

Ryszard KACZYŃSKI

## Wytrzymałość i odkształcalność kredowych piaskowców rejonu Nowogrodźca (depresja północnosudecka)

Badania wytrzymałości (na ściskanie jednoosiowe i trójosiowe, rozciąganie, zginanie i ścinanie) i odkształcalności piaskowców kredowych otaczających złoża iłów Bolko II w rejonie Nowogrodźca wykonano na próbkach rdzeni wiertniczych, uwzględniając zakres potrzeb niezbędnych przy projektowaniu wyrobisk górniczych. W szczególności zwrócono uwagę na scharakteryzowanie właściwości masywu skalnego z punktu widzenia oceny inżyniersko-geologicznej. Na podstawie wskaźników Niejsztadta, Deere'a i Hansagi'ego masyw piaskowców kredowych rejonu Nowogrodźca można ocenić jako masyw o złej jakości, na podstawie wskaźnika  $Q$  jako masyw bardzo słaby. Badane piaskowce są skałami o bardzo małej wytrzymałości i dużej odkształcalności oraz silnie mięknącymi.

### WSTĘP

Projektowanie wyrobisk górniczych, oprócz ogólnego rozpoznania warunków geologicznych masywu i cech fizycznych skał, wymaga przede wszystkim określenia parametrów wytrzymałościowych i odkształcalności skał. Ustalenie wytrzymałości na ściskanie, rozciąganie, zginanie i ścinanie oraz wyznaczenie parametrów charakteryzujących odkształcalność (moduł odkształcenia, sprężystości i współczynnik Poissona) pozwalają na określenie stanu równowagi granicznej ośrodka skalnego. Właściwe wyznaczenie charakterystyk wytrzymałościowo-odkształceniowych skał budujących masyw warunkuje bezpieczne i ekonomiczne projektowanie.

Badania piaskowców kredowych były związane z projektowaniem górniczych wyrobisk podziemnych dla eksploatacji złoża biało wypalających się iłów. Piaskowce stanowią otoczenie złoża iłów Bolko II, usytuowanego w okolicach Nowogrodźca w depresji północnosudeckiej. Badania przeprowadzono na rdzeniach piaskowców, pobranych z otworów badawczych (wykonanych przez Przedsiębiorstwo Geologiczne we Wrocławiu), w Laboratorium Instytutu Hydrogeologii i Geologii

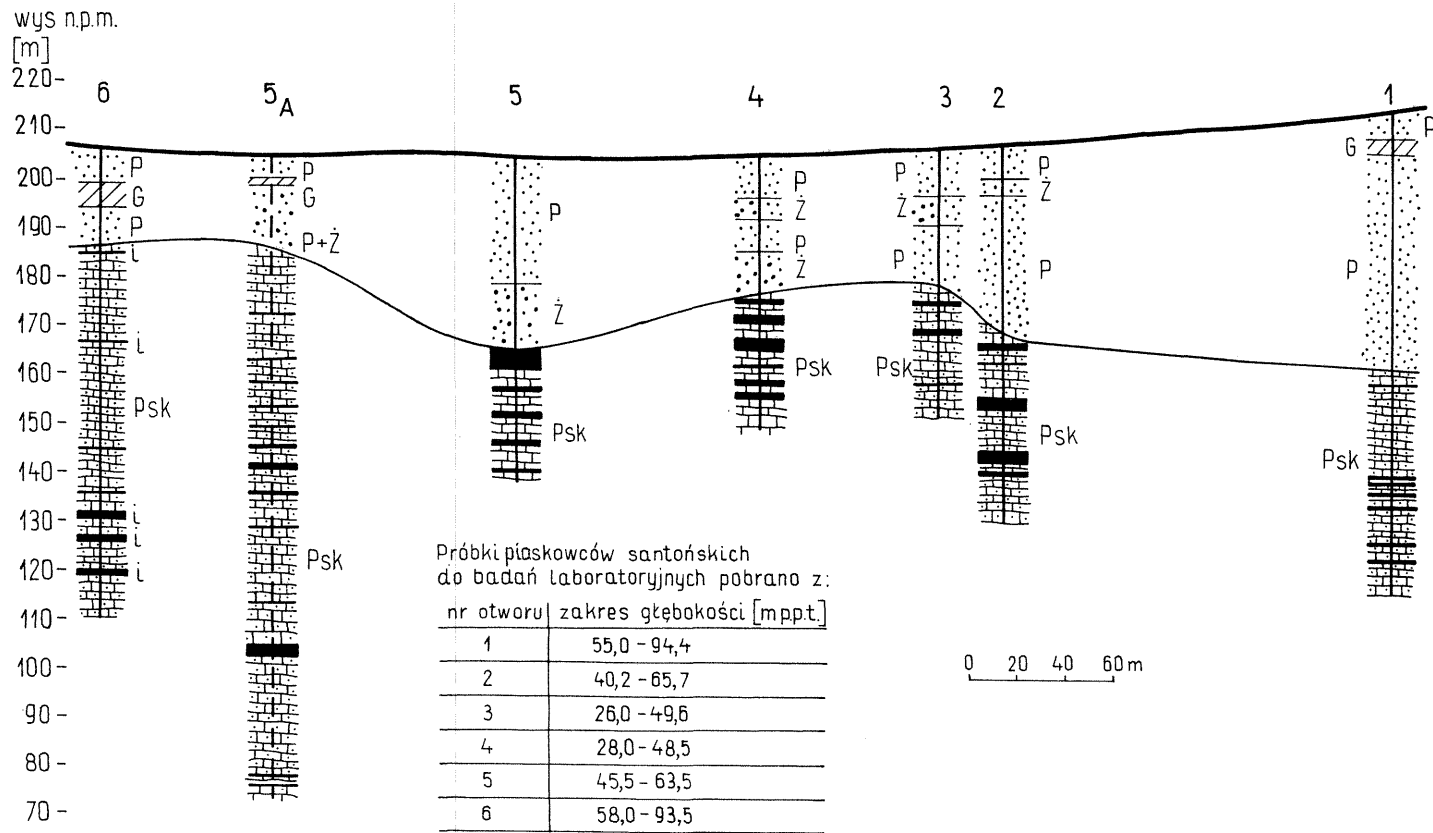


Fig. 1. Schematyczny przekrój geologiczno-litologiczny przez złożę ilów Bolko II (na podstawie materiałów archiwalnych Przedsiębiorstwa Geologicznego we Wrocławiu)

Schematic geologic-lithologic section of the clay deposit Bolko II (on the basis of archival data of the Geologic Enterprise, Wrocław)

Czwartorzęd: P – piaski, G – gliny, Ż – żwirzy; kreda, santon: i – wkładki ilów, Psk – piaskowce

Quaternary: P – sands, G – clays, Ż – gravels; Cretaceous, Santonian: i – inserts of clays, Psk – sandstones

Inżynierskiej Uniwersytetu Warszawskiego. W sumie zbadano rdzenie o łącznej długości 69 m. Do badań wytrzymałościowych udało się wyciąć 300 próbek rdzeni o średnicy ok. 85 mm, 80 próbek – płytek, 56 próbek – krążków i 30 próbek nieforemnych.

Niniejszy artykuł został przygotowany do druku na podstawie niepublikowanego opracowania nt. *Charakterystyka wytrzymałości i odkształcalności skał z wierceń badawczych na złożu Bolko II*, wykonanego przez zespół pod kierunkiem autora w Zakładzie Prac Geologicznych Uniwersytetu Warszawskiego.

Autor składa serdeczne podziękowanie Dyrekcji i Pracownikom Przedsiębiorstwa Geologicznego we Wrocławiu, którzy umożliwili przeprowadzić tego rodzaju badania; prof. drowi hab. Z. Glazerowi za konsultacje i wielokrotne dyskusje wyników badań oraz wszystkim Kolegom z Zakładu Mechaniki Gruntów i Fundamentowania Instytutu Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej UW za pomoc oraz udział w badaniach piaskowców kredowych, a w szczególności: doc. dr hab. J. Pinińskiej, mgrowi J. Wróblewskiemu, mgrowi A. Niedkowi, mgrowi H. Górcze, st. tech. J. Wewiórowi, st. tech. A. Kasprzakowi, st. tech. W. Ćwierzyńskiej oraz st. tech. B. Pamrowowi. Szczególne wyrazy wdzięczności należą się drowi J. Parafiniukowi z Instytutu Petrografii i Geochemii UW za opis petrograficzny szlifów mikroskopowych oraz st. tech. A. Lewandowskiemu za wykonanie szlifów.

## GEOLOGICZNE WARUNKI WYSTĘPOWANIA PIASKOWCÓW

Analizowane piaskowce i iły je przewarstwiające według J. Milewicza (1974, 1979) są wieku kredowego (santon). Próbkę do badań pochodzą z 6 otworów wiertniczych z głęb. 26,0–94,4 m p.p.t. (fig. 1). Makroskopowo piaskowce są różnoziarniste, jasnoszare, przeważnie słabo zwięzłe, przewarstwiane iłami kaolinowymi. Ziarna, głównie kwarcu, mają średnice od 0,1 do ponad 2 mm. Niekiedy w obrębie rdzenia o niewielkiej długości obserwuje się ziarna wszystkich średnic. Spoiwo ilaste ma charakter masy wypełniającej. Większe ziarna kwarcu lub skał krzemionkowych o średnicach 1–2 mm wykazują duży stopień obtoczenia, natomiast ziarna drobniejsze o wymiarach ułamka milimetra są bardziej kanciaste. Minerale akcesoryczne – przeważnie tlenki żelaza i łuszczyki – są rzadkie. Czasem spotyka się aglomeraty zawierające od kilku do kilkunastu ziarn mocniej scementowanych spoiwem krzemionkowym. Piaskowce mają tekstury liniowe, podkreślone ułożeniem wydłużonych ziarn oraz smug grubszego i drobniejszego materiału. Tekstur tych generalnie nie obserwuje się w piaskowcach gruboziarnistych i zlepieńcowatych. Badania mikroskopowe wskazują, że wszystkie analizowane piaskowce są zbudowane z materiału pokrewnego genetycznie. Świadczy o tym analogiczny skład mineralny okruchów. Różnice dotyczą głównie wymiarów ziarn. Piaskowce mieszczą się przede wszystkim między piaskowcami średnioziarnistymi a zlepieńcowatymi. Cechą charakterystyczną tych skał jest słaba zwięzłość i wysoka porowatość wszystkich odmian.

Piaskowce są spękane. Najczęściej są to spękania poziome, w szczególności na granicach litologicznych, na przewarstwieniach z iłami kaolinowymi. Obserwuje się również na rdzeniach spękania pionowe typu ciosu. Oprócz przestrzennej orientacji spękań istotne znaczenie ma liczba spękań w stosunku do rozpatrywanej długości czy powierzchni. Wzrost zagęszczenia spękań zmniejsza wytrzymałość i zwiększa odkształcalność masywu.

Tabela 1

## Charakterystyka spękań masywu skalnego na podstawie pomiarów rdzeni wiertniczych

| Numer otworu      | Zakres głębokości (m p.p.t.) | Długość wszystkich fragmentów rdzeni (cm) | Uzysk rdzenia $U$ (%) | Wskaźnik szczelinowatości liniowej |      |       | Wskaźnik jakości masywu Deere'a |       |       | Wskaźnik spękania Hansagi'ego (wg pomiarów rdzeni) |     |        |     |      |      | Skorygowany wskaźnik Hansagi'ego $C_s$ |
|-------------------|------------------------------|---|-----------------------|------------------------------------|------|-------|---------------------------------|-------|-------|--|-----|--------|-----|------|------|--|
|                   |                              |   |                       | $N$                                | $L$  | $S_z$ | $L_p$                           | $L_t$ | $RQD$ | $p$  | $H$ | $k$    | $n$ | $S$  | $C$  |  |
| 34 – IV           | 55,0 – 94,4                  | 1397                                      | 96                    | 103                                | 14,5 | 7/m   | 847                             | 1450  | 58    | 103  | 8,4 | 1159   | 65  | 1450 | 0,30 | 0,16                                   |
| 35 – II           | 26,0 – 49,6                  | 832                                       | 92                    | 59                                 | 9    | 7/m   | 460                             | 900   | 51    | 62   | 8,4 | 692,5  | 37  | 900  | 0,30 | 0,17                                   |
| 35,5 – III        | 40,2 – 65,7                  | 898,5                                     | 94                    | 78                                 | 9,6  | 8/m   | 347                             | 960   | 36    | 54   | 8,4 | 619    | 39  | 960  | 0,24 | 0,16                                   |
| 36 – II           | 28,0 – 48,5                  | 775,5                                     | 83                    | 84                                 | 9,3  | 9/m   | 187,5                           | 930   | 20    | 38   | 8,4 | 425    | 27  | 930  | 0,18 | 0,11                                   |
| 37 – II           | 45,5 – 63,5                  | 1015,5                                    | 91                    | 63                                 | 11,1 | 6/m   | 669,5                           | 1110  | 60    | 80   | 8,4 | 840,5  | 44  | 1110 | 0,31 | 0,19                                   |
| 37 – IV           | 58,0 – 93,5                  | 1409,5                                    | 92                    | 123                                | 15,4 | 8/m   | 720,5                           | 1540  | 47    | 104  | 8,5 | 1074,5 | 58  | 1540 | 0,29 | 0,15                                   |
| Dla całego masywu |                              | 6328                                      | 92                    | 510                                | 68,9 | 7/m   | 3231,5                          | 6890  | 47    | 441  | 8,4 | 4810,5 | 270 | 6890 | 0,27 | 0,15                                   |

Wskaźnik porowatości szczelinowej  $K_s = 100 - U = 100 - 92 = 8\%$ ; stopień szczelinowatości Niejsztadta: silny; skorygowany wskaźnik Hansagi'ego obliczono według faktycznej liczby wyciętych próbek, przy  $p = 243$  próbki

Pomiary rdzeni wiertniczych pozwalają na określenie:

– uzysku rdzenia  $U$ ;

– wskaźnika szczelinowatości liniowej  $S_z = \frac{N}{L}$ , gdzie:  $N$  – liczba spękań,

$L$  – długość linii rozpoznania;

– wskaźnika jakości masywu Deere'a  $RQD = \frac{L_p}{L_t}$ , gdzie:  $L_p$  – sumaryczna długość odcinków rdzenia, wynosząca powyżej  $2d$  ( $d$  – średnica rdzenia),  $L_t$  – całkowita długość rdzenia (D.U. Deere, 1963);

– wskaźnika spękania Hansagi'ego – faktora kiruńskiego –  $C = \frac{1}{2S}$

$\left(pH + \frac{k}{n}\right)$ , gdzie:  $p$  – liczba próbek cylindrycznych przewidywanych do badania  $R_c$ , którą można uzyskać z rdzenia o długości  $S$ ;  $H$  – wysokość próbki cylindrycznej;  $k$  – sumaryczna długość fragmentów rdzenia o długości większej od średnicy;  $n$  – liczba odcinków rdzenia o długości większej od średnicy (J. Hansagi, 1974).

Wyniki pomiarów dla poszczególnych otworów wiertniczych<sup>1</sup> zostały przedstawione w tab. 1 i na fig. 2. Średnie wartości wymienionych parametrów charakteryzujących szczelinowatość masywu piaskowców przedstawiają się następująco:  $U = 92\%$ ,  $S_z = 7/m$ ,  $RQD = 47\%$ ,  $C = 0,27$  oraz skorygowany wskaźnik Hansagi'ego  $C_s = 0,15$  i wskaźnik porowatości szczelinowej Niejsztadta  $K_s = 100 - U = 8\%$  (L.I. Niejsztadt, 1957).

Wskaźnik spękania Hansagi'ego ( $C$ ) obliczono dwoma sposobami. W pierwszym przyjęto dane z pomiarów rdzeni piaskowców, dotyczące liczby przewidywanych (potencjalnych) próbek do badań wytrzymałości na ściskanie. Drugim sposobem obliczono wartość skorygowanego wskaźnika ( $C_s$ ) już na podstawie konkretnie uzyskanej liczby próbek, których użyto do badań wytrzymałościowych. Zmniejszenie wartości wskaźnika Hansagi'ego z 0,27 do 0,15 również świadczy o zachowaniu się piaskowców przy obróbce mechanicznej (ukryte spękania). Prawie dwukrotne zmniejszenie wskaźnika poważnie wpływa na wytrzymałość masywu skalnego.

Przyjmuje się często, że wytrzymałość masywu skalnego ( $R_{cM}$ ) jest funkcją wskaźnika spękania Hansagi'ego ( $C$ ) i wytrzymałości na ściskanie próbki ( $R_c$ ):

$$R_{cM} = R_c \cdot C$$

Pozostałe wskaźniki, tj. szczelinowatości liniowej, jakości masywu, porowatości szczelinowej, świadczą również o znacznym osłabieniu masywu skalnego przez spękania. Wskaźnik Niejsztadta  $K_s = 8\%$  wskazuje na silny stopień szczelinowatości. Wskaźnik Deere'a  $RQD = 47\%$  świadczy o złej jakości masywu. Ma on tę wadę, że nie daje obrazu rozkładu przestrzennego poszczególnych długości rdzenia. Na fig. 2 przedstawiono krzywą kumulacyjną długości rdzenia, przy czym ustalono również wartość mediany odpowiadającej 50% analizowanego zbioru. Wartość powyższą określa moduł średnich spękań, który w przypadku piaskowców kredowych wynosi 12 cm. Należy podkreślić, że przedstawione parametry zależą w dużej mierze od sposobu i jakości wiercenia.

<sup>1</sup> Szczegółowe wyniki wszystkich obserwacji przeprowadzonych na rdzeniach piaskowców kredowych są zawarte w opracowaniu R. Kaczyńskiego i in. (1985).

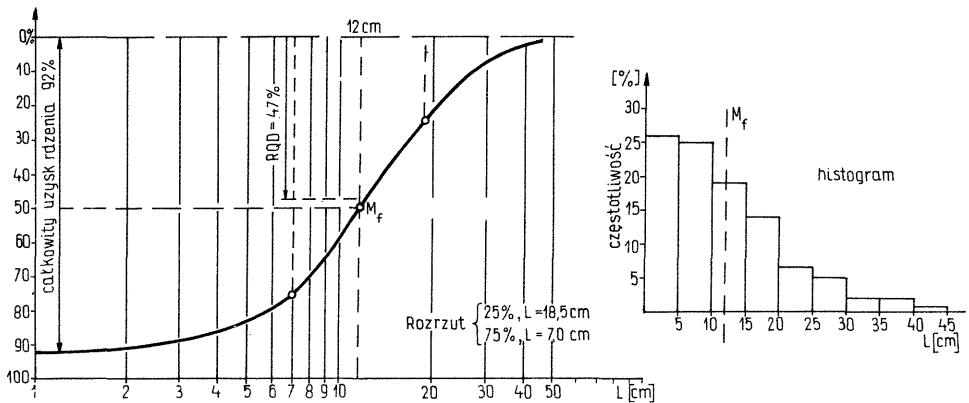


Fig. 2. Charakterystyka stopnia spękania masywu skalnego za pomocą rozkładu długości rdzeni  
Description of fissuring of a rock body with distribution of core lengths

$RQD$  – wskaźnik jakości masywu Deere'a,  $M_f$  – moduł średnich spękań,  $L$  – długość rdzenia  
 $RQD$  – rock quality designation of Deere,  $M_f$  – modulus of mean fissures,  $L$  – length of cores

Dla kompleksowej, inżyniersko-geologicznej oceny masywu A. Kidybiński (1982) zaleca stosować wskaźnik  $Q$  (wg N. Barton i in., 1974), który obejmuje sześć najistotniejszych parametrów masywu:

$$Q = \frac{RQD}{I_n} \cdot \frac{I_r}{I_a} \cdot \frac{I_w}{SRF}$$

gdzie:  $RQD$  – wskaźnik jakości masywu Deere'a,  $I_n$  – wskaźnik liczby systemów spękań,  $I_r$  – wskaźnik szorstkości szczelin,  $I_a$  – wskaźnik zwietrzenia ścianek szczelin,  $I_w$  – wskaźnik zawodnienia,  $SRF$  – wskaźnik odprężenia masywu.

Orientacyjnie wartość  $Q$ , przy przyjęciu  $RQD = 47\%$ ,  $I_n = 5$ ,  $I_r = 1,5$ ,  $I_a = 5$ ,  $I_w = 1$  i  $SRF$  od 5 do 10, wyniesie od 0,1 do 1. Wartość  $Q$  zmienia się ogólnie w bardzo szerokim przedziale 0,001–1000 i obejmuje ok. 300 000 kombinacji geologicznych. Na podstawie jego można zaliczyć masyw piaskowców kredowych do masywów bardzo słabych (*very poor*).

## WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE PIASKOWCÓW

Zbadano gęstość właściwą, gęstość objętościową w stanie powietrzno-suchym i w stanie pełnego nasycenia wodą oraz nasiąkliwość wagową. Poszczególne rodzaje piaskowców nie wykazują w zasadzie wyraźnego zróżnicowania analizowanych cech. Można uznać badane skały za jedną warstwę geotechniczną. Konkretny wyniki przedstawiają się następująco:

- gęstość właściwa (na podstawie 18 oznaczeń) waha się w granicach 2,58 – 2,68, śr.  $2,64 \pm 0,03$  ( $\cdot 10^3$  kg/m<sup>3</sup>), przy współczynniku zmienności  $V = 1\%$ ;
- gęstość objętościowa w stanie powietrzno-suchym (240 oznaczeń) waha się w granicach 1,67 – 2,17, śr.  $1,90 \pm 0,085$  ( $\cdot 10^3$  kg/m<sup>3</sup>), przy współczynniku zmienności  $V = 4,5\%$ ;

– gęstość objętościowa w stanie pełnego nasycenia wodą (105 oznaczeń) zmienia się w granicach 1,93–2,24, śr.  $2,05 \pm 0,066$  ( $\cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ ), przy współczynniku zmienności  $V = 3,2\%$ ;

– nasiąkliwość wagowa zmienia się w zakresie 5,3–15,5, śr.  $9,3 \pm 1,86\%$ , przy współczynniku zmienności  $V = 20,0\%$ ;

– porowatość wynosi średnio 28%.

Piaskowce kredowe ze względu na gęstość objętościową można zaliczyć do skał średniociężkich, natomiast z uwagi na nasiąkliwość do średnionasiąkliwych (PN-84/B-01080).

## CHARAKTERYSTYKA WYTRZYMAŁOŚCIOWA PIASKOWCÓW

Dotychczas o właściwościach masywu skalnego wnioskowano przede wszystkim na podstawie próbek skalnych. Wytrzymałość piaskowców ustalono na podstawie badań rdzeni o średnicy ( $d$ ) równej wysokości ( $d = h = 85 \text{ mm}$ ). Metodyka badań była zgodna z *Wytycznymi Międzynarodowego Biura Mechaniki Górniczej ...* H. Pför (1975), polskimi i branżowymi normami oraz wytycznymi Głównego Instytutu Górniczego. Przede wszystkim określono wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie, rozciąganie, zginanie i ścinanie.

### WYTRZYMAŁOŚĆ NA JEDNOOSIOWE ŚCISKANIE

Badania wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie wykonano na 60 próbkach w stanie powietrzno-suchym i na 30 próbkach w stanie pełnego nasycenia wodą. Próbki ścismano bez podkładek z prędkością obciążania  $0,5 \text{ MPa/s}$  w prasie wytrzymałościowej *ZD-10*. Maksymalne wartości siły ścisnącej nie przekraczały

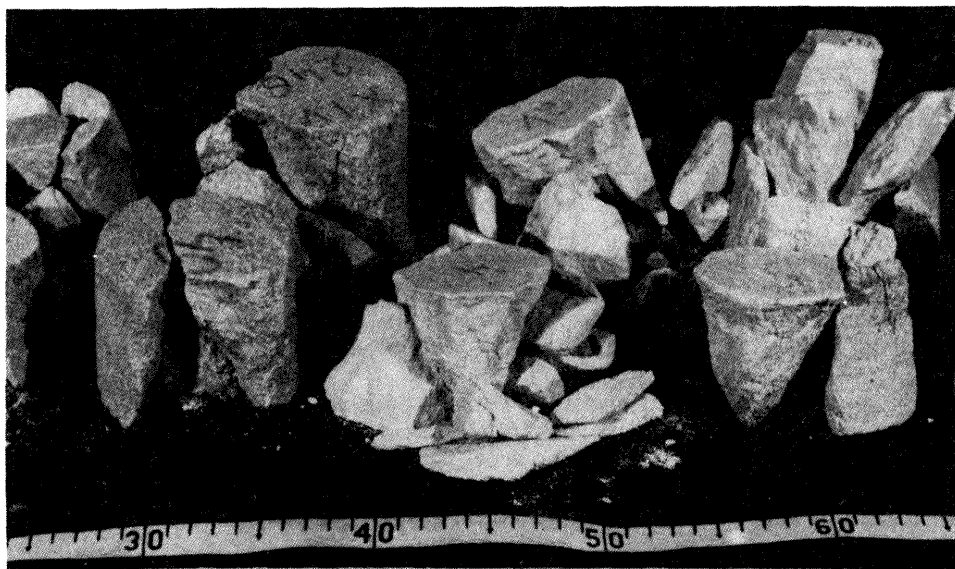


Fig. 3. Charakter zniszczenia próbek piaskowców podczas jednoosiowego ściskania. Fot. A. Niedek  
Destruction of sandstone samples during uniaxial compressive stress. Photo A. Niedek

Tabela 2

## Wytrzymałość na ściskanie piaskowców w stanie powietrzno-suchym

| Piaskowce        | Gęstość objętościowa<br>$10^3$ (kg/m <sup>3</sup> )      | Wytrzymałość na ściskanie<br>$R_{cs}$ (MPa) | Moduł odkształcenia<br>$E_{os}$ (MPa) | Współczynnik Poissona<br>$\nu$  | Moduł sprężystości<br>$E_{ss}$ (MPa) |
|------------------|--|---|---------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|
| Zlepieńcowate    | 1,83–2,10<br>$\bar{x} = 1,94$<br>$S_x = 0,06$<br>$V = 3$ | 3,4–11,6<br>6,7<br>2,3<br>35                | 571–2148<br>1131<br>497<br>44         | 0,14–0,46<br>0,28<br>0,11<br>38 | 813–9025<br>2640<br>2132<br>81       |
| Gruboziarniste   | 1,81–1,94<br>$\bar{x} = 1,86$<br>$S_x = 0,03$<br>$V = 2$ | 2,5–12,4<br>6,9<br>2,5<br>36                | 744–3559<br>1518<br>729<br>48         | 0,18–0,37<br>0,30<br>0,06<br>20 | 1200–10 435<br>3016<br>2275<br>75    |
| Średnioziarniste | 1,74–1,97<br>$\bar{x} = 1,85$<br>$S_x = 0,06$<br>$V = 3$ | 2,5–10,6<br>6,6<br>2,1<br>32                | 106–2935<br>1350<br>657<br>49         | 0,13–0,35<br>0,25<br>0,07<br>30 | 836–9020<br>3288<br>2157<br>66       |

$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum x_i$  – średnia arytmetyczna;  $S_x = \left[ \frac{1}{N} \sum (x_i - \bar{x})^2 \right]^{1/2}$  – odchylenie standardowe;  $V = \frac{S_x}{\bar{x}} \cdot 100$  – współczynnik zmienności (%);  $N$  – liczba oznaczeń

$7 \cdot 10^4$  N. Kierunek ściskania był zgodny z osią rdzenia. Próbkki piaskowców w trakcie ściskania zachowywały się w większości przypadków w sposób klasyczny. Po zniszczeniu próbek obserwowano często w podstawie górnej i dolnej wyraźne stożki (fig. 3). Podczas rozpadu próbek piaskowców powstało dużo materiału sypkiego i drobnych okruchów. Przy ścisaniu próbek obserwowano powstawanie spękań i szczelin przed osiągnięciem maksymalnej wartości siły. Próbkki piaskowców reagują akustycznie już przy 60–70% maksymalnego obciążenia. Wczesne notowanie odpowiednich dźwięków – trzasków oznaczało najczęściej dość szybkie zniszczenie próbek.

Wytrzymałość na ściskanie piaskowców ( $R_{cs}$ ) w stanie powietrzno-suchym (tab. 2) waha się w granicach 2,5–12,4, śr.  $6,8 \pm 2,3$  MPa, przy współczynniku zmienności  $V = 34\%$ . Średnie wytrzymałości na ściskanie piaskowców zlepieńcowatych, grubo- i średnioziarnistych są zbliżone i wynoszą odpowiednio 6,7, 6,9 i 6,6 MPa.

W pierwszym etapie nasycania wodą – podsiąkania kapilarnego – następuje jedynie łuszczenie się powierzchni próbek oraz zaokrąglenie ich krawędzi. Dotyczy to przede wszystkim piaskowców średnioziarnistych z wkładkami ilów lub lepiszczem wyraźnie ilastym. Próbkki piaskowców w tym stanie ulegały zatem zniszczeniu w sposób „łagodny”. W stanie pełnego nasycenia wodą wytrzymałość na ściskanie piaskowców (tab. 3) zmienia się w zakresie 1–13, śr.  $4,5 \pm 2,0$  MPa, przy współczynniku zmienności  $V = 44\%$ .

Zmienność wytrzymałości na ściskanie piaskowców w stanie pełnego nasycenia jest większa od zmienności wytrzymałości w stanie powietrzno-suchym. Jeżeli



Tabela 3

## Wytrzymałość na ściskanie piaskowców w stanie pełnego nasycenia wodą

| Piaskowce        | Gęstość objętościowa w stanie pow.-suchym $10^3(\text{kg}/\text{m}^3)$ | Gęstość objętościowa w stanie nasycenia $10^3(\text{kg}/\text{m}^3)$ | Nasiąkliwość wagowa (%)       | Wytrzymałość na ściskanie $R_{cn}$ (MPa) | Moduł odkształcenia $E_{on}$ (MPa) | Współczynnik Poissona           | Moduł sprężystości $E_{sn}$ (MPa) |
|------------------|--|--|-------------------------------|--|------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| Zlepieńcowate    | 1,75–2,02<br>$\bar{x} = 1,95$<br>$S_x = 0,07$<br>$V = 4$               | 1,95–2,16<br>2,10<br>0,03<br>2                                       | 7,0–11,7<br>8,8<br>1,4<br>15  | 1,8–8,1<br>5,0<br>1,7<br>34              | 326–2604<br>1119<br>761<br>68      | 0,34–0,43<br>0,38<br>0,03<br>8  | 1000–3717<br>1970<br>849<br>43    |
| Gruboziarniste   | 1,79–2,02<br>$\bar{x} = 1,90$<br>$S_x = 0,07$<br>$V = 4$               | 2,00–2,17<br>2,09<br>0,05<br>3                                       | 7,4–11,9<br>9,6<br>1,3<br>13  | 2,2–13,0<br>5,6<br>3,0<br>54             | 463–3809<br>1308<br>986<br>75      | 0,26–0,41<br>0,34<br>0,05<br>14 | 744–4808<br>2551<br>1584<br>62    |
| Średnioziarniste | 1,67–2,00<br>$\bar{x} = 1,80$<br>$S_x = 0,10$<br>$V = 6$               | 1,93–2,16<br>2,04<br>0,08<br>4                                       | 8,2–15,4<br>11,7<br>2,1<br>18 | 1,0–4,4<br>2,8<br>1,1<br>37              | 446–1555<br>892<br>332<br>37       | 0,27–0,41<br>0,36<br>0,05<br>14 | 845–1569<br>1110<br>272<br>25     |

Objaśnienia jak przy tab. 2

w obliczeniach średniej wytrzymałości nie uwzględnimy 4 wyników najbardziej odbiegających, to otrzymamy znacznie mniejszą zmienność rzędu 24%, przy średniej wytrzymałości na ściskanie 4,2 MPa. Z uwagi na wytrzymałość na ściskanie analizowane piaskowce są zatem skałami o bardzo małej wytrzymałości (PN-84/B-01080).

Zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie wskutek nasycenia wodą wyraża współczynnik rozmiękczenia  $r_1 = R_{cn} : R_{cs}$ ; dla badanych piaskowców  $4,5:6,8 = 0,66$ . Oznacza to, że pod wpływem nasycenia wodą wytrzymałość piaskowców może się zmniejszyć o 34%. Z uwagi na tę ostatnią wartość analizowane piaskowce należy uznać za silnie miękkące.

## WYTRZYMAŁOŚĆ NA ROZCIĄGANIE

Badania wytrzymałości na rozciąganie wykonano na 60 próbkach piaskowców w stanie powietrzno-suchym i pełnego nasycenia wodą (fig. 4). Przeprowadzono je metodą „brazylijską” (rozłupywania), polegającą na ściskaniu po tworzącej próbek w kształcie walca. Siła rozciągająca powstaje w osiowym przekroju próbki prostopadle do obciążenia ściskającego. Prędkość obciążenia wynosiła 0,05 MPa/s. Wytrzymałość na rozciąganie określono ze wzoru:

$$R_r = \frac{2P}{\pi F}$$

gdzie:  $P$  – maksymalna wartość przyłożonej siły, odpowiadająca chwili rozdzielnego pęknięcia próbki;  $F$  – pole powierzchni przekroju (rozłamu) równe iloczynowi średnicy i wysokości próbki.

Tabela 4

## Wytrzymałość na rozciąganie piaskowców w stanie powietrzno-suchym

| Piaskowce        | Gęstość<br>objętościowa<br>$10^3 \text{ (kg/m}^3\text{)}$  | Wytrzymałość na<br>rozciąganie<br>$R_{rr}$ (MPa) |
|------------------|--|--|
| Zlepieńcowate    | 1,91 – 2,07<br>$\bar{x} = 1,97$<br>$S_x = 0,08$<br>$V = 4$ | 0,38 – 1,11<br>0,63<br>0,24<br>39                |
| Gruboziarniste   | 1,75 – 2,02<br>$\bar{x} = 1,82$<br>$S_x = 0,09$<br>$V = 5$ | 0,32 – 1,37<br>0,65<br>0,30<br>47                |
| Średnioziarniste | 1,69 – 1,93<br>$\bar{x} = 1,86$<br>$S_x = 0,08$<br>$V = 4$ | 0,41 – 1,35<br>0,83<br>0,28<br>34                |

Liczba zbadanych próbek  $3 \cdot 10 = 30$ ; pozostałe objaśnienia jak przy tab. 2



Fig. 4. Charakter zniszczenia próbek piaskowców podczas rozciągania. Fot. A. Nidek  
Destruction of sandstone samples during tension. Photo A. Nidek

Tabela 5

Wytrzymałość na rozciąganie piaskowców w stanie pełnego nasycenia wodą

| Piaskowce        | Gęstość<br>objęt. w<br>stanie<br>pow.-such.<br>$\cdot 10^3$ (kg/m <sup>3</sup> ) | Gęstość<br>objęt. w<br>stanie<br>nasyconym<br>$\cdot 10^3$ (kg/m <sup>3</sup> ) | Nasiąkliwość<br>wagowa<br>(%) | Wytrzyma-<br>łość na<br>rozciąganie<br>$R_{ru}$ (MPa) |
|------------------|--|---|-------------------------------|---|
| Zlepieńcowate    | 1,82–1,98<br>$\bar{x} = 1,88$<br>$S_x = 0,05$<br>$V = 3$                         | 1,96–2,13<br>2,04<br>0,05<br>3  | 5,3–9,9<br>8,6<br>1,4<br>16   | 0,18–0,65<br>0,36<br>0,15<br>42                       |
| Gruboziarniste   | 1,78–2,10<br>$\bar{x} = 1,89$<br>$S_x = 0,09$<br>$V = 5$                         | 1,98–2,12<br>2,06<br>0,05<br>2  | 6,2–13,6<br>9,9<br>2,3<br>23  | 0,15–0,61<br>0,34<br>0,16<br>48                       |
| Średnioziarniste | 1,78–2,12<br>$\bar{x} = 1,97$<br>$S_x = 0,15$<br>$V = 7$                         | 1,97–2,15<br>2,06<br>0,06<br>3  | 8,9–13,0<br>11,4<br>1,3<br>12 | 0,05–0,69<br>0,36<br>0,21<br>58                       |

Liczba zbadanych próbek  $3 \cdot 10 = 30$ ; pozostałe objaśnienia jak przy tab. 2

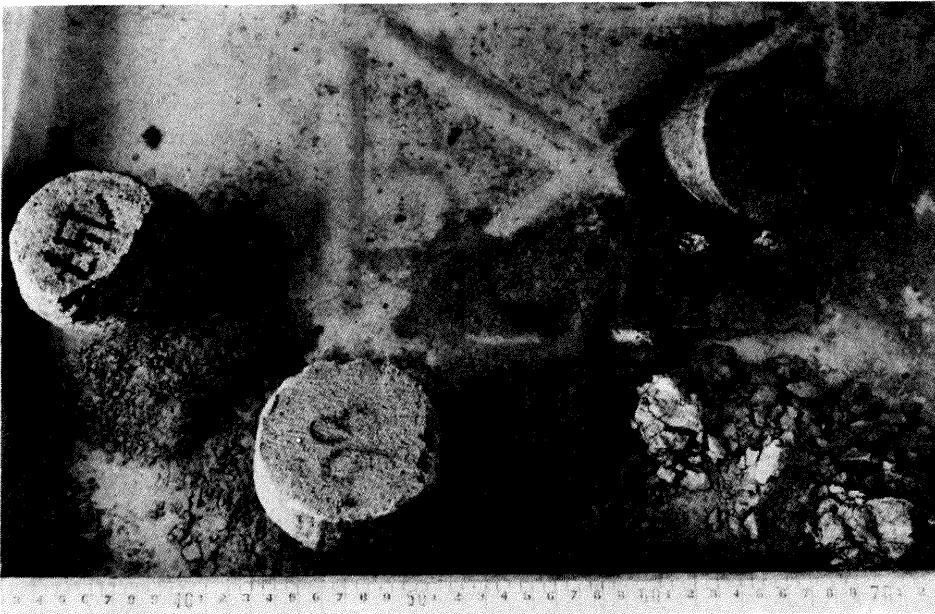


Fig. 5. Rozpad piaskowców podczas nasycania wodą. Fot. A. Niedek  
Disintegration of sandstones during saturation with water. Photo A. Niedek

Wytrzymałość na rozciąganie piaskowców w stanie powietrzno-suchym ( $R_{rs}$ ) waha się w granicach 0,32–1,37, śr.  $0,70 \pm 0,29$  MPa, przy współczynniku zmienności  $V = 42\%$ . Dla piaskowców zlepieńcowatych, grubo- i średnioziarnistych średnia wytrzymałość na rozciąganie wynosi odpowiednio 0,63, 0,65 i 0,83 MPa (tab. 4).

Podczas nasycania wodą piaskowców średnioziarnistych z przewarstwieniami ilów w trakcie badań wytrzymałości na rozciąganie ( $R_{rn}$ ) 4 próbki uległy całkowitemu rozpadowi (fig. 5), natomiast w kilku przypadkach następowały częściowe deformacje. W stanie pełnego nasycenia wytrzymałość na rozciąganie zmienia się w zakresie 0,05–0,69, śr.  $0,35 \pm 0,17$  MPa, przy współczynniku zmienności  $V = 49\%$  (tab. 5).

Wpływ wody na wytrzymałość na rozciąganie piaskowców obrazuje współczynnik  $r_2 = R_{rn} : R_{rs} = 0,35 : 0,70 = 0,50$ .

Przedstawione wyniki świadczą o większym wpływie wody na wytrzymałość na rozciąganie aniżeli na wytrzymałość na ściskanie badanych piaskowców.

#### WYTRZYMAŁOŚĆ NA ZGINANIE

Badania wytrzymałości na zginanie piaskowców przeprowadzono dwiema metodami: łamania rdzeni wiertniczych oraz ściskania krążków. Metoda łamania polegała na ścisaniu próbki walcowej (rdzenia wiertniczego) umieszczonej między płytami stalowymi na odpowiednich podporach stalowych (fig. 6). Badania prowa-

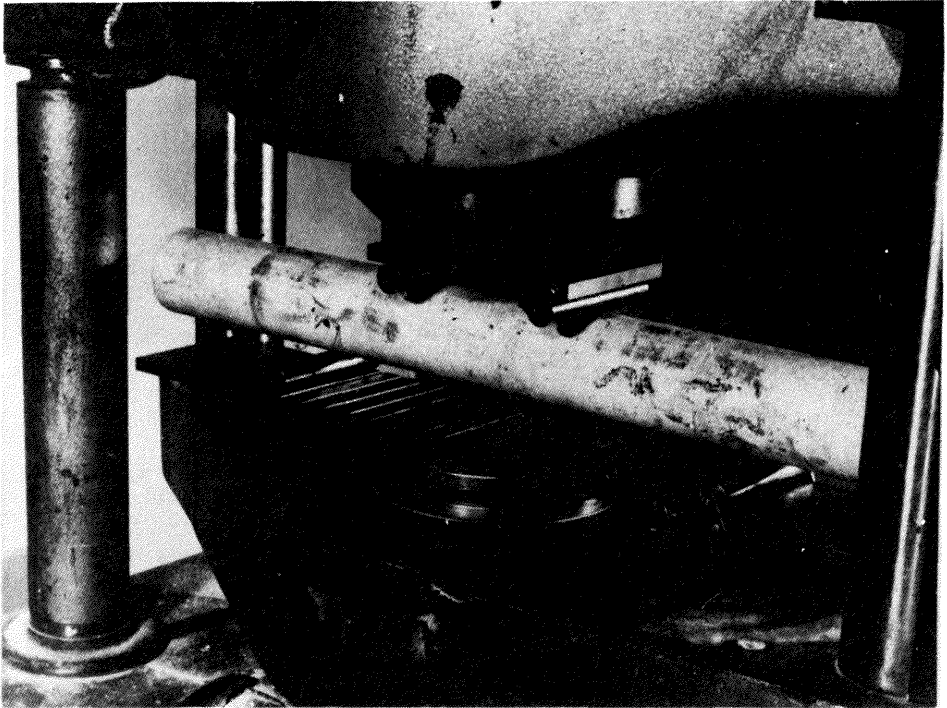


Fig. 6. Przyrząd do badania zginania skał. Fot. A. Niedeck  
Apparatus for studies of rock bending. Photo A. Niedeck



Fig. 7. Charakter powierzchni próbek piaskowców po badaniu zginania. Fot. A. Niedek  
Surface of sandstone samples after studies of bending. Photo A. Niedek

dzono w stanie powietrzno-suchym i w stanie pełnego nasycenia wodą. Prędkość przyrostu obciążenia wynosiła 0,1 MPa/s. Kierunek przyłożenia obciążenia był prostopadły do osi rdzenia. Do badań wytypowano 30 odpowiedniej długości rdzeni. Większej liczby próbek nie uzyskano, ponieważ rdzenie piaskowców były zbyt gęsto spękane. Wytrzymałość na zginanie dla schematu 2-punktowego podparcia obliczono ze wzoru:

$$R_{g1} = \frac{16Pe}{\pi d^3}$$

gdzie:  $P$  – wartość siły niszczącej w chwili pęknięcia rdzenia,  $e$  – odległość miejsca pęknięcia próbki od bliższej podpory,  $d$  – średnica próbki.

Charakter zniszczenia w wyniku zginania przedstawia fig. 7.

Metodą ściskania krążków zbadano 56 próbek wyciętych z rdzenia wiertniczego piaskowców różnoziarnistych w stanie powietrzno-suchym. Próbkę umieszczano centrycznie na pierścieniu dolnym (o większej średnicy) i nakryto (również centrycznie) pierścieniem górnym (o mniejszej średnicy). Przyrząd (fig. 8) do badania krążków wykonano oraz metodykę badań przyjęto według zasad podanych w pracy A. Kidybińskiego (1982). Prędkość obciążania wynosiła około 1 N/s. Wytrzymałość na zginanie obliczono ze wzoru:

$$R_{g2} = K \frac{P}{h^2}$$

gdzie:  $P$  – krytyczna wartość siły,  $h$  – wysokość krążka,  $K$  – współczynnik zależny od stosunku średnic dolnego i górnego pierścienia i liczby Poissona badanej skały;  $K$  waha się w granicach 0,65 – 0,75.

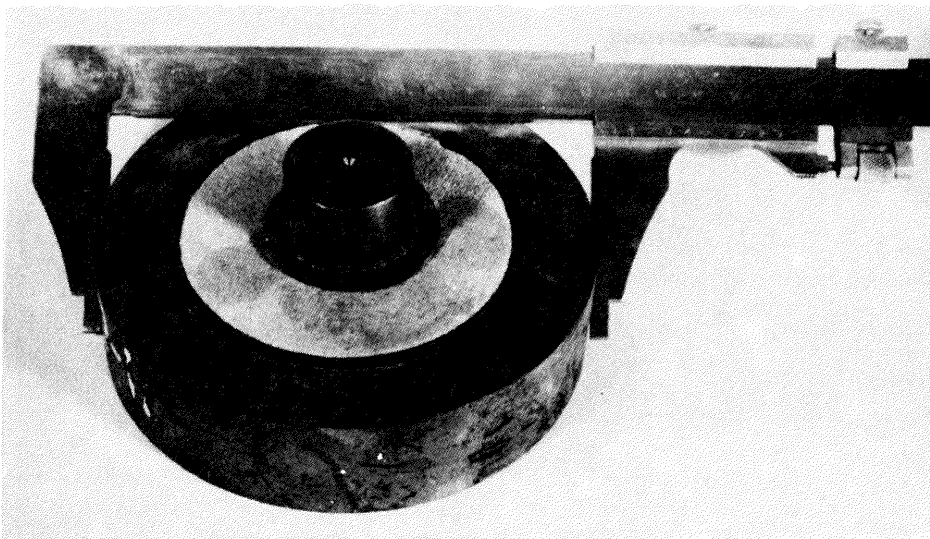


Fig. 8. Przyrząd do badania zginania. Metoda krążków. Fot. A. Niedeck  
Apparatus for studies of bending. Circle method. Photo A. Niedeck

Według metody łamania rdzeni wiertniczych wytrzymałość na zginanie piaskowców w stanie powietrzno-suchym ( $R_{gs1}$ ) mieści się w granicach 0,28–1,84, śr.  $0,93 \pm 0,35$  MPa, przy współczynniku zmienności  $V = 59\%$ , a w stanie pełnego nasycenia wodą ( $R_{gs1}$ ) w granicach 0,06–1,70, śr.  $0,68 \pm 0,45$  MPa, przy współczynniku zmienności  $V = 66\%$ .

Według metody ściskania krążków wytrzymałość na zginanie ( $R_{gs2}$ ) wynosi średnio 4,8 MPa. Wartość ta jest zdecydowanie wyższa od wartości uzyskiwanych metodą łamania rdzeni wiertniczych. Prawdopodobnie jest to związane ze stosowaną grubością krążków. Była ona zbyt duża, wynikała bowiem z charakteru piaskowców. Niestety zbyt cienkie krążki ulegały podczas wycinania rozpadowi.

#### WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCINANIE

Wytrzymałość na ścinanie określono metodą ściskania skały umieszczonej w stalowych matrycach. Metoda ta pozwala na wyznaczenie oporu skały poddanej łącznemu działaniu naprężeń ściskających (prostopadłych do powierzchni ścinania) i ścinających (równoległych do powierzchni ścinania). Przeprowadzając badania pod różnymi kątami wymuszonej płaszczyzny ścinającej, można uzyskiwać wartość naprężeń ścinających przy różnych naprężeniach normalnych. Takie postępowanie pozwala wyznaczyć część obwiedni wytrzymałościowej oraz określić kąt tarcia wewnętrznego i spójność skały.

Badania wykonano na 100 próbkach walcowych (średnica = wysokości) umieszczonych w matrycach stalowych. Płaszczyzna ścinająca była nachylona pod trzema kątami ( $\alpha = 30, 45$  i  $60^\circ$ ) do kierunku działania siły ściskającej ( $P$ ). Siła ściskająca rozkłada się na dwie składowe: normalną do płaszczyzny ścinania ( $N$ ) oraz styczną do tej płaszczyzny ( $T$ ). Naprężenia normalne ( $\sigma$ ) i ścinające ( $\tau$ ) określono według wzorów podanych na fig. 9 i 10.

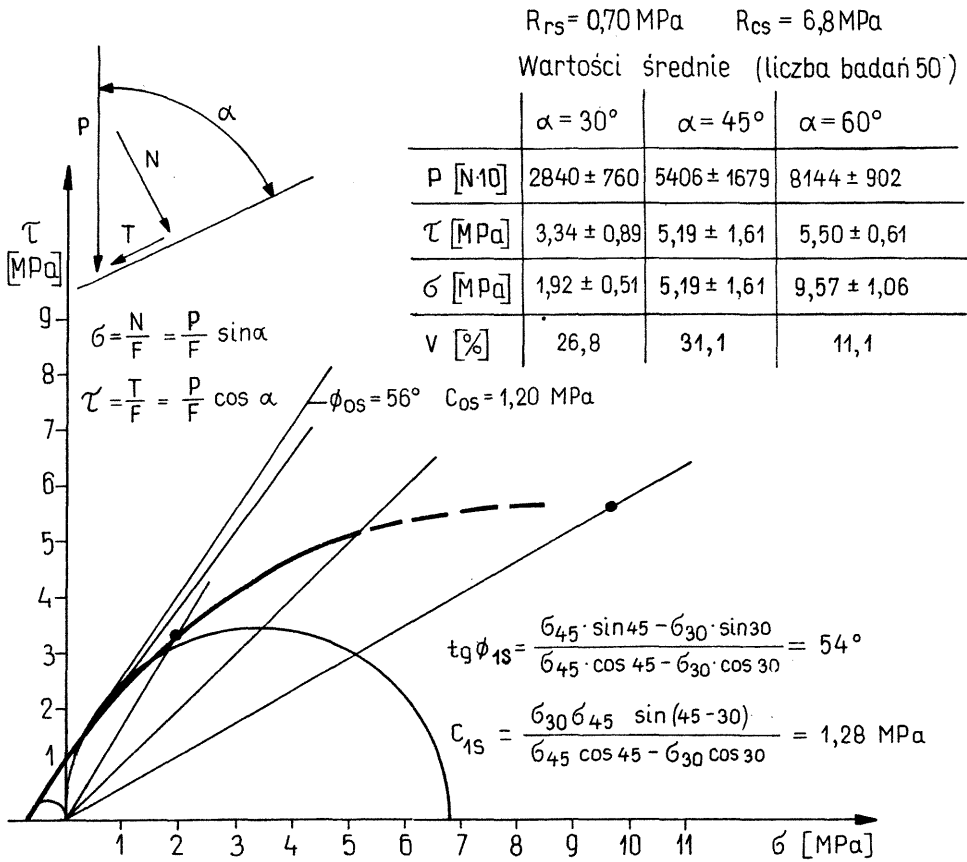


Fig. 9. Wytrzymałość na ścinanie piaskowców w stanie powietrzno-suchym; badanie w karetkach  
Shear strength of sandstones in air-dry state; analyses in boxes

$R_{rs}$  – wytrzymałość na rozciąganie w stanie powietrzno-suchym;  $R_{cs}$  – wytrzymałość na ściskanie w stanie powietrzno-suchym;  $\alpha$  – kąt nachylenia płaszczyzny ścinającej;  $P$  – kierunek działania siły ściskającej (kN);  $N$  – składowa normalna do płaszczyzny ścinania (kN);  $T$  – składowa styczna do płaszczyzny ścinania (kN);  $F$  – pole przekroju ( $\text{m}^2$ );  $\sigma$  – naprężenia normalne;  $\tau$  – naprężenia ścinające;  $\Phi_{1s}$ ,  $\Phi_{os}$  – kąty tarcia wewnętrzne w stanie powietrzno-suchym;  $C_{1s}$ ,  $C_{os}$  – spójność w stanie powietrzno-suchym;  $V$  – współczynnik zmienności

$R_{rs}$  – tensile strength in air-dry state;  $R_{cs}$  – compressive strength in air-dry state;  $\alpha$  – angle of shear plane;  $P$  – direction of compression force (kN);  $N$  – vector normal to shearing plane (kN);  $T$  – vector oblique to shearing plane (kN);  $F$  – section area ( $\text{m}^2$ );  $\sigma$  – normal stress;  $\tau$  – shear stress;  $\Phi_{1s}$ ,  $\Phi_{os}$  – angles of internal friction in air-dry state;  $C_{1s}$ ,  $C_{os}$  – cohesion in air-dry state;  $V$  – variation coefficient

Próbki piaskowców ściskano w prasie wytrzymałościowej z prędkością ok. 0,5 MPa/s. Dla każdego z trzech kątów nachylenia płaszczyzny ścinania wykonano po 15 oznaczeń dla stanu powietrzno-suchego i stanu pełnego nasycenia wodą.

Siły ściskające podczas zniszczenia próbek piaskowców, w zależności od kąta nachylenia płaszczyzny ścinania i wilgotności, ulegały zmianie. Współczynnik zmienności ( $V$ ) dla stanu powietrzno-suchego wynosił 11,1–31,1% i dla pełnego nasycenia wodą 30,3–45,4%.

Na fig. 9 i 10 zostały również naniesione w układzie  $\tau = f(\sigma)$  wytrzymałości na rozciąganie i jednoosiowe ściskanie oraz średnie wartości współrzędnych pod kątem 30, 45 i 60° w stosunku do nacisku.

$$R_{rn} = 0,35 \quad R_{cn} = 4,5 \text{ [MPa]}$$

Wartości średnie (liczba badań 47)

|                               | $\alpha = 30^\circ$ | $\alpha = 45^\circ$ | $\alpha = 60^\circ$ |
|-------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| $P \text{ [N}\cdot\text{10]}$ | $1603 \pm 625$      | $2913 \pm 1322$     | $4260 \pm 1290$     |
| $\tau \text{ [MPa]}$          | $1,88 \pm 0,73$     | $2,79 \pm 1,27$     | $2,88 \pm 0,87$     |
| $\sigma \text{ [MPa]}$        | $1,08 \pm 0,42$     | $2,79 \pm 1,27$     | $5,00 \pm 1,52$     |
| $V \text{ [%]}$               | 39,0                | 45,4                | 30,3                |

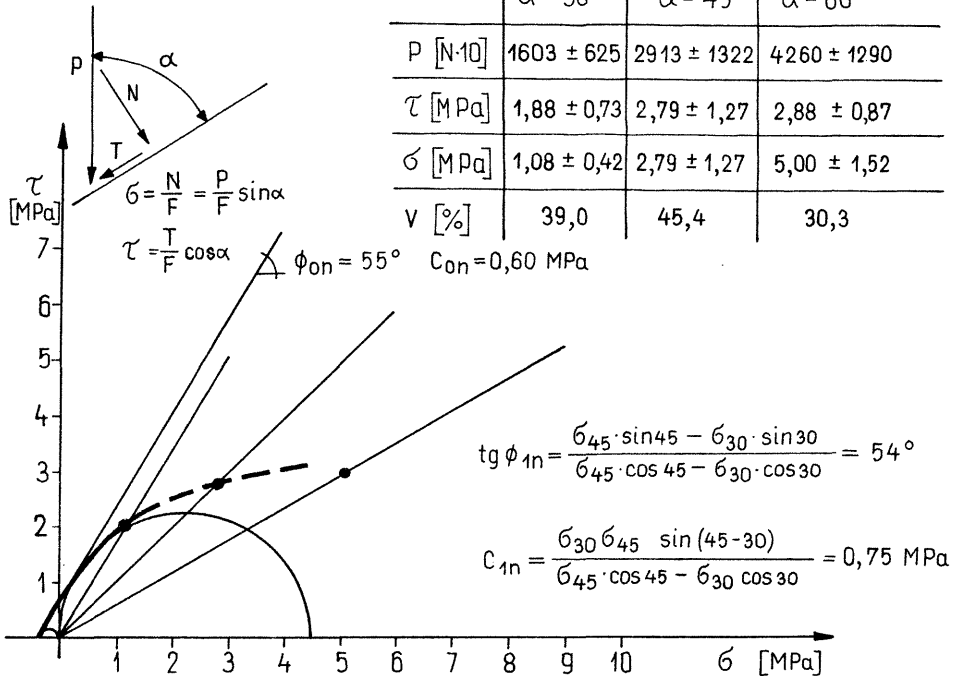


Fig. 10. Wytrzymałość na ścinanie piaskowców w stanie pełnego nasycenia; badanie w karetkach  
Shear strength of sandstones during full saturation; analyses in boxes

$R_{rn}$  – wytrzymałość na rozciąganie w stanie pełnego nasycenia wodą;  $R_{cn}$  – wytrzymałość na ścislenie w stanie pełnego nasycenia wodą;  $\Phi_{1n}$ ,  $\Phi_{on}$  – kąt tarcia wewnętrzznego w stanie pełnego nasycenia wodą;  $C_{1n}$ ,  $C_{on}$  – spójność w stanie pełnego nasycenia wodą; pozostałe objaśnienia jak na fig. 9

$R_{rn}$  – tensile strength during full saturation;  $R_{cn}$  – compressive strength during full saturation;  $\Phi_{1n}$ ,  $\Phi_{on}$  – angle of internal friction during full saturation;  $C_{1n}$ ,  $C_{on}$  – cohesion during full saturation; for other explanations see Fig. 9

Na podstawie badań wytrzymałości na ścinanie skał można ustalić kąt tarcia wewnętrzznego i spójność. Istnieje kilka sposobów określania tych parametrów. Najczęściej oblicza się je z wytrzymałości na rozciąganie i jednoosiowe ścislenie ( $\phi_0$ ,  $C_0$ ), jako styczną do kół Mohra, lub z parametrów otrzymanych z badań w stalowych matrycach ( $\phi_1$ ,  $C_1$ ).

Dla stanu powietrzno-suchego kąt tarcia wewnętrzznego piaskowców wynosi średnio  $\phi_{0s} = 56^\circ$ ,  $\phi_{1s} = 54^\circ$  i spójność  $C_{0s} = 1,20 \text{ MPa}$ ,  $C_{1s} = 1,28 \text{ MPa}$ , a dla stanu pełnego nasycenia kąt  $\phi_{0n} = 55^\circ$ ,  $\phi_{1n} = 54^\circ$  oraz  $C_{0n} = 0,60 \text{ MPa}$  i  $C_{1n} = 0,75 \text{ MPa}$ .

Wpływ wody na wytrzymałość na ścinanie dotyczy w zasadzie tylko spójności piaskowców. Ulega ona wyraźnemu obniżeniu –  $C_{0n}:C_{0s} = 0,60:1,20 = 0,50$ ;  $C_{1n}:C_{1s} = 0,75:1,28 = 0,58$ , natomiast kąt tarcia wewnętrzznego pozostaje bez zmian.



## OBWIEDNIA WYTRZYMAŁOŚCIOWA

W celu określenia zachowania się piaskowców przy szerszym zakresie obciążeń przeprowadzono cykl badań trójosiowego ściskania. Badania wykonano na 18 próbkach walcowych o wysokości 2 razy większej od średnicy (średnica 22 mm) w komorach wysokociśnieniowych produkcji OBRTG Warszawa. W komorach tych, tak jak w komorze Franklina, ciśnienie poziome (1,5 i 10 MPa) jest przekazywane na próbki przez odpowiednio wykonaną osłonę za pomocą pompy, a obciążenie pionowe podobnie jak sposobem Karmana za pomocą prasy hydraulicznej. Otrzymane wyniki zostały przedstawione na fig. 11 i 12. Do określenia obwiedni wytrzymałościowej wykorzystano pary naprężeń głównych w chwili zniszczenia próbek oraz wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie i bezpośrednie rozciąganie. Na podstawie ustalonych kół Mohra poprowadzono obwiednię wytrzymałościową. Na podstawie zaproponowanego przez A. Kidybińskiego (1982) wzoru dla skał karbońskich spróbowano ustalić równanie obwiedni w postaci ogólnej:

$$\tau = a(\sigma + R_r)^b$$

gdzie:  $\tau$  – naprężenie ścinające,  $\sigma$  – naprężenie normalne,  $R_r$  – wytrzymałość na rozciąganie,  $a$ ,  $b$  – współczynniki liczbowe.

Dla próbek w stanie powietrzno-suchym  $R_{r,s} = 0,7$  MPa,  $a = 1,54$ ,  $b = 0,71$ , a dla próbek w stanie pełnego nasycenia wodą  $R_{r,n} = 0,35$  MPa,  $a = 1,30$ ,  $b = 0,65$ .

Krzywoliniowa obwiednia wytrzymałościowa piaskowców wskazuje na zależność kąta tarcia wewnętrznego od obciążenia. Znając równanie obwiedni, można obliczyć kąt tarcia przy dowolnym obciążeniu. Jest to pierwsza pochodna ustalonego równania. Kąt tarcia wewnętrznego dla piaskowców w stanie powietrzno-

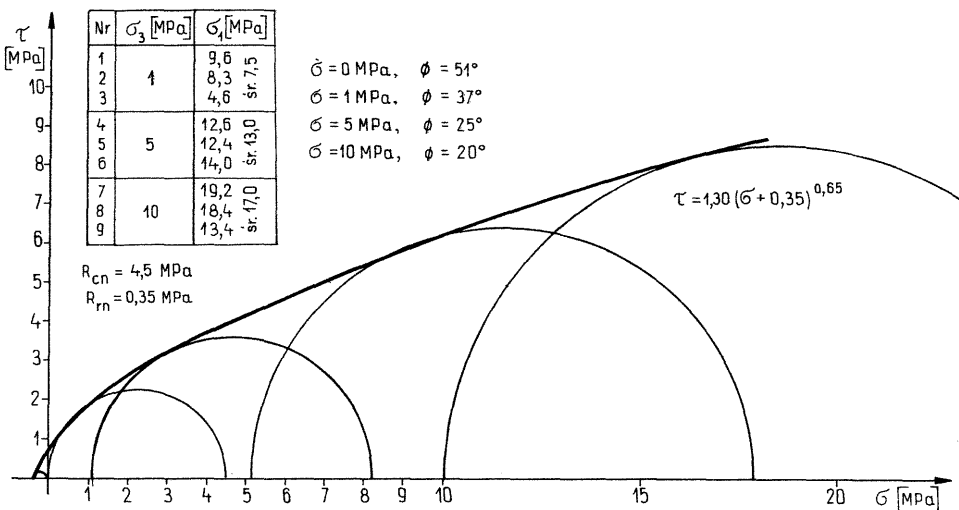


Fig. 11. Obwiednia wytrzymałościowa piaskowców w stanie pełnego nasycenia wodą

Strength envelope of sandstones during full saturation

$\Phi$  – kąt tarcia wewnętrznego;  $\sigma_3$  – najmniejsze naprężenie główne w chwili zniszczenia;  $\sigma_1$  – największe naprężenie główne w chwili zniszczenia; pozostałe objaśnienia jak na fig. 9 i 10

$\Phi$  – angle of internal friction;  $\sigma_3$  – lowest main stress during failure;  $\sigma_1$  – largest main stress during failure; for other explanations see Figs 9 and 10

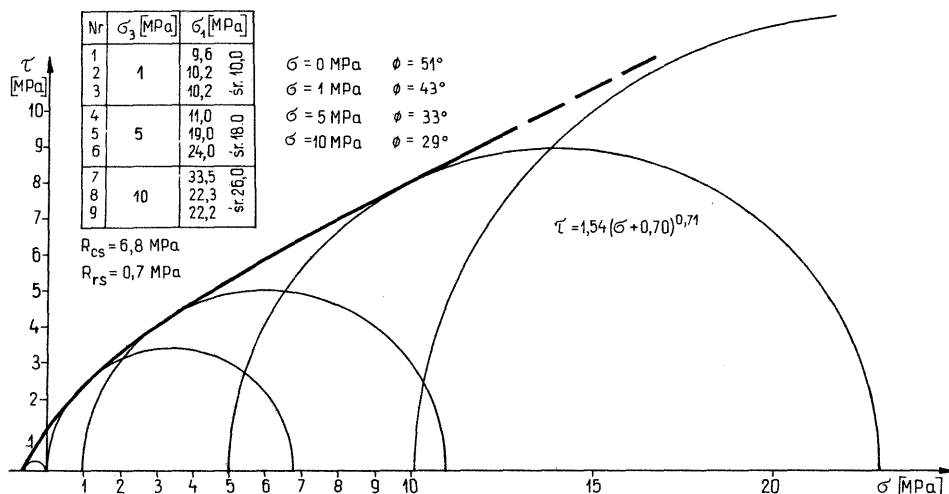


Fig. 12. Obwiednia wytrzymałościowa piaskowców w stanie powietrzno-suchym  
Strength envelope of sandstones in air-dry state

Objasnienia jak na fig. 9 i 11

For explanations see Figs 9 and 11

-suchym w zakresie obciążeń 0–10 MPa wynosi 51–29°, a w stanie pełnego nasycenia wodą w zakresie tych samych obciążeń 51–20°.

Te ostatnie wartości dotyczą piaskowców przede wszystkim średnioziarnistych z wkładkami piaskowców drobnoziarnistych i iłów kaolinowych.

#### BADANIA WYTRZYMAŁOŚCIOWE NA PRÓBKACH NIEFOREMNYCH

Ponieważ niektóre odcinki rdzeni wiertniczych były bardzo pokruszone i nie było możliwości wycięcia foremnych próbek, dla scharakteryzowania tych partii zdecydowano się wykonać badania wytrzymałościowe na okruchach. Przygotowano dwie serie próbek nieforemnych – okruchów: okruchy rdzenia uzyskane podczas wiercenia oraz okruchy będące pozostałością po wycięciu próbek foremnych. Te ostatnie stanowiły bazę porównawczą. Do badań użyto 60 próbek.

Dla próbek nieforemnych rdzenia wiertniczego wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie wynosi 0,77 MPa, natomiast dla próbek nieforemnych stanowiących pozostałość po wycięciu próbek foremnych 1,30 MPa.

Stosunek powyższych wytrzymałości 0,77:1,30 = 0,59 świadczy, że wytrzymałość piaskowca w rdzeniu pokruszonym jest o 41% mniejsza od wytrzymałości piaskowca w rdzeniu niepokruszonym.

#### ODKSZTAŁCALNOŚĆ PIASKOWCÓW

Zależność obciążenie-odkształcenie dla badanych skał jest w zasadzie prostopadłościowa, w szczególności w zakresie od 0,25 do 0,75 maksymalnej wytrzymałości na ściskanie. W tym przedziale skały najczęściej nie wykazują (lub jedynie bardzo mało) odkształceń trwałych. Początek i koniec tej zależności są natomiast zazwy-

czaj krzywoliniowe. Krzywoliniowość wykresu w pierwszej fazie obciążenia tłumaczy się w różny sposób. Często spotyka się pogląd, że jest ona wynikiem odprężenia próbki skalnej w sąsiedztwie szczelin w masywie i po jej wydobyciu z calizny. Przypisuje się również skale zachowanie „pamięci” obciążeń, jakim była poddana w przeszłości geologicznej i dopiero po przekroczeniu odpowiedniej dla niej wartości obciążeń wykres naprężenie – odkształcenie staje się zbliżony do prostoliniowego. Krzywoliniowość w końcowej fazie obciążenia próbki jest związana najczęściej z właściwościami plastycznymi skały, które odgrywają ważną rolę podczas znacznych obciążeń.

Pomiary odkształceń piaskowców wykonywano za pomocą czujników zegarowych, samopisu prasy i tensometrów oporowych. Dokładność pomiaru czujników wynosiła 0,005 mm. Przy opracowaniu wyników napotkano duże trudności interpretacyjne pomiarów tensometrycznych, wynikające prawdopodobnie z gruboziarnistości piaskowców. Analiza obserwacji wskazuje, że w przebiegu funkcji obciążenie – odkształcenie można wyróżnić następujące fazy:

I – sprasowywania materiału (odkształcenia nieodwracalne);

II – proporcjonalnego przyrostu odkształceń wraz z obciążeniem (odkształcenia sprężyste);

III – wzmocnienia;

IV – odkształceń plastycznych.

W badanych piaskowcach wyraźne są przede wszystkim, oprócz fazy II, fazy I i IV. Podczas ściskania próbki skalne są niszczone w jednoosiowym stanie naprężeń. Wadą tego sposobu badań jest skomplikowany, właściwie bliżej nieokreślony, stan naprężenia, jaki panuje w rzeczywistości w próbce.

#### MODUŁ ODKSZTAŁCENIA I SPRĘŻYSTOŚCI

Najlepiej pod względem odkształcalności charakteryzują skałę moduły odkształcenia (obliczane dla całego zakresu obciążeń i odkształceń) i sprężystości (zakres odkształceń sprężystych). Uzyskane wyniki (tab. 2, 3) są bardzo zróżnicowane, o znacznej zmienności. Dla skał w stanie powietrzno-suchym moduł odkształcenia ( $E_{os}$ ) wynosi 106–3263, śr.  $1334 \pm 660$  MPa, przy współczynniku zmienności  $V = 49,5\%$ , a moduł sprężystości ( $E_{ss}$ ) 813–5873 (przy obliczeniach modułu nie uwzględniono jednej wartości bardzo odbiegającej równej 10 435 MPa), śr.  $2850 \pm 1950$  MPa, przy  $V = 65\%$ . Dla skał w stanie pełnego nasycenia wodą moduł odkształcenia ( $E_{on}$ ) mieści się w przedziale 326–3809, śr.  $1106 \pm 981$  MPa, przy  $V = 80,7\%$ , a moduł sprężystości ( $E_{sn}$ ) 838–4808, śr.  $1915 \pm 1241$  MPa, przy  $V = 64,8\%$ .

Uzyskane rezultaty wyraźnie świadczą o istotnym wpływie wody na odkształcalność badanych piaskowców. Stosunki modułów odkształcenia i sprężystości skał w stanie pełnego nasycenia do odpowiednich modułów skał w stanie powietrzno-suchym wynoszą:  $E_{on}:E_{os} = 0,83$  i  $E_{sn}:E_{ss} = 0,67$ .

Współczynniki zmienności dla modułów wahają się w granicach 50–80%. Są znacznie większe od analogicznych współczynników dla wytrzymałości na ściskanie.

Wartości modułów odkształcenia i sprężystości piaskowców w stanie powietrzno-suchym średnio w granicach 1300–3000 MPa i w stanie pełnego nasycenia średnio w granicach 1100–2000 MPa świadczą, że badane skały są miękkie, o dużej odkształcalności.

## WSPÓŁCZYNNIK POISSONA

Wartości współczynnika Poissona ( $\nu$ ) – tab. 2, 3 – dla piaskowców w stanie powietrzno-suchym zmieniają się w granicach 0,13–0,46, śr.  $0,28 \pm 0,085$ , przy współczynniku zmienności  $V = 30,2\%$ , a w stanie pełnego nasycenia wodą w granicach 0,26–0,43, śr.  $0,36 \pm 0,050$ , przy współczynniku  $V = 14,1\%$ . Stosunek współczynnika Poissona skał w stanie pełnego nasycenia do współczynnika Poissona skał w stanie powietrzno-suchym  $0,28:0,36 = 0,78$ .

Wartości współczynnika Poissona badanych piaskowców są wysokie, potwierdzają znaczną odkształcalność i małą wytrzymałość skał.

## ULTRADŹWIĘKOWE BADANIA PIASKOWCÓW

Badania przeprowadzono na 90 próbkach. Prędkość propagacji fali podłużnej ( $V_p$ ) zmienia się od 1462 do 3823, śr.  $2290 \pm 337$  m/s, przy współczynniku zmienności  $V = 14,7\%$ . Dynamiczny moduł sprężystości ( $E_{ds1}$ ) wynosi 0,42–2,81, śr.  $1,03 \pm \pm 0,36 \cdot 10^4$  MPa, przy współczynniku zmienności  $V = 35,3\%$ . Prędkość fali poprzecznej zmienia się w zakresie 1020–1916, śr. 1380 m/s. Dynamiczny współczynnik Poissona wynosi średnio 0,21. Dynamiczny moduł sprężystości ( $E_{ds2}$ ), przy uwzględnieniu liczby Poissona, wynosi średnio  $0,92 \cdot 10^4$  MPa. Moduł sprężystości  $E_{ds2}:E_{ss} = 3$ .

## WNIOSKI

Badania właściwości fizyczno-mechanicznych rdzeni wiertniczych piaskowców kredowych, otaczających złoża iłów Bolko II, można podsumować następująco:

1. Pod względem litologicznym badane utwory są piaskowcami kwarcowymi, przede wszystkim średnio- i gruboziarnistymi, często zlepieńcowatymi, rzadziej drobnoziarnistymi. Cechuje je słaba zwięzłość i wysoka porowatość. Spoiwo ilaste ma charakter masy wypełniającej. Występują w nich liczne wkładki i prze-warstwienia iłów kaolinowych.

2. Obecność spękań w piaskowcach wpływa na znaczne osłabienie masywu. Wskaźnik porowatości szczelinowej, wskaźnik jakości masywu Deere'a i wskaźnik spękania Hansagi'ego świadczą o silnym stopniu szczelinowatości i złej jakości masywu.

3. Z punktu widzenia inżyniersko-geologicznej oceny, na podstawie wartości indeksu  $Q$  masyw piaskowców kredowych można zaliczać do masywów bardzo słabych (*very poor*).

4. Ze względu na gęstość objętościową piaskowce należy zaliczyć do skał średniociężkich, a z uwagi na nasiąkliwość do średnionasiąkliwych.

5. Pod względem wytrzymałości i odkształcalności piaskowce są bardzo zróżnicowane. Współczynnik zmienności waha się w granicach 30–80%. Na podstawie wytrzymałości na ściskanie w stanie powietrzno-suchym i w stanie pełnego nasycenia wodą można je zaliczyć do skał o bardzo małej wytrzymałości.

6. Piaskowce pod wpływem wody zmniejszają swoją wytrzymałość. W przypadku ściskania wytrzymałość zmniejsza się o 34%, a w przypadku rozciągania o 50%. Są one skałami silnie mięknącymi. W przypadku występowania wkładek iłów kaolinowych ulegają pod wpływem wody całkowitemu rozpadowi.

7. Badania wytrzymałościowe piaskowców wykazują następujące zależności:

$$R_{cs} > R_{gs} > R_{rs}, \quad R_{cn} > R_{gn} > R_{rn}$$

$$R_{cs}:R_{rs} \approx 10, \quad R_{cn}:R_{rn} \approx 13$$

8. Przy małym zakresie obciążeń piaskowce charakteryzują się dużymi kątami tarcia wewnętrznego i jednocześnie małą spójnością. Pod wpływem wody spójność zmniejsza się o ok. 50%.

9. Obwiednia wytrzymałościowa piaskowców przy obciążeniach 0–10 MPa jest krzywoliniowa. Kąt tarcia wewnętrznego skał w stanie powietrzno-suchym zmienia się od 51 do 29°, a w stanie pełnego nasycenia wodą od 51 do 20°. Znaczne zmniejszenie kąta tarcia wewnętrznego dotyczy przede wszystkim piaskowców średnioziarnistych z dużą zawartością spoiwa ilastego.

10. Wytrzymałość na ściskanie rdzenia pokruszonego jest o 41% mniejsza niż wytrzymałość całego rdzenia.

11. Charakter przebiegu funkcji obciążenie-odkształcenie dla piaskowców jest złożony. Oprócz fazy odkształceń odwracalnych obserwuje się fazę sprasowywania materiału oraz odkształceń plastycznych.

12. Stosunkowo niewysokie moduły odkształcenia i sprężystości oraz względnie wysokie wartości współczynnika Poissona potwierdzają znaczną odkształcalność i niską wytrzymałość piaskowców.

Instytut Hydrogeologii  
i Geologii Inżynierskiej  
Uniwersytetu Warszawskiego  
Warszawa, al. Żwirki i Wigury 93  
Nadesłano dnia 15 lipca 1987 r.

## PIŚMIENNICTWO

- BARTON N., LIEN R., LUNDE J. (1974) – Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, **6**, p. 189–236, nr 4.
- DEERE D.U. (1963) – Technical description of rock cores for engineering purposes. In: *Fels mechanik und Ingenieurgeologie*, **1**, nr 1.
- HANSAGI J. (1974) – A method of determining the degree of fissuration of rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sc. Geomech.*, **11**, nr 10.
- KACZYŃSKI R. i in. (1985) – Charakterystyka wytrzymałości i odkształcalności skał z wierceń badawczych na złożu Bolko II. Arch. UW. Warszawa.
- KIDYBIŃSKI A. (1982) – Podstawy geotechniki kopalnianej. Wyd. Śląsk. Katowice.
- MILEWICZ J. (1974) – Złoża górnokredowych ilów ceramicznych na tle budowy geologicznej depresji północnosudeckiej. *Biul. Inst. Geol.*, **280**, p. 217–258.
- MILEWICZ J. (1979) – Piaskowce dolnotriasowe i górnokredowe depresji północnosudeckiej. W: *Surowce mineralne Dolnego Śląska*, p. 391–396. Ossolineum. Wrocław.
- PFÖR H. (1975) – Wytyczne Międzynarodowego Biura Mechaniki Górnotworu do określania parametrów geomechanicznych skał i górnotworu. Wyd. GIG. Katowice.
- PN-84/B-01080 – Kamień dla budownictwa i drogownictwa. Podział i zastosowanie według własności fizyczno-mechanicznych. PKNMiJ. Warszawa.

НЕЙШТАДТ Л.И. (1957) — Методы геологического изучения трещиноватости горных пород при инженерно-геологических исследованиях. Госенергоиздат. Москва.

Рышард КАЧИНЬСКИ

### **ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМИРУЕМОСТЬ МЕЛОВЫХ ПЕСЧАНИКОВ В РАЙОНЕ НОВОГРОДЗЬЦА (СЕВЕРСУДЕТСКАЯ ВПАДИНА)**

#### **Резюме**

Изучение прочности (на одно и трехосевое сжатие, растяжение, сгиб и сдвиг) и деформируемости меловых песчаников, окружающих месторождение глин Болько II в районе Новогродзца, проводилось на образцах керна с учетом необходимых требований, предъявляемых к проектированию горных выработок. В особенности обращалось внимание на охарактеризование свойств горного массива с точки зрения инженерно-геологической его оценки. По коэффициентам Нейштадта, Дире и Хансага массив меловых песчаников в районе Новогродзца является низкокачественным массивом, по коэффициенту  $Q$  это очень слабый массив (*very poor*). Песчаники отличаются низкой прочностью, сильной деформируемостью и размягчаемостью.

Ryszard KACZYŃSKI

### **STRENGTH AND DEFORMABILITY OF CRETACEOUS SANDSTONES OF NOWOGRODZIEC AREA (NORTH-SUDETIC DEPRESSION)**

#### **S u m m a r y**

Studies of strength (to unconfined compression, triaxial compression, tension, bending and shear) and deformability of Cretaceous sandstones around the clay deposit Bolko II near Nowogrodziec were done on samples from borehole cores and considering the range needed at project of mining pits. Particular attention was paid to properties of a rock massif from the point of view of its engineering geological evaluation. Basing on indices of Niejsztadt, Deere and Hansagi the Cretaceous sandstones of the Nowogrodziec area can be evaluated for the bed quality one and on the basis of the  $Q$  system as the very poor one. Studied sandstones have very small strength and high deformability and easily get soft.