

WŁAŚCIWOŚCI GEOMECHANICZNE MIOCEŃSKICH SOLI KAMIENNYCH

GEOMECHANICAL PARAMETERS OF MIOCENE ROCK SALT

DANUTA FLISIAK¹, KATARZYNA CYRAN²

Abstrakt. Odcinki rdzeni wiertniczych ze złóż mioceńskich soli kamiennych Łęczkowice i Siedlec–Moszczenica poddano badaniom wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie, rozciąganie oraz testom pełzania. Wyznaczono następujące parametry: ciężar objętościowy, wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na rozciąganie, moduł Younga, liczbę Poissona. Charakterystyki odkształceń osiowych, poprzecznych i objętościowych próbek soli kamiennej cechuje nieliniowość w całym zakresie naprężeń. Granica dylatacji pojawia się przy naprężeniach osiowych wynoszących od 8,4 do 14,4 MPa, tj. na poziomie około 35% *R*. Otrzymane parametry pozwalają stwierdzić, że na właściwości wytrzymałościowe soli w pierwszym rzędzie wpływa zawartość materiału terygenicznego. Jego wzrost podnosi wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie, przy czym znaczenie ma nie tylko ilość, ale także forma jego występowania (laminy, otoczenie ziaren). Uziarnienie ma znaczenie drugorzędne i generalnie wytrzymałość maleje wraz ze wzrostem wielkości ziaren, pomimo to najmniejszą wytrzymałością cechują się próbki różnoziarniste. Interesująca jest wysoka wytrzymałość próbek soli wykazujących kierunkowe ułożenie ziaren. Wydaje się, że procesy tektoniczne, które przyczyniły się do takiego ułożenia ziaren, spowodowały wzmocnienie soli poprzez lepsze dopasowanie kryształów lub częściową rekryształizację. Wśród próbek skał płonnych największą wytrzymałością cechują się piaskowce z gronami anhydrytu. Ich wytrzymałość, podobnie jak łożców, osłabiają warstwy i smugi anhydrytu o strukturze trzewiowej lub gipsu włóknistego, których granice są naturalnymi powierzchniami osłabień. W testach pełzania zaznacza się zależność pełzania od wielkości przyłożonego naprężenia. Jego większa wartość skutkuje większą intensywnością pełzania. Krzywe pełzania charakteryzuje duże zróżnicowanie wartości dla poszczególnych rodzajów soli, a także w obrębie tego samego gatunku. Wynika to z faktu dużej zmienności wytrzymałości na ściskanie.

Słowa kluczowe: mioceńska seria solna, parametry geomechaniczne, petrologia, zaangażowanie tektoniczne.

Abstract. Core samples from the Miocene salt deposits of Lezkowice and Siedlec–Moszczenica were tested for uniaxial compression and uniaxial tension strength and for creep properties. As a result of these tests the following parameters were calculated: bulk density, compressive strength, tensile strength, Young's modulus and Poisson's ratio. Axial, transverse and volume strain characteristics of rock salt samples are described by unlinear course in the whole range of stress. Dilatancy boundary appears at axial stress from 8.4 to 14.4 MPa (about 35% *R*). All the obtained parameters indicated that strength of rock salt is influenced primarily by a terrigenous material content. In most cases, its high content increases both compressive and tensile strength. However, not only the content of terrigenous material is important, but also its concentration form such as laminas and intergranular space infill. Graining is less important but generally the strength value decreases with a grain size increase. In spite of this fact, the lowest strength is typical for vari-grained salt samples. Moreover, interesting is a high strength of salt sample characterized with directionally elongated grains. Tectonic processes which produced such salt texture caused its strengthening. It is probably connected with better grain to grain fitting or partial recrystallization. Sandstone samples with anhydrite exhibit with the highest compressive strength value among the tested barren rocks. This value can be reduced by the occurrence of laminas and flames of entherolithic anhydrite whose boundaries are the natural weakening surfaces. Creep dependence on loaded stress was noticeable in the tests. Furthermore, the higher stress values correspond with the greater creep intensity. Creep curves are characterized by variable values both for each rock salt type and within the same type. The values resulted from changeability in compressive strength values of all the samples analyzed.

Key words: Miocene salt series, geomechanical parameters, petrology, intensity of tectonic deformations.

¹ Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; danutafl@agh.edu.pl

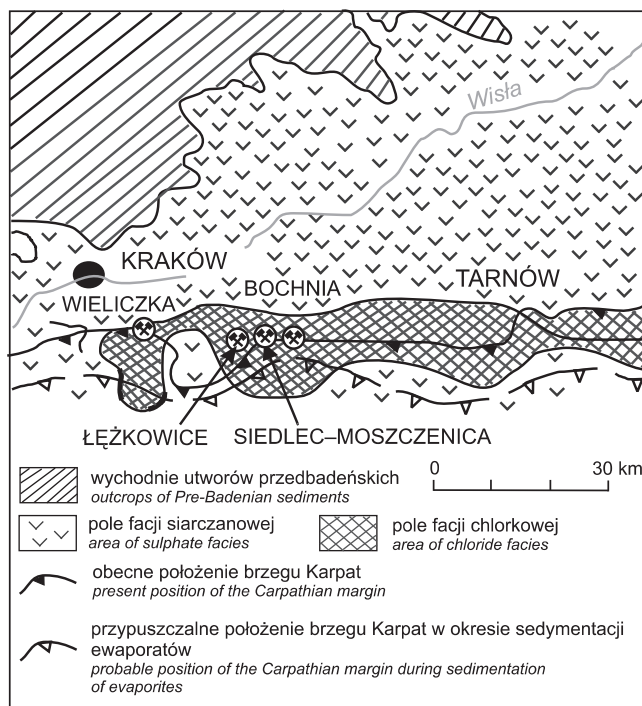
² Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; kcyran@geolog.geol.agh.edu.pl

WSTĘP

Złoża soli kamiennej Siedlec–Moszczenica i Łęzkowice są zlokalizowane przy brzegu Karpat, gdzie utwory miocennej formacji solonośnej uległy silnym zaburzeniom w okresie tektonicznej przebudowy Karpat i ich przedpola (fig. 1). Serię solną budują warstwy soli kompleksów północnego, środkowego i południowego, przedzielone utworami płonnymi (Garlicki, 1971; Szybist, Tobała, 1995). Czynniki tektoniczny oraz zróżnicowane zachowanie się soli i skał płonnych podczas deformacji wpłynęło na silne skomplikowanie ich struktury wewnętrznej. Złoża te mają formę fałdów i łusek silnie spiętrzonych i ponasuwanych na siebie. Zjawiska obserwowane w wyrobiskach górniczych dowodzą, że istnieje potrzeba powiązania geomechanicznych właściwości skał serii solnej z ich wykształceniem i zaangażowaniem tektonicznym.

Fig. 1. Występowanie osadów chemicznych miocenu w okolicy Krakowa (wg Garlickiego, 1979)

Occurrence of Miocene chemical deposits in the vicinity of Kraków (after Garlicki, 1979)



METODYKA BADAŃ LABORATORYJNYCH

Odcinki rdzeni wiertniczych pochodzących ze złóż soli Łęzkowice i Siedlec–Moszczenica poddano badaniom wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie (R) i rozciąganie (R) oraz próbom pełzania. Badania skał z kopalni Siedlec realizowano w okresie udostępniania złoża (Wosz i in., 1987) i nie wykonano ich szczegółowego opisu petrologicznego. Próbkę ze złoża Łęzkowice pochodziły z otworów kontrolnych z lat 2003–2005 (Cyran, 2008). Ogółem wykonano, metodą toczenia na sucho, 108 laboratoryjnych próbek soli kamiennych i skał płonnych o średnicy 55 mm i smukłości ok. 1,5. Wszystkie próbki z Łęzkowic opisano pod kątem budowy petrologicznej, a ze względu na brak wystarczającej ilości materiału poddano je tylko testom wytrzymałości na ściskanie. Podczas każdej próby jednoosiowego ściskania rejestrowano odkształcenia osiowe w kierunku działania ob-

ciążenia, oraz odkształcenia poprzeczne i w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach. Dla wszystkich próbek obliczono odkształcenia objętościowe i wykonano charakterystyki deformacyjno-naprężeniowe (fig. 2). Na podstawie ich przebiegu zostały określone parametry odkształceniowe badanych próbek: moduł Younga E i liczba Poissona ν , zgodnie z zaleceniami ISRM (International Society for Rock Mechanics). Obliczone parametry przypisano poszczególnym rodzajom petrologicznym soli i skał płonnych (tab. 1, 2).

Próby pełzania soli z kopalni Siedlec prowadzono do czasu ustalenia się prędkości odkształceń osiowych (ok. 50 dni), a ich wyniki dla poszczególnych rodzajów soli i różnych naprężeń przedstawiono w postaci krzywych w funkcji czasu (fig. 3, 4).

OCENA WIAŚCIWOŚCI GEOMECHANICZNYCH BADANYCH SKAŁ SERII SOLNEJ

Wszystkie próbki cechują się znacznym zróżnicowaniem parametrów określanych w testach wytrzymałościowych (tab. 1, 2). Dotyczy to również poszczególnych rodzajów petrologicznych badanych skał. W związku z tym przeprowadzenie analizy statystycznej uzyskanych wyników było nieuzasadnione.

Otrzymane parametry pozwalają stwierdzić, że na wytrzymałość soli w pierwszym rzędzie wpływa zawartość materiału terygenicznego. Jego zwiększenie podnosi wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie. W badaniach próbek pochodzących ze złoża Łęzkowice można zaobserwować, że znaczenie ma nie tylko ilość materiału ilastego, ale także for-

Tabela 1

**Parametry geomechaniczne soli i utworów płonnych kopalni Siedlec
(Wosz i in., 1987)**

Geomechanical parameters of salt and barren rocks from Siedlec mine
(after Wosz *et al.*, 1987)

| Próbka <i>Sample</i> | Ciężar objętościowy <i>Bulk density</i> γ [kN/m] | Wytrzymałość na ściskanie <i>Compressive strength</i> R [MPa] | Moduł Younga <i>Young's modulus</i> E [MPa] | Liczba Poissona <i>Poisson's ratio</i> ν | Wytrzymałość na rozciąganie <i>Tensile strength</i> R [MPa] |
|------------------------------------|---|--|---|--|--|
| Sól średnioziarnista szara i biała | 22,21–21,74 | 28,79 30,58 | 894,65 1715,75 | 0,11 0,22 | 1,40 1,56 1,86 2,01 2,22 |
| Sól średnioziarnista szara | 20,65–21,74 | 19,10 22,17 36,52 | 2919,73 2108,60 1870,57 | 0,21 0,25 0,22 | 1,53 |
| Sól kryształowa | 20,63–22,18 | 17,29 29,36 | 1153,28 2101,56 | 0,28 0,15 | 1,41 1,71 |
| Sól pasiasta | 20,74–22,11 | 25,41 25,46 29,60 31,33 | 2252,26 3127,24 2101,68 982,01 | 0,18 0,27 0,21 0,40 | 1,84 1,21 1,39 |
| Sól drobnoziarnista szara i biała | 21,43–23,27 | 20,87 24,40 26,88 29,26 29,71 | 1414,69 2086,59 1830,87 1642,66 2092,00 | 0,30 0,44 0,45 0,07 0,21 | 1,57 |
| Sól średnioziarnista z iłowcem | 20,65–21,84 | 5,31 8,87 14,15 16,86 30,06 | 738,59 926,43 3041,80 3548,76 1588,00 | 0,35 0,12 0,34 0,10 0,19 | brak danych |
| Howiec z anhydrytem | 23,76–26,15 | 12,24 13,00 | 1179,08 4146,40 | 0,38 0,46 | 0,89 4,16 1,23 |
| Howiec z gronami anhydrytu | 24,81–26,08 | 27,55 39,35 | 3405,40 7925,44 | 0,14 0,18 | 1,62 |
| Piaskowiec anhydrytowy | 24,71–25,80 | 23,12 | 5701,26 | 0,27 | 3,91 6,41 |
| Howiec szary | 18,92–20,65 | 1,37 4,24 | 411,59 883,22 | 0,08 0,15 | 0,35 |

ma jego występowania. Wytrzymałość jest największa, gdy materiał ilasty występuje w postaci rozproszonej w kryształach halitu (fig. 5, pr. 19). Jeżeli stanowi on otoczenie kryształów, występuje na ich granicach lub tworzy smugi, również podwyższa właściwości wytrzymałościowe (fig. 5, pr. 6 i 11). Natomiast laminy materiału płonnego, głównie iłowca, nie zawsze podnoszą wytrzymałość na ściskanie. Na granicy pomiędzy nimi a solą może dochodzić do rozwarstwień, które osłabiają próbkę.

W skałach solnych uziarnienie nie ma tak znaczącego wpływu na wytrzymałość, jak w przypadku skał wulkanicznych. Stwierdzono, że najmniejszą wytrzymałością cechują się próbki soli różnoziarnistej o wielkości ziaren od drobno- do grubokryształicznych (fig. 5, pr. 9). W pozostałych przypadkach wytrzymałość maleje ze wzrostem wielkości ziaren. Na uwagę zasługuje wysoka wytrzymałość soli wykazujących kierunkowe ułożenie kryształów halitu (tab. 2). Wydaje się, że procesy tektoniczne, które przyczyniły się

Tabela 2

**Parametry geomechaniczne soli i utworów płonnych złoża Łęzkowice
(Cyran, 2008)**

Geomechanical parameters of salt and barren rocks from Lezkwice mine
(after Cyran, 2008)

| Nr próbki <i>Number of sample</i> | Opis makroskopowy <i>Macroscopic description</i> | Ciężar objętościowy <i>Bulk density</i> γ [kN/m] | Wytrzymałość na ściskanie <i>Compressive strength</i> R [MPa] | Moduł Younga <i>Young's modulus</i> E [MPa] | Liczba Poissona <i>Poisson's ratio</i> ν |
|--------------------------------------|---|---|---|---|--|
| 6 | Sól kamienna szara i biała liniowana iłowcem, laminy iłowca są pofałdowane i ich grubość jest zmienna, grona anhydrytu, średnioziarnista | 21,71 | 37,96 | 2023,37 | 0,15 |
| 12 | Sól kamienna szara i sól biała liniowana iłowcem, średnio-, grubokrystaliczna, widoczna wyraźna granica (400) pomiędzy tymi dwoma rodzajami soli, laminy iłowca są pofałdowane i mają zmienną grubość | 21,36 | 34,54 | 992,10 | 0,11 |
| 1 | Sól kamienna szara od średnio- do gruboziarnistej, kierunkowe ułożenie ziaren, ze szczeliną | 21,85 | 33,57 | 1144,52 | 0,10 |
| 14 | Sól szara drobno- i średnioziarnista, kierunkowość ułożenia ziaren | 21,94 | 38,74 | 719,38 | 0,04 |
| 16 | Sól szara średnioziarnista, kierunkowe ułożenie ziaren | 22,77 | 41,09 | 2782,82 | 0,16 |
| 19 | Sól kamienna drobnoziarnista, szara, grona anhydrytu o średnicy 1–10 mm, kierunkowe ułożenie ziaren | 22,00 | 32,49 | 834,90 | 0,30 |
| 13 | Sól kamienna jasnoszara, różnokrystaliczna, grona anhydrytu o średnicy 1–10 mm | 20,58 | 24,01 | 1652,30 | 0,29 |
| 9 | Sól kamienna jasnoszara, różnokrystaliczna, grona anhydrytu o średnicy 1–10 mm, kierunkowe ułożenie ziaren | 21,16 | 28,63 | 1497,12 | 0,14 |
| 11 | Sól kryształowa, w przestrzeni między kryształami (około 30%) widoczny iłowiec i grona anhydrytu o średnicy 2–15 mm | 21,31 | 30,09 | 1636,96 | 0,10 |
| 7 | Sól pasiasta drobno i średnioziarnista | 21,64 | 36,36 | 2849,32 | 0,10 |
| 8 | Sól pasiasta średnioziarnista, pasy pofalowane, nieregularnej grubości | 21,35 | 30,33 | 2017,71 | 0,11 |
| 2 | İlowiec anhydrytowy, żyły anhydrytu włóknistego o grubości 1–2 cm (warstwy chodenickie o zapadaniu 100) | 21,92 | 31,37 | 13229,97 | 0,12 |
| 3 | İlowiec laminowany anhydrytem (warstwy chodenickie o zapadaniu 100), warstwy trzewiowca | 21,92 | 31,38 | 3756,82 | 0,01 |
| 15 | İlowce anhydrytowe z anhydrytem trzewiowym o miąższości 1–5 cm | 23,84 | 45,64 | 11004,23 | 0,10 |
| 4 | Piaskowiec szary z gronami anhydrytu | 25,33 | 59,34 | 10608,98 | 0,17 |
| 10 | Piaskowiec szary z gronami anhydrytu, miejscami smugi trzewiowca | 25,35 | 49,31 | 13274,78 | 0,12 |

do takiego ułożenia ziaren (fig. 5, pr. 19 i 9), spowodowały wzmocnienie soli poprzez idealne dopasowanie kryształów lub częściową rekrytalizację.

Wśród skał płonnych największą wytrzymałością cechują się piaskowce z gronami anhydrytu. Ich wytrzymałość, podobnie jak iłowców, osłabiają warstwy i smugi anhydrytu o strukturze trzewiowej lub gipsu włóknistego (fig. 5, pr. 10). Granice pomiędzy nimi a iłowcem lub piaskowcem są naturalnymi powierzchniami osłabień.

Wpływ procesów tektonicznych na właściwości mechaniczne skał solnych jest związany ze sposobem, w jaki ulegają deformacji pod wpływem nacisku. Proces ten składa się

z dwóch faz oddzielonych granicznym naprężeniem, przy którym pojawia się względny przyrost objętości, nazwany dylatacją (Schultze i in., 2001). Poniżej tej granicy sole kamienne deformują się plastycznie, a objętość maleje do momentu, gdy wszystkie spękania i mikrospękania zostaną zamknięte. Po jej przekroczeniu dochodzi do rozwoju mikrospękań i ich propagacji, aż do zniszczenia próbki. Zjawiskom tym towarzyszy wzrost objętości (Hunsche, Hampel, 1999). Występujące w solach powierzchnie spękań przeważnie stanowią miejsca o osłabionej wytrzymałości, jednak poniżej granicy dylatacji ich wpływ na wytrzymałość jest związany z geometrią obciążania (Schultze i in., 2001). Jeżeli spękania

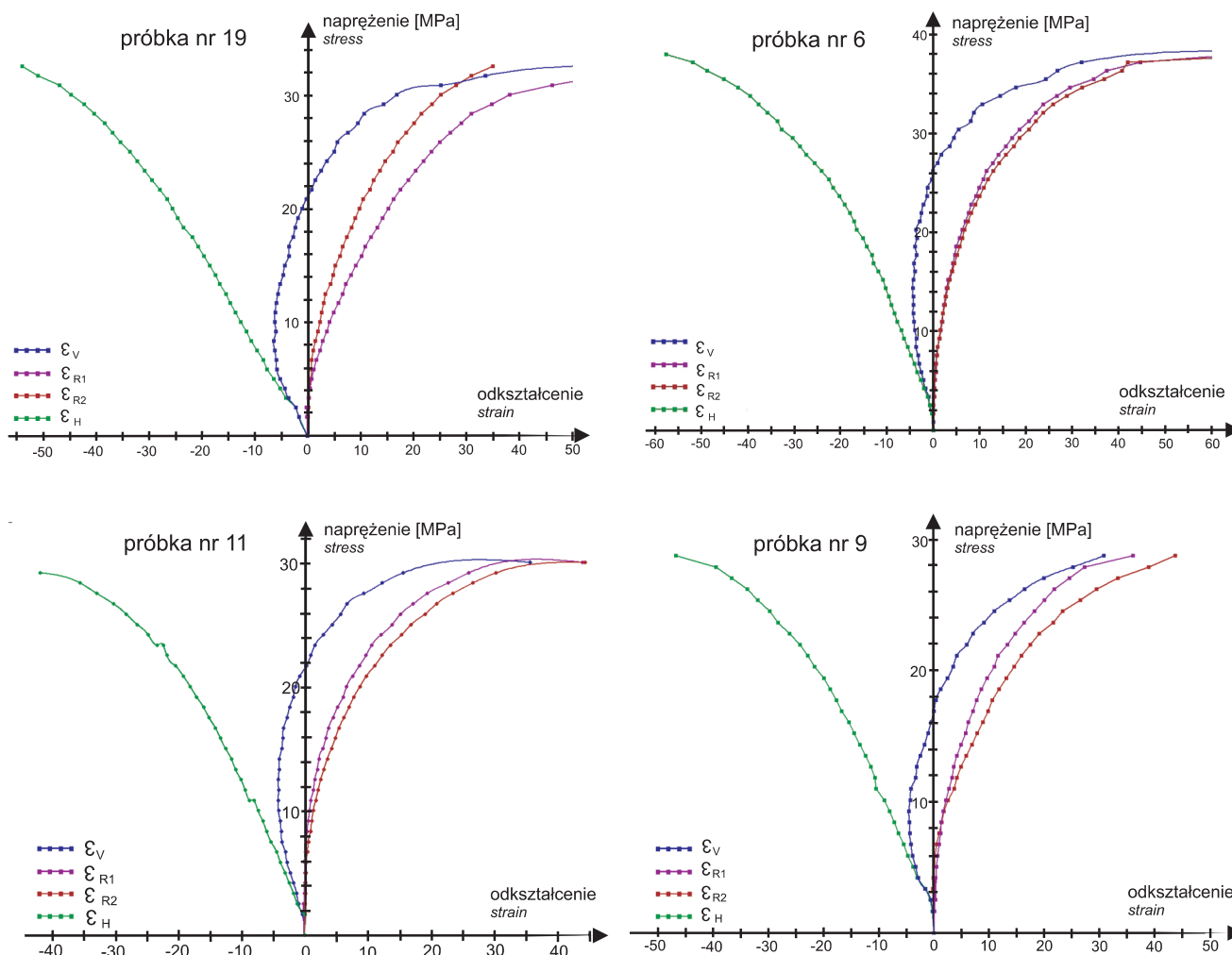


Fig. 2. Charakterystyka deformacyjno-naprężeniowa wybranych próbek: □ – odkształcenie objętościowe, □ – odkształcenia poprzeczne, □ – odkształcenia podłużne

Stress-strain characteristic of selected sample: □ – volumetric strain, □ – transverse strain, □ – axial strain

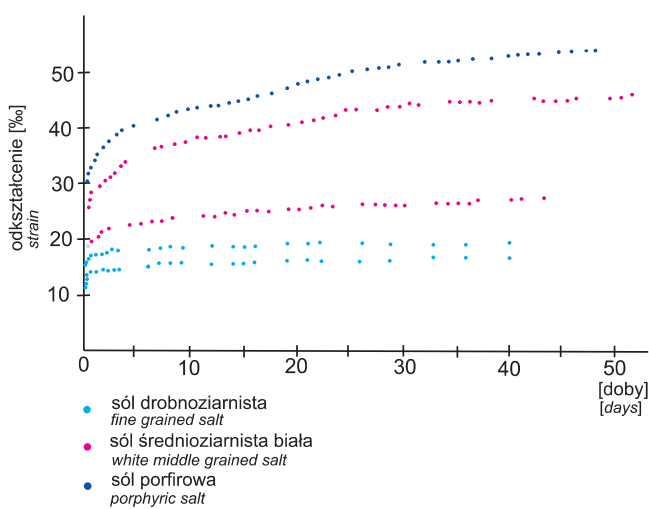


Fig. 3. Krzywe pełzania różnych rodzajów soli przy naprężeniu 0,7 R

Creep curves of different salt types under stress 0,7 R

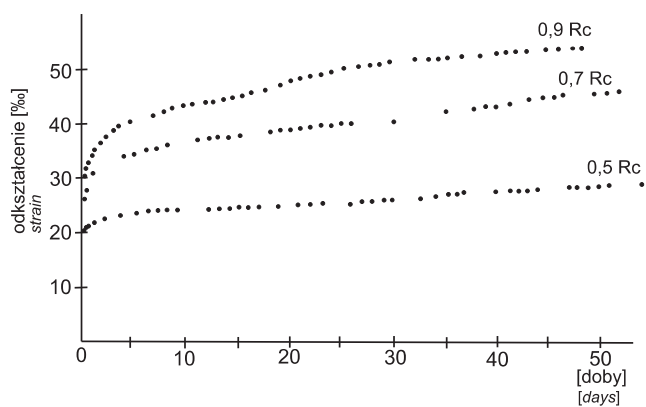


Fig. 4. Krzywe pełzania soli porfirowej przy różnych naprężeniach

Creep curves of porphyric salt under different stress

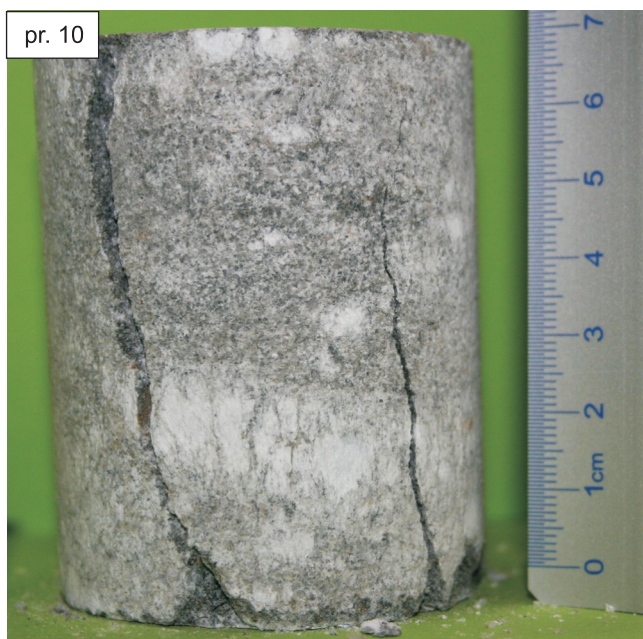
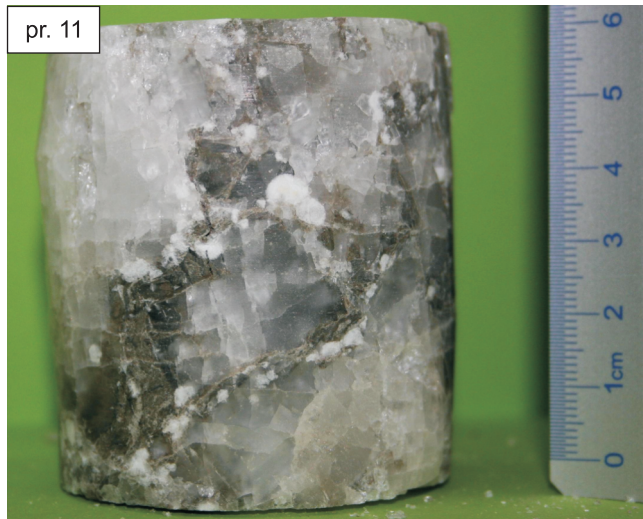
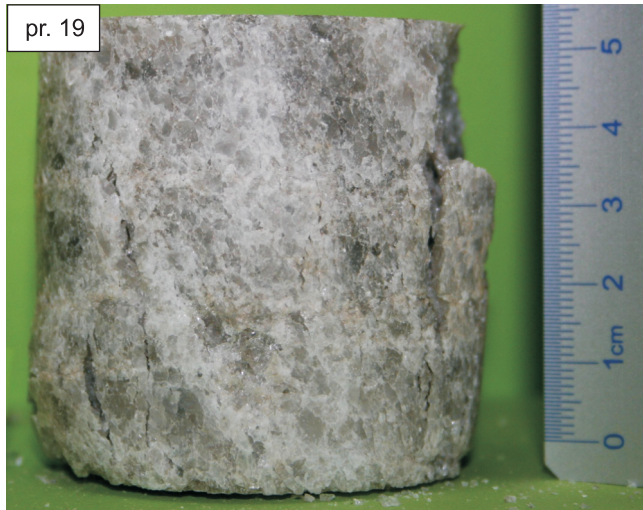


Fig. 5. Próbki po badaniach wytrzymałościowych

Samples after uniaxial compression test

są ustawione równoległe do kierunku obciążania, następuje ich stopniowe otwieranie. Natomiast spękania przebiegające prostopadle ulegają zaciskaniu.

Zarejestrowane podczas badań i przedstawione na wykresach charakterystyki odkształceniowe cechuje nieliniowość w całym zakresie naprężeń (fig. 2). Granica dylatacji pojawia się przy naprężeniach osiowych wynoszących od 8,4 do 14,4 MPa, czyli około 35% R . W tym przedziale wszystkie charakterystyki są najbardziej zbliżone do linii prostej. Dalszy wzrost naprężeń powoduje nieproporcjonalnie duży przyrost odkształceń, co jest objawem postępującej dezintegracji skały.

Na uwagę zasługuje charakterystyka odkształceń poprzecznych soli o kierunkowym ułożeniu ziaren (fig. 2). Podczas badania pary czujników przyłożono prostopadle i równoległe do zaobserwowanej kierunkowości. Otrzyma-

no mniejsze wartości odkształceń poprzecznych w kierunku równoległym do ułożenia ziaren.

W testach pełzania, przy różnych poziomach obciążenia próbek, zaznacza się zależność prędkości pełzania od wielkości działającego naprężenia: jego większa wartość skutkuje większą intensywnością pełzania (fig. 4). Analizując krzywe pełzania, można zauważyć duże różnice między poszczególnymi rodzajami soli, nawet przy tym samym poziomie obciążenia (fig. 3). Różnice występują także w obrębie tego samego gatunku soli, a wynikają z faktu dużej zmienności wytrzymałości na ściskanie. Generalnie, sole z dużą zawartością zanieczyszczeń pełzają wolniej niż sole czyste. Na szybkość pełzania wpływa także sposób występowania materiału ilastego.

PODSUMOWANIE

Górotwór solny nie jest ośrodkiem jednorodnym, a zmienność budowy serii solnych, ich historia geologiczna i głębokość zalegania są powodem zróżnicowania właściwości mechanicznych skał. Opisany przebieg deformacji jest charakterystyczny dla wszystkich soli, jednak wartość granicy dylatacji różni się dla poszczególnych serii solnych. Na przykład, dla cechsztyńskich soli z wysadu Dębina próg dylatacji pojawia się przy naprężeniach wynoszących ok. 20% R (Flisiak, Klisowski, 2004). Jest to niewątpliwie związane z odmiennymi warunkami zalegania, historią geologiczną oraz petrologią cechsztyńskich serii solnych. Generalnie, wytrzymałość skał i ich właściwości odkształceniowe zależą od ich składu mine-

ralogicznego, kształtu i wielkości ziaren, rodzaju spoiwa i łupliwości. Wpływa na nie także intensywność procesów tektonicznych, jakim zostały poddane. Ze względu na fakt, że sole miocenijskie uległy silnym deformacjom tektonicznym w okresie przebudowy Karpat i ich przedpola oraz charakteryzują się znacznym zróżnicowaniem petrologicznym, wpływ obu czynników na właściwości mechaniczne jest istotny.

Badania naukowe zostały sfinansowane ze środków na naukę w latach 2007–2008 jako projekt badawczy nr N52503832/3772 oraz z prac statutowych AGH nr 11.11.100.197.

LITERATURA

- CYRAN K., 2008 – Tektonika miocenijskich złóż soli w Polsce. Arch. Wyd. GGiOŚ, AGH. Kraków.
- FLISIAK D., KLISOWSKI R., 2004 – Wstępna ocena właściwości reformacyjnych soli kamiennych z wysadu Dębiny. *W: Geotechnika i Budownictwo Specjalne*, t. I: 63–72. AGH, Kraków.
- GARLICKI A., 1971 – Tektonika wewnętrzna złoża solnego Łężkowice. *Kwart. Geol.*, **15**, 3: 726–727.
- HUNSCH U., HAMPEL A., 1999 – Rock salt – the mechanical properties of the host rock material for radioactive waste repository. *Eng. Geol.*, **52**: 271–291.
- SCHULTZE O., TILL P., KERN H., 2001 – Development of damage and permeability in deforming rock salt. *Eng. Geol.*, **61**, 163–180.
- SZYBIST A., TOBOŁA T., 1995 – Budowa geologiczna złoża soli kamiennych Siedlec–Moszczenica w świetle nowych danych. *Prz. Geol.*, **43**, 8: 682–686.
- WOSZ R., FLISIAK D., JAKÓBSKA A., 1987 – Badania właściwości fizykomechanicznych soli i skał płonnych. Arch. Inst. Geomechaniki Górniczej, AGH. Kraków.