

## Ocena jakości wybranych wapieni jurajskich stosowanych w budownictwie na podstawie pomiaru ich energii pęknięcia przy uderzeniu i mikrotwardości metodą Knoop

Marek Rembiś<sup>1</sup>



**The quality of selected Jurassic limestones utilized for building purposes as determined from their energy of rupture by impact and the Knoop microhardness.** Prz. Geol., 65: 1461–1470.

*Abstract.* The Jurassic limestones of Botticino Classico (Italy), Bilecik Beige (Turkey) and Morawica (Poland) are commonly used in the construction practice as facing and slab stones. Petrographic investigations revealed that the rocks are not homogenous in their inner development, and despite a similar age and a comparable genesis, differ also in their mechanical properties. The structural and textural rock features affect their resistance to the impact force measured as the rupture energy, according to the standard PN-EN 14158:2005. The varying structure and mineral composition of these limestones result in their different microhardness values measured with the Knoop method (PN-EN 14205:2004). The variability of the lithological parameters makes possible establishing the resistance of these rocks to some damaging factors of the mechanical character on a wider scale than applying other commonly used methods of the stone quality evaluation.

ing the resistance of these rocks to some damaging factors of the mechanical character on a wider scale than applying other commonly used methods of the stone quality evaluation.

**Keywords:** Jurassic limestones, Knoop microhardness, rupture energy, dimension stone

Kamień naturalny stosowany w wyrobach budowlanych, zgodnie z generalną zasadą wyrażoną w art. 4 Ustawy z dnia 16 kwietnia 2004 r. o wyrobach budowlanych (Dz.U. z 2004 r. Nr 92 poz. 881 z późn. zm.), powinien posiadać właściwości użytkowe umożliwiające prawidłowo zaprojektowanemu obiektowi budowlanemu spełnienie wymagań podstawowych. W Polsce, od momentu jej wstąpienia do Unii Europejskiej, istnieją tylko pojedyncze normy określające wartości progowe parametrów technicznych kamienia, uzasadniające jego stosowanie w określonych realizacjach budowlanych. W większości przypadków, dotychczasowe wymagania norm krajowych (PN-B), tzw. kwalifikacyjnych, zostały zastąpione normami europejskimi PN-EN, na podstawie których producent jedynie deklaruje wartości podanych w normie właściwości. Decyzję o tym, czy kamień o określonych parametrach technicznych może być zastosowany w projektowanym obiekcie budowlanym, podejmuje projektant, zwykle bazujący na swoim doświadczeniu, względnie odwołujący się do wymagań zawartych w normach PN-B. Oceny jakości kamienia stosowanego w wykładzinach pionowych, poziomych, w tym także w posadzkach i stopniach, dokonuje się najczęściej na podstawie badania jego wytrzymałości na ściskanie (PN-EN 1926:2007), wytrzymałości na zginanie pod działaniem siły skupionej (PN-EN 12372:2010) i przy stałym momencie (PN-EN 13161:2008), odporności na ścieranie (PN-EN 14157:2005), nasiąkliwości kapilarnej (PN-EN 1925:2001) i mrozoodporności (PN-EN 12371:2010). Znajomość wartości tych właściwości jest zazwyczaj wystarczająca do określenia trwałości wybranej skały, czyli jej odporności na różnego rodzaju zjawiska fizyczne i chemiczne, jakim będzie ona poddana w trakcie użytkowania obiektu. Wyniki wieloletnich obserwacji elementów kamiennych zastosowanych w budowlach i użytkowanych w różnorodnych warunkach (Wilczyńska-Michalik, Michalik, 1995; Bromowicz, Magiera, 2003; Płuska i in., 2005; Labus, 2008,

2009; Pinińska i in., 2010; Buciak, 2012) wskazują, że niejednokrotnie, mimo wykazywania przez skałę odpowiednio wysokiej wytrzymałości mechanicznej, dochodzi do selektywnej i nierównomiernej destrukcji jej składników. Powoduje ona nie tylko pogorszenie walorów dekoracyjnych elementu kamiennego, ale także obniżenie, niekiedy nawet gwałtowne, jego cech użytkowych i funkcjonalnych. Zjawisko to, zachodzące zwłaszcza w skałach o złożonej budowie wewnętrznej wyrażającej się silnym zróżnicowaniem składu mineralnego i/lub cech strukturalno-teksturalnych, jest niekiedy trudne do przewidzenia przy zastosowaniu wymienionych metod badawczych.

Dodatkowe możliwości w zakresie oceny jakości kamienia naturalnego, ułatwiającej podjęcie decyzji o jego zastosowaniu w obiekcie budowlanym, stwarzają badania stosunkowo rzadko ocenianych dwóch parametrów technicznych. Są to: energia pęknięcia przy uderzeniu, określona normą PN-EN 14158:2005 oraz mikrotwardość wg Knoopa oznaczana na podstawie normy PN-EN 14205:2004. Pierwszy z wymienionych parametrów określa odporność skały na rozprzestrzenianie się w niej spękań powstałych pod wpływem punktowego uderzenia i odpowiada energii pochłanianej przez skałę w czasie jej pęknięcia. Badanie mikrotwardości metodą Knoopa polega na pomiarze powierzchni rzutu wgłębienia powstałego wskutek statycznego wgniatania w skałę (z określonym obciążeniem) diamentowego wgłębniaka w kształcie ostrosłupa o podstawie rombu i kątach 172°30' i 130° między przeciwległymi ścianami równymi. Małe rozmiary powstałych wgłębień, wynoszące zwykle kilkadziesiąt mikrometrów, umożliwiają pomiary twardości nawet stosunkowo niewielkich składników skały. Znajomość wartości obu parametrów pozwala zatem na określenie zróżnicowania odporności mechanicznej poszczególnych składników budujących skałę oraz wskazanie obecności stref niejednorodności sprzyjających jej rozpadowi. Wykazanie takiego zróżnicowania, a zarazem

<sup>1</sup> AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. S. Staszica w Krakowie, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; mrembis@geol.agh.edu.pl.

**Tab. 1.** Wartości fizyczno-mechanicznych właściwości wapieni Botticino Classico i Bilecik Beige  
**Table 1.** Physical and mechanical properties of the Botticino Classico and Bilecik Beige limestones

Parametr <i>Parameter</i>	Jednostka <i>Unit</i>	Metoda badania parametru <i>Standard applied to determine the parameter</i>	Wartość parametru <i>Parameter values</i>	
			Botticino Classico <sup>1)</sup>	Bilecik Beige <sup>2)</sup>
Gęstość <i>Density</i>	Mg/m <sup>3</sup>	EN 1936:2001	2,71	2,67–2,74
Nasiąkliwość przy ciśnieniu atmosferycznym <i>Water absorption at atmospheric pressure</i>	%	EN 13755:2002	0,14	0,20–0,45
Wytrzymałość na ściskanie <i>Compression strength</i>	MPa	EN 1926:2000	183	102–113
Wytrzymałość na ściskanie po cyklach zamrażania i rozmrażania <i>Compression strength after alternated freezing-unfreezing cycles</i>	MPa	EN 1926:2000	164	113
Wytrzymałość na zginanie pod działaniem siły skupionej <i>Flexural strength under concentrated load</i>	MPa	EN 12372:2001	12,7	–
Wytrzymałość na zginanie pod działaniem siły skupionej po cyklach zamrażania i rozmrażania <i>Flexural strength under concentrated load after alternated freezing-unfreezing cycles</i>	MPa	EN 12372:2001	12,9	12,9
Odporność na ścieranie <i>Abrasion resistance</i>	mm	EN 14157:2004 (szeroka tarcza / wide disc)	20,0	–
	cm <sup>3</sup> /50 cm <sup>2</sup>	EN 14157:2004 (tarcza Böhme / Böhme disc)	–	12,2–16,8

Źródło danych / source of data: <sup>1)</sup> Applied Petrographic Laboratory of the Department of Earth Sciences, Università degli Studi, Parma (2005);  
<sup>2)</sup> Uz i in. (2003); Declaration of Conformity (2016)

**Tab. 2.** Wartości fizyczno-mechanicznych właściwości wapienia Morawica  
**Table 2.** Physical and mechanical properties of the Morawica limestone

Parametr <i>Parameter</i>	Jednostka <i>Unit</i>	Metoda badania parametru <i>Standard applied to determine the parameter</i>	Wartość parametru <i>Parameter values</i>
Gęstość pozorna <i>Apparent density</i>	Mg/m <sup>3</sup>	PN-B-04100:1966	2,48–2,56
Nasiąkliwość wagowa <i>Water absorption</i>	%	PN-B-04101:1985	1,90–2,70
Wytrzymałość na ściskanie jednoosiowe w stanie powietrzno-suchym <i>Unconfined compression strength in the air-dry state</i>	MPa	PN-B-04110:1984	88,0–131,0
Wytrzymałość na ściskanie jednoosiowe po nasyceniu wodą <i>Unconfined compression strength after saturating with water</i>	MPa	PN-B-04110:1984	58,0–84,0
Wytrzymałość na ściskanie jednoosiowe po 25 cyklach zamrażania <i>Unconfined compression strength after 25 freezing cycles</i>	MPa	PN-B-04110:1984	53,0–75,0
Ścieralność na tarczy Böhme <i>Abrasion using the Böhme disc</i>	mm	PN-B-04111:1984	7,0

Źródło danych / source of data – Pinińska, 1994

identyfikacja składników wykazujących największą podatność na czynniki niszczące o charakterze mechanicznym, we wzajemnie zbliżonych litologicznie skałach, było celem niniejszej pracy. Do jego realizacji posłużono się badaniami obu wspomnianych parametrów: energii pęknięcia przy uderzeniu i mikrotwardości wg Knoop, w trzech rodzajach wapieni, podobnych do siebie pod względem wieku oraz genezy, znanych pod komercyjnymi nazwami: Botticino Classico, Bilecik Beige i Morawica. Wartości fizyczno-mechanicznych właściwości wymienionych wapieni (tab. 1, 2), odniesione do zapisów normy PN-B-01080:1984, wskazują, że są to skały bardzo ciężkie i ciężkie, bardzo mało i mało nasiąkliwe, o średniej i dużej wytrzymałości na ściskanie oraz o średniej wytrzymałości na zginanie. Dzięki temu wapienie te, są od wielu lat powszechnie stosowane

w budownictwie, jako dekoracyjny materiał okładzinowy, a także jako materiał konstrukcyjny.

## METODYKA BADAŃ

Energii pęknięcia przy uderzeniu wapieni oznaczono zgodnie z wytycznymi zawartymi w normie PN-EN 14158:2005. Badania przeprowadzono na płytach kamiennych o wymiarach 20 × 20 × 3 cm i wypolerowanej górnej powierzchni, wysuszonych do stałej masy. Każdy rodzaj wapienia był reprezentowany przez pięć próbek, a z uzyskanych pięciu wartości wyliczono średnią arytmetyczną, stanowiącą końcowy wynik badania.

Mikrotwardość metodą Knoop oznaczono zgodnie z metodyką podaną w normie PN-EN 14205:2004, na mikro-

twardościomierzu Knoop/Vickersa (model HVKD-1000 IS). Z każdego rodzaju wapienia wycięto dwie płytki o grubości 20 mm i powierzchni 150 × 150 mm, a następnie wypolerowano ich górną powierzchnię. Pomiar prowadzono w punktach oddalonych od siebie o 4 mm, wzdłuż czterech linii pomiarowych o długości 40 mm. Dla każdej próbki wapienia wykonano 40 pomiarów, uzyskując łącznie 320 wyników. W każdym punkcie badawczym identyfikowano rodzaj składnika wapienia, a następnie wcisniono diamentowy wgłębnik w jego powierzchnię przez okres 10 sekund, z obciążeniem wynoszącym 0,98 N.

Dokonanie pełniejszej interpretacji wyników, uzyskanych w trakcie oznaczania energii pęknięcia i mikroczwerności, umożliwiły badania petrograficzne wapieni, wykonane przy użyciu polaryzacyjnego mikroskopu optycznego do światła przechodzącego typu JENAPOL (Carl Zeiss Jena).

## CHARAKTERYSTYKA LITOLOGICZNA SKAŁ

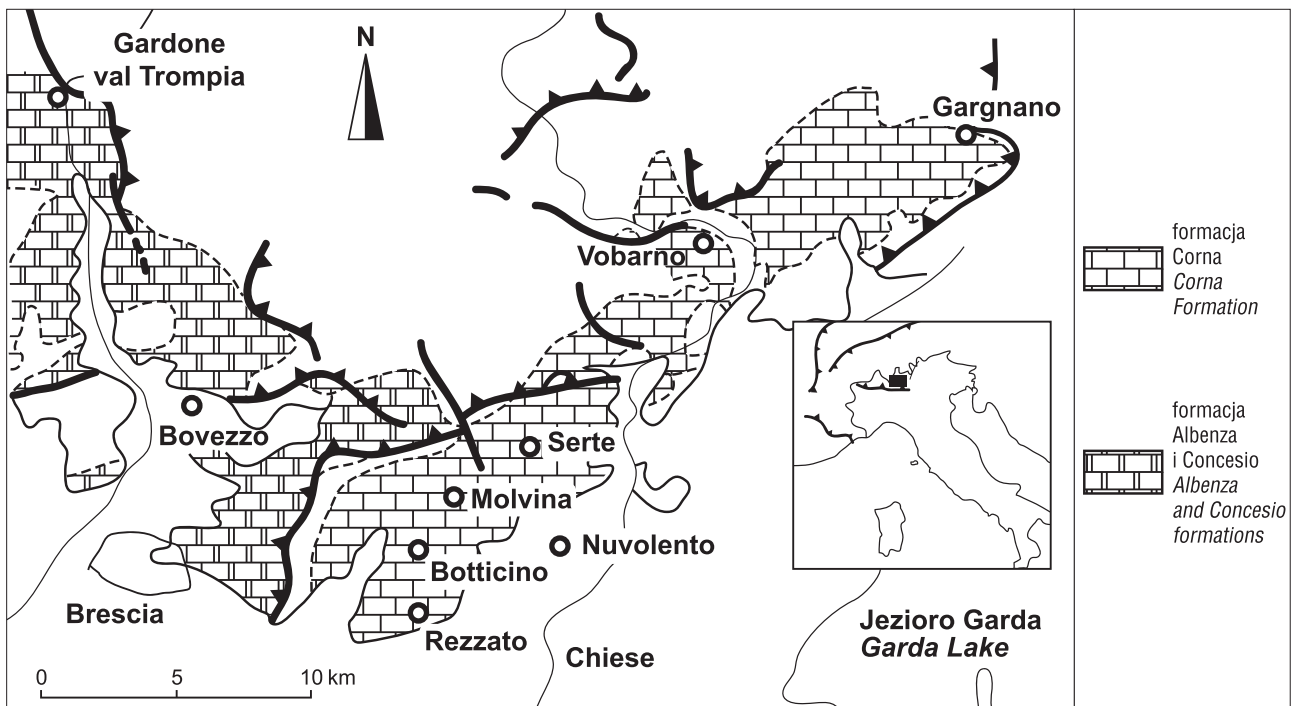
### Wapień Botticino Classico

Skała występuje we wschodniej części Lombardii w północnych Włoszech. Od czasów antycznych jest eksploatowana w złożach położonych w okolicach miejscowości Botticino, Nuvolento, Rezzato i Serle w prowincji Brescia, w południowych Alpach. Obecnie, w tym regionie, jest czynnych 65 złóż, przy całkowitej ich liczbie wynoszącej 131 (Ghirardi, 2016). Wapień należy do jurajskiej formacji Corna (ryc. 1) – hettang–synemur (Cassinis, 1968; Boni, Cassinis, 1973; Schirolli, 1997). Na zachód od tej jednostki zalegają triasowo-jurajskie skały węglanowe formacji z Albenza i formacji z Concesio (Bersezio i in., 1996; Jadoul, Galli, 2008). Miąższość utworów formacji Corna jest zmienna i wynosi od ok. 100 m w rejonie miejscowości Botticino do ok. 500 m w okolicach Gargnano (Boni, Cassinis, 1973; Castallarini, Picotti, 1990). Można wśród nich

wyróżnić trzy poziomy wapieni rozdzielone cienkimi warstewkami skał ilastych. W poziomach dolnym i górnym grubość ławic dochodzi do 4,8 m, natomiast w środkowym wynosi ok. 1 m. W złożach, w których są eksploatowane wapienie dolnej części profilu, kąt nachylenia warstw wynosi ok. 25°, natomiast w złożach w jego górnej części, warstwy są nachylone pod kątem 15° (Clerici, Meda, 2005; Jadoul, Galli, 2008). Makroskopowo wapień Botticino są barwy od kremowej do szarobeżowej. Są zwężłe, a w mikrokryształicznym tle są widoczne liczne skamieniałości oraz onkoidy. Powszechnie występują w nich liczne żyłki białego lub przezroczystego kalcytu i brązowe stylolity o nieregularnym przebiegu. Ze względu na różnorodność cech strukturalnych i zmienność barwy wydziela się różne gatunki i odmiany tego wapienia.

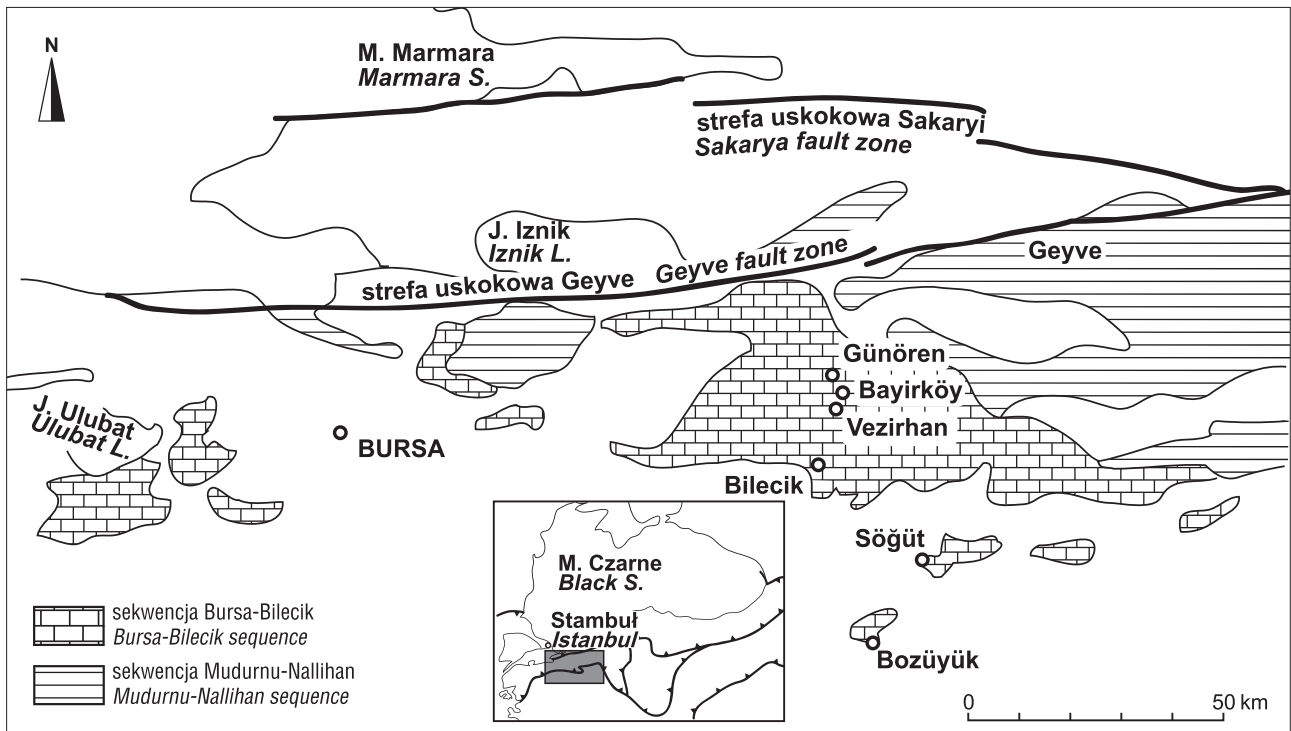
### Wapień Bilecik Beige

Skały znajdują się w Turcji, w obszarze Bayırköy-Günören, znajdującym się w regionie Bursa-Bilecik, w północno-zachodniej części strefy Anatolijskiej. Należą do formacji wapieni z Günören wieku kimeryd–berias (Altiner i in., 1991), która występuje w obrębie Grupy Bilecik, nazywanej też sekwencją Bursa-Bilecik (ryc. 2). Od W i NE kontaktuje ona ze skałami wulkanicznymi i wulkanoklastycznymi jury środkowej i górnej oraz utworami fliszowymi kredy dolnej, które łącznie tworzą sekwencję Mudurnu-Nallihan (ryc. 2). Miąższość wapieni formacji z Günören wynosi 127 m. Wapień formacji z Günören występują w trzech odmianach (Altiner i in., 1991; Koçyğit, Altiner, 2002). Pierwszą z nich o największym znaczeniu surowcowym, stanowią leżące najniżej w profilu zwężłe jasnoszare, beżowe, kremowe i różowe wapienie zasobne w stromatopory, jeżowce, mszywioly, otwornice, onkoidy, peloidy i intraklasty. Posiadają liczne żyłki kalcytu o nieregularnym przebiegu. Często występują w nich formy pale-

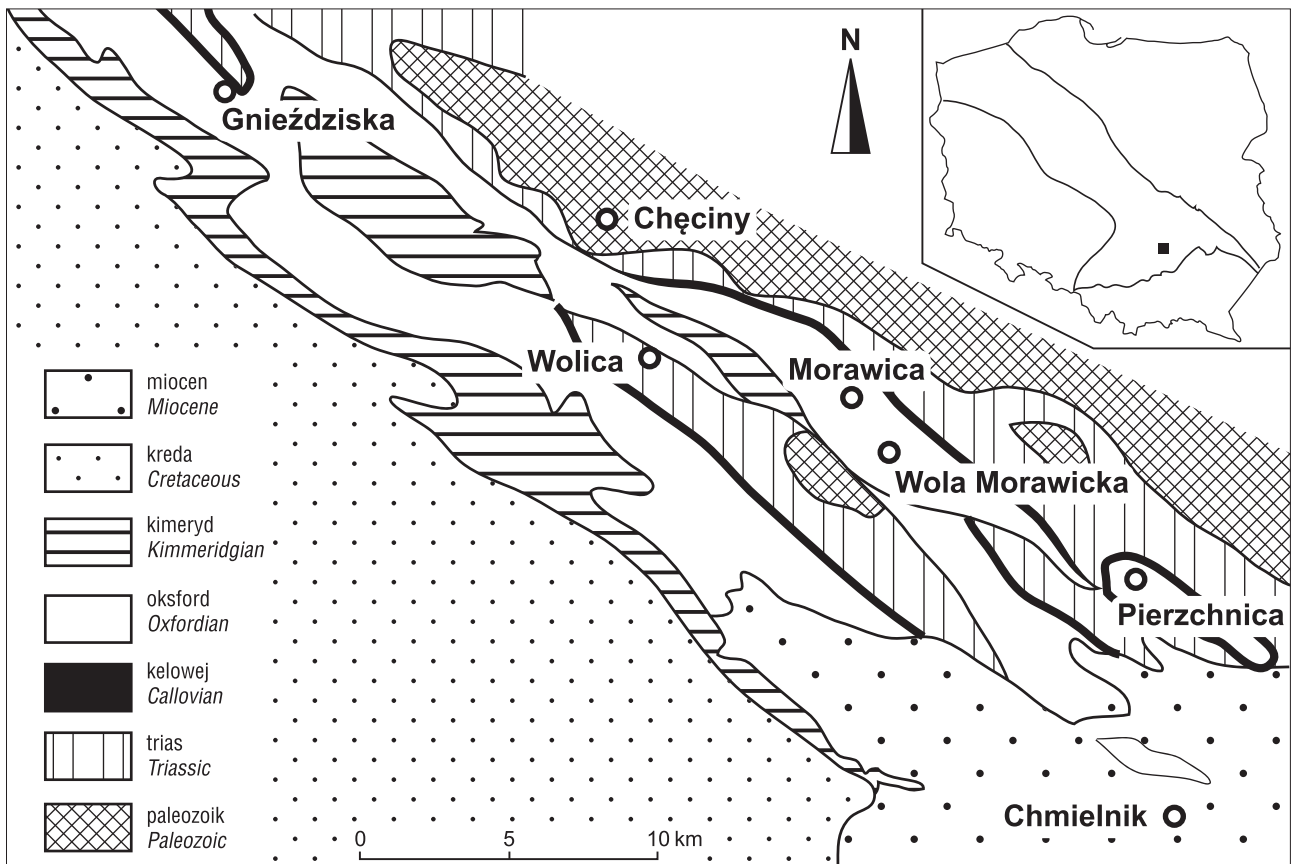


Ryc. 1. Wschodnie skały węglanowe formacji Corna we wschodniej części Lombardii (Bersezio i in., 1996; Jadoul, Galli, 2008)

Fig. 1. Outcrops of the Corna Formation limestones in eastern Lombardy (after Bersezio et al., 1996; Jadoul, Galli, 2008)



Ryc. 2. Wychodne wapieni formacji z Günören w północno-zachodniej części Anatolidów (wg Altinera i in., 1991)  
 Fig. 2. Outcrops of the Günören Formation limestones in the north-western part of the Anatolides (after Altiner et al., 1991)



Ryc. 3. Wychodne wapieni jurajskich w południowo-zachodniej części permsko-mezozoicznego obrzeżenia Gór Świętokrzyskich (wg Matyi, 1977)  
 Fig. 3. Outcrops of Jurassic limestones in the south-western part of the Permian-Mesozoic margin of the Holy Cross Mountains (after Matyja, 1977)

okrasowe. Są gruboławicowe, osiągając w rejonie miejscowości Vezirhan miąższość ławic od 0,8 do 3,0 m, przy łącznej ich miąższości w profilu 115 m. Wapienie drugiej odmiany zalegają wyżej w profilu, tworząc kompleks szarych wapieni gruzłowatych o miąższości 5 m. Trzecią, zalegającą najwyżej w profilu odmianą są średnio- i gruboławicowe wapienie organogeniczne zawierające liczne fragmenty krynowców i mszywiolów. Miąższość tych utworów wynosi 7 m.

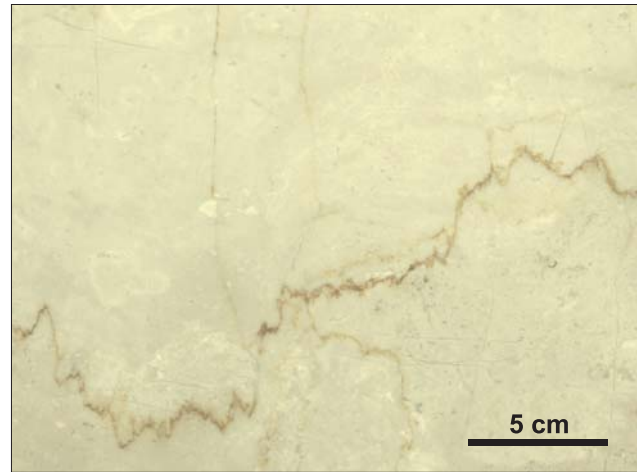
### Wapień Morawica

Skąła odsłania się w powiecie kieleckim w województwie świętokrzyskim. Genetycznie jest związana z kompleksem wapieni morawickich oksfordu środkowego i górnego, odpowiadających części formacji wapieni gąbkowych częstochowskich (Wagner, 2008). Wapienie te występują w paśmie wychodni na obszarze między Gnieździskami a Pierzchnicą, w obrębie permsko-mezozoicznego obrzeżenia Gór Świętokrzyskich (Matyja, 1977) (ryc. 3), a także w Niece Nidy (Złonkiewicz, 2009). Odsłaniają się w wielu wyrobiskach, z których obecnie są eksploatowane jedynie złoża Morawica III i Wola Morawicka. Miąższość wapieni morawickich wynosi od 110 do 150 m (Matyja, 1977). Są dobrze uławiczone, o grubości ławic najczęściej od 40 do 80 cm, maksymalnie osiągają 120 cm. Warstwy zapadają pod kątem 19–28° (Peszat, 1992). Posiadają zróżnicowaną barwę od ciemnoszaro-beżowej, przez ciemnokremową do jasnokremowej, co znajduje swój wyraz w ofercie handlowej eksponującej trzy odmiany wapieni: Morawicę ciemną, średnią i jasną. Wapienie są zwięzłe, zbudowane z mikrokrystalicznego kalcytu otaczającego onkoidy oraz różnorodne bioklasty. Powszechne są w nich wzajemnie przecinające się szwy stylolitowe. Cechą charakterystyczną, łatwo dostrzegalną makroskopowo, są nieregularne skupienia tuberoïdowe określane jako plamki, szczególnie liczne w ławicach wapieni z dolnej części profilu.

## WYNIKI BADAŃ

### Wapień Botticino Classico

Badany wapień Botticino Classico pochodzi ze złoża w Molvina (Molvina Marmi Di Torri Bortolo & C. s.n.c.). Skąła jest jasnokremowa, zwięzła, o drobnokrystalicznej strukturze, z licznymi żyłkami przezroczystego kalcytu i brązowymi stylolitami (ryc. 4). Składniki ziarniste są reprezentowane głównie przez liczne onkoidy i peloidy zbudowane z mikrytu kalcytowego, wykazującego w niektórych miejscach przejawy rekrytalizacji. Badania wykonane przy użyciu mikrotwardościomierza Knoop wykazały, że charakteryzują się one znaczną mikrotwardością  $HK_{0,1}$  wynoszącą od 87,4 do 101,2 MPa. W nieco mniejszym udziale są obecne fragmenty skamieniałości ramienionogów, ślimaków, jeżowców, krynowców i koralów, o rozmiarach dochodzących do 4 mm. Wnętrza niektórych muszli są wypełnione sparytem kalcytowym lub bioklasty te są w całości zrekrystalizowane, przez co są widoczne jako skupienia blokowego sparytu. Niekiedy wykazują przejawy nieznacznego rozpuszczenia lub sylikfikacji. Różnicowanie strukturalne kalcytu oraz obecność krzemionki w niektórych bioklastach powoduje, że składniki te posiadają

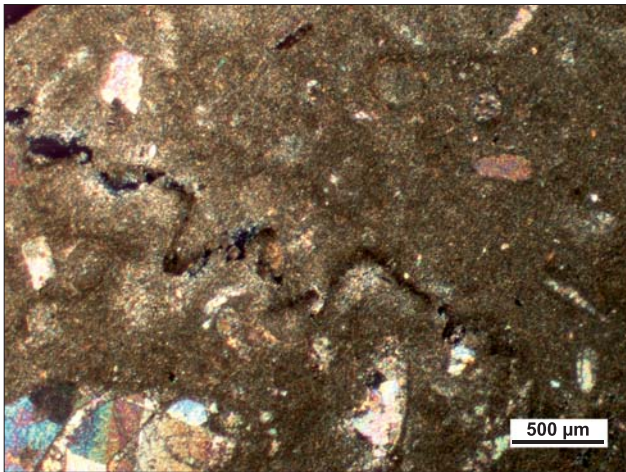


Ryc. 4. Wypolerowana powierzchnia wapienia Botticino Classico ze złoża w Molvina

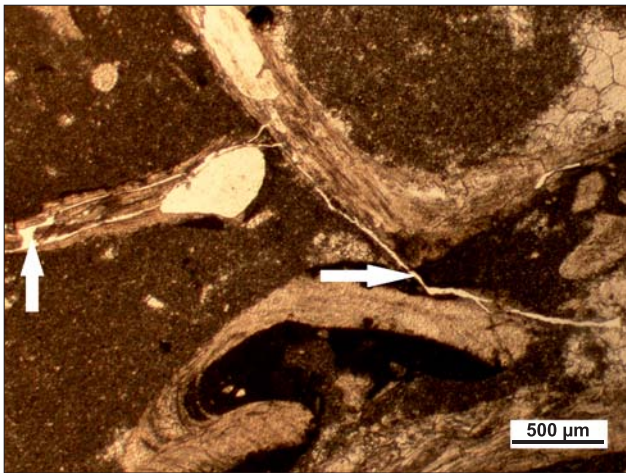
Fig. 4. Polished surface of the Botticino Classico limestone from the Molvina deposit

zmienną mikrotwardość w zakresie 99,6–226,2 MPa. W wapieniu dość częste są skupienia sparytu kalcytowego o różnej wielkości kryształów, częściowo wypełniających pory o nieregularnych kształtach i zróżnicowanych rozmiarach, wynoszących od dziesiątych części milimetra do kilku milimetrów. Zmierzony w nich parametru  $HK_{0,1}$  wynosi 68,1–146,4 MPa i jest uzależniony od wielkości budujących je kryształów kalcytu, wzrastając wraz z ich rozmiarami. Tło skalne składa się z mikrytu kalcytowego, w którym powszechnie są widoczne przejawy rekrytalizacji, a podrzędnie także sylikfikacji. We fragmentach wapienia zdominowanych przez mikryt kalcytowy, mikrotwardość międsi się w zakresie 32,7–47,3 MPa. Natomiast w mikroobszarach, w których obok mikrytu występują pojedyncze kryształy mikrosparytu lub skupienia chalcedonu, wartość tego parametru wzrasta do 73,9 MPa. W skale występują licznie żyłki kalcytowe o grubości nie przekraczającej 3 mm, przecinające się wzajemnie niemal pod kątem prostym. Budujące je kryształy kalcytu są składnikami skąły o najwyższej mikrotwardości Knoop, wynoszącej od 242,0 do 264,5 MPa. Niektóre z żyłek nie są całkowicie wypełnione przez kryształy kalcytu. W takich przypadkach są w nich obecne izolowane lub wzajemnie połączone niewielkie pory o regularnych kształtach wytyczonych płaszczyznami ścian kryształów. W wapieniu powszechne są stylolity o ząbkowanej morfologii i amplitudzie dochodzącej do 1 cm. Mają nieregularny przebieg, przecinając się w różnych kierunkach. Wypełnione są substancją ilastą oraz związkami żelaza (ryc. 5). Ze względu na porowatą strukturę tych fragmentów skąły i niedostatecznie dobrą jakość uzyskanego poleru, dokładny pomiar długości przekątnych powstałego wgłębienia był utrudniony i otrzymano tylko przybliżone wyniki mikrotwardości, wynoszące 34–44 MPa.

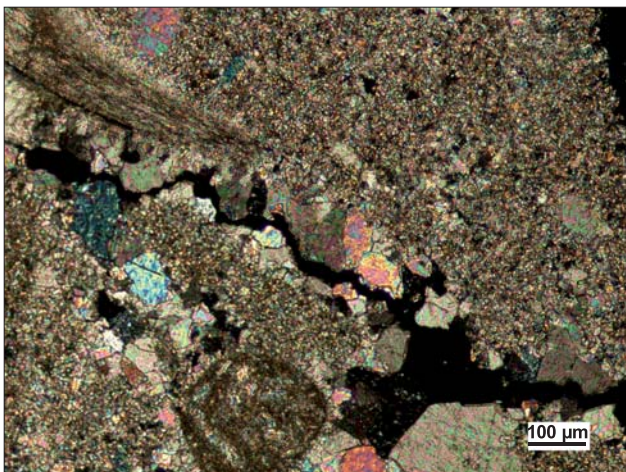
Badanie energii pęknięcia wapienia dowiodło, że charakteryzuje się on przeciętną wielkością tego parametru równą 6 J, wykazując tym samym umiarkowaną odporność na uderzenie oraz złamanie. Jak wykazały obserwacje mikroskopowe, wynika to z dominującego w skale udziału składników o mikrotwardości  $HK_{0,1}$  wynoszącej ponad 50 MPa. Stwierdzono ponadto, że po uderzeniu płyty kamiennej, przełam skąły tylko częściowo występuje wzdłuż stylolitów, stano-



**Ryc. 5.** Obraz mikroskopowy w świetle przechodzącym wapienia Botticino Classico ze złoża w Molvina. Szew stylolitytowy wypełniony substancją ilastą. Polaryzatory skrzyżowane  
**Fig. 5.** Microphotograph of the Botticino Classico limestone from the Molvina deposit. A stylolitic suture filled with clay substance. Transmitted light, crossed polars



**Ryc. 6.** Obraz mikroskopowy w świetle przechodzącym wapienia Botticino Classico ze złoża w Molvina po badaniu energii pęknięcia. Pęknięcie biegnące wzdłuż płaszczyzn muszli skamieniałości (strzałki). Jeden polaryzator  
**Fig. 6.** Microphotograph of the Botticino Classico limestone from the Molvina deposit after the rupture energy test. The fracture spreads along the surface of a fossilized shell (arrows). Transmitted light, one polarizer



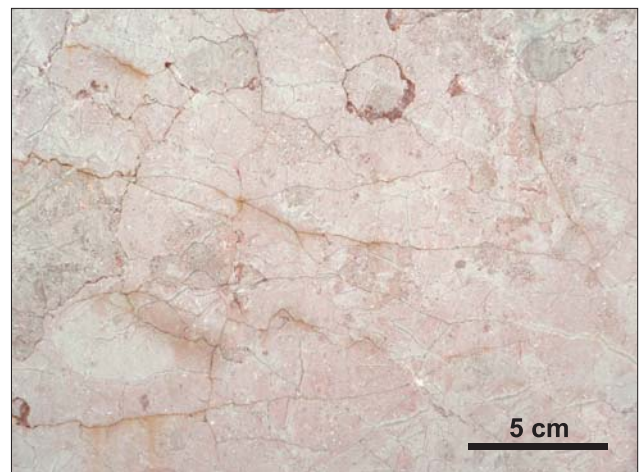
wiących w powszechnej opinii oczywiste powierzchnie nieciągłości, sprzyjające rozpadowi. Równie często pęknięcia rozwijają się w obrębie tła mikrytowego, niejednokrotnie na granicy z żyłką kalcytową lub wzdłuż dużych płaszczyzn muszli skamieniałości (ryc. 6). Rozpad skały wywołany uderzeniem zachodzi jednak najłatwiej we wnętrzu żyłek niecałkowicie wypełnionych kryształami kalcytu, w których pory przynajmniej częściowo są ze sobą połączone (ryc. 7).

### Wapień Bilecik Beige

Wapień poddany badaniom pochodzi z dolnej części profilu formacji wapieni z Günören, ze złoża w miejscowości Bayirköy, położonego 15 km na północ od miejscowości Bilecik, eksploatowanego przez firmę GT Stone.

Skała ma barwę beżową. W drobnokrystalicznym tle są widoczne składniki ziarniste o owalnych kształtach oraz pokruszone fragmenty muszli. Na powierzchni są obecne liczne, wzajemnie się przecinające, żyłki przezroczystego kalcytu i stylolity o rdzawym lub różowym zabarwieniu (ryc. 8).

Dominujące w skale ziarna obleczone i peloidy, zbudowane z mikrokryształicznego kalcytu, są słabo zwięzłe i posiadają wartość parametru  $HK_{0,1}$  w zakresie 35,8–45,2 MPa. Mniej liczne w skale fragmenty małży, jeżowców i otwornice są składnikami skały wyraźnie twardszymi, co wyraża się mikrotwardością w zakresie 134,1–158,2 MPa. Intraklastami są fragmenty biosparytów o mikrotwardości  $HK_{0,1}$  wynoszącej 77,1–111,2 MPa. Składniki ziarniste są rozmieszczone nierównomiernie. W niektórych miejscach kontaktują ze sobą, tworząc wciski, w innych są oddzielone

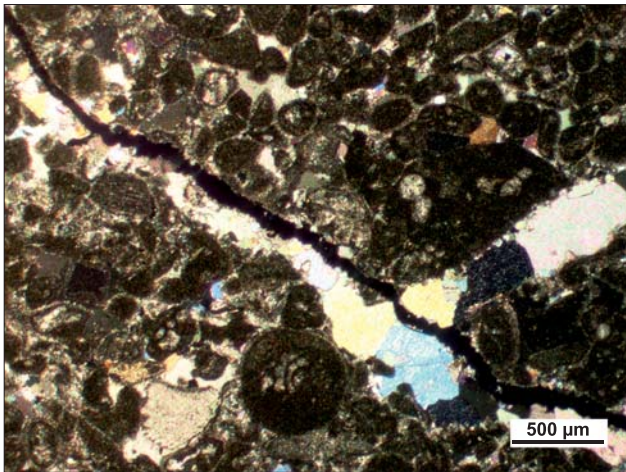


**Ryc. 8.** Wypolerowana powierzchnia wapienia Bilecik Beige ze złoża w Bayirköy  
**Fig. 8.** Polished surface of the Bilecik Beige limestone from the Bayirköy deposit

←

**Ryc. 7.** Obraz mikroskopowy w świetle przechodzącym wapienia Botticino Classico ze złoża w Molvina po badaniu energii pęknięcia. Pęknięcie rozwinięte we wnętrzu kalcytowej żyłki. Polaryzatory skrzyżowane

**Fig. 7.** Microphotograph of the Botticino Classico limestone from the Molvina deposit after the rupture energy test. The fracture spreads within a calcite vein. Transmitted light, crossed polars



**Ryc. 9.** Obraz mikroskopowy w świetle przechodzącym wapienia Bilecik Beige ze złoża w Bayirköy po badaniu energii pęknięcia. Liczne ziarna obleczone, połączone cementem kalcytowym. Na ich kontakcie z kalcytową żyłką powstało spękanie. Polaryzatory skrzyżowane

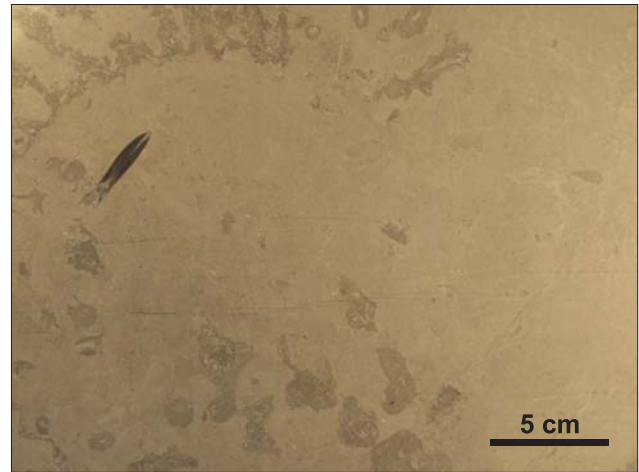
**Fig. 9.** Microphotograph of the Bilecik Beige limestone from the Bayirköy deposit after the rupture energy test. Many coated grains are set in the calcite cement. The fracture has been formed at the contact of the coated grains with a calcite vein. Transmitted light, crossed polars

cementem sparytowym. Stwierdzono dwie generacje cementu: wcześniejszego (typu A), narastającego na niektórych allochemach, oraz późniejszego, będącego cementem wypełniającym (typu B), zawierającego niekiedy skupienia mikrytu. W niektórych miejscach pomiędzy składnikami ziarnistymi jest obecny cement krzemionkowy. W tak zróżnicowanym cemencie stwierdzono dużą zmienność wartości mikrotwardości wynoszącej od 55,3 do 141,6 MPa. Skala jest poprzecinana licznymi żyłkami kalcytowymi (ryc. 9) zbudowanymi z kryształów sparytu dwóch generacji, charakteryzujących się różnymi rozmiarami i mikrotwardością w zakresie 188,3–197,5 MPa. Obecne w skale stylolity mają niewielką amplitudę, poniżej 1 cm i ząbkowaną morfologię. Wzdłuż szwu stylolitowego koncentrują się skupienia związków żelaza. Ich mikrotwardość  $HK_{0,1}$  wynosi 48,3–56,7 MPa.

Pomimo dość wysokiej mikrotwardości niektórych składników, skala wykazuje wyraźnie niższą niż wapień Boticino energię pęknięcia wynoszącą 4 J. Obserwacje makroskopowe i mikroskopowe wykazały, że wapień pod wpływem uderzenia pęka wzdłuż nieregularnych powierzchni, najczęściej na granicy żyłki kalcytovej i onkoidów oraz peloidów (ryc. 9). Spękanie dość często rozwija się także we wnętrzu żyłki, na granicy pomiędzy kryształami obu generacji. Rzadziej natomiast skala ulega przełamowi wzdłuż powierzchni stylolitowych.

### Wapień Morawica

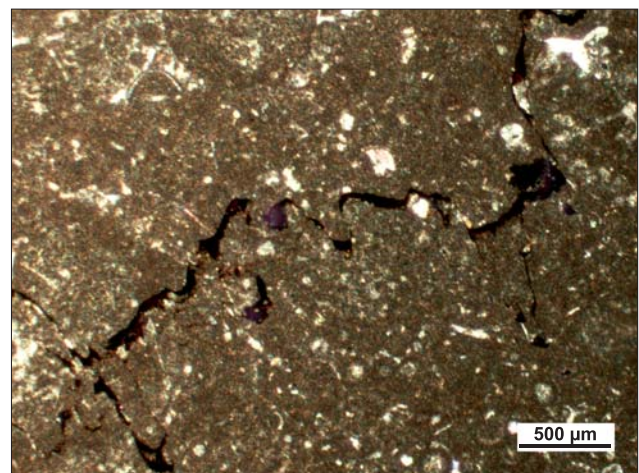
Do badań pobrano w kopalni Morawica próbki dwóch odmian wapieni. Pierwsza z nich, charakteryzuje się jasnokremową barwą, niewielkim udziałem skupień tuberoidów i skamieniałości, wśród których szczególnie uwidaczniają się kilkucentymetrowej wielkości amonity i rostra belemnitów (ryc. 10), a także pokruszone fragmenty ramienionogów, rozdrobnione i zdeformowane gąbki, jeżowce oraz



**Ryc. 10.** Wypolerowana powierzchnia jasnokremowego wapienia Morawica ze złoża Morawica III

**Fig. 10.** Polished surface of a light cream Morawica limestone from the Morawica III deposit

igły gąbek. Bioklasty wykazują różną mikrotwardość, wynoszącą 176,8–237,3 MPa. Onkoidy i peloidy mają pod względem ilościowym (ryc. 11) i posiadają różną mikrotwardość od 105,3 do 178,4 MPa. Wymienione składniki są nieregularnie rozmieszczone w mikrosparytowej masie skalnej, zawierającej nieliczne skupienia substancji ilastej i związków żelaza. Tak wykształcone tło skalne charakteryzuje się niewielką mikrotwardością Knoop – 27,5–53,3 MPa. W skale wyraźnie zaznaczają się liczne stylolity wzajemnie przecinające się, o ząbkowanej morfologii i amplitudzie nie przekraczającej 1,5 cm. Większość z nich ma rdzawożółte zabarwienie i stanowią one strefy kumulacji przede wszystkim związków żelaza i minerałów ilastych. To powoduje, że ich mikrotwardość wynosi zwykle od ok. 27 do ok. 32 MPa. W nielicznych szwach stylolitowych o jasnoszarej barwie doszło do krystalizacji drobno-

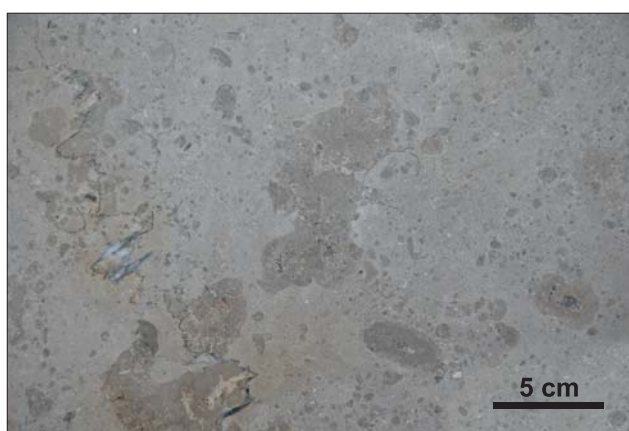


**Ryc. 11.** Obraz mikroskopowy w świetle przechodzącym ciemnoszaro-beżowego wapienia Morawica ze złoża Morawica III po badaniu energii pęknięcia. Pojedynczy szew stylolitowy wypełniony związkami żelaza, przecinający masę skalną zdominowaną przez onkoidy i peloidy oraz liczne bioklasty. Jeden polaryzator

**Fig. 11.** Microphotograph of the dark grey-beige Morawica limestone from the Morawica III deposit after the rupture energy test. A single stylolitic suture is filled with iron compounds and intersects the rock groundmass, in which oncoids, peloids and many bioclasts dominate. Transmitted light, one polarizer

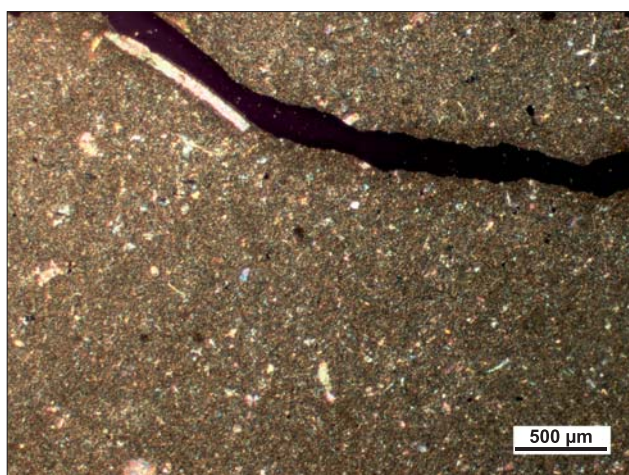
krystalicznego kalcytu, dzięki czemu miejsca te wykazują nieco większą twardość  $HK_{0,1}$  dochodzącą do 43,9 MPa. Stylolity są przecięte nielicznymi żyłkami o prostoliniowym przebiegu i grubości dziesiątych części milimetra, zbudowanymi z kryształów kalcytu o blokowym pokroju i niewielkich rozmiarach, poniżej 70  $\mu m$ . Mają one wysoką mikrotwardość wynoszącą 177,3–199,5 MPa.

Wapień drugiej odmiany, posiada barwę ciemnoszaro-beżową, liczne „plamki” tuberoidowe, onkoidy i peloidy (ryc. 12). Składniki te charakteryzują się wartością  $HK_{0,1}$ , mieszczącą się w przedziale 143,3–194,6 MPa. Nieco mniej liczne są bioklasty o mikrotwardości w przedziale 181,2–258,6 MPa. W mikrosparytowym tle skalnym nie zaobserwowano ilasto-żelazistych domieszek, natomiast stwierdzono liczne skupienia krzemionki. Wskutek tego mikrotwardość tła skalnego jest nieco większa niż w odmia-



Ryc. 12. Wypolerowana powierzchnia ciemnoszaro-beżowego wapienia Morawica ze złoża Morawica III

Fig. 12. Polished surface of the dark grey beige Morawica limestone from the Morawica III deposit



Ryc. 13. Obraz mikroskopowy w świetle przechodzącym ciemnoszaro-beżowego wapienia Morawica ze złoża Morawica III po badaniu energii pęknięcia. Pęknięcie rozwijające się w obrębie tła skalnego oraz częściowo wzdłuż powierzchni dużej muszli skamieniałości. Polaryzatory skrzyżowane

Fig. 13. Microphotograph of the dark grey-beige Morawica limestone from the Morawica III deposit after the rupture energy test. The fracture has been formed within the rock groundmass and, in part, it spreads along the surface of a large fossilized shell. Transmitted light, crossed polars

nie jasnokremowej i wynosi 48,1–62,2 MPa. Szwy stylolitowe są obecne sporadycznie (ryc. 11). Mają budowę kolumnowo-ząbkowaną i amplitudę dochodzącą do 3 cm. Wypełnione są zazwyczaj drobnymi kryształami kalcytu o blokowym pokroju lub rzadziej, drobnokrystaliczną krzemionką. W miejscach niektórych przegubów szwów stylolitowych doszło do większej koncentracji kryształów kalcytu, który tworzy wówczas gniazda o nieregularnych kształtach i rozmiarach dochodzących do 1 cm. Mikrotwardość w obrębie stylolitów wynosi od 68,7 MPa, dla stref z wykrystalizowanym kalcytem, do 117,6 MPa w miejscach wypełnionych krzemionką. Żyłki przezroczystego kalcytu występują zupełnie wyjątkowo. Ich mikrotwardość jest wysoka i wynosi od 195,5 do 211,0 MPa.

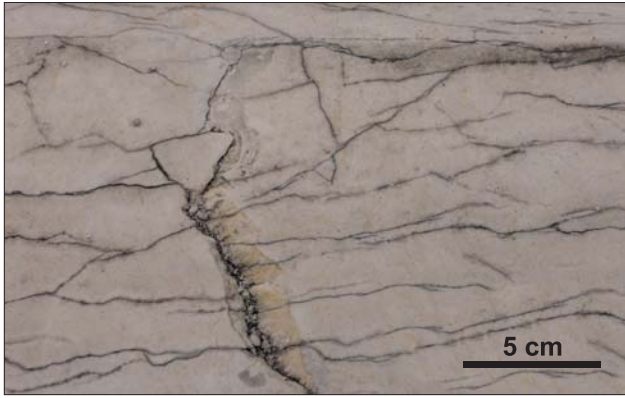
Wyniki badania energii pęknięcia wapieni wykazały, że ich jasnokremowa odmiana jest stosunkowo mało odporna na uderzenie, co wyraża wartość omawianego parametru równa 4 J. Jest to związane z dużym udziałem mikrytowego tła skalnego oraz stylolitów wypełnionych miękką substancją ilastą i związkami żelaza. Obserwacje wykazały, że rozpad skały wywołany uderzeniem, jest inicjowany przede wszystkim wzdłuż szwów stylolitowych, rozwijając się następnie w tle skalnym (ryc. 13).

W ciemnoszaro-beżowej odmianie wapienia energia pęknięcia wynosi 5J. Wyższa wartość tego parametru wynika z mniejszego udziału mikrytowego tła, które dodatkowo jest zsylikowane, a ponadto z większego udziału bioklastów i stylolitów wypełnionych przez kalcyt i krzemionkę. Pod wpływem uderzenia skała ulega rozpadowi przede wszystkim w obrębie tła, natomiast znacznie rzadziej wzdłuż stylolitów lub żyłek.

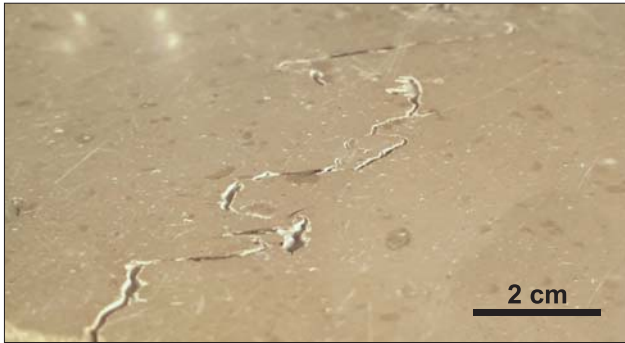
#### PRZEJAWY NISZCZENIA WAPIENI WYWOŁANEGO ICH UŻYTKOWANIEM

W celu stwierdzenia, czy niszczenie omawianych wapieni, wywołane ich użytkowaniem, istotnie zachodzi selektywnie i dokonuje się przede wszystkim w obrębie wyszczególnionych składników, przeprowadzono obserwacje wykonanych z nich elementów kamiennych, zastosowanych we wnętrzach budowli Krakowa (pawilon A-0 Akademii Górniczo-Hutniczej, Hall Główny Politechniki Krakowskiej, InfoKraków Punkt Sieci Informacji Miejskiej, Klinika Kardiochirurgii im. Jana Pawła II, Hotel Pałac Bonerowski, Hotel Demel, budynek Dworca Głównego PKP), Warszawy (Centrum Handlowe Arkadia, budynek biurowy Adgar Plaza), Poznania (kościół oo. Dominikanów i Franciszkanów, Hotel „Ikar”) oraz w kościołach w Kokoszycach k. Wodzisławia Śląskiego i w Górze k. Pszczyny. W większości analizowanych obiektów wapień, zgodnie ze stwierdzoną wcześniej ich przydatnością do stosowania w budownictwie, nie wykazywały oznak znaczącej destrukcji, poza typowymi przejawami, takimi jak utrata faktury polerowanej lub zabrudzenie. Jedynie w trzech obiektach, w których wapień zastosowany w posadzkach i schodach był poddany intensywnemu użytkowaniu oraz prawdopodobnie działaniu dodatkowych nietypowych czynników, stwierdzono przejawy wyraźnej destrukcji. Na powierzchni płyt wapienia Botticino, doszło do zaniku faktury polerowanej, powstania zarysowań oraz nierównomiernie rozmieszczonych, drobnych odprysków o nieregularnych kształtach i podłużnych, wąskich zagłębieniach o długości kilku





**Ryc. 14.** Powierzchnia płyt posadzkowych wykonanych z wapienia Bilecik Beige, użytkowanych przez okres trzech lat. Liczne spękania rozwinięte wzdłuż kalcytowych żyłek oraz odpryski powstałe w miejscach ich wzajemnego przecinania się  
**Fig. 14.** Surface of a floor slabs made of the Bilecik Beige limestone after three years of use. Many fractures are developed along small calcite veins. Hollows are formed by rock chipping at the intersections of the veins



**Ryc. 15.** Powierzchnia płyt posadzkowych wykonanych z jasnokremowego wapienia Morawica, użytkowanych przez okres czterech lat. Szew stylolitytowy z licznymi ubytkami powstałymi wskutek wypreparowania z niego substancji ilastej  
**Fig. 15.** Surface of one of the floor slabs made of the light cream Morawica limestone after four years of use. A stylolitic suture with many hollows resulting from losing its clay substance

centymetrów. Ubytki te utworzyły się w obrębie skupień sparytu oraz fragmentów żyłek kalcytowych. W niektórych miejscach, gdzie stylolity lub żyłki kalcytu znajdowały się tuż przy brzegach lub narożach płyt, doszło do odspojenia drobnych ich fragmentów. Płyty wykonane z wapienia Bilecik Beige utraciły fakturę polerowaną. Ponadto uległy zaawansowanej dezintegracji rozwijającej się wzdłuż żyłek kalcytowych. W płytach silnie użyłonych, w miejscach przecinania się żyłek, powstały płaskie odspojenia o znacznych rozmiarach (ryc. 14). W jasnokremowym wapieniu Morawica doszło do zarysowania powierzchni płyt, częściowej utraty przez nie poleru oraz ubytku minerałów ilastych wypełniających stylolity (ryc. 15). Dodatkowo powstały niewielkie, miejscowe ubytki zlokalizowane w strefach zasobniejszych w tło mikrytowe zawierające substancję ilastą. Nieco lepiej zachował się ciemnoszaro-beżowy wapień Morawica, w którym oprócz częściowej utraty poleru powstały tylko miejscowe, drobne ubytki koncentrujące się w obrębie tła mikrosparytowego.

## PODSUMOWANIE

Wykonane badania mikrotwardości oraz energii pęknięcia przy uderzeniu wykazały, że we wszystkich trzech rodzajach omawianych wapieni są obecne składniki o bardzo dużym zróżnicowaniu odporności mechanicznej. Jednocześnie stwierdzono, że pomimo podobieństwa petrograficznego, skały te różnią się między sobą charakterem i rozmieszczeniem komponentów, które mogą stanowić miejsca lub strefy szczególnie podatne na deteriorację. W wapieniu Botticino Classico są to: skupienia mikrytu budującego tło skalne, ponadto agregaty i żyłki, niecałkowicie zabudowane przez kryształy kalcytu oraz stylolity. W przypadku wapienia Bilecik Beige partie skały najbardziej narażone na niszczenie to mikrytowe ziarna obleczone i peloidy, zwłaszcza w strefach ich przylegania do żyłek kalcytowych oraz wnętrza tych żyłek, na granicy występujących w nich kryształów różnych generacji. W obu odmianach wapienia Morawica przyspieszonej dezintegracji ulega przede wszystkim mikrytowe i mikrosparytowe tło skalne, a w jasnokremowej odmianie dodatkowo stylolity wypełnione substancją ilastą.

Przeprowadzone obserwacje wykazały, że jeśli w omawianych wapieniach dochodzi do destrukcji wywołanej użytkowaniem, to jej przejawy ujawniają się przede wszystkim w miejscach występowania składników określonych badaniami mikrotwardości i energii pęknięcia jako najmniej odporne mechanicznie. Stanowi to pozytywną weryfikację obu metod badawczych i pozwala uznać je za w pełni przydatne do oceny jakości kamienia naturalnego.

Autor dziękuje firmie Kambud s.c. z Bochni za przekazanie mu płyt wapieni Botticino Classico i Bilecik Beige, wykorzystanych w badaniach. Autor składa także podziękowania Recenzentom oraz Redakcji Przeglądu Geologicznego za poświęcony czas oraz cenne uwagi dotyczące treści artykułu i jego formy. Praca finansowana z funduszu badań statutowych WGGiOŚ AGH, nr 11.11.140.320.

## LITERATURA

- ALTINER D., KOÇYIĞIT A., FARINACCI A., NICOSIA U., CONTI M.A. 1991 – Jurassic, Lower Cretaceous stratigraphy and paleogeographic evolution of the southern part of north-western Anatolia. *Geologica Romana*, 27: 13–80.
- BERSEZIO R., FELLETTI F., LOZAR F., RUGGERI M. 1996 – The Concesio Formation on the Lombardian rifted Basin (southern Alps, Italy). *Stratigraphy of a Jurassic calcareous turbidite unit. Riv. Ital. di Paleont. e Strat.*, 102: 49–64.
- BONI A., CASSINIS G. 1973 – Carta geologica delle Prealpi Bresciane a Sud dell'Adamello. Note illustrative della legenda stratigrafica. *Atti Ist. Geol. Univ. Pavia*, 23: 119–159.
- BROMOWICZ J., MAGIERA J. 2003 – Materiał kamienny wnętrza Kaplicy Zygmuntońskiej. *Materiały Konferencji Naukowej – Kamień architektoniczny i dekoracyjny, Kraków, 23–24 września 2003*: 5–12.
- BUCIAK R. 2012 – Wietrzenie piaskowców w środowisku miejskim na przykładzie obserwacji okładzin ścian w wyjściach z metra warszawskiego. *Prz. Geol.*, 60 (10): 554–562.
- CASSINIS G. 1968 – Stratigrafia e tettonica dei terreni mesozoica compresi tra Brescia e Serle: *Atti Ist. Geologiche Università di Padova*, 19: 50–152.
- CASTELLARIN A., PICOTTI V. 1990 – Jurassic tectonic framework of the eastern border of the Lombardian basin. *Eclogae Geol. Helv.*, 83: 683–700.
- CLERICI A., MEDA A. 2005 – Confronto tra le caratteristiche meccaniche di diversi livelli di estrazione del Botticino Classico. *Giornale di Geologia Applicata*, 2: 307–312.
- DECLARATION OF CONFORMITY 2016 – Bilecik Beige Limestone. BANDIRMA MERMER Sanayi Ticaret A.S.

- EN 1926:2000 – Natural stone test methods. Determination of uniaxial compressive strength.
- EN 1936:2001 – Natural stone test methods. Determination of real density and apparent density, and of total and open porosity.
- EN 12372:2001 – Natural stone test methods. Determination of flexural strength under concentrated load.
- EN 13755:2002 – Natural stone test methods. Determination of water absorption at atmospheric pressure.
- EN 14157: 2004 – Natural stone test methods. Determination of abrasion resistance.
- GHIRARDI G. 2016 – Botticino: from “Marble” to commodity. Impact, perspectives and innovations with the rapid change of the global market. International Conference: STONECHANGE 2016 “Stone sector and changing trends”. Carrara 16–17 June, 2016.
- JADOUL F., GALLI M.T. 2008 – The Hettangian shallow water carbonates after the Triassic/Jurassic biocalcification crisis: the Albenza formation in the Western Southern Alps. Riv. Ital. Paleont. Stratigr., 114 (3): 453–470.
- KOCYIGIT A., ALTINER D. 2002 – Tectonostratigraphic Evolution of the North Anatolian Palaeorift (NAPR): Hettangian–Aptian Passive Continental Margin of the Northern NeoTethys, Turkey. Turkish J. Earth Sci., 11: 169–191.
- LABUS M. 2008 – Evaluation of weathering-resistance classes in clastic rocks on the example of Polish sandstones. Environ. Geol., 54 (2): 283–289.
- LABUS M. 2009 – Parametry porozymetryczne górnokredowych piaskowców ciosowych jako czynnik warunkujący ich odporność na wietrzenie. Kwart. AGH Geologia, 35 (2): 263–275.
- MATYJA B.A. 1977 – The Oxfordian in the south-western margin of the Holy Cross Mts. Acta Geol. Pol., 27 (1): 41–64.
- PESZAT C. 1992 – Wapień jury świętokrzyskiej jako surowce do produkcji kredy technicznej. Zesz. Nauk. AGH, Geologia, 18 (4): 5–94.
- PINIŃSKA J. (red.) 1994 – Właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe skał. Cz. I. Skały osadowe regionu świętokrzyskiego. T. 1. Katalog. Z. Geom. IHiGI, Wyd. Geol. UW, Warszawa: 1–171.
- PINIŃSKA J., BOBROWSKA A., PAMUKCU C. 2010 – Deterioration processes of travertine monumental and contemporary stone structures. Geol. Balcanica, 39 (1/2): 310–311.
- PLUSKA I., REMBIŚ M., SMOLEŃSKA A. 2005 – Kamień w architekturze i dekoracji Kaplicy Zygmuntowskiej. Biul. Historii Sztuki, 67 (1/2): 147–161.
- PN-B-04100:1966 – Materiały kamienne. Oznaczanie gęstości objętościowej, gęstości, porowatości i szczelności.
- PN-B-01080:1984 – Kamień dla budownictwa i drogownictwa – Podział i zastosowanie według własności fizyczno-mechanicznych.
- PN-B-04110:1984 – Materiały kamienne – Oznaczanie wytrzymałości na ściskanie.
- PN-B-04111:1984 – Materiały kamienne – Oznaczanie ścieralności na tarczy Boehmego.
- PN-B-04101:1985 – Materiały kamienne – Oznaczanie nasiąkliwości wodą.
- PN-EN 1925:2001 – Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie wytrzymałości na ściskanie.
- PN-EN 14205:2004 – Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie twardości według Knoopa.
- PN-EN 14157:2005 – Kamień naturalny. Oznaczanie odporności na ścieranie.
- PN-EN 14158:2005 – Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie energii pęknięcia.
- PN-EN 1926:2007 – Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie wytrzymałości na ściskanie.
- PN-EN 13161:2008 – Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie wytrzymałości na zginanie przy stałym momencie.
- PN-EN 12371:2010 – Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie mrozoodporności.
- PN-EN 12372:2010 – Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie wytrzymałości na zginanie pod działaniem siły skupionej.
- SCHIROLLI P. 1997 – La successione liassica nelle Prealpi bresciane centro-occidentali. Atti Tic. Sc. Terra, ser. spec., 6: 5–137.
- UZ B., BACAK G., ÖZDAMAR Ş., YILMAZ M. 2003 – Bilecik Bej Mermerleri, Vezirhan Bölgesi jeolojik etüd ve değerlendirmesi Türkiye. IV Mermer Sempozyumu (MERSEM’2003) Bildiriler Kitabı 18–19 Aralık: 567–572.
- WAGNER Z. (red.) 2008 – Tabela stratygraficzna Polski. Polska pozakarpacka. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- WILCZYŃSKA-MICHALIK W., MICHALIK M. 1995 – Deterioracja materiałów skalnych w budowlach Krakowa. Prz. Geol., 43 (3): 227–235.
- ZŁONKIEWICZ Z. 2009 – Profil keloweju i górnej jury w niecce Nidy. Prz. Geol., 57 (6): 521–530.