

*Andrzej Nierobisz\**

## OZNACZANIE WŁASNOŚCI MECHANICZNYCH SKAŁ ZA POMOCĄ HYDRAULICZNEGO PENETROMETRU OTWOROWEGO NOWEJ GENERACJI

---

### 1. Wprowadzenie

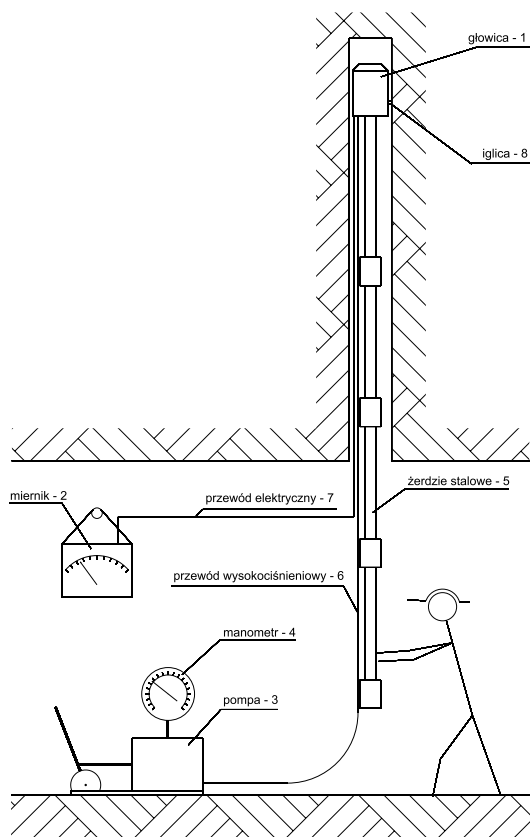
Hydrauliczny penetrometr otworowy został opracowany i wypróbowany w Głównym Instytucie Górnictwa w Katowicach [2]. Produkcją penetrometrów zajął się Zakład Budowy Urządzeń i Aparatury Naukowo-Doświadczalnej przy GIG, który w 1976 r. rozprowadził w kopalniach węgla kamiennego około 90 kompletów tych urządzeń wraz z odpowiednią instrukcją użytkowania i wykorzystania wyników [4].

Urządzenie służy do badania parametrów wytrzymałościowych skał i składa się z następujących elementów (rys. 1): 1 — głowica, 2 — miernik elektryczny wysuwu iglicy, 3 — ręczna pompa hydrauliczna, 4 — manometr do mierzenia ciśnienia w układzie hydraulicznym, 5 — żerdzie stalowe do przesuwania głowicy w otworze, 6 — przewód wysokociśnieniowy do podawania ciśnienia do głowicy penetrometru, 7 — przewód elektryczny łączący cewkę umieszczoną w głowicy z miernikiem, 8 — iglica wysuwna.

Zasada działania hydraulicznego penetrometru otworowego polega na tym, że do otworu o średnicy 85–95 mm wywierconego w stropie lub spągu wyrobiska wkłada się głowicę (1) a następnie ręczną pompką hydrauliczną (3), poprzez przewód wysokociśnieniowy podaje się do głowicy olej (hydrol), powodując wysuw iglicy (8) z płaską powierzchnią czołową o średnicy 5 mm. Iglica ta wciska się (penetruje) w ściankę otworu wiertniczego. Przy określonym ciśnieniu krytycznym, które można odczytać na manometrze pompy (4) następuje zniszczenie ścianki otworu. Głowicę przesuwa się wzdłuż otworu z krokiem co 5 lub 10 cm, wykonując pomiary ciśnienia krytycznego wywołującego zniszczenie ścianki otworu. Uzyskane wyniki nanosi się na wykres gdzie na osi poziomej odmierza się ciśnienie krytyczne, a na osi pionowej głębokość, na której został wykonany pomiar.

---

\* Główny Instytut Górnictwa, Katowice

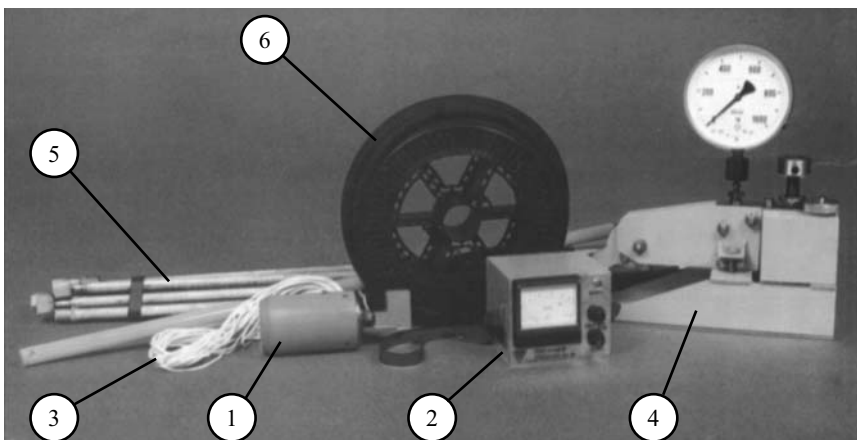


Rys. 1. Schemat hydraulicznego penetrometru otworowego

Penetrometr w postaci przedstawionej na rysunku 2 był produkowany przez wspomnianego powyżej producenta od 1976 do 2008 roku. W latach osiemdziesiątych i dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku był on mało używany przez kopalnie, ponieważ nie istniały wymagania związane z koniecznością badania parametrów górotworu. Począwszy od 1991 roku, gdy następowały kolejne zmiany przepisów górniczych wzrosło zainteresowanie penetrometrem, ponieważ dobór obudowy należało dokonywać w oparciu o przeprowadzone badania własności górotworu. Aktualnie wymóg badania parametrów geomechanicznych złoży i skał otaczających wprowadzony jest do przepisów [8].

Począwszy od 1976 roku pracownicy Głównego Instytutu Górniczego stosują penetrometr otworowy wykonując badania na zlecenie kopalń oraz w ramach prac własnych. Szacuje się, że przez 33 lata wykonano badania w co najmniej 300 otworach penetrometrycznych.

Zebrane doświadczenia pozwoliły na podjęcie próby opracowania nowej generacji penetrometru [6]. W artykule przedstawiono schemat i sposób wykonywania pomiarów penetrometrem, podano metodykę wyznaczania parametrów mechanicznych skał oraz opisano nowe rozwiązanie penetrometru.



**Rys. 2.** Widok hydraulicznego penetrometru otworowego [7]

1 — głowica, 2 — miernik elektryczny, 3 — przewód elektryczny, 4 — pompa,  
5 — żerdzie stalowe, 6 — bęben z nawiniętym przewodem wysokociśnieniowym

## 2. Metodyka wyznaczania parametrów mechanicznych skał na podstawie wskazań penetrometru otworowego [3]

Odczytanie ciśnienia na manometrze pompy w momencie zniszczenia ścianki otworu wiertniczego pozwala na korelacyjne wyznaczenie następujących parametrów skały występującej w danym punkcie górotworu:

- wytrzymałości na rozciąganie  $R_r$ ,
- wytrzymałości na ściskanie  $R_c$ ,
- wskaźnika urabialności  $f$ ,
- szczelinowatości skały  $S$ .

Określenie wymienionych cech dla kolejnych punktów położenia wzdłuż profilu penetrometrycznego, pozwala na wykreślenie ciągłych profilów  $R_r$ ,  $R_c$ ,  $f$  oraz  $S$  dla zbadanej penetrometrem serii skalnej. Poniżej podano szczegółowe zasady określenia wymienionych wskaźników na podstawie wartości krytycznego ciśnienia  $p_m$  na manometrze pompy.

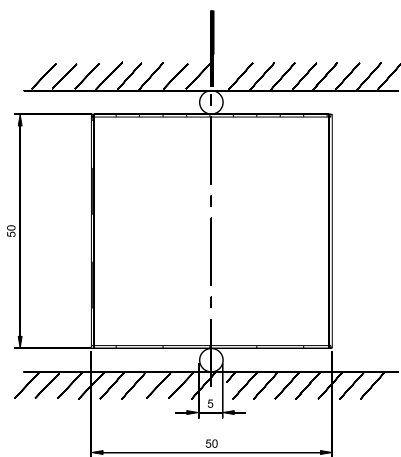
### 2.1. Wytrzymałość na rozciąganie $R_r$

W wyniku przeprowadzonych badań ustalono zależność pomiędzy oporem penetracji a wytrzymałością skały na rozciąganie, odpowiadającej kierunkowi działania siły rozciągającej prostopadłemu do powierzchni uwarstwienia dla wszystkich podstawowych typów skał karbońskich Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Poprzez opór penetracji rozumie się wartość krytycznego ciśnienia odczytanego na manometrze pompy w momencie punktowego zniszczenia skały przez iglicę penetrometru.

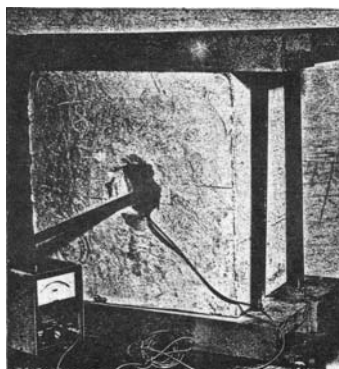
Wykonano to poprzez równoległe badania wytrzymałości na rozciąganie metodą brazylijską oraz badania oporów penetracji dokładnie na tym samym poziomie litologicznym.

Badania te prowadzono w następujący sposób:

- 1) pobrano w kopalni próbki blokowe wybranych skał,
- 2) przecięto na połowę każdy blok przy pomocy piły szybkoobrotowej w kierunku prostopadłym do uwarstwienia,
- 3) z jednej połówki bloku wykonano dokładnie zorientowane przestrzennie próbki kostkowe o boku 5 cm a następnie przeprowadzono badania wytrzymałości na rozciąganie (rys. 3),
- 4) z drugiej połowy bloku wykonano takie same próbki jak powyżej i umieszczono je odpowiednio zorientowane przestrzennie w bloku z otworem na penetrometr, który zalano betonem (rys. 4),
- 5) w tak przygotowanym bloku betonowo-skalnym wykonano badania oporów penetracji.



Rys. 3. Oznaczanie wytrzymałości na rozciąganie  $R_t$  metodą brazylijską [4]



Rys. 4. Pomiary penetrometrem w bloku modelowym [3]

Przeprowadzone badania wykazały, że istnieje liniowa zależność pomiędzy wytrzymałością na rozciąganie a oporem penetracji skał karbońskich. Minimalną dla danego punktu wartość wytrzymałości na rozciąganie w przypadku działania siły prostopadłej do uwarstwienia skał można określić z zależności:

$$R_r = 0,77p_m \quad (1)$$

gdzie:

$R_r$  — wytrzymałość na rozciąganie, MPa,  
 $p_m$  — krytyczne ciśnienie penetracji, MPa.

## 2.2. Wytrzymałość na ściskanie $R_c$

Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie określono na podstawie następującego równania empirycznego:

$$R_c = 1,2p_m \quad (2)$$

gdzie:

$R_c$  — wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie, MPa,  
 $p_m$  — krytyczne ciśnienie penetracji, MPa.

Równanie powyższe otrzymano poprzez równoległe badania laboratoryjne: wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie oraz oporów penetracji szeregu skał karbońskich w sposób podobny jak w punkcie 2.1.

## 2.3. Wskaźnik urabialności $f$

Wskaźnik urabialności w przybliżeniu można określić na podstawie następującego równania empirycznego:

$$f = 0,1p_m \quad (3)$$

gdzie:

$f$  — wskaźnik urabialności (wielkość bezwymiarowa),  
 $p_m$  — krytyczne ciśnienie penetracji, MPa.

Równanie powyższe opracowano na podstawie prac Protodiakonowa, który wykazał istnienie liniowego związku pomiędzy wartością  $R_c$  oraz wartością  $f$ .

## 2.4. Szczelinowatość skał $S$

Szczelinowatość skał określono na podstawie zmian wartości  $p_m$  dla danego petrograficznego typu skał. Równanie do obliczania wskaźnika szczelinowatości ma postać:

$$S = \sqrt{\frac{A \cdot F}{W p_{m sr}}} \quad (4)$$

gdzie:

$S$  — wskaźnik szczelinowatości (wielkość bezwymiarowa),

$A$  — amplituda zmian oporów penetracji  $p_m$ , MPa,

$F$  — liczba skokowych zmian oporu penetracji na określonym odcinku długości otworu,

$W$  — liczba wykonanych cykli badania oporów penetracji (wgniotów) na rozpatrywanym odcinku długości otworu,

$p_{m sr}$  — średnia wartość  $p_m$  na odcinku badanej zmienności amplitudy, MPa.

## 3. Nowa generacja penetrometru

Nowe rozwiązanie penetrometru (rys. 5) pozwoliło na eliminację szeregu wad starego rozwiązania. Charakteryzuje się ono następującymi cechami:

- mniejszym ciężarem,
- elektronicznym sposobem rejestracji i obróbki uzyskanych wyników,
- dużą wytrzymałością iglicy,
- niezawodnym uszczelnieniem głowicy.

Nie zmieniono średnicy i konstrukcji iglicy (rys. 1), a tym samym pozostawiono bez zmian empiryczne współczynniki przeliczeniowe wytrzymałości na rozciąganie  $R_t$  i ściskanie  $R_c$ , mając świadomość tego, że zależą one od typu litologicznego skały, jej wilgotności i powierzchni osłabienia [1].

Wprowadzono natomiast nowy parametr — penetrometryczny wskaźnik jakości masywu określony z zależności (5)

$$RQD_p = (1 - SP) \cdot 100 \quad (5)$$

gdzie:

$RQD_p$  — penetrometryczny wskaźnik jakości masywu, %,

$SP$  — wskaźnik szczelinowatości (bezwymiarowy) określony na podstawie badań penetrometrycznych z zależności:

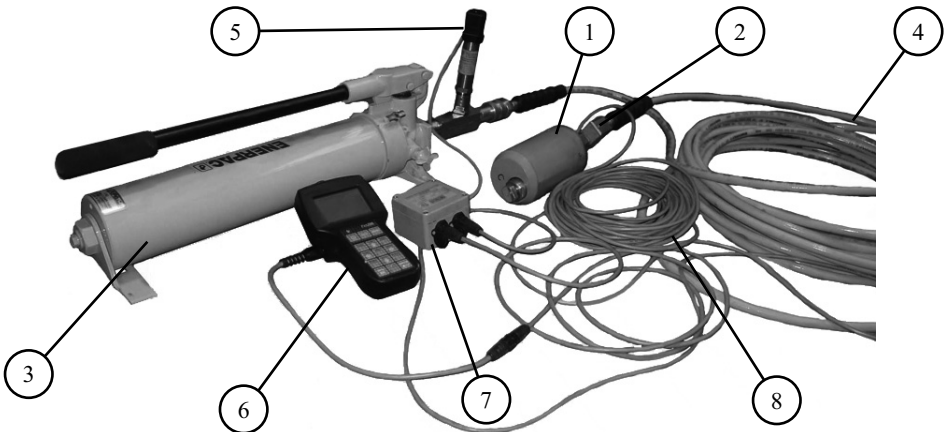
$$SP = \sqrt{\frac{A \cdot F}{n R_{c sr}}} \quad (6)$$

gdzie:

- $A$  — amplituda wytrzymałości, to jest różnica pomiędzy średnią a minimalną wytrzymałością badanego odcinka górotworu, MPa,
- $F$  — liczba spadków  $R_c$  poniżej 0,7 średniej wytrzymałości na rozpatrywanym odcinku górotworu,
- $n$  — liczba wykonanych pomiarów na rozpatrywanym odcinku górotworu,
- $R_{c, sr}$  — średnia wytrzymałość na ściskanie rozpatrywanego odcinka górotworu, MPa.

Zestaw penetrometru otworowego typu Pen206 przedstawiono na rysunku 5. Jego parametry techniczne są następujące:

- maksymalne ciśnienie w układzie hydraulicznym: 70 MPa,
- możliwość badania skał o wytrzymałości na ściskanie: do 84 MPa,
- całkowity ciężar: 34 kg,
- średnica głowicy pomiarowej: 85 mm,
- masa głowicy pomiarowej: 5,30 kg,
- maksymalny wysuw naciskacza: 17 mm,
- dokładność przemieszczenia naciskacza:  $\pm 0,1$  mm,
- dokładność pomiaru wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie:  $\pm 1$  MPa,
- zasięg pomiarowy w głąb górotworu: do 10 m,
- ciecz robocza w układzie hydraulicznym: płyn hydrauliczny,
- temperatura pracy: 0–70°C,
- średnica końcówki naciskacza: 5 mm,
- rozdzielczość wskazań położenia naciskacza:
  - wskaźnik paskowy 0,2 mm,
  - wskaźnik cyfrowy 0,1 mm,

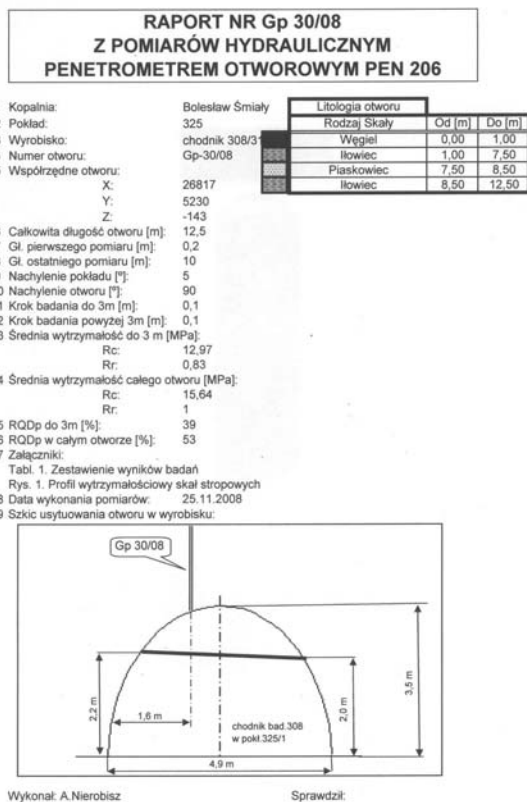


**Rys. 5.** Widok penetrometru otworowego typu Pen206

- 1 — głowica, 2 — korpus złącza, 3 — ręczna pompa hydrauliczna, 4 — węże wysokociśnieniowe,
- 5 — przetwornik ciśnienia, 6 — pulpit sterujący, 7 — krosownica, 8 — przewody elektryczne

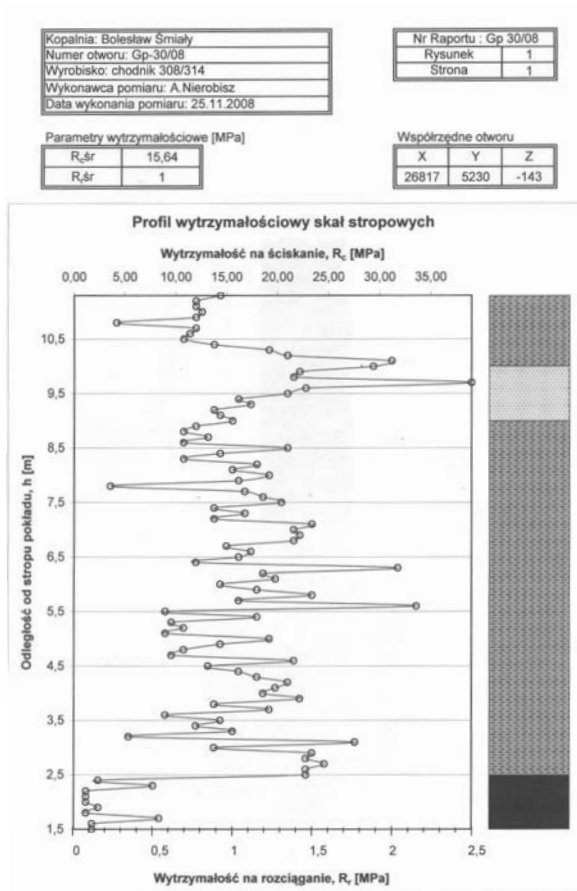
- automatyczne rozpoznawanie momentu skruszenia skały,
- łatwe zapisywanie wyników pomiarów do pamięci wewnętrznej pulpitu,
- wspomaganie komputerowe obróbki danych pomiarowych i generowanie raportów,
- pamięć wewnętrzna pulpitu: 56 sesji pomiarowych (56 otworów),
- całkowita ilość poziomów pomiarowych w jednej sesji (w jednym otworze): 130,
- zasilanie akumulatorowe własne: 3,6 V,
- czas pracy z całkowicie naładowanym akumulatorem: minimum 10 godzin,
- klasyfikacja urządzenia ze względu na zagrożenie wybuchem: Grupa I, Kategoria M2, Ex”ial”,
- klasa szczelności: głowica IP54 (pulpit i krosownica IP65),
- Certyfikat zewnętrznej oceny zgodności CE — Jednostka Certyfikująca GIG Katowice,
- Certyfikat badania typu WE w zakresie zgodności z Dyrektywą ATEX 94/9/WE: KDB 08ATEX099.

Pomiary w kopalni wykonuje się zgodnie z zasadami podanymi w dokumentacji techniczno-ruchowej. Na powierzchni w biurze opracowuje się wyniki za pomocą specjalnego do tego celu napisanego programu, który generuje raport z pomiarów w formie tabelarycznej i graficznej (rys. 6, 7).



**Rys. 6.** Strona tytułowa raportu z pomiarów hydraulicznym penetrometrem otworowym





Rys. 7. Profil wytrzymałościowy skał stropowych

#### 4. Podsumowanie

Podstawą do obliczeń obudowy podporowej i kotwowej w kopalniach węgla są wyniki badań laboratoryjnych, takich jak: wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie  $R_c$ , wytrzymałość na rozciąganie  $R_r$ , moduł Younga  $E$ , wskaźnik rozmakalności  $r$ , współczynnik Poissona  $\nu$ , gęstość  $\rho$  i inne.

Oznaczanie własności skał za pomocą hydraulicznego penetrometru otworowego jest jedyną metodą badań prowadzoną w warunkach *in situ*. Pozwala równocześnie porównać wyniki uzyskane w laboratorium w wynikami uzyskanymi w warunkach naturalnych.

Prezentowane urządzenie nowej generacji znacznie ułatwia wykonywanie pomiarów i opracowywanie wyników, może być również stosowane — po odpowiedniej kalibracji — na powierzchni do badań własności skał.

## LITERATURA

- [1] *Bukowska M., Kidybiński A.*: Wpływ czynników naturalnych masywu skalnego na jego wytrzymałość określaną metodami penetrometryczną i laboratoryjną. Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa, nr 1, 2002
- [2] *Kidybiński A., Gwiazda J.*: Hydrauliczny penetrometr otworowy. Urząd Patentowy PRL, zgłoszenie P-162723, 1973
- [3] *Kidybiński A., Gwiazda J., Hładysz Z.*: Ocena mechanicznych własności skał oraz stateczności górotworu hydraulicznym penetrometrem otworowym. Prace Głównego Instytutu Górnictwa, Seria Dodatkowa. Katowice 1976
- [4] *Kidybiński A.*: Podstawy geotechniki kopalnianej. Wydawnictwo Śląsk, 1982
- [5] *Nierobisz A., Masny W.*: Metoda obliczania wskaźnika szczelinowatości RQD za pomocą badań hydraulicznym penetrometrem otworowym. Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa, nr 4, 2004
- [6] Opracowanie i przygotowanie produkcji nowej generacji penetrometru otworowego do badań parametrów wytrzymałościowych skał dla potrzeb górnictwa. Projekt celowy NOT nr ROW-II-085/2006
- [7] Penetrometr hydrauliczny PHI-00. Oferta handlowa. Zakład Budowy Urządzeń i Aparatury Naukowo-Doświadczalnej Sp. z o.o
- [8] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 28.06.2002 r w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w podziemnych zakładach górniczych (Dz.U. z 2002 nr 139 poz. 1169 oraz z 2006 r. nr 124, poz. 863)