f_{tb} [MPa]	Wytrzymałość na ściskanie f_c [MPa]
Specimen	Water abs. [g]	Water abs. [%]	Frost resistance [cycle]	Bending force [N]	Compressive force [N]	Bending strength f_{tb} [MPa]	Compressive Strength f_c [MPa]
M0	55,18	14,46	1	101	1402	0,24	0,9
MS	39,64	10,73	3	133	3201	0,31	2,0
MH	25,06	7,06	7	150	3950	0,35	2,5
ML	0,11	0,03	14	141	3401	0,33	2,1

Tab. 2. Właściwości fizyczne i mechaniczne badanych zapraw

Table 2. Physical and mechanical properties of lime mortars



Ryc. 2. Właściwości mechaniczne zapraw wapiennych: a) wytrzymałość na zginanie w układzie trójpunktowym (f_{tb}); b) wytrzymałość na ściskanie (f_c)

Fig. 2. Lime mortars: a) three-point tensile strength f_{tb} , b) compressive strength f_c

Rycina 4 przedstawia mrozoodporność zaprawy referencyjnej M0 oraz zapraw impregnowanych MS, MH i ML. Fotografie pierwszych rys destrukcyjnych pokazano po lewej stronie: M0 – po 1 cyklu, MS – po 3 cyklach, MH – po 7 cyklach, a ML – po 14 cyklach. Po prawej stronie przedstawiono proces zniszczenia: M0 – po 9 cyklach, MS – po 9 cyklach, MH – po 9 cyklach, a ML – po 15 cyklach.

W próbce referencyjnej M0 pierwsze rysy pojawiły się po pierwszym cyklu zamrażania i rozmrażania. W próbkach MS pierwsze uszkodzenia zaobserwowano po 3 cyklach, natomiast w próbkach MH – po 7 cyklach. Najlepsze wyniki uzyskano dla zaprawy wapiennej impregnowanej lotexanem ML, w której pierwsza rysa pojawiła się dopiero po 14 cyklach.

Próbki M0 i MS, charakteryzujące się niższą mrozoodpornością, uległy również szybszemu procesowi całkowitego zniszczenia po 9 cyklach (ryc. 4, po prawej). Próbka MH wykazała większą mrozoodporność – pierwsza rysa pojawiła się po 7 cyklach, a całkowite zniszczenie nastąpiło po 9 cyklach.

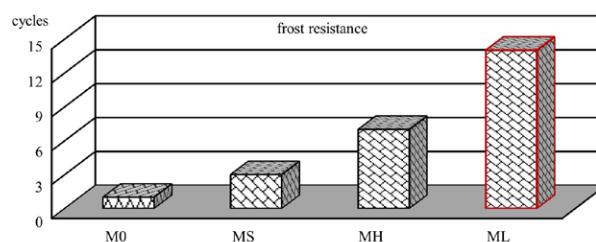
Najlepsze wyniki uzyskano dla próbek impregnowanych lotexanem ML. W tym wypadku pierwszą rysę zaobserwowano dopiero po 14 cyklach, a całkowite rozdzielenie próbki na dwie części nastąpiło po 15 cyklach (ryc. 4, ML).

Rycina 5 przedstawia próbkę ML podczas badania mrozoodporności. Pojawiające się podczas zalewania wodą pęcherzyki powietrza wskazują, że próbka zachowała właściwości dyfuzyjne. Analogiczne zjawisko zaobserwowano również w próbkach M0, MS i MH.

Dyskusja

Przeprowadzone badania wykazały istotny wzrost trwałości zapraw wapiennych po zastosowaniu impregnacji powierzchniowej lotexanem.

Poprawa właściwości mechanicznych osiągnięta dzięki impregnacji silanowo-siloksanowej (lotexan) jest porównywalna z efektami uzyskanymi przy zastosowaniu ciekłego krzemianu potasu oraz estru kwasu krzemowego. Impregnacja zwiększyła wytrzymałość na ściskanie i zginanie mniej więcej dwukrotnie (ryc. 2). Wzrost wytrzymałości można wiązać ze zwiększoną twardością powierzchni. Grubość warstwy impregnacyjnej we wszystkich badanych wariantach wynosiła ok. 3 mm (ryc. 4).



Ryc. 3. Mrozoodporność badanych zapraw – liczba cykli zamrażania i rozmrażania do wystąpienia pierwszych zarysowań

Fig. 3. Frost resistance of tested mortars – number of cycles to the first crack

tion process after 9 cycles (Fig. 3, right). Specimen MH demonstrated improved frost resistance, with the first crack appearing after 7 cycles and complete destruction after 9 cycles.

The best performance was observed for samples impregnated with lotexane ML. In these specimens, the first crack appeared after 14 cycles, and complete disintegration into two parts occurred after 15 cycles (Fig. 3, ML).

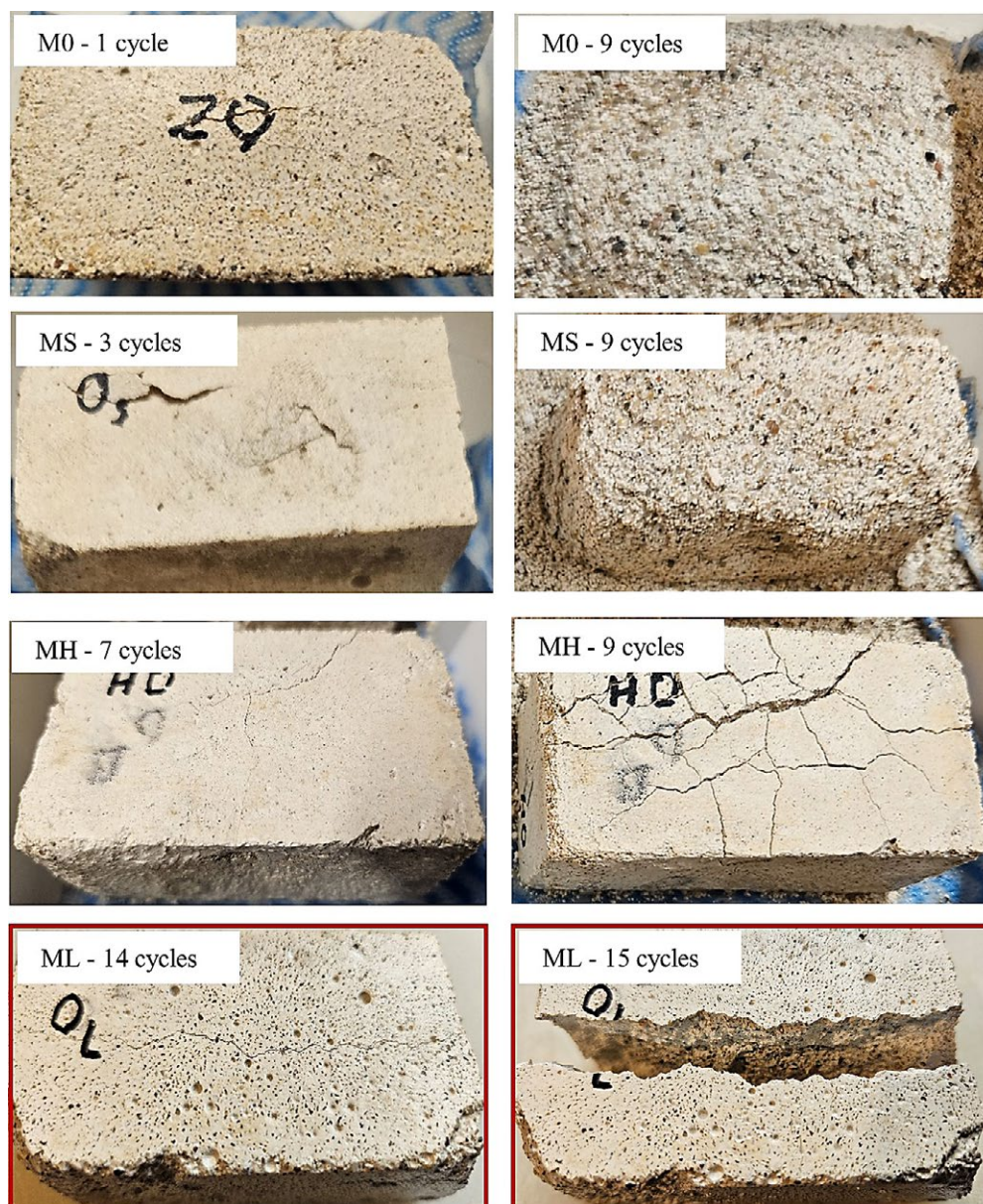
Figure 5 presents an ML specimen during the frost resistance test. Air bubbles appearing during water soaking indicate that the specimen retained diffusion properties. Similar phenomena were observed in specimens M0, MS, and MH.

Discussion

The conducted tests indicate a significant increase in the durability of lime mortars due to lotexane (Lotexan) surface impregnation.

The improvement in mechanical properties achieved using silane-siloxane (lotexane) impregnation is comparable to that obtained with liquid potassium silicate and silicic acid ester. Impregnation increased compressive and three-point bending strength by approximately two times (Fig. 2). This increase in strength may be correlated with increased surface hardness. The impregnated layer thickness was approximately 3 mm for all impregnation types (Fig. 4).

Lotexane impregnation effectively blocked water absorption in lime mortars. Previous studies [Krukowiecka-Brzęczek, Logoń 2025] showed that liquid potassium silicate and silicic acid ester also reduced water absorp-



Ryc. 4. Test mrozoodporności zapraw M0, MS, MH oraz ML: po lewej – pierwsze zarysowanie, po prawej – stan próbek w trakcie procesu destrukcji; fot. D. Logoń

Fig. 4. Frost resistance test – general appearance of the lime mortars M0, MS, MH and ML: left – first crack, right – destruction process; photo by D. Logoń

Impregnacja lotexanem skutecznie ograniczyła nasiąkliwość wodną zapraw wapiennych. Wcześniejsze badania [Krukowiecka-Brzęczek, Logoń 2025] wykazały, że ciekły krzemian potasu oraz ester kwasu krzemowego również zmniejszał absorpcję wody, jednak ich skuteczność była znacznie niższa w porównaniu z lotexanem (ryc. 1). Istotne jest również, że impregnacja lotexanem, podobnie jak pozostałe badane środki, nie ograniczała dyfuzyjności zapraw wapiennych.

Poprawa mrozoodporności (tab. 2; ryc. 3, 4) była ściśle skorelowana z ograniczeniem absorpcji wody. Impregnacja lotexanem zapewniła najwyższą mrozoodporność, zwiększając liczbę cykli do wystąpienia pierwszych uszkodzeń czternastokrotnie. Ciekły krzemian potasu oraz ester kwasu krzemowego zwiększyły mrozoodporność odpowiednio trzykrotnie i siedmiokrotnie.



Ryc. 5. Próbką ML podczas badania mrozoodporności – widoczne pęcherzyki powietrza podczas zalewania wodą; fot. D. Logoń

Fig. 5. Specimen ML during the frost resistance test: air bubbles during flooding with water; photo by D. Logoń

Mechanizm uszkodzeń mrozowych obserwowany w zaprawach impregnowanych lotexanem różnił się od mechanizmu występującego w pozostałych próbkach. Jak pokazano na rycinie 4, zniszczenie następowało bez tworzenia gęstej sieci spękań – pojedyncze pęknięcie prowadziło do rozdzielenia próbki. W pozostałych próbkach obserwowano bardziej rozległą sieć spękań. Ograniczona absorpcja wody oraz zwiększona mrozoodporność sprzyjały erozji powierzchni, a nie rozwojem sieci pęknięć, co zaobserwowano w próbce ML.

Na świecie badano liczne metody poprawy trwałości historycznych zapraw wapiennych [Padovnik et al. 2020; Rousset et al. 2005; Forster 2010], przy czym impregnacja powierzchniowa należy do najprostszych. W pracach konserwatorskich kluczowe jest minimalizowanie ingerencji w materiał oryginalny przy jednoczesnym uzyskaniu mierzalnej poprawy właściwości fizycznych i chemicznych. Chociaż impregnacja lotexanem jest droższa niż zastosowanie ciekłego krzemianu potasu lub estru kwasu krzemowego, wykazuje znacznie większą skuteczność w poprawie odporności na wodę, mrozoodporności i twardości powierzchni. Nie stwierdzono istotnego wpływu impregnacji na zmianę koloru powierzchni próbki; zaobserwowano jedynie nieznaczne jej rozjaśnienie (ryc. 5).

Uzyskane wyniki potwierdzają, że powierzchniowa impregnacja może stanowić skuteczną, a niekiedy jedyną możliwą metodę zwiększenia trwałości tradycyjnych i historycznych kruchych zapraw wapiennych.

Wnioski

Wyniki badań wykazują możliwość istotnego zwiększenia trwałości tradycyjnych i historycznych zapraw wapiennych poprzez impregnację powierzchniową lotexanem (silanem–siloksanem).

Impregnacja lotexanem niemal całkowicie ograniczyła absorpcję wody, co przełożyło się na czternastokrotny wzrost mrozoodporności przy zachowaniu dyfuzyjności zaprawy.

Impregnacja powierzchniowa spowodowała około dwukrotny wzrost wytrzymałości na ściskanie i zginanie tradycyjnych zapraw wapiennych, wynikający z utwardzenia powierzchni.

Nie zaobserwowano istotnego wpływu impregnacji na kolor próbek – stwierdzono jedynie nieznaczne rozjaśnienie powierzchni.

W porównaniu z ciekłym krzemianem potasu i estrum kwasu krzemowego lotexan znacząco poprawił właściwości fizyczne zapraw, takie jak nasiąkliwość wodna, mrozoodporność oraz odporność na erozję powierzchni, przy jednoczesnym porównywalnym wzroście wytrzymałości mechanicznej.

Podziękowania

Autor składa podziękowania firmie KEIM za dostarczenie preparatu impregnującego Keim Lotexan (impregnat silanowo-siloksanowy).

tion; however, they were significantly less effective than lotexane (Fig. 1). Importantly, lotexane impregnation, like the other agents, did not eliminate lime mortar diffusivity.

The improvement in frost resistance (Table 2, Fig. 3 and 5) correlated strongly with reduced water absorption. Lotexane impregnation resulted in the highest frost resistance, with a fourteen-fold increase. Liquid potassium silicate and silicic acid ester increased frost resistance by factors of 3 and 7, respectively.

The frost damage mechanism observed in lotexane-impregnated mortars differed from that in other samples. As shown in Fig. 3, destruction occurred without forming a dense crack network; instead, a single fracture divided the specimen. In contrast, other samples exhibited a more extensive crack network. Reduced water absorption and increased frost resistance resulted in surface erosion rather than crack network development, as observed for the ML sample.

Numerous approaches to improving the strength of historical lime mortars have been explored worldwide, with surface impregnation among the simplest methods. In conservation works, it is crucial to minimize interference with original materials while achieving measurable improvements in physical and mechanical properties. Although lotexane impregnation is more expensive than liquid potassium silicate and silicic acid ester, it is significantly more effective in improving water resistance, frost resistance, and surface hardness. Impregnation did not significantly affect sample color. The slight surface lightening can be observed (Fig. 5).

Surface impregnation was confirmed as the only viable method for increasing the durability of traditional and historical brittle lime mortars.

Conclusions

The results show the potential to significantly improve the durability of traditional and historical lime mortars through surface impregnation with lotexane (silane-siloxane).

Lotexane impregnation almost completely blocked water absorption, increasing frost resistance fourteen-fold while maintaining mortar diffusivity.

Surface impregnation approximately doubled the compressive and bending strength of traditional lime mortars by hardening the surface.

Impregnation did not significantly affect sample color. A slight surface lightening can be observed.

Compared to liquid potassium silicate and silicic acid ester, lotexane significantly improved physical properties such as water absorption, frost resistance, and surface erosion resistance, while providing a similar increase in mechanical properties.

Acknowledgements

The author would like to thank KEIM for supplying the Lotexan (lotexane: silane/siloxane) impregnating agent.

Bibliografia / References

- Caprai Veronica, Lazaro Alberto, Brouwers H.J.H., *Waterglass impregnation of municipal solid waste incineration bottom ash applied as sand replacement in mortars*, „Waste Management” 2019, t. 86.
- Chen J.J., Zampini Davide, Walliser A., *High-pressure epoxy-impregnated cementitious materials for microstructure characterization*, „Cement and Concrete Research” 2002, t. 32, nr 1.
- Chiari Giacomo, Torraca Giorgio, Santarelli Maria L., *Recommendations for systematic instrumental analysis of ancient mortars: The Italian experience*, [w:] *Standards for Preservation and Rehabilitation*, red. Stephen J. Kelley, West Conshohocken 1996.
- Forster Alan, *Building conservation philosophy for masonry repair. Part 2*, „Structural Survey” 2010, t. 28, nr 3.
- Hughes John J., *RILEM TC 203-RHM Repair mortars for historic masonry. The role of mortar in masonry: An introduction to requirements for the design of repair mortars*, „Materials and Structures” 2012, t. 45, nr 9.
- Hughes John J., Callebaut Kristof, *Practical sampling of historic mortars*, [w:] *RILEM International Workshop: Historic Mortars – Characteristics and Tests*, red. Peter Bartos, Caspar Groot, John J. Hughes, Paisley 1999.
- Hughes John J., Groot Caspar, Van Balen Koenraad, Elsen Jan, *RILEM TC 203-RHM: Repair mortars for historic masonry. The role of mortar in masonry: An introduction to requirements for the design of repair mortars*, „Materials and Structures” 2012, t. 45.
- Jasieńko Jerzy, Logoń Dominik, Misztal Witold, *Trass-lime reinforced mortars in strengthening and reconstruction of historical masonry walls*, „Construction and Building Materials” 2016, t. 102, cz. 1.
- Kang Sung-Hoon, Lee Sang-Ok, Hong Sung-Gul, Kwon Yang-Hee, *Historical and scientific investigations into the use of hydraulic lime in Korea and preventive conservation of historic masonry structures*, „Sustainability” 2019, t. 11.
- Krukowiecka-Brzęczek Anna, Logoń Dominik, *The improvement of the durability and frost resistance of traditional and historical lime mortars by means of surface impregnation with liquid potassium silicate and silicic acid ester*, „International Journal of Conservation Science” 2025, t. 16.
- Laycock Elizabeth A., Pirrie Duncan, Clegg Francis, Bell Anthony M.T., Bidwell Paul, *An investigation to establish the source of the Roman lime mortars used in Walsend, UK*, „Construction and Building Materials” 2019, t. 196.
- Logoń Dominik, Kobaka Janusz, Domski Jacek, *Modifying water-frost resistance and mechanical properties of lime mortar using siliceous and fluidised bed fly combusted ashes activated with cement*, „Materials” 2023, t. 16, nr 8, art. 3013.
- Maravelaki-Kalaitzaki Pagona, *Hydraulic lime mortars with siloxane for waterproofing historic masonry*, „Cement and Concrete Research” 2007, t. 37.
- Padovnik Andreja, Bokan-Bosiljkov Violeta, *Effect of ultralight filler on the properties of hydrated lime injection grout for the consolidation of detached historic decorative plasters*, „Materials” 2020, t. 13, art. 3360.
- Padovnik Andreja, Piqué Francesca, Jornet Albert, Bokan-Bosiljkov Violeta, *Injection grouts for the re-attachment of architectural surfaces with historic value – measures to improve the properties of hydrated lime grouts in Slovenia*, „International Journal of Architectural Heritage” 2016, t. 10.
- Palomar Irene, Barluenga Gonzalo, *A multiscale model for pervious lime-cement mortar with perlite and cellulose fibers*, „Construction and Building Materials” 2018, t. 160.
- Pasian Chiara, Secco Michele, Piqué Francesca, Artioli Gilberto, Rickerby Stephen, Cather Sharon, *Lime-based injection grouts with reduced water content: An assessment of the effects of the water-reducing agents ovalbumin and ethanol on the mineralogical evolution and properties of grouts*, „Journal of Cultural Heritage” 2018, t. 30.
- Rousset Bénédicte, Gentile Stéfania, James Julian, Pozzi Barbara, *Injection grouts for molasse sandstones: Preliminary assessments*, [w:] *Proceedings of the RILEM Workshop Repair Mortars for Historic Masonry*, Delft 2005.
- Sepulcre-Aguilar Alberto, Hernández-Olivares Francisco, *Assessment of phase formation in lime-based mortars with added metakaolin, Portland cement and sepiolite, for grouting of historic masonry*, „Cement and Concrete Research” 2010, t. 40.
- Silva Bruna, Guerreiro Elsa, Duarte António P.C., *Comparative study of lime-based mortars for conservation and restoration interventions*, „Construction and Building Materials” 2025, t. 499, art. 143956.
- Silva Bruna, Pinto Ana P.F., Gomes Augusto, Candeias António, *Effect of air-entraining and water-repellent admixtures and of their dosage on the performance of lime mortars*, „International Journal of Architectural Heritage” 2022, t. 16, nr 4.
- Zawawi Rashid, Banfill Peter F.G., *Effect of burning conditions on properties of artificial hydraulic lime mortar obtained from limestone and siliceous waste materials*, „Advances in Applied Ceramics” 2006, t. 105, nr 4.

Streszczenie

Przedmiotem badań było zwiększenie trwałości zapraw wapiennych poprzez powierzchniową impregnację mieszaniną silanowo-siloksanową. Uzyskane wyniki wskazują, że impregnacja powierzchniowa związkami silanowo-siloksanowymi (lotexan) jest bardzo skuteczną metodą poprawy właściwości fizycznych i mechanicznych wbudowanych zapraw wapiennych. Badania mrozoodporności ujawniły odmienny mechanizm zniszczeń, charakteryzujący się mniej rozległą siecią spękań. Potwierdzono również, że zastosowanie impregnacji nie zmienia koloru zaprawy, powodując jedynie nieznaczne rozjaśnienie powierzchni. Wyniki badań wykazały, że impregnacja lotexanem zwiększa wytrzymałość mechaniczną zapraw około dwukrotnie, jednocześnie znacząco poprawiając odporność na absorpcję wody i uszkodzenia spowodowane mrozem. Otrzymane wyniki porównano z wcześniejszymi badaniami zapraw impregnowanych ciekłym krzemianem potasu oraz estrem kwasu krzemowego. Choć koszt lotexanu może ograniczać jego wykorzystanie w porównaniu z ciekłym krzemianem potasu, potwierdzono, że impregnacja powierzchniowa często pozostaje jedyną możliwą metodą poprawy trwałości tradycyjnych i historycznych kruchych zapraw wapiennych.

Abstract

This research focuses on improving the durability of lime mortars using mixed silane-siloxane surface impregnation. The results indicate that surface impregnation with silane-siloxane compounds (lotexane) is a highly effective method for enhancing the physical and mechanical properties of built-in lime mortars. Frost resistance tests revealed a distinct destruction mechanism characterized by a reduced crack network. Impregnation also did not alter mortar color, causing only slight surface lightening. The results demonstrate that lotexane impregnation approximately doubles mechanical strength while significantly improving resistance to water absorption and frost damage. The findings were compared with previous studies on mortars impregnated with liquid potassium silicate and silicic acid ester. Although the cost of lotexane may limit its use compared with liquid potassium silicate, the study confirmed that surface impregnation is often the only feasible way to improve the durability of traditional and historical brittle lime mortars.