

WPŁYW IMPREGNACJI ZWIĄZKAMI KRZEMOORGANICZNYMI PIASKOWCÓW STOSOWANYCH W PIONOWYCH OKŁADZINACH KAMIENNYCH NA ICH ODPORNOŚĆ WOBEC SIŁY WYRYWAJĄCEJ BOLEC KOTWY

THE EFFECT OF ORGANO-SILICIC IMPREGNATION OF VERTICAL FACING SLAB SANDSTONES ON THEIR RESISTANCE TO FORCES PULLING OUT CONSTRUCTION DOWELS

MAREK REMBIŚ¹

Abstrakt. Piaskowce są materiałem dość często stosowanym w elewacjach kamiennych wentylowanych. W takich rozwiązaniach konstrukcyjnych płyty okładzinowe są mocowane do muru za pomocą kotw zakończonych bolcami, wykonanych ze stali nierdzewnej. Ponieważ są one poddawane obciążeniom dynamicznym związanym z parciem i ssaniem wiatru, kamień, z którego są wykonane, powinien między innymi wykazywać odporność na siłę wyrywającą bolec kotwy. W piaskowcach wielkość tego parametru, określanego zgodnie z normą PN-EN 13364:2002, można zmienić poprzez impregnację odpowiednimi preparatami zwiększającymi ich zwięzłość. Taki zabieg przy użyciu związków krzemorganicznych przeprowadzono dla piaskowców pochodzących z 19 złóż z różnych obszarów Polski. Próbki nasycano poprzez zanurzenie w impregnie, a następnie sezonowano przez cztery tygodnie dla uzyskania pełnego efektu wzmocnienia. W dalszej kolejności określano odporność piaskowców wobec siły wyrywającej bolec kotwy.

Uzyskane wyniki wykazały, że wielkość obciążenia niszczącego przy otworze na kołek piaskowców po ich impregnacji ulega zmianom o zróżnicowanym nasileniu. Niemal we wszystkich przypadkach stwierdzono wzrost wielkości tego parametru. Jedynie w pojedynczych próbkach nie zaobserwowano efektu wzmocnienia wywołanego impregnacją. Wyniki badań wskazują na możliwość stosowania metody wzmocnienia strukturalnego kamienia budowlanego metodą impregnacji, rekomendując ją zwłaszcza dla piaskowców o dużej porowatości i niewielkiej zwięzłości.

Słowa kluczowe: płyty elewacyjne, odporność na wyrwanie bolca kotwy, impregnacja wzmacniająca, piaskowce.

Abstract. Sandstones are materials often used in ventilated stone façades. In such constructions, dowels are fixed to the wall. Their stainless steel bars join stone slabs. The slabs are exposed to dynamic load resulting from wind pressure effects, therefore the stone should possess, among others, resistance to the forces pulling out the bolts. This parameter is determined by the standard PN-EN 13364:2002 and its value may be increased by impregnating the stone with proper polymer preparations that change its strength. The sandstones collected from 19 deposits in Poland were subjected to strengthening with organo-silicic compounds. The samples were saturated by immersing in the impregnate, and seasoned for four weeks to reach the full effect. As the next step, the resistance of the samples to the force pulling out the bolts was determined.

The results indicate that the breaking load of the sandstones after impregnation measured at the dowel-bolt hole increased to a various degree. The effect of strengthening induced by impregnation has not been recorded only in a few samples. The tests point to the possibility of structural strengthening of building stones with polymers. The method may be recommended particularly for highly porous and weakly cohesive sandstones.

Key words: façade slabs, bolt resistance for pulling out, strengthening impregnation, sandstones.

¹ Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków;
e-mail: mrembis@geol.agh.edu.pl

WSTĘP

Współczesne technologie montowania okładzin kamiennych na elewacjach budynków często polegają na mocowaniu kamiennych płyt (najczęściej o grubości 3 cm) za pomocą specjalnych kotw, zakończonych bolcami, wykonanych ze stali nierdzewnej i osadzonych w murze. Pomiędzy płytami kamiennymi a ścianą konstrukcyjną (często ocieploną wełną mineralną) pozostawia się pustkę wentylacyjną, zwykle o szerokości 4 cm. Stąd też tego typu rozwiązanie określane jest jako „elewacja kamienna wentylowana”. Płyty kamienne, z uwagi na stosunkowo dużą gęstość objętościową skały, w istotnym stopniu wpływają na obciążenie statyczne całej ściany. Dodatkowo przenoszą obciążenia dynamiczne spowodowane parciem wiatru, na skutek nadciśnienia powietrza otaczającego, oraz ssaniem wiatru wywołanym jego podciśnieniem. Z uwagi na wymienione czynniki, w trakcie projektowania obiektu powinien być dokonany dobór odpowiedniego kamienia, zwłaszcza w zakresie jego odporności wobec siły wyrwijającej bolce kotwy oraz innych cech, np. wytrzymałości na zginanie. W niektórych przypadkach dla zapewnienia odpowiedniej trwałości okładziny zwiększa się grubość płyt, co wpływa jednak na

wzrost ciężaru elewacji i podraża koszty inwestycji. Innym rozwiązaniem, które można zastosować, jest impregnacja kamienia odpowiednimi preparatami zwiększającymi jego zwięzłość. Tego typu impregnaty, zwłaszcza związki krzemooorganiczne, są z powodzeniem stosowane w konserwacji zabytków do wzmacniania struktury kamienia, osłabionego przez procesy deterioracji (Zielecka, 2000). Dla zapewnienia skuteczności wykonania tych prac, istotne jest aby dobór impregnatu był dokonywany na podstawie znajomości skutków jego reakcji ze składnikami skały. Dlatego też ważne są wstępne badania laboratoryjne, które oceniają przydatność określonych impregnatów do poszczególnych typów skał. Tego typu badania stanowiące przedmiot niniejszego artykułu wykonano dla piaskowców, które są skałami powszechnie stosowanymi w budownictwie jako materiał okładzinowy. Ze względu na wykształcenie skały te często są stosunkowo mało odporne na działanie różnych czynników niszczących, co wyraża się powstawaniem pęknięć i ubytków na ich powierzchni. Dlatego też wymagają one zastosowania dodatkowych zabiegów, które zapewniłyby ich ochronę przed zmiennymi warunkami atmosferycznymi i technicznymi.

MATERIAŁ BADAWCZY I METODYKA BADAŃ

Do analizy wybrano piaskowce o odmiennym składzie mineralnym i porowatości, pochodzące z różnych obszarów Polski i dość powszechnie stosowane w budownictwie.

Do badań wytypowano następujące piaskowce:

- z niecki śródsudeckiej – piaskowce permskie ze złożeń Bieganów oraz kredowe (ciosowe) ze złożeń Długopole i Radków;
- z niecki północnosudeckiej – piaskowce kredowe (ciosowe) ze złożeń Rakowiczki, Żerkowice i Wartowice III;
- z mezozoicznego obrzeżenia Gór Świętokrzyskich – piaskowce triasowe: suchedniowskie (złoża Baranów i Kopulak) oraz tumlińskie (złoża Tumlin Gród); piaskowce dolnojurajskie: żarnowieckie (złoża Dąbie II i Sielec I), szydlowieckie (złoża Szydłowiec i Śmiłów II) oraz kunowskie (złożenie Nietulisko);
- z obszaru Karpat – piaskowce górnokredowe: godulskie (złoża Głębiec i Tokarzówka) i istebniańskie (złoża Sobolów i Czasław) oraz piaskowce oligoceńskie: krośnieńskie (złożenie Górka-Mucharz).

Z każdego złoża pobrano 42 próbki z trzech ławic reprezentujących różne fragmenty profilu. Impregnację piaskowców przeprowadzono przy użyciu stosowanych powszechnie w praktyce konserwatorskiej preparatów krzemooorganicznych do wzmacniania kamienia, o następujących nazwach handlowych: Sarsil OH-100, Sarsil OH-300, Sarsil OH-500 (Zakład Chemiczny „Silikony Polskie”), Asolin OH-30 (Schomburg Polska Sp. z o.o.), Funcosil-Steinfestiger 100,

Funcosil KSE 300 E, Funcosil KSE 500 E (Remmers Polska Sp. z o.o.). Każdy z wymienionych płynnych preparatów, w których substancją czynną są estry etylowe kwasu ortokrzemowego, wprowadzono w przestrzeń porową piaskowca poprzez jego stopniowe zalewanie, początkowo do 1/4 wysokości próbki. Po 15 minutach dolewano impregnat do połowy, a po kolejnych 15 minutach zwiększano poziom impregnatu do 3/4 wysokości próbki. Następnie próbki zalano całkowicie impregnatem (2 cm powyżej górnej powierzchni próbki) i pozostawiono na 1 godzinę. Dla otrzymania pełnego efektu wzmocnienia (Domasłowski, Łukasiewicz, 1988), próbki były sezonowane przez okres 4 tygodni w warunkach wilgotności względnej 75%, w temperaturze 20°C. Próbkę kontrolną stanowiły piaskowce niepoddane impregnacji. Dla wszystkich odmian piaskowców (próbki nieimpregnowane oraz poddane impregnacji poszczególnymi preparatami) określono wielkość obciążenia niszczącego przy otworze na kołek, według normy PN-EN 13364:2002. Badana wartość obciążenia dla skały jest średnią z pomiarów wykonanych dla 6 próbek o wymiarach 200 × 200 × 30 mm. W każdej próbce wywiercono cztery otwory o średnicy 10 mm, a następnie za pomocą zaprawy cementowej o wskaźniku W/C = 0,6 osadzono w nich kołki o średnicy 6 mm wykonane ze stali nierdzewnej. Próbkę umieszczono pomiędzy dwiema metalowymi płytami na długości 100 mm, a następnie do osi kołka przykładano obciążenie niszczące, zwiększając je z prędkością 50 N/s. Po zniszczeniu próbki

przedstawiono dla niej średnią wartość obciążenia niszczonego [N] podawaną zgodnie z normą, z dokładnością do 50 N. Zmienność odporności piaskowców wobec siły wyry-

wającej bolec odniesiono do ich porowatości oraz składników spoiwa opisanych we wcześniejszej publikacji (Rembiś, 2010).

WYNIKI BADAŃ

W **piaskowcach permskich** z kamieniołomu w Bieganiu wielkość obciążenia niszczonego przy otworze na kołek jest równa 850 N. Na skutek impregnacji Sarsilem OH-300 oraz OH-500 zwiększa się ona do 1300 N, a po zastosowaniu Funcosilu KSE 500 E do 1250 N (tab. 1). Najśłabszy efekt wzmocnienia uzyskano po użyciu Funcosilu KSE 300 E. Do wyrwania kołka w tym przypadku wymagana jest siła 900 N (tab. 1).

W **piaskowcach kredowych (ciosowych)** wielkość wymaganego obciążenia do wyrwania kołka wynosi od 750 N w piaskowcach z Radkowa do 1550 N w piaskowcach z Długopola (tab. 1). Można to wiązać z różną zawartością spoiwa oraz inną porowatością analizowanych skał (fig. 1). Jednocześnie w bardziej zwięzłych piaskowcach z Długopola, efekt impregnacji zaznaczył się względnie mniejszym (w zakresie od 3 do 32%) przyrostem odporności piaskowców

na przykładane obciążenie wyrywające kołek. Zdecydowanie większemu wzmocnieniu uległy pozostałe piaskowce, zwłaszcza z Radkowa, Wartowic III i Żerkowic, dla których obserwuje się wzrost obciążenia niezbędnego do zerwania kołka, wynoszący często powyżej 50% (tab. 1). Spośród zastosowanych impregnatów najlepszy efekt wzmocnienia we wszystkich piaskowcach uzyskano stosując Sarsil OH-300, Asolin OH-30, Funcosil KSE 500 E i Sarsil OH-500 (przyrost wielkości obciążenia wyrywającego o 23–81%). Użycie Funcosilu Steinfestiger 100 i Funcosilu KSE 300 E spowodowało natomiast wzrost tego parametru o 3–19% (tab. 1, fig. 2).

Piaskowce triasowe z obrzeżenia Gór Świętokrzyskich charakteryzują się nieznacznym zróżnicowaniem wielkości omawianego parametru, wynoszącej w piaskowcach suchedniowskich 700 i 850 N, a w piaskowcach tumlińskich –

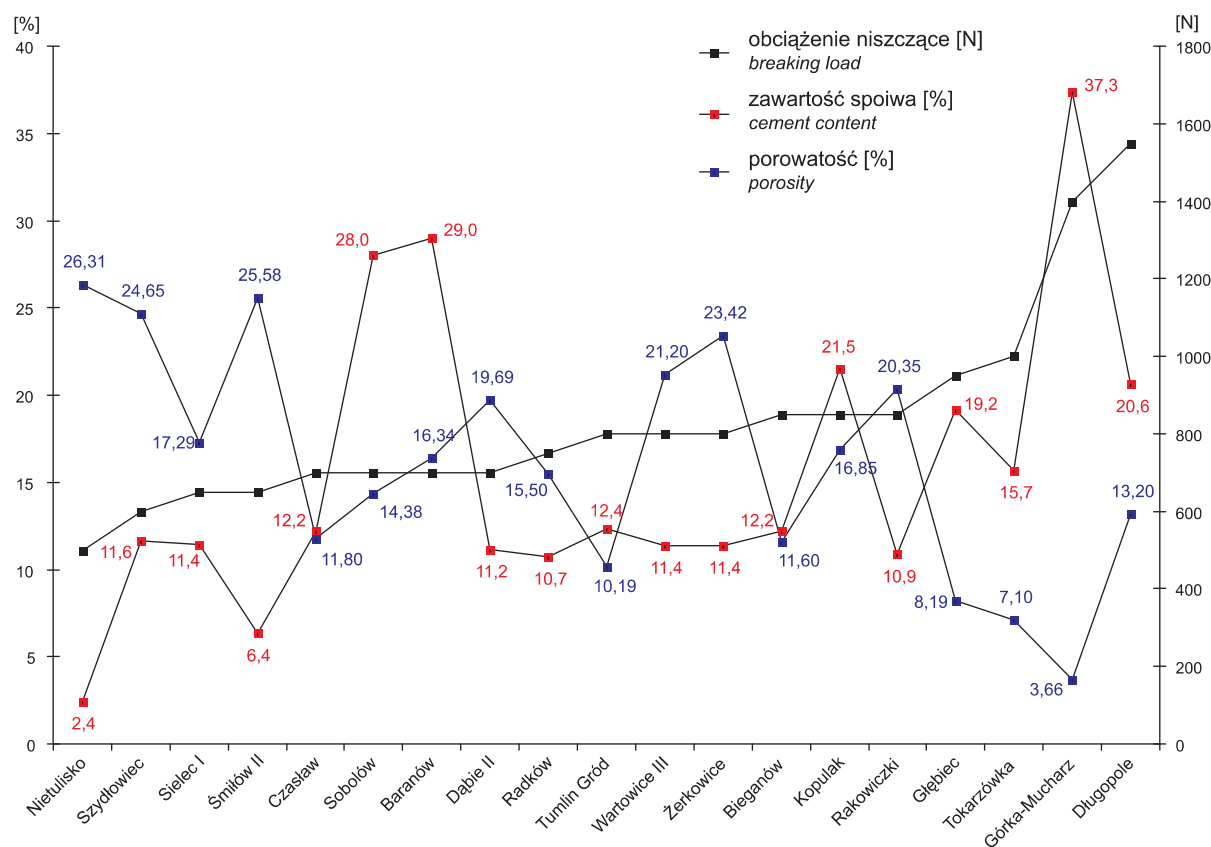


Fig. 1. Zmienność porowatości (oznaczonej porozymetrycznie), udziału spoiwa oraz wielkości obciążenia niszczonego przy otworze na kołek w piaskowcach niepoddanych impregnacji

Variation of the porosity (porosimetric determinations), cement content and breaking load value (measured at the dowel-bolt hole) of sandstones not subjected to impregnation with organo-silicic compounds

Tabela 1

**Zmienność wielkości obciążenia niszczonego przy otworze na kolek piaskowców
poddanych impregnacji związkami krzemorganicznymi**

Variability of the breaking load at dowel hole of sandstones impregnated with silico-organic compounds

Obszar występowania	Wiek	Nazwa złoża	Obciążenie niszczące przy otworze na kolek po zastosowaniu impregnatu																																			
			przed impregnacją						Funcosil KSR 300 E						Sarsil OH-300						Asolin OH-30						Funcosil KSE 500 E						Sarsil OH-500					
			Funcosil Steinfestiger 100		Sarsil OH-100		Funcosil KSR 300 E		Sarsil OH-300		Asolin OH-30		Funcosil KSE 500 E		Sarsil OH-500		Asolin OH-30		Funcosil KSE 500 E		Sarsil OH-500																	
A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C															
Niecka śródsudecka	perm dolny	Bieganów	850	950	112	950	112	900	106	1300	153	1050	124	1250	147	1300	153	1550	1600	103	1850	119	1650	106	2050	132	1900	123	1950	126	2000	129						
			750	850	113	1000	133	800	107	1350	180	1250	167	1200	160	1150	153	1150	1200	113	1000	133	800	107	1350	180	1250	167	1200	160	1150	153						
			800	850	106	1050	131	950	119	1350	169	1300	163	1300	163	1250	156	1250	1300	106	1050	131	950	119	1350	169	1300	163	1300	163	1250	156						
	Niecka północnosudecka	kreda górna	Rakowiczki	850	900	106	1100	129	1000	118	1350	159	1300	153	1250	147	1200	141	1200	1300	106	1100	129	1000	118	1350	159	1300	153	1250	147	1200	141					
				800	850	106	1000	125	950	119	1450	181	1400	175	1350	169	1250	156	1250	1350	106	1000	125	950	119	1450	181	1400	175	1350	169	1250	156					
				700	750	107	950	136	750	107	1300	186	1100	157	1200	171	1250	179	1250	1300	107	950	136	750	107	1300	186	1100	157	1200	171	1250	179					
Mezozoiczne obrzeżenie Gór Świętokrzyskich	trias dolny	Kopulak	850	900	106	950	112	900	106	1200	141	1150	135	950	112	1100	129	1100	1200	106	950	112	900	106	1200	141	1150	135	950	112	1100	129						
			800	800	100	900	113	850	106	1200	150	1100	138	1000	125	950	119	1000	1100	100	900	113	850	106	1200	150	1100	138	1000	125	950	119						
			700	750	107	1050	150	900	129	1250	179	1000	143	1100	157	1050	150	1100	1200	107	1050	150	900	129	1250	179	1000	143	1100	157	1050	150						
	jura dolna	Sielec I	650	700	108	850	131	800	123	1250	192	1050	162	1200	185	1250	192	1250	1350	108	850	131	800	123	1250	192	1050	162	1200	185	1250	192						
			600	650	108	900	150	700	117	1200	200	1150	192	1200	200	1150	192	1200	1300	600	650	108	900	150	700	117	1200	200	1150	192	1200	200	1150	192				
			650	700	108	900	138	750	115	1100	169	1000	154	950	146	1000	154	1000	1100	650	700	108	900	138	750	115	1100	169	1000	154	950	146	1000	154				
			500	550	110	650	130	600	120	950	190	800	160	850	170	900	180	900	1000	500	550	110	650	130	600	120	950	190	800	160	850	170	900	180				
	Karpaty	kreda górna	Głębiec	950	950	100	1000	105	950	100	1250	132	950	100	950	100	1050	111	1050	1100	950	950	100	1250	132	950	100	950	100	1050	111							
				1000	1000	100	1050	105	1050	105	1050	105	1350	135	1050	105	1050	110	1100	1200	1000	1000	100	1050	105	1050	105	1050	105	1050	110							
				700	750	107	900	129	850	121	1300	186	1250	179	1200	171	1250	179	1250	1300	700	750	107	900	129	850	121	1300	186	1250	179	1200	171	1250	179			
oligocen		Czasław	700	750	107	950	136	750	107	1250	179	1150	164	1100	157	1150	164	1100	1200	700	750	107	950	136	750	107	1250	179	1150	164	1100	157	1150	164				
			1400	1400	100	1450	104	1450	104	1750	125	1450	104	1400	100	1550	111	1550	1650	1400	1400	100	1450	104	1450	104	1750	125	1450	104	1400	100	1550	111				
			1400	1400	100	1450	104	1450	104	1750	125	1450	104	1400	100	1550	111	1550	1650	1400	1400	100	1450	104	1450	104	1750	125	1450	104	1400	100	1550	111				
			1400	1400	100	1450	104	1450	104	1750	125	1450	104	1400	100	1550	111	1550	1650	1400	1400	100	1450	104	1450	104	1750	125	1450	104	1400	100	1550	111				

A, B – obciążenie niszczące przy otworze na kolek (w N) (średnia z pomiarów wykonanych dla sześciu próbek); C – stosunek wielkości obciążenia niszczonego przy otworze na kolek po i przed impregnacją (B/A × 100) [%]

A, B – breaking load at dowel hole (in N) (average for six samples); C – the ratio (in %) of the breaking load at dowel hole values prior and after impregnation (B/A × 100) [%]

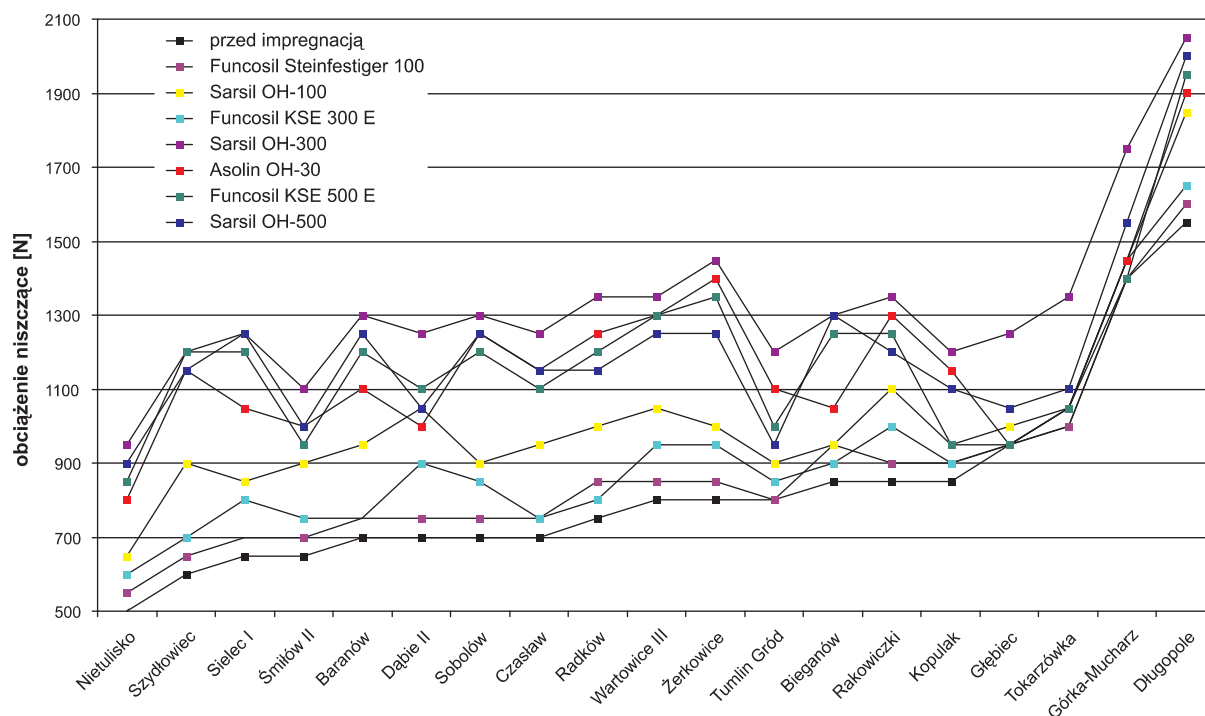


Fig. 2. Zmienność wielkości obciążenia niszczonego przy otworze na kołek w piaskowcach przed i po impregnacji związkami krzemooorganicznymi

Variation of the breaking load value (measured at the dowel-bolt hole) of sandstones prior and after impregnation with organo-silicic compounds

800 N (tab. 1). Impregnacja Sarsilem OH-300, Asolinem OH-30, Funcosilem KSE 500 E i Sarsilem OH-500, dość wyraźnie zwiększyła zwięzłość piaskowców, sprawiając, że obciążenie wymagane do wyrwania kołka wzrosło o 12–86% i maksymalnie wynosiło 1300 N dla piaskowców z Baranowa (tab. 1, fig. 2). Najmniejszy efekt wzmocnienia (wzrost obciążenia nieprzekraczający zwykle kilkunastu procent) odnotowano po zastosowaniu Funcosilu KSE 300 E, Sarsilu OH 100 i Funcosilu Steinfestiger 100. Jedynie w piaskowcach z Tumlina Grodu użycie ostatniego z wymienionych preparatów nie spowodowało żadnej zmiany wielkości omawianego parametru.

Piaskowce dolnojurajskie z obrzeżenia Gór Świętokrzyskich cechowały się najmniejszymi wartościami obciążenia niezbędnego do wyrwania kołka, co można łączyć z wysoką ich porowatością i słabą zwięzłością, warunkowaną nieznaczną ilością spoiwa (fig. 1). Oznaczone wielkości obciążeń mieściły się w zakresie od 500 N dla piaskowców z Nietuliska do 700 N dla piaskowców ze złoża Dąbie II (tab. 1). Impregnacja piaskowców Sarsilem OH-300, Asolinem OH-30, Funcosilem KSE 500 E i Sarsilem OH-500, spowodowała wzrost wielkości tego parametru o 43–100%. Zastosowanie Sarsilu OH-100 zwiększyło wymagane ob-

ciążenie o 30–50%, natomiast Funcosilu Steinfestiger tylko o 7–10% (tab. 1, fig. 2).

Spośród karpaccich **piaskowców górno-kredowych i oligoceńskich** najmniejszymi wartościami obciążenia wymaganego do zerwania kołka (700 N) charakteryzowały się piaskowce istebniańskie ze złoża Sobolów i Czaślów. Zastosowanie Sarsilu OH-300, Asolinu OH-30, Funcosilu KSE 500 E i Sarsilu OH-500 zwiększyło odporność piaskowców na siły obciążające, które musiały wzrosnąć o 57–86%, aby doprowadzić do wyrwania kołka. Użycie mniej skondensowanych impregnatów, spowodowało wzrost niezbędnego obciążenia jedynie o 7–21% (tab. 1). W pozostałych, bardziej zwięzłych piaskowcach, wielkość obciążenia wyrwującego kołek wynosiła 950 i 1000 N (piaskowce godulskie) oraz 1400 N (piaskowce krośnieńskie ze złoża Górka-Mucharz) (tab. 1). Wyraźny efekt wzmocnienia w tych piaskowcach stwierdzono jedynie po zastosowaniu Sarsilu OH-300 (fig. 2). W tym przypadku obciążenie niezbędne do zerwania kołka wzrosło o 25–35% (tab. 1). Po zastosowaniu pozostałych impregnatów wielkość ta wynosiła najwyżej 11%, albo stwierdzono żadnego efektu wzmocnienia, co spowodowało, że do wyrwania kołka było wystarczające przyłożenie takiego samego obciążenia, jak przed impregnacją (tab. 1).

PODSUMOWANIE

Badania wykazały, że piaskowce charakteryzujące się zmienną odpornością na obciążenie niszczące przy otworze na kołek po nasyceniu związkami krzemoorganicznymi w większości przypadków wykazują wzrost wartości tego parametru. Szczególnie wyraźnie (tab. 1, fig. 2) zaznacza się on w porowatych piaskowcach dolnojurajskich i kredowych (ciosowych), zwykle o dużych, połączonych porach, co umożliwia wprowadzenie większej ilości impregnatu. Słaby efekt wzmocnienia uzyskany w niektórych piaskowcach, lub jego brak (tab. 1, fig. 2), należy wiązać z trudnością wnikiwania skondensowanych impregnatów (Funcosil KSE 300 E, Asolin OH-30 i Funcosil KSE 500 E) w przestrzeń porową, zdominowaną przez pory o małych rozmiarach i licznych

przewężeniach. W niektórych przypadkach wynika on także z niewielkiej zdolności impregnatów (np. Funcosilu Steinfe-stiger 100 i Sarsilu OH-100) o małym stężeniu substancji czynnej (tetraetoksyilanu) do utworzenia żelu łączącego składniki mineralne piaskowców. Pomimo tych zastrzeżeń należy stwierdzić, że przedstawiona metoda strukturalnego wzmocnienia kamienia budowlanego może być z powodzeniem stosowana, zwłaszcza w piaskowcach o dużej porowatości i słabej zwięzłości.

Pracę zrealizowano w Katedrze Geologii Złóżowej i Górniczej, Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH, finansowano ją ze środków na naukę w latach 2007–2009, jako projekt badawczy nr N525 031 32/2907.

LITERATURA

- DOMASŁOWSKI W., ŁUKASZEWICZ J.W., 1988 — Possibilities of silica application in consolidation of stone monuments. VI International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Toruń: 563–576.
- PN-EN 13364:2002 — Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie obciążenia niszczącego przy otworze na kołek. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
- REMBIŚ M., 2010 — Piaskowce modyfikowane związkami krzemoorganicznymi oraz zmiany ich porowatości i wytrzymałości na zginanie pod działaniem siły skupionej. *Kwart. AGH, Geologia*, **1**. (w druku)
- ZIELECKA M., 2000 — Środki hydrofobizujące i wzmocniające. *Renowacje*, **2**: 70–73.