Górnictwo i Geoinżynieria • Rok 33 • Zeszyt 1 • 2009

*Urszula Sanetra**, *Jerzy Gawryś**

WŁASNOŚCI FIZYCZNO-MECHANICZNE WAPIENI Z JASKINI SZACHOWNICA

1. Wstęp

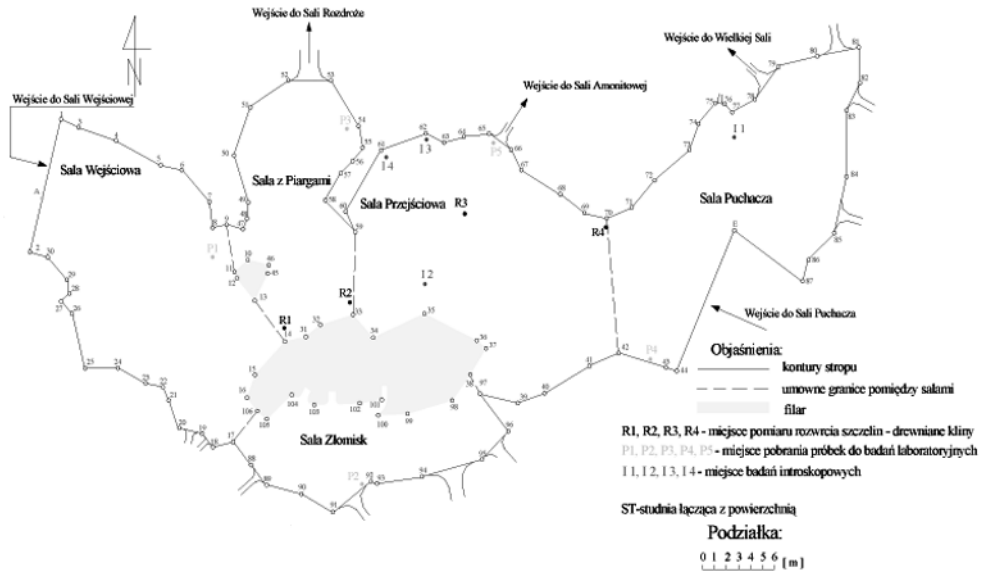
W artykule przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych wapieni górnojurajskich budujących proglacjalną jaskinię „Szachownica I", która znajduje się w gminie Lipie w województwie śląskim. Badania te były jednym z elementów niezbędnych do opracowania ekspertyzy dotyczącej zabezpieczenia jaskini, będącej rezerwatem i stanowiącym miejsce zimowania nietoperzy (obszar siedlisk Natura 2000) [3, 4, 16], przed postępującym procesem niszczenia. W tym celu niezbędne było poznanie podstawowych własności fizyko-mechanicznych oraz składu i struktury wapieni budujących jaskinię.

2. Lokalizacja miejsc opróbowania

Do badań laboratoryjnych pobrano próbki wapienia z wytypowanych miejsc w salach jaskini Szachownica I. Ich lokalizację przedstawiono na rysunku 1, oraz na poniższym zestawieniu:

— próbka 1 — wapień stropowy sali Wejściowej, ocios N
— próbka 2 — wapień stropowy sali Złomisk, ocios S
— próbka 3 — wapień stropowy sali z Piargami, ocios E
— próbka 4 — wapień z ociosu sali Puchacza, ocios S
— próbka 5 — wapień z ociosu sali Przejściowej, ocios N.

* Główny Instytut Górnictwa, Katowice



Rys. 1. Rozmieszczenie miejsca pobrania próbek w salach jaskini Szachownica I

Przeprowadzone badania laboratoryjne obejmowały badania petrograficzne oraz badania własności fizyko-mechanicznych w stanie powietrzno-suchym, w stanie nasycenia wodą oraz w stanie uwzględniającym wpływ działania niskiej temperatury (po badaniu mrozoodporności).

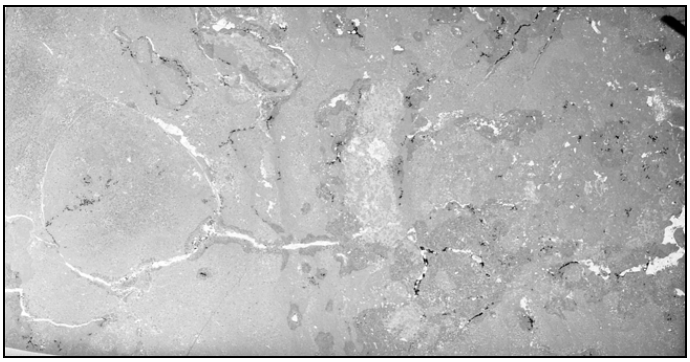
3. Charakterystyka petrograficzna wapieni z uwzględnieniem deformacji

Badania petrograficzne wapieni wykonane zostały w Zakładzie Mineralogii Wydziału Nauk o Ziemi Uniwersytetu Śląskiego. Obserwacje mikroskopowe oraz dokumentację fotograficzną przeprowadzono przy użyciu mikroskopu polaryzacyjnego OLYMPUS BX51 zaopatrzonego w kamerę Color View III U (5 mln pixeli). Charakterystykę przeprowadzono w oparciu o systematykę wapieni wg Folka [1].

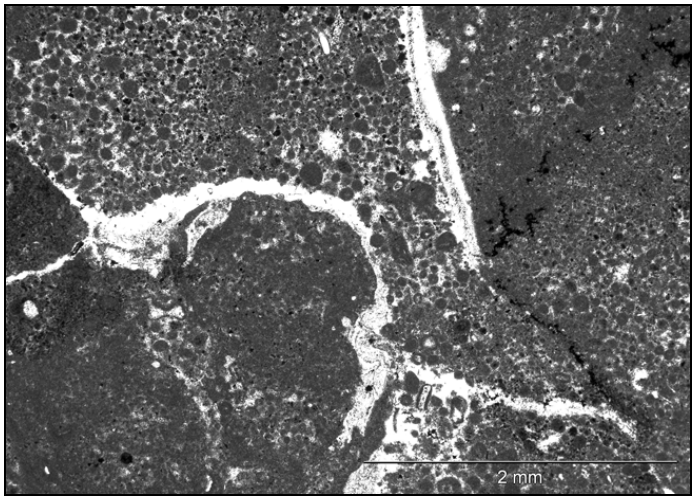
Do badań petrograficznych wytypowano dwa różniące się makroskopowo typy wapieni (próbkę 2 ze stropu sali Złomisk i próbkę 5 z ociosu Sali Przejściowej).

Wapień pobrany z sali Złomisk (próbka 2) cechuje się dość silnie szczelinowatą teksturą (rys. 2). Podstawowymi składnikami wapienia są pellety mikrytowe osiągające średnicę do 0,02 mm spojone głównie mikrytem, rzadziej sparytem. Bardzo rzadko występują bioklasty. Są to zrekrystalizowane szczątki szkieletów jamochłonów oraz fragmenty muszli mięczaków. Na podstawie tych obserwacji można zaklasyfikować badany wapień jako pelmikryt z niewielkim udziałem pelsparytu. W obrębie badanego wapienia stwierdzono występowanie

wielu spękań przecinających różne typy strukturalne skały osiągające szerokość do 0,5 mm. Niektóre z nich są zabliźnione kalcytem i tlenkami manganu, a niektóre stanowią wolne szczeliny. Ponadto zaobserwowano zluźnienia pomiędzy różnymi typami strukturalnymi wapienia wypełnione kalcytem (rys. 3). W obrębie spękań obserwowano druzy (pustki) do 3 mm szerokości z narastającymi na ich powierzchni kryształami kalcytu.



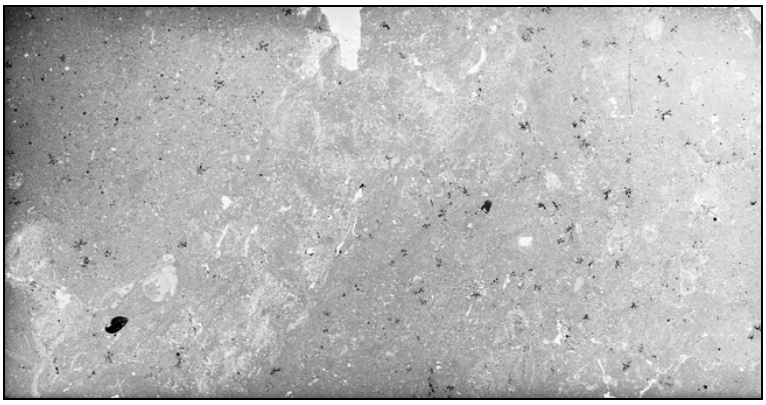
Rys. 2. Ogólny widok próbki 2 (rozmiar 2,5 × 4,5 cm).
Mikroskop polaryzacyjny, 1 nikol



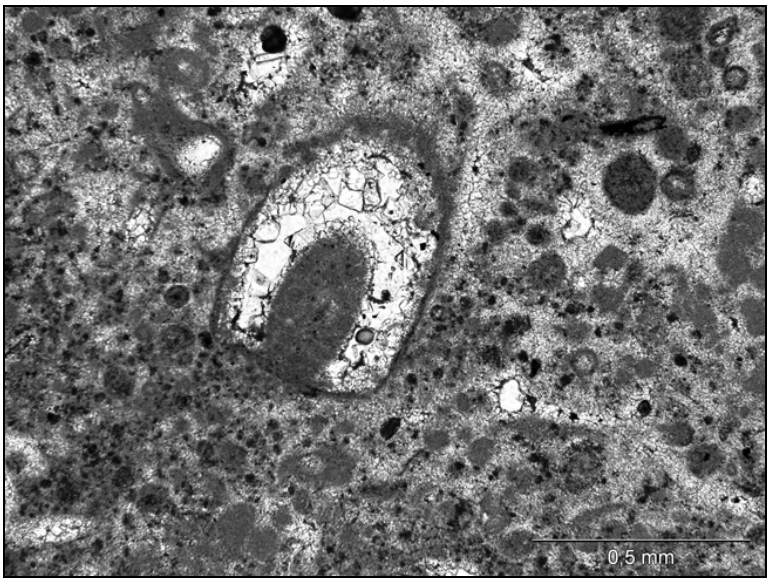
Rys. 3. Szczeliny powstałe na granicy dwóch typów struktury (pelmikrytu i pelsparytu) w obrębie wapienia wypełnione kalcytem. Mikroskop polaryzacyjny, 1 nikol

Wapień pobrany z ociosu Sali Przejściowej (próbka 5) cechuje się na ogół zwartą budową (rys. 4). Podstawowymi składnikami wapienia są pellety mikrytowe osiągające średnicę do 0,02 mm spojone głównie mikrytem, rzadziej sparytem. Rzadziej występującymi skład-

nikami są szczątki fauny (bioklasty), są to głównie fragmenty muszli mięczaków (rys. 5), fragmenty kostne ryb lub gadów oraz nieidentyfikowalne zrekrystalizowane struktury szkieletowe, prawdopodobnie jamochłonów ze skupieniami chalcedonu. Na podstawie tych obserwacji można zaklasyfikować badany wapień jako pelmikryt z niewielkim udziałem pelsparytu i biomikrytu. W obrębie wapienia rozproszone są pojedyncze dendryty manganowe osiągające wielkość do 1 mm.



Rys. 4. Ogólny widok próbki 5 (rozmiar 2,5× 4,5 cm).
Mikroskop polaryzacyjny, 1 nikol



Rys. 5. Bioklast — fragment skorupy mięczaka (ślimak?).
Mikroskop polaryzacyjny, 1 nikol

W obrębie badanego wapienia stwierdzono występowanie spękań przecinających niezgodnie różne typy strukturalne skały osiągające szerokość do 0,3 mm. Niektóre z nich są zabliźnione kalcytem, a niektóre stanowią wolne szczeliny. Ponadto zaobserwowano kalcytowe wypełnienia luźniejszych partii wapienia oraz skorup mięczaków, które miejscami zostały całkowicie wyługowane ze skały pozostawiając luźne szczeliny.

4. Badania fizyko-mechaniczne

W ramach badań laboratoryjnych oznaczono własności fizyko-mechaniczne dla pięciu próbek wapienia pobranych z wytypowanych miejsc sal jaskini Szachownica I (rys. 1). Dla celów przygotowania ekspertyzy wykonano m.in. oznaczenia następujących parametrów:

1) parametry wytrzymałościowo-odkształceniowe:
   — wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie,
   — wytrzymałość na rozciąganie,
   — wytrzymałość na ścinanie proste,
   — moduł Younga,
   — moduł sprężystości,
   — współczynnik Poissona;
2) parametry fizyczne:
   — gęstość objętościową,
   — gęstość,
   — porowatość,
   — ciężar objętościowy,
   — wilgotność naturalną,
   — nasiąkliwość wagową,
   — mrozoodporność,
   — współczynnik filtracji.

Badania laboratoryjne przeprowadzono zgodnie z obowiązującymi normami [5–14] oraz uznanymi metodami nieznormalizowanymi [15, 17]. Badania wytrzymałościowo-odkształceniowe wykonano w sztywnej maszynie wytrzymałościowej MTS 810 NEW.

5. Wyniki badań

Wyniki badań wapieni pobranych ze stropu (próbka 1, 2 i 3) i ociosu (próbka 4 i 5) z sal w jaskini Szachownica I przedstawiono w tabelach 1–4 oraz graficznie na rysunkach 2–8.

Wyniki badań na jednoosiowe ściskanie

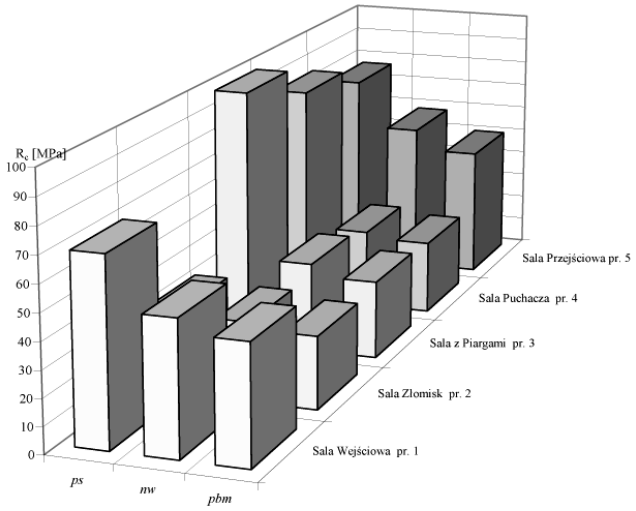
Średnie wartości wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie R_c wapieni oznaczone na próbkach w stanie powietrzno suchym, w stanie nasycenia wodą i po badaniu mrozoodporności przyjmują wartości:

TABELA 1

Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie wapieni z jaskini Szachownica I

Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie	Zakres zmienności	Wartość średnia
Stan powietrzno-suchy	32,0÷98,3 MPa	72,5 MPa
Stan nasycenia wodą	29,9÷58,4 MPa	40,5 MPa
Stan po badaniu mrozoodporności	27,4÷50,3 MPa	36,0 MPa

Rozkład wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie dla poszczególnych miejsc opróbowania przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Rozkład wytrzymałości na ściskanie R_c wapienia w stanie powietrzno-suchym p_s, nasycenia wodą n_w i po badaniu mrozopodprności p_{bs}

W stanie powietrzno-suchym próbka 2 jest skałą o małej wytrzymałości na ściskanie, pozostałe próbki (1, 3, 4 i 5) charakteryzują się wytrzymałością na ściskanie mieszczącą się w przedziale wartości średnich [14].

W stanie nasycenia wodą próbki 2, 3 i 4 są skałami o małej wytrzymałości na ściskanie, natomiast próbki 1 i 5 charakteryzują się wytrzymałością na ściskanie w granicach wartości średnich [14].

W stanie po badaniu mrozoodporności próbki 1 i 5 zaliczyć należy do skał o średniej wytrzymałości na ściskanie, próbki pozostałe (2, 3 i 4) charakteryzują się wytrzymałością na ściskanie mieszczącą się w przedziale wartości małych [14].

Niska wytrzymałość na ściskanie próbki 2 pobranej ze stropu Sali Złomowisk związana jest z teksturą dość silnie porowatą (badania petrograficzne), co czyni ją bardziej podatną na działanie wody i niskich temperatur i znacznie wpływa na obniżenie jej wytrzymałości na ściskanie. Większą wytrzymałością charakteryzują się pozostałe próbki wapieni cechujące się zwartą budową.

Wyniki badań wskaźników zmniejszenia wytrzymałości

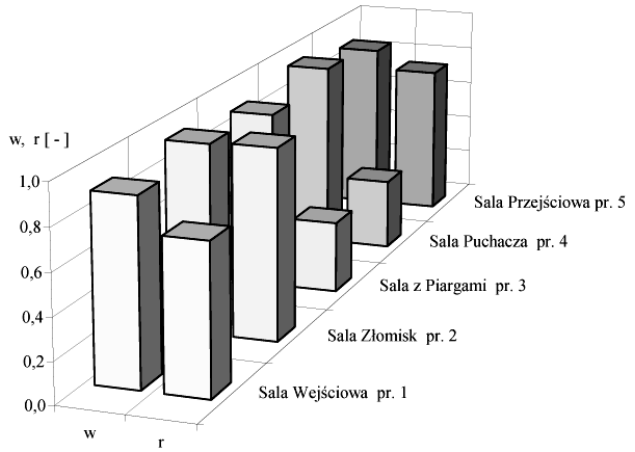
Obliczone na podstawie oznaczonych wartości wytrzymałości na ściskanie wskaźniki — współczynnik rozmiękczenia *r* (stopień zmniejszenia wytrzymałości pod wpływem działania wody) i współczynnik odporności na zamrażanie w (stopień zmniejszenia wytrzymałości pod wpływem działania zamrażania) przedstawiono w tabeli 2.

TABELA 2

Wskaźniki zmniejszenia wytrzymałości wapieni z jaskini Szachownica I

Wskaźnik	Zakres zmienności	Wartość średnia
Współczynnik rozmiękczenia, *r*	0,35÷0,93	0,62
Współczynnik odporności na zamrażanie, *w*	0,86÷0,93	0,89

Rozkład wskaźników osłabienia — współczynnika rozmiękczenia *r* i współczynnika odporności na zamrażanie w dla poszczególnych miejsc opróbowania przedstawiono graficznie na rysunku 7.

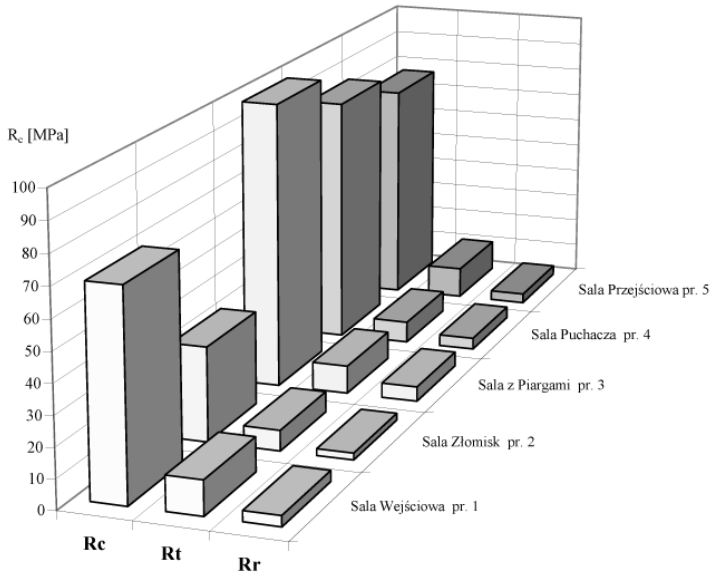


Rys. 7. Rozkład współczynnika rozmiękczania *r* i odporności na zamrażanie *w*

Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie i wytrzymałość na ścinanie proste

Średnia wartość wytrzymałości na rozciąganie R_r wapienia oznaczona na próbkach w stanie powietrzno-suchym, zawiera się w przedziale 2,28÷4,99 MPa, średnio 3,63 MPa.

Średnia wartość wytrzymałości na ścinanie proste R_t wapienia oznaczona na próbkach w stanie powietrzno suchym, zawiera się w przedziale 6,95÷11,64 MPa, średnio 9,27 MPa. Rozkład wartości wytrzymałości wapieni na ściskanie R_c, ścinanie R_t i na rozciąganie R_r dla poszczególnych miejsc opróbowania zestawiono na rysunku 8.



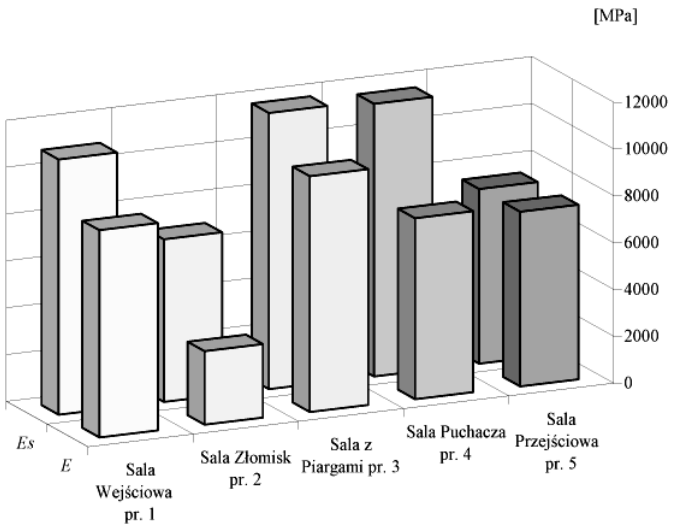
Rys. 8. Rozkład wartości wytrzymałości wapieni na ściskanie R_c, ścinanie R_t i na rozciąganie R_r

Wyniki badań modułu Younga i modułu sprężystości

Moduł Younga i moduł sprężystości (przy nawrocie odkształceń) przyjmują wartości, które generalnie korelują z wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie będącym najważniejszym parametrem spośród wyznaczanych w badaniach. Rozkład wartości modułu Younga E i modułu sprężystości E_s dla badanych wapieni zestawiono na rysunku 9.

Wyniki badań współczynnika Poissona

Współczynnik Poissona ν jest wielkością określającą sposób, w jaki odkształca się skała pod wpływem obciążenia ściskającego. Średnia wartość współczynnika Poissona dla wapieni, oznaczona na próbkach w stanie powietrzno suchym, zawiera się w przedziale 0,12÷0,13.



Rys. 9. Rozkład modułu Younga E i modułu sprężystości E_s

Wyniki badań gęstości objętościowej, gęstości i porowatości

Średnie wartości gęstości objętościowej, gęstości i porowatości wapienia oznaczone na próbkach przedstawiono w tabeli 3.

TABELA 3

Gęstość objętościowa, gęstość i porowatość wapieni z jaskini Szachownica I

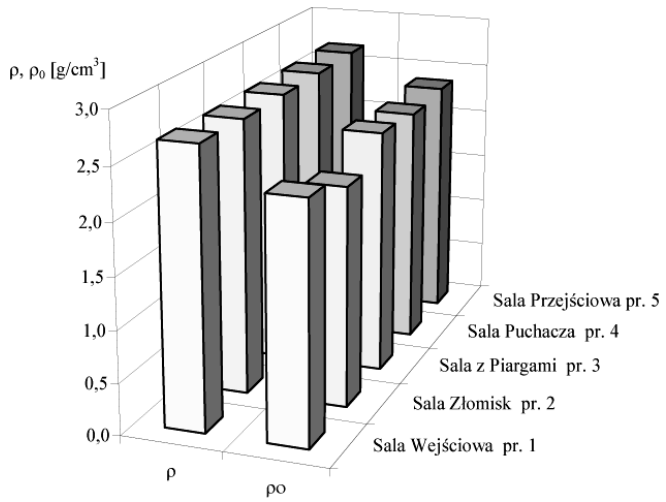
Parametr	Zakres zmienności	Wartość średnia
Gęstość objętościowa, ρ_o	2,13÷2,38 g/cm^3	2,30 g/cm^3
Gęstość, ρ	2,67÷2,69 MPa g/cm^3	2,68 g/cm^3
Porowatość, p	11,04÷20,32%	13,96%

Rozkład wartości gęstości ρ i gęstości objętościowej ρ_0 dla badanych wapieni zestawiono na rysunku 10. Ze względu na gęstość objętościową próbkę wapienia 2 zaliczyć można do skał średnio ciężkich, a próbki pozostałe (1, 3, 4 i 5) do skał ciężkich [14].

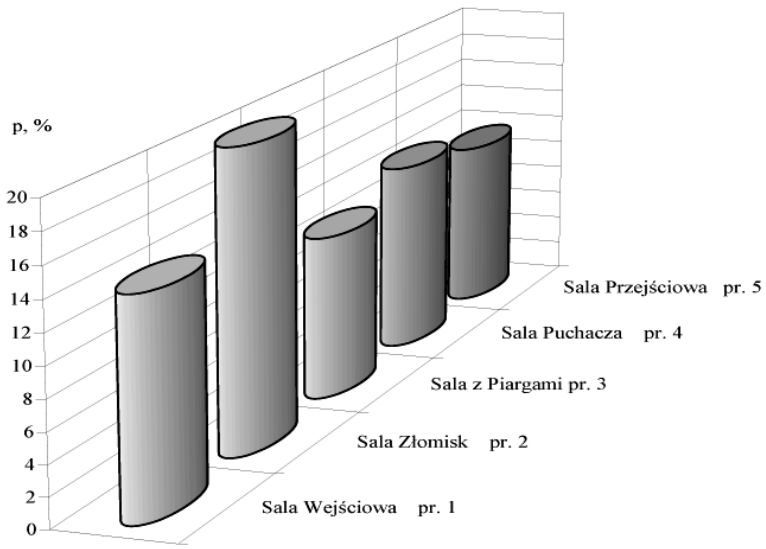
Rozkład wartości porowatości wapieni z jaskini przestawiono na rysunku 11.

Wyniki badań ciężaru objętościowego

Wartości ciężaru objętościowego γ_0 zostały określone na podstawie gęstości objętościowej i dla badanych wapieni przyjmują wartości od 20,90 do 23,25 kN/m^3, średnio 22,60 kN/m^3.



Rys. 10. Rozkład wartości gęstości ρ i gęstości objętościowej ρ_0



Rys. 11. Rozkład porowatości p wapieni

Wyniki badań wilgotności naturalnej i nasiąkliwości wagowej

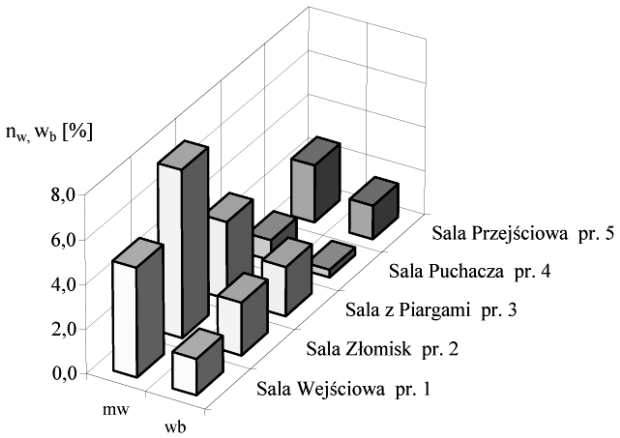
Średnie wartości wilgotności naturalnej i nasiąkliwości próbek wapienia oznaczone na próbkach przedstawiono w tabeli 4.

Rozkład wartości wilgotności naturalnej w_b i nasiąkliwości n_w wapieni dla miejsc pobrania prób zestawiono na rysunku 12.

TABELA 4

Wilgotność naturalna i nasiąkliwość wapieni z jaskini Szachownica I

Parametr	Zakres zmienności	Wartość średnia
Wilgotność naturalna, w_b	0,80÷2,39%	1,72%
Nasiąkliwość, n_w	2,62÷7,57%	4,46%



Rys. 12. Rozkład nasiąkliwości wagowej n_w i wilgotności naturalnej w_n

Ze względu na nasiąkliwość próbkę wapienia 2 o silnie porowatej teksturze i znacznej ilości spękań zaliczyć można do skał średnio nasiąkliwych, a pozostałe próbki o teksturze zbitej (1, 3, 4 i 5) do skał mało nasiąkliwych [14].

Wyniki badań mrozoodporności

W trakcie badania w pierwszej kolejności przeprowadzono badania ubytku masy po kilkudziesięciu cyklach zamrażania i odmrażania, a następnie określono współczynnik odporności na zamrażanie, w którego wartość dla badanych wapieni waha się od 0,86 do 0,93.

Na rysunku 6 przedstawiono obniżenie wytrzymałości na ściskanie po badaniu mrozoodporności w stosunku do próbki porównawczej. Mimo widocznych, po 25 cyklach zamrażania i odmrażania na większości badanych próbek rys, pęknięć oraz wykruszonych krawędzi i naroży, stwierdzono niewielki wzrost wagi (od 0,16 do 1,10 g). Stwierdzony przyrost masy próbek spowodowany jest wchłanianiem przez wapień dodatkowej ilości wody w trakcie kolejnych cykli rozmrażania. Wchłanianie tej dodatkowej ilości wody przez próbkę po uprzednim całkowitym jej nasyceniu jest związane prawdopodobnie z rozszerzaniem się porów i pęknięć na skutek zamrażania. Podobne zjawisko zaobserwowano podczas wcześniej prowadzonych badań dolomitów.

Wyniki badań współczynnika filtracji

Z badań na wytypowanych próbkach wapieni uzyskano średnie współczynniki filtracji k, które wahały się od $6{,}5 \cdot 10^{-8}$ do $9{,}7 \cdot 10^{-8}$ m/s, co pozwala zaliczyć je zgodnie z klasyfikacją według Pazdro, Kozerski [2] do skał półprzepuszczalnych.

6. Wnioski

Dla oceny stateczności jaskini Szachownica I [16] do badań laboratoryjnych pobrano próbki uwzględniając różnice litologiczne wapieni oraz równomierność opróbowania (w poziomie i pionie).

Najważniejsze średnie wyniki badań laboratoryjnych wapieni pobranych z pięciu sal jaskini Szachownica I przedstawiają się następująco:

— wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie w stanie powietrzno-suchym: R_c = 72,5 MPa,
— wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie w stanie nasycenia wodą: $R_c\, n_w$ = 40,5 MPa,
— wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie po badaniu mrozoodporności: $R_c\, p_{bm}$ = 36,0 MPa,
— współczynnik rozmiękczenia: r = 0,62,
— współczynnik odporności na zamrażanie: w = 0,89,
— wytrzymałość na rozciąganie w stanie powietrzno-suchym: R_r = 3,63 MPa,
— wytrzymałość na ścinanie proste w stanie powietrzno-suchym: R_t = 9,27 MPa,
— moduł Younga: E = 7445 MPa; średni moduł sprężystości: E_s = 10 240 MPa,
— współczynnik Poissona: $\nu = 0{,}12 \div 0{,}13$,
— gęstość objętościowa: ρ_0 = 2,30 g/cm^3; gęstość: ρ = 2,68 g/cm^3,
— porowatość: p = 13,96%; ciężar objętościowy: γ_0 = 22,6 kN/m^3,
— wilgotność naturalna w_b = 1,72%; nasiąkliwość n_w = 4,46%;
— współczynnik filtracji: $k = 8{,}1 \cdot 10^{-8}$ m/s.

Badania laboratoryjne wraz z pomiarami *in situ* (badania kamerą introskopową i georadarem oraz makroskopowe obserwacje struktury deformacji nieciągłych) miały na celu poznanie własności fizykomechanicznych wapieni, ich budowę mineralogiczną i strukturę oraz deformacje. Wyniki tych badań wykorzystano do sporządzenia ekspertyzy dla Śląskiego Urzędu Wojewódzkiego. W oparciu o poznane własności przeprowadzono analizę stateczności sal jaskini rozpatrując stropy sal jako dwuprzęsłowe płyty nieciągłe. W ekspertyzie zaproponowano kilka wariantów zabezpieczenia jaskini przed postępującym procesem destrukcji wykorzystując metody iniekcji ciśnieniowej oraz metodę kotwienia iniekcyjnego.

LITERATURA

[1] *Folk, R.L.*: Practical petrographic classification of limestones: American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v. 43, 1959, p. 1–38
[2] *Pazdro Z., Kozerski B.*: Hydrogeologia ogólna, Wyd. III. Warszawa, Wydawnictwo Geologiczne 1990

[3] Plan zarządzenia odtworzeniem siedliska dla Obszaru Natura 2000
[4] *Postawa T.*: Plan lokalnej współpracy na rzecz ochrony obszaru NATURA 2000-PLH240004. Szachownica, 2007
[5] PN-EN ISO14689-1:2006 Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikacja skał. Część1: Oznaczanie i opis
[6] PN-EN 1926:2001 Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie wytrzymałości na ściskanie
[7] PN-EN 13755:2002 Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie nasiąkliwości przy ciśnieniu atmosferycznym
[8] PN-EN 1936:2001 Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie gęstości i gęstości objętościowej oraz całkowitej i otwartej porowatości
[9] PN-EN 12371:2002 Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie mrozoodporności
[10] PN-G-04302:1997 Skały zwięzłe. Oznaczanie wytrzymałości na rozciąganie metodą poprzecznego ściskania
[11] PN-G-04304:1997 Skały zwięzłe. Oznaczanie wytrzymałości na ścinanie proste
[12] PN-G-04301:1996: Skały zwięzłe. Pobieranie i przygotowanie próbek do badań własności mechanicznych i technologicznych
[13] PN-88/B-04481 Grunty budowlane. Badania próbek gruntu
[14] PN-84/B-01080 Kamień dla budownictwa i drogownictwa. Podział i zastosowanie wg własności fizyczno-mechanicznych
[15] *Rogoż M.*: Urządzenie do oznaczania przepuszczalności skał zwięzłych. Przegląd Górniczy, nr 7–8, 1975, s. 289–291,
[16] Ekspertyza określająca możliwości, metody i koszty zabezpieczenia jaskini Szachownica — projektowanego Specjalnego Obszaru Ochrony Siedlisk NATURA 2000, nr pracy 58155768-142, 2008 (praca niepublikowana)
[17] *Ulusay R. & Hudson J.A. (red.)*: The Complete Isrm Suggested Methods For Rock Characterization, Testing And Monitoring: 1974–2006, Compilation Arranged by the ISRM Turkish National Group, Ankara, Turkey, 2007