

## BADANIA ULTRADŹWIĘKOWE W OCENIE DETERIORACJI SKAŁ

### Ultrasonic assessment of stonework elements deterioration

Joanna PINIŃSKA<sup>1</sup>, Alicja BOBROWSKA<sup>1</sup> & Cagatay PAMUKCU<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Uniwersytet Warszawski, Wydział Geologii;  
al. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa;  
e-mail: joanna.pininska@uw.edu.pl, a.bobrowska@uw.edu.pl

<sup>2</sup>Politechnika w Izmirze, Wydział Inżynierii Górniczej,  
35-100 Bornova – Izmir, Turcja;  
e-mail: cagatay.pamukcu@deu.edu.tr

**Abstract:** In an ageing process of stonework elements their strength and decoration value are changing. Ultrasonic method of nondestructive testing is especially applicable in determining the state of the art of rock deterioration and in forecasting and controlling further stages of changes. Tested were, alike, fresh rock samples and samples of deteriorated stoneworks from various locations, subjected to artificial ageing by cyclic freezing, saturating with salt solutions leading to fast drying and crystallizing of salts, and increasing of rock temperature. The poster shows results of comparable researches of ageing travertines from the Raciszyn quarry in Poland and from two locations in Hierapolis, Turkey.

**Key words:** travertine, geomechanical properties, deterioration

**Słowa kluczowe:** trawertyn, właściwości geomechaniczne, deterioracja

W kamiennych obiektach architektonicznych pod wpływem zachodzących procesów deterioracji, wraz z postępowaniem czasu ulega zmianie ich wytrzymałość oraz walory dekoracyjne – następuje tzw. proces starzenia. Modelowane w warunkach laboratoryjnych procesy starzenia mają na celu ustalenie ich mechanizmów, zachodzących tak pod wpływem naturalnych, geologicznych procesów wietrzenia jak i antropogenicznych wpływów środowiska np. zanieczyszczenia atmosfery, zmiany zasolenia wód lub kwaśnych deszczów.

Do prognozowania jakościowych i ilościowych przemian strukturalnych materiału kamiennego w procesie starzenia z dużym powodzeniem dają się stosować badania ultradźwiękowe, ze względu na nieniszczący charakter badań i nieograniczoną powtarzalność.

Praca przedstawia badania procesu starzenia się trawertynów z kamieniołomu Raciszyn (Polska) oraz trawertynów z Hierapolis (Turcja) z zastosowaniem tej metody (Fig. 1, 2).



**Fig. 1.** Kamieniołom w Raciszynie (Polska)

**Fig. 1.** Quarry in Raciszyn (Poland)



**Fig. 2.** Kamieniołom w Hierapolis (Turcja)

**Fig. 2.** Quarry in Hierapolis (Turkey)

Skąły te, powszechnie występujące na terenie Turcji, wykorzystywane są jako materiał dekoracyjny i konstrukcyjny obiektów współczesnych i zabytkowych. Również polski trawertyn, ze względu na wysokie walory dekoracyjne w fakturze wypolerowanej, znalazł szerokie zastosowanie jako okładzina w ekspozycjach wewnętrznych i zewnętrznych (Fig. 3, 4, 5A i 5B).



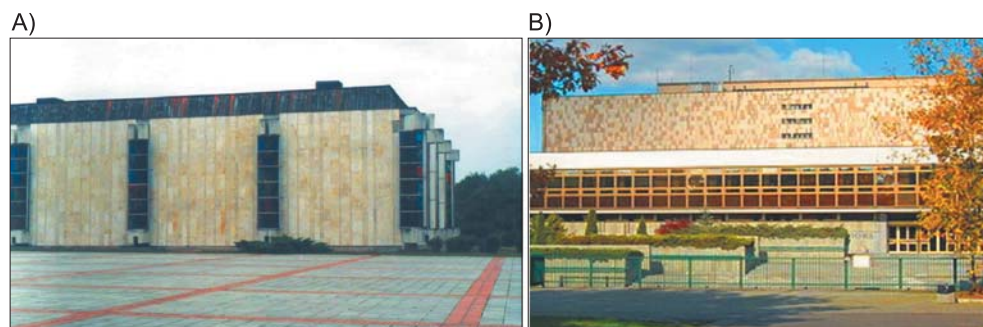
**Fig. 3.** Antyczne grobowce wykonane z trawertynu w rejonie Hierapolis (Turcja)

**Fig. 3.** Antique tombs made of travertine in the region of Hierapolis (Turkey)



**Fig. 4.** Współczesne wykorzystanie trawertynu do renowacji zabytkowych obiektów inżynierskich – most Belkis (Turcja)

**Fig. 4.** Contemporary use of travertine for renovation of engineering monuments – bridge Belkis (Turkey)



**Fig. 5.** Elewacje z okładzin trawertynowych we współczesnych obiektach w Polsce: A) Muzeum Początków Państwa Polskiego w Gnieźnie; B) Biblioteka Narodowa w Warszawie

**Fig. 5.** Travertine cladding elevations of the buildings in today's Poland: A) Museum of the Origins of the Polish State in Gniezno; B) The National Library of Warsaw

Badania procesów starzenia się materiałów kamiennych i stopnia ich degradacji muszą uwzględniać wpływ czasu jako ważny aspekt deterioracji. Na podstawie modelowania zmian cech materiału w warunkach laboratoryjnych, możliwe jest określenie podatności i wrażliwości skały na wybrane czynniki niszczące.

Badania starzenia się trawertynów przeprowadzono na próbkach świeżego trawertynu z Raciszyna i Hierapolis oraz na próbkach materiału zwietrzałego z antycznego kamieniołomu w Hierapolis. Znormalizowane i przystosowane do badań wytrzymałościowych próbki skalne badano w warunkach laboratoryjnych przy zastosowaniu metody przejścia, fal o dużej częstotliwości – rzędu 2÷3 MHz, dla zapewnienia nieograniczoności ośrodka. Próbkę trawertynu z Hierapolis i Raciszyna, poddane zostały cyklicznym badaniom, określającym ich odporność na działanie niskich temperatur, wpływ krystalizującej soli i podwyższonej temperatury. Brano pod uwagę lokalizację obiektu, elementy środowiska oraz odmienność klimatu umiarkowanego Polski od śródziemnomorskiego Turcji.

Wpływ mechanicznego działania wody i zamrozu w regionie klimatycznym umiarkowanym uznano za charakterystyczne dla warunków w Polsce, z racji że przymrozki mogą występować przez okres prawie pół roku (koniec września – początek czerwca). Natomiast wpływ podwyższonych temperatur jest charakterystyczny dla klimatu śródziemnomorskiego Turcji. Wpływ krystalizacji soli jest zjawiskiem bardziej uniwersalnym, gdyż łączy oddziaływanie wody opadowej, temperatury oraz zanieczyszczeń powietrza, a może być również efektem działania organizmów żywych.

Jako tło wpływu tych czynników na starzenie badanych skał przyjęto własności fizyczne i wytrzymałościowe materiału świeżego z kamieniołomów, szczególnie porowatość, szczelność oraz nasiąkliwość objętościową i wagową oraz wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie (Tab. 1).

**Tabela (Table) 1**

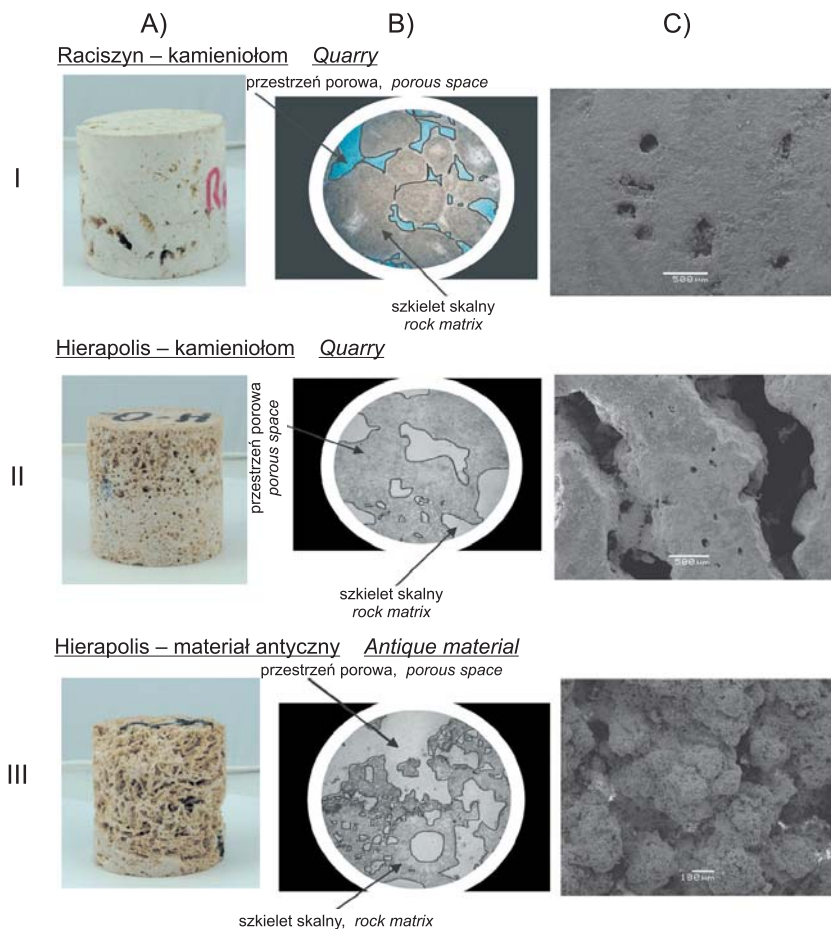
Właściwości fizyczne i wytrzymałościowe badanych skał

*Physical and strength properties of tested rocks*

Materiał skalny <i>Rock material</i>	Gęstość pozorna <i>Density</i>	Porowatość <i>Porosity</i>	Szczelność <i>Leakproofness</i>	Nasiąkliwość objętościowa <i>Absorption</i>	Wytrzymałość na ściskanie <i>Compression strength</i>
	[g/cm <sup>3</sup> ]	<i>P</i> [%]	<i>S</i> [%]	<i>n</i> [%]	<i>R<sub>co</sub></i> [MPa]
	min.-maks. (śr.) <i>min-max</i> ( <i>average</i> )	min.-maks. (śr.) <i>min-max</i> ( <i>average</i> )	min.-maks. (śr.) <i>min-max</i> ( <i>average</i> )	min.-maks. (śr.) <i>min-max</i> ( <i>average</i> )	min.-maks. (śr.) <i>min-max</i> ( <i>average</i> )
RA Raciszyn – kamieniołom <i>RA Raciszyn – quarry</i>	2.20÷2.38 (2.30)	2.19÷17.59 (9.89)	79.00÷88.91 (83.95)	2.78÷10.21 (6.51)	37.6÷65.48 (44.11)
HO Hierapolis – kamieniołom <i>HO Hierapolis – quarry</i>	1.32÷2.14 (1.79)	14.48÷37.40 (23.70)	55.95÷87.38 (71.60)	8.33÷13.42 (10.63)	9.49÷17.52 (12.70)
HA Hierapolis – materiał antyczny <i>HA Hierapolis – antique material</i>	1.34÷1.93 (1.57)	12.90÷39.40 (29.00)	60.59÷87.09 (74.30)	21.15÷30.17 (26.80)	4.09÷9.49 (6.79)



Badania makroskopowe próbek (Fig. 6A) płytek cienkich (Fig. 6B) oraz analizy skaningowe (Fig. 6C), wskazują że we wszystkich analizowanych próbkach trawertynów mamy do czynienia z materiałem wysokoporowatym. Przy czym porowatość trawertynów z Raciszyna jest prawie dwukrotnie niższa niż trawertynów z Hierapolis.



**Fig. 6.** Obraz makroskopowy, mikroskopowy i skaningowy struktury badanego materiału skalnego: (A) obraz makroskopowy próbki do badań wytrzymałościowych, (B) obraz mikroskopowy płytek cienkich, (C) obraz skaningowy, I – Raciszyn – materiał świeży, II – Hierapolis – materiał świeży, III – Hierapolis – materiał antyczny

**Fig. 6.** Macroscopic, microscopic and SEM view of the internal structure of rock material: (A) macroscopic view of sample prepared for strength tests, (B) microscopic view of thin section, (C) SEM image, I – Raciszyn – fresh material, II – Hierapolis – fresh material, III – Hierapolis – ancient material

Do analizy postępu starzenia zastosowano badania nieniszczące (ultradźwiękowe), prowadzone w kolejnych cyklach modelowania. We wszystkich przypadkach określono wartość początkową prędkości fali podłużnej ( $V_{po}$ ) w kierunku prostopadłym i równoległym do osi próbki (Tab. 2).

**Tabela (Table) 2**Zestawienie początkowej wartości prędkości fali podłużnej  $V_{po}$ *Sets of initial values of the longitudinal wave velocity  $V_{po}$* 

Materiał skalny <i>Rock material</i>	Prędkość fali podłużnej <i>Longitudinal wave velocity</i> $V_p \parallel$ [m/s]	Prędkość fali podłużnej <i>Longitudinal wave velocity</i> $V_p \perp$ [m/s]
	min.-maks. (śr.) <i>min-max (average)</i>	min.-maks. (śr.) <i>min-max (average)</i>
RA Raciszyn – kamieniołom <i>RA Raciszyn – quarry</i>	4700÷5603 (5151)	3925÷5105 (4050)
HO Hierapolis – kamieniołom <i>HO Hierapolis – quarry</i>	3102÷4876 (3953)	3192÷4594 (3951)
HA Hierapolis – materiał antyczny <i>HA Hierapolis – antique material</i>	1883÷3429 (2559)	1913÷3719 (2530)

Narastanie defektów struktury w warunkach cyklicznego zamrażania, cyklicznej krystalizacji soli oraz wpływu podwyższonej temperatury monitorowano poprzez rejestrację zmian prędkości propagacji fali podłużnej od  $V_{po}$  do  $V_{pn}$ . We wszystkich przypadkach prędkość fali rejestrowana w trakcie cykli starzenia stopniowo malała, co wskazuje na rozluźnienie struktury materiału (Fig. 7A, B, C).

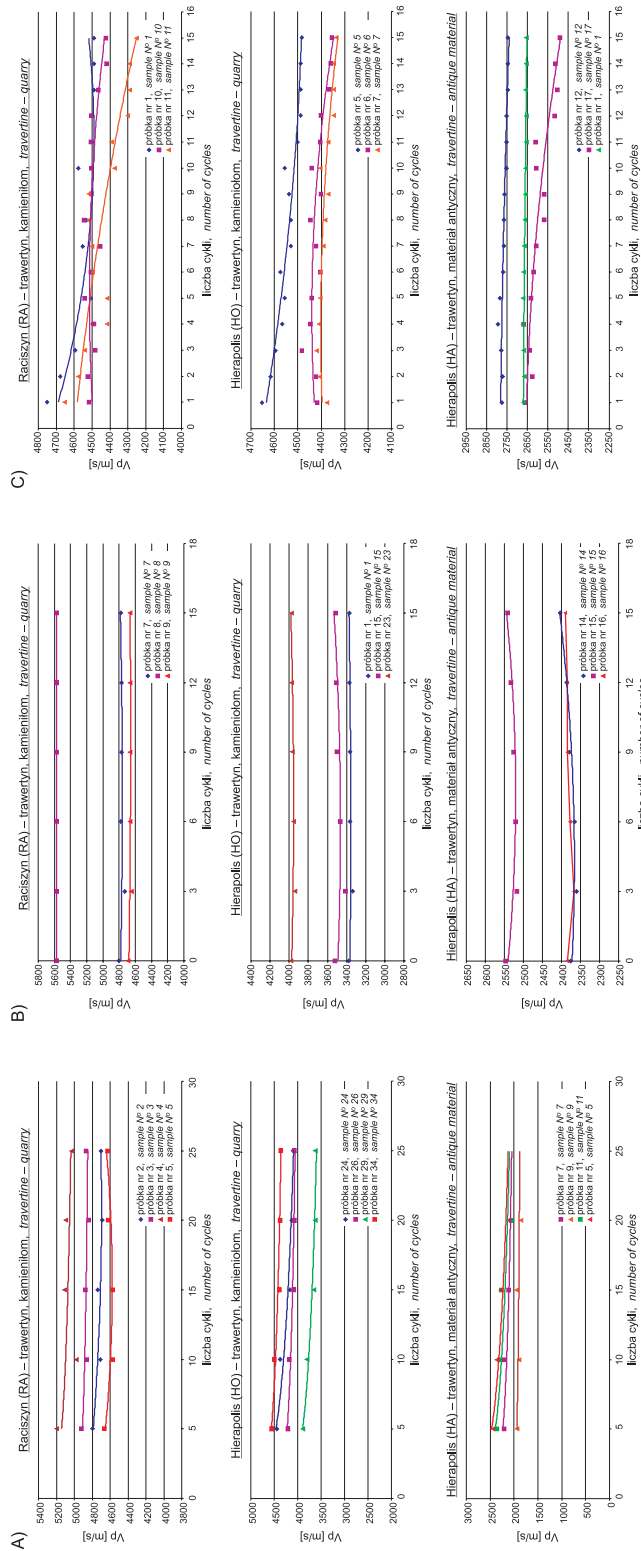
Zmiany wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie ( $R_c$ ) pod działaniem zamrozu, krystalizacji soli i podwyższonej temperatury przedstawia tabela 3 i figura 8.

**Tabela (Table) 3**

Wartości  $R_c$  w stanie naturalnym ( $R_{co}$ ) oraz po cyklicznych badaniach odpornościowych na czynniki degradujące: zamróż ( $R_{c \text{ mróz}}$ ), podwyższonej temperatury ( $R_{c \text{ sun}}$ ) i krystalizacja soli ( $R_{c \text{ sól}}$ )

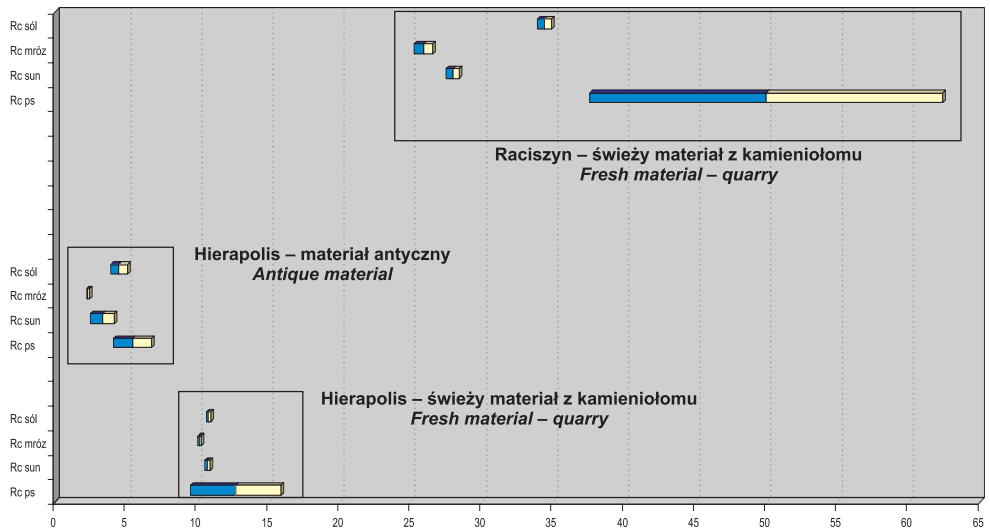
*The values of  $R_c$  in the natural state ( $R_{co}$ ) and after cyclic tests on resistance to degradation factors: freeze-thaw cycles ( $R_{c \text{ frost}}$ ), elevated temperature ( $R_{c \text{ sun}}$ ) and the crystallization of salt ( $R_{c \text{ salt}}$ )*

Materiał skalny <i>Rock material</i>	$R_{co}$ [MPa]	$R_{c \text{ mróz}}$ [MPa] <i>R<sub>c</sub> freeze-thaw</i> [MPa]	$R_{c \text{ sól}}$ [MPa] <i>R<sub>c</sub> salt</i> [MPa]	$R_{c \text{ słońce}}$ [MPa] <i>R<sub>c</sub> sun</i> [MPa]
	min.-maks. (śr.) <i>min-max</i> <i>(average)</i>	min.-maks. (śr.) <i>min-max</i> <i>(average)</i>	min.-maks. (śr.) <i>min-max</i> <i>(average)</i>	min.-maks. (śr.) <i>min-max</i> <i>(average)</i>
RA Raciszyn – kamieniołom <i>RA Raciszyn – quarry</i>	37.60÷65.48 (44.11)	25.25÷26.55 (25.9)	33.90÷34.97 (34.43)	27.50÷28.41 (27.95)
HO Hierapolis – kamieniołom <i>HO Hierapolis – quarry</i>	9.49÷17.52 (12.70)	10.000÷10.325 (10.16)	10.65÷10.95 (10.8)	10.5÷10.9 (10.7)
HA Hierapolis – mat. antyczny <i>HA Hierapolis – antique mat.</i>	4.09÷9.49 (6.79)	2.20÷2.45 (2.32)	3.9÷5.1 (4.5)	2.500÷4.175 (3.33)



**Fig. 7.** Przebieg prędkości fali podłużnej  $V_p$  w badaniu odporności na działanie: A) niskich temperatur; B) krystalizacji soli; C) podwyższonych temperatur

**Fig. 7.** Course of the longitudinal wave velocity values  $V_p$  of tests on resistance to: A) low temperatures; B) crystallization of salt; C) elevated temperatures



**Fig. 8.** Przedziały zmienności  $R_c$  w stanie naturalnym oraz po cyklicznych badaniach odpornościowych na czynniki degradujące: zmróz, podwyższona temperatura i krystalizacja soli

**Fig. 8.**  $R_c$  variation ranges in the natural state and after cyclic tests on resistance to degradation factors: freeze-thaw, elevated temperature and the crystallization of salt

Z badań wynika, że trawertyny polskie z Raciszyna są materiałem o wyższej wytrzymałości i mniej podatne na działanie zamrozu, podwyższonej temperatury oraz krystalizację soli niż trawertyny z Hierapolis oraz potwierdzają, że stan osłabienia materiału antycznego w stosunku do materiału świeżego jest znacznie wyższy.

*Praca była prezentowana na VII Konferencji Naukowo-Technicznej pt. „Geofizyka w geologii, górnictwie i ochronie środowiska” organizowanej z okazji jubileuszu 90-lecia AGH na WGGiOŚ.*