

Systemy geologiczno-inżynierskiej oceny skał i masywów skalnych

Joanna Pinińska*

Engineering-geological valuation systems for rock and rock massif classification. Prz. Geol., 49: 804–814.

Summary. Traditions, norms, legislative limitations and formal rules in assessing engineering properties of soils and rocks vary in different countries of the European Union and elsewhere. The Committee of European Normalization (CEN) accepts numerous engineering systems of soil assessment, and does not object to introduction of traditional classifications, comments and orders, "experimental limits" and "comparable parameters" in determining load-bearing capacity of soil in any specific country. In Poland, great effort was already undertaken in translation, adaptation and employment of European standards in engineering geology. This, however, concerns mostly soft soils, while rock massifs are almost totally overlooked. Geotechnical classification of rocks and rock massifs should be more complex than that of soft soils, because of great lithological variability of rocks, their stratigraphic inhomogeneity, tectonic deformations, residual stress, shear zones, fractures, and uneven weathering. The contemporary engineering norms promoted by CEN are rather conservative with respect to development in sciences. Moreover, these norms are overloaded with unclear excessively detailed geological descriptions, which seems to be a result of somewhat late recognition of geological factors in geotechnical diagnosis. Whilst according to the recent world trends, when describing rock-structure interactions, the geological complexity must be substituted with simplified indices, which will allow alternative representation of complicated mechanical properties of various rock massif components.

Key words: engineering geology, rock, rock massif, classification, European standards, strength, deformability and deformation energy indices

Ze światowych trendów wynika, że skały i masywy skalne będą w obecnym wieku przedmiotem znacznie większych zainteresowań geotechnicznych niż grunty (Jonson & Graff, 1994; Van der Merwe, 1999; Pinińska, 2001). Wiodące trendy to stateczność zboczy skalnych, podziemnych komór i magazynów, tuneli i wyrobisk górniczych w trudnych warunkach i na dużych głębokościach. W warunkach złożonych zadań inżynierskich niezmiernie ważnym zagadnieniem jest uporządkowanie wiedzy na temat klasyfikacji skał i masywów skalnych

Podwaliny inżynierskiej **klasyfikacji skał**, stworzył w 1908 r. Protodiakonow, wydzielając 10 klas o różnej wytrzymałości na ściskanie, zależnej od litologii skały. W miarę rozwoju badań, klasyfikację wytrzymałościową skał rozszerzono o charakterystykę ich odkształcalności. Początkowo stosowano głównie ocenę cech sprężystych, jak np. w stworzonych w połowie zeszłego wieku klasyfikacjach Millera lub Habenichta i Brensteinera (*vide* Kidybiński, 1982). Następnie, gdy w latach siedemdziesiątych wzrósł poziom techniki badań laboratoryjnych, zaczęto uwzględniać także zmienność przebiegu ścieżki deformacji w zakresach nieliniowej deformacji skał (np. klasyfikacja Hallbauera i in., 1973). Lata siedemdziesiąte przyniosły natomiast pierwsze oceny wytrzymałości stanów pokrywających (Wawersick & Fairhurst, 1970; Salamon, 1974; Jeager & Cook, 1979), które Salamon określił w owym czasie jako „być może jeden z najważniejszych momentów w rozwoju badań nad związkami naprężenie/odkształcenie” (*vide* Hood & Brown, 1999).

Postawy inżynierskiej **klasyfikacji masywów skalnych** stworzyli natomiast Deere i Miller (1966) wprowadzając wskaźnikowe oceny cech geologicznych masywu skalnego, charakteryzujące jego rozdrobnienie (*Rock Quality Designation* — RQD i rozstaw spękań). Niezależną drogą rozwinęły się również klasyfikacje oparte na pomiarach prędkości propagacji fal w ośrodku skalnym (Masuda [W:] Kidybiński, 1982), Caterpillar Co. (*vide* Thiel, 1980; Pinińska, 1980).

Ogromny postęp badań laboratoryjnych i polowych doprowadził do lawinowego rozwoju specjalistycznych, branżowych klasyfikacji skał i masywów skalnych i w latach dziewięćdziesiątych stawały się one coraz bardziej, ukierunkowane na pojedyncze cele i tym samym trudne do wykorzystania w powszechnej działalności inżynierskiej.

Ewolucję badań skał i masywów skalnych scharakteryzowali Hood i Brown (1999). Wyzaczyli w niej trzy okresy rozwoju: prehistoryczny, renesansu i współczesny.

Do okresu prehistorycznego zaliczyli czasy od pierwszego twórczego kontaktu pierwotnego człowieka ze skałą w Swazilandzie aż po 1960 r. i ocenili go pod względem rozwoju geotechniki skalnej, jako „okres neandertalski”. Po nim nastąpił, trwający do 1983 r. „wiek renesansu”. Rozwój konstrukcji górniczych i tunelowych wymusił bowiem w tym czasie opracowanie pionierskich klasyfikacji skał o zasięgu międzynarodowym, a dyskusja nad nimi zaowocowała, pamiętnym Pierwszym Kongresem Mechaniki Skał w Lizbonie (1966). Kamieniem milowym tego okresu było wprowadzenie przez Deera (1964), a następnie przez Hoeka i Braya (1974) charakterystyki opisów „małych i dużych” nieciągłości, zestawienie ich na stereogramach i powiązanie z oceną stateczności. Było to pierwsze wprowadzenie do ocen inżynierskich uporządkowanych technicznie pojęć zaczerpniętych z geologii strukturalnej. Tym samym wprowadzono do projektowania geotechnicznego ocenę masywu skalnego jako zespołu różnie skonfigurowanych bloków skalnych. W konsekwencji, środowisku praktyków została narzucona konieczność inżynierskiej oceny masywów skalnych z łącznym uwzględnieniem cech elementów monolitycznych, charakteryzowanych parametrem wytrzymałości skały oraz osłabionych stref masywu, charakteryzowanych stanem spękania i zwietrzienia.

Niezmiernie ważnymi wydarzeniami „wieku renesansu” było powstanie kompleksowych, uznanych obecnie za klasyczne, wskaźnikowych ocen masywów skalnych zaproponowanych przez Bartona i innych (1974) oraz Bieniawskiego (1974). Wywodzą się one z praktycznych potrzeb norweskiej szkoły tunelowania w NGI oraz rozwiązań CSIR w złożonych warunkach górnictwa podziemnego Republiki Południowej Afryki. Obie oceny

*Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa

mają charakter uniwersalny, dzięki zastosowaniu obiektywnych, wywodzących się z praktyki inżynierskiej parametrów cząstkowych.

Zdaniem Hooda i Browna (1999) renesansowy okres rozwoju geotechniki skalnej zakończył się w 1983 r., Piątym Kongresem Mechaniki Skał. Od tej pory w rozwoju geotechniki skalnej notuje się pewien, trwający do dziś regres okresu współczesnego. Lata te zaowocowały jednak na świecie wzajemnym zbliżeniem teorii i praktyki oraz sprzyjały ogromnemu transferowi osiągnięć z laboratoriów badawczych do prac inżynierskich.

Dalszego postępu geotechniki skalnej Hood i Brown upatrują we prowadzeniu wielkoskalowych prac badawczych *in situ* na dużych głębokościach. Do takich badań, a także w ich wyniku niezbędne staną się nowe, uaktualnione klasyfikacje skał i masywów skalnych, opracowane w ścisłej relacji z klasyfikacjami geologicznymi. W tej nowej sytuacji, parametryzacja inżynierska masywów skalnych będzie więc możliwa i sensowna tylko na osnowie geologicznych, litologicznych, genetycznych i strukturalnych klasyfikacji skał ujętych w formę czytelnych wskaźników i „wyprowadzonych” parametrów regionalnych.

Klasyfikacja skał w Polsce

Milowy krok w systematyzowaniu inżynierskich ocen skał w Polsce zrobiono dopiero w latach osiemdziesiątych, gdy J. Litwiniszyn i A. Kidybiński zapoczątkowali międzynarodowy „transfer informacji”. W niedługim czasie na sesji *Problemy geologiczno-inżynierskie masywów skalnych* podsumowano ówczesny stan rozumienia pojęć „skała” i „masyw skalny” (Krajewski, 1984a). W okresie tym zaakceptowano liczne klasyfikacje branżowe, dotyczące fragmentarycznej oceny masywu skalnego pod względem szczelinowatości (Liszkowski i in., 1976), przydatności technicznej (Thiel, 1980) czy zagrożeń tąpnięciami lub deformacjami spągu wyrobisk górniczych (Kidybiński, 1982).

W owym czasie podjęto także dyskusję normalizacyjną jak ustalić granicę podziału na „grunt” i „skałę”. Krajewski (1984b) proponował ustalenie tej granicy na podstawie kryterium wytrzymałościowego, uzupełnionego wskaźnikiem odporności na działanie wody. Jako skała określony został ośrodek wykazujący wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie (R_c) $> 1,0$ MPa i podatność na rozmakanie $> 0,5$.

Thiel (1980) i Krajewski (1984a, 1984b) zalecali wówczas klasyfikowanie cech masywu skalnego na podstawie trzech łatwych do zakodowania wskaźników: wytrzymałość na ściskanie jednoosiowe R_c ($S_{1,2,3,4,5}$) rozstaw spękań ($F_{1,2,3,4,5}$), zwietrzenie ($A_{1,2,3,4,5}$) proponowanych przez ISRM (tab. 1).

Równocześnie Kidybiński (1982) upowszechnił w tym czasie dwie ważne klasyfikacje wskaźnikowe masywów skalnych: Z. Bieniawskiego (wskaźnik RMR) oraz N. Bartona, R. Liena i J. Lundego (wskaźnik Q) oparte na badaniach laboratoryjnych próbek i na polowych obserwacjach masywu skalnego.

W klasyfikacji wskaźnikowej skał Bieniawskiego (tab. 2) uwzględniono wytrzymałość materiału skalnego (I_s , R_c), podzielność rdzenia wiertniczego (RQD), odstępy spękań i chropowatość ich powierzchni, zawodnienie masywu i orientację szczelin względem kierunku działania obciążeń. Klasyfikacja Bieniawskiego zawiera zatem elementy idei

Deera i Millera (1966) oraz Hoeka i Braya (1974). Każdy wskaźnik cząstkowy punktowo waloryzuje cechy geologiczne, dzięki czemu możliwa jest kompleksowa, jakościowa ocena przydatności inżynierskiej masywu skalnego (tab. 3).

W klasyfikacji Bartona i innych (tab. 4) wskaźnik prowadzi również do punktowej oceny masywu w przedziale od skały nienaruszonej po rumowisko skalne, w różnych warunkach współpracy konstrukcji z podłożem. Barton (1976) dużą wagę przypisał oddziaływaniu tarcia na powierzchni pęknięcia (JRC) co wyraża odpowiednią klasą chropowatości. Cząstkowe wskaźniki ogólnego wskaźnika Q to liczba systemów spękań (J_n), szorstkości (J_r) i stan zwietrzenia ścianek szczelin (J_a), warunki wodne (J_w) oraz odprężenia masywu (SRF). We wskaźniku SRF jest ukryty wskaźnik wytrzymałości zależny od warunków tektonicznych i pęcznienia skał. Ocena wskaźnikowa Bartona ma swe umocowanie przy projektowaniu nowoczesnych, nie mających sobie równych konstrukcji tunelowych oraz drogowych połączeń podmorskich w spękanym i złupkowaconym, masywach skalnych Norwegii i jest stale empirycznie weryfikowana. W Polsce jest jednak znacznie mniej powszechna niż klasyfikacja Bieniawskiego.

Wprowadzenie w Polsce obu tych klasyfikacji w latach osiemdziesiątych należy uznać za „okres renesansu” geotechniki skalnej. Dzięki nim bowiem wiele środowisk inżynierskich w prosty sposób wprowadziło czynniki geologiczne do kategoryzacji masywów skalnych, zamiast poprzestać na ocenach wytrzymałości i opisach porównawczych skał nienaruszonych. Nie dopracowano jednak formalnego krajowego systemu kompleksowej klasyfikacji masywów skalnych i pomimo lat, które upłynęły od tamtej pory, klasyfikacja nadal jest oparta na przestarzałych, niejednorodnych i nieprecyzyjnych zaleceniach. Co prawda pojęcia „grunt” i „skała” znalazły swe miejsca w polskiej mechanice gruntów i mechanice skał, ale także ten podział ma charakter zwyczajowy, a nie formalny (Pinińska, 2000a) co jest przyczyną wielu nieporozumień.

Zgodnie z przestarzałą normą PN-86/B-02480 (1986) za „grunt skalisty” uważa się grunt rodzimy lity, bądź spękany o nie przesuniętych blokach, którego próbki nie wykazują zmian objętości ani nie rozmakają pod działaniem wody destylowanej i mają wytrzymałość na ściskanie $R_c > 0,2$ MPa. Natomiast według normy PN-84/B-01080 (1984) *Kamień dla budownictwa i drogownictwa* dyskwalifikowana jest skała o bardzo małej wytrzymałości < 15 MPa. Istniejące inne liczne klasyfikacje branżowe oraz cząstkowe klasyfikacje regionalne są także wzajemnie zupełnie niespójne.

W *Zasadach sporządzania dokumentacji geologiczno-inżynierskich* w 1999 r., a więc na przełomie wieku uznano, że „rozdzielenie pojęć skała i grunt jest zagadnieniem otwartym” (Bażyński i in., 1999) i zalecono tam podział Morgensterna i Eigenbroda z 1974 r., gdzie za skałę jest uważany ośrodek o $R_c > 0,7$ MPa, a wraz z rezerwą na rozdrobnienie do 7 MPa i współczynnika mięknięcia $> 0,4$. W tym ujęciu, mimo podobnych kryteriów podziału, „skała” Krajewskiego może być mocniejsza lub słabsza od „skały” Morgensterna i Eigenbroda.

Z różnych powodów postęp badawczy i rozwój technologiczny w światowej, a szczególnie europejskiej geotechnice skalnej nie znalazły zatem właściwego odbicia w formowaniu nowych poglądów na ocenę masywów skal-

nych w Polsce. Inaczej bowiem rozumiana jest problematyka właściwej klasyfikacji skał przy takich inwestycjach jak Eurotunel pod kanałem la Manche, tunele podmorskie czy mosty w Norwegii, tunele Gran Sasso we Włoszech czy Arlberg w Austrii, a inaczej w górnictwie czy przejściu tunelem metra pod Wisłą w Warszawie. Obecne prace nad unifikacją przepisów europejskich w Polsce należy więc jak przed 20 laty rozpocząć od pytań:

— jakie jest kryterium podziału geotechnicznego na „skały” i „grunty”?

— jak zdefiniować pojęcia „skała” i „masyw skalny”? oraz sformułować nowe pytanie „czy podział taki ma sens”?

Przykłady międzynarodowych projektów norm europejskich

Prace nad unifikacją ocen podłoża gruntowego dla celów projektowania są w Unii Europejskiej bardzo zaawansowane i istnieje wielki nacisk środowiska międzynarodowego, aby zostały zaakceptowane jak najszybciej.

Tab. 1. Klasyfikacja skał wg ISRM (Krajewski, 1984b)

Table 1. The ISRM rock classification (Krajewski, 1984b)

Re [MPa]	Klasa masywu	Rozstaw spękań, [m]	Klasa masywu	Stopień zwietrzenia	Klasa masywu
<5	S_1	<0,1	F_1	brak zwietrzliny lub nieznaczne zwietrzenie	A_5
5 ÷ 10	$S_{1,2}$ S_2	0,1÷0,3	$F_{1,2}$ F_2	zwietrzenie wzdłuż ścianek spękań	A_4
10 ÷ 50	S_3	0,3÷1,0	F_3	ogólne nieznaczne zwietrzenie	A_3
50÷100	S_4	1,0÷3,0	F_4	wyraźne zwietrzenie	A_2
>100	$S_{4,5}$ S_5	>3,0	$F_{4,5}$ F_5	mocne zwietrzenie	A_1

Tab. 2. Klasyfikacja skał wg Bieniawskiego (wskaźnik RMR) (Kidybiński, 1982)

Table 2. Rock classification index RMR (Kidybiński, 1982)

Wytrzymałość materiału skalnego		Podzielność rdzenia wiert. (wskaź. RQD) (punkty)	Odstęp spękań [m] (punkty)	Charakter spękań (punkty)		
wskaźnik I_s [MPa]	R_c (punkty) [MPa]					
>8	> 200 (15)	90÷100 (20)	>3 (30)	bardzo nierówne, nieciągle, brak oddzielności (25)		
4÷8	100÷200 (12)	75÷90 (17)	1÷3 (25)	nierówne, oddzielność do 1 mm, twarde ścianki szczelin (20)		
2÷4	50÷100 (7)	50÷75 (13)	0,3÷1 (20)	nierówne, oddzielność do 1 mm, miękkie ścianki szczelin (12)		
1÷2	25÷50 (4)	25÷50 (8)	0,05÷0,3 (10)	ciągle, rozwarłość szczelin 1÷5 (6)		
Ocena wg R_c	10÷ 25 (2) 3÷ 10 (1) 1÷ 3 (0)	<25 (3)	<0,05 (5)	ciągle, równe, rozwarłość ponad 5 mm (0)		
Zawodnienie			Orientacja szczelin w relacji do kierunku obciążeń			
Dopływ na 10 m chodnika 1/min	Stosunek ciśnienia wód szczel. do maks. naprężenia	Ogólne warunki (punkty)	Stopień oceny	W wyrobiskach podziemnych (punkty)	W podłożu fundamentu (punkty)	W zboczu (punkty)
brak	0	zupełnie sucho (10)	bardzo korzystna	0	0	0
brak	0	zupełnie sucho (10)	korzystna	-2	-2	-5
<25	do 0,2	zawilgocenia (7)	średnia	-5	-7	-25
25÷125	0,2÷0,5	woda o małym ciśnieniu (4)	niekorzystna	-10	-15	-50

Dzięki działaniom ITB środowisko polskie mogło zapoznać się z dotychczasowymi zaleceniami projektu CEN Eurocode 7, poświęconemu projektowaniu geotechnicznemu (Harmonizacja..., 2000). Pojawiają się w nim pewne nieliczne elementy oceny „gruntów skalistych”, w głównej jednak mierze przepisy te dotyczą podłoża gruntowego.

Poza projektem CEN, projekt międzynarodowego systemu oceny ośrodków skalnych przedstawiła w ostatnim czasie ISO (1997, 2000). Na uwagę zasługuje także blisko 10 lat starsza norma czeska (CSN 731001, 1988).

Ponieważ w Polsce w zakresie kompleksowej klasyfikacji masywu skalnego zatrzymaliśmy się na poziomie ustalonym z lat osiemdziesiątych, warto je nieco przybliżyć.

Projekt CEN (Europejskiego Komitetu Normalizacji) dokument ENV-1997-1 Eurocode 7 wskazuje na znaczącą rolę opisu geologicznego w ocenie geotechnicznej podłoża skalnego. W rozdziale pt. *Projektowanie geotechniczne cz. 1. Zasady ogólne* (CEN, 1997) zalecono klasyfikowanie skał na podstawie kompleksowego opisu geologicznego, jego standardowych cech fizyczno-mechanicznych takich jak wilgotność, rozmakanie, ciężar objętościowy, porowatość, nasiąkliwość, pęcznienie, wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie oraz, co jest pewnym novum, na podstawie prędkości rozchodzenia się fal ultradźwiękowych.

W rozdziale 3.3.9 tego dokumentu pt. *Ocena właściwości skał i masywów skalnych* są wymienione również badania materiału skalnego na próbkach z rdzeni oraz badania niejednorodnego masywu skalnego zawierającego powierzchnie nieciągłości. CEN zaleca także by klasyfikacje oparte na jednoosiowej wytrzymałości na ściskanie próbek skalnych, uzupełniać w skali masywu o wytrzymałość na ścinanie wzdłuż powierzchni nieciągłości.

Bardzo istotnym wymogiem w badaniach laboratoryjnych jest konieczność oceny wpływu naprężeń na parametry geomechaniczne oraz bada-

nia wytrzymałości na **orientowanych próbkach skalnych**, jak też ocena wpływu **ścieżki obciążenia na wartość modułu Younga**. Dopuszczona jest ocena wytrzymałości na ściskanie metodą *load point test* oraz ocena wskaźnika RQD stanowiące integralne elementy klasyfikacji masywów skalnych wg Deera i Millera, Bieniawskiego oraz Bartona. Te wymienione przykładowo, zalecane przez CEN wymogi badawcze, należałoby uznać za znaczne osiągnięcie formalne, gdyby rzeczywiście udało się je powszechnie wprowadzić do badań geomechanicznych. Dotychczas w rutynowej praktyce inżynierskiej orientacja próbek lub analiza faz deformacji były bowiem stosowane jedynie w badaniach poznawczych.

Zalecenia CEN mają w wielu przypadkach charakter „wylizanki”, pomimo to jednak wytyczają nowe kierunki badań a czynniki geologiczne, które w ostatnich latach są prezentowane już w wielu uznanych klasyfikacjach masywów skalnych są w nich także reprezentowane. Projekt CEN-Eurocode 7, pozostawia niestety otwarty problem inżynierskiej kategoryzacji ilościowej tak skał, jak i masywu skalnego co jest godne ubolewania. Eurocode 7 w dokumentach ENV-1997-2 - „badania laboratoryjne” oraz ENV-1997-3 - „badania polowe”, zawiera również projekty procedur badawczych skał. ITB proponuje zachowanie ogółu procedur badań laboratoryjnych zgodnie z projektem CEN, natomiast w odniesieniu do badań polowych przedstawia własny projekt normy polskiej PRN-B-04452, opartej na ustaleniach ENV-1997-3, która ma zastąpić normę PN-74/B-04452. Wymienione są tam wrywkowo zasady badania skał dylatometrem RTD oraz uproszczonej klasyfikacji wietrzenia skały (tab. 5). W projekcie tym, niestety nieprecyzyjna jest terminologia oraz definicja granicy skała/grunt, a zalecany zakres badań polowych skał jest skąpy.

ISO (International Standard Organization) przedstawiła w ostatnich latach dwie wersje projektu normy międzynarodowej dotyczącej badań geomechanicznych i klasyfikacji skał (ISO/DIS 14689) pt. *Geotechnika w budownictwie — identyfikacja i opis skał*. Jest to projekt z 1997 r. (ISO, 1997) oraz jego wersja poprawiona z roku 2000 (ISO, 2000). Projekt ISO ma charakter kompilacyjny. Ujęte są w nim szczegółowo wydzielenia geologiczne, tablica barw dla ich oznaczania i wiele innych ustaleń o charakterze podstawowym. W projekcie wprowadzono również wiele elementów kategoryzacji zaczerpniętych z wielu omówionych wcześniej klasyfikacji. Posłużono się wynikami osiągnięć praktyki światowej, zaleceniami ISRM (1978),

IAEG (1981), Bieniawskiego (1989) oraz wielu innych norm szczegółowych. Można się więc zgodzić z jej autorami, że tak kompleksowy opis skał nie był ujęty w żadnej dotychczasowej normie międzynarodowej.

W obu wersjach normy wprowadzono bardzo ważną notę, że **identyfikacja skał jest możliwa jedynie w ramach wiedzy geologicznej**. W ISO granica między pojęciami „skała” i „grunt” jest oparta na kryterium wytrzymałościowym. Grunt charakteryzuje wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie $R_c < 0,6$ MPa. Zatem granica ta jest jeszcze niżej postawiona niż u Morgensterna i Eigenbroda (1974). Pod terminem „skała” (*rock*) jest rozumiany naturalny zbiór minerałów, skonsolidowany i zcementowany lub związany ze sobą w inny sposób tak, że jego wytrzymałość jest większa niż gruntu. Pod terminem „masyw skalny” (*rock mass*) rozumiana jest skała *in situ* wraz z nieciągłościami i profilem wietrzeniowym. Pod terminem „materiał skalny” (*rock material*) jest rozumiana skała niaruszona, ograniczona powierzchniami nieciągłości.

W normie ISO zalecono w opisie masywu uwzględnienie biegu i upadu warstw, charakterystyki struktury skały, stopnia jej zwietrzenia, podziału na bloki, szorstkości powierzchni spękań i wiele innych cech wyszczególnionych we wcześniejszych klasyfikacjach. Wiele z tych zaleceń ma charakter podręcznikowy. Przy dzisiejszym stanie wiedzy z zakresu geomechaniki jest to uwstecznienie w stosunku do dokonanych w tej dziedzinie. Projekt ten wprowadza jednak ważne elementy klasyfikacji masywów skalnych oparte na elementach badań laboratoryjnych i obserwacjach polowych i pod tym względem jest bardzo cenny.

Klasyfikacja skał wg ISO jest oparta na ocenie wytrzymałościowej skał nawiązującej, szczególnie w wersji z 2000 r. do klasyfikacji Browna (1981). W projekcie ISO, którego główne elementy przedstawiono w tab. 6, wyróżniono skały: wyjątkowo mocne, bardzo mocne, mocne, średnio mocne, średnio słabe, słabe i bardzo słabe znane już w klasycznej klasyfikacji Deera i Millera (1966) przy czym w projekcie ISO, tak w wersji z 1997, jak i 2000 zwiększono liczbę klas wytrzymałości z 5 do 7.

W projekcie ISO, w którym zawarto również wiele elementów klasyfikacji Bieniawskiego i Bartona, masyw skalny scharakteryzowano jednak przy pomocy skomplikowanych wskaźników cząstkowych co utrudnia jego ocenę na podstawie prostych obserwacji polowych. Nie przedstawiono także oceny wpływu struktur geologicznych, kierunku działania sił i zmiennego stanu naprężeń na wypadkową stateczność masywu, co jest np. możliwe poprzez zastosowanie wskaźnika SRF.

Mimo zatem nowoczesnego ujęcia jednych zagadnień, inne są w projekcie niezbyt docenione, lub nadmiernie rozbudowane opisowo. Wskutek tego końcowa ocena podłoża na podstawie normy ISO jest mało uniwersalna. Pod tym względem jest to regres w stosunku do ocen punktowych dokonywanych na podstawie wskaźników RMR lub Q wg Bieniawskiego lub Bartona, czy też kodów (R_0 do R_6) stosowanych przez Browna.

Tab. 3. Klasyfikacja masywu skalnego ze względu na RMR wg Bieniawskiego (1989)
Table 3. Rock massif classification index RMR (after Bieniawski, 1989)

Cechy stateczności	Klasa masywu skalnego				
	I	II	III	IV	V
Ocena słowna	bardzo mocny	mocny	średni	słaby	bardzo słaby
Sumaryczna ocena punktowa	90÷100	70÷90	50÷70	25÷50	do 25
Średni czas statecznego utrzymania stropu bez obudowy i rzępiętość	10 lat (5 m)	6 miesięcy (4 m)	1 tydzień (3 m)	5 godz. (1,5 m)	10 min (0,5)
Spójność masywu	ponad 30	20÷30	15÷20	10÷15	do 10
Kąt tarcia wewnętrznego skał masywu, stopnie	ponad 45	40÷45	35÷40	30÷35	do 30
Zawałowość (rabowalność) stropu	bardzo słaba	trudna, duże bloki	średnia	łatwa, małe kęsy	bardzo dobra

Tab. 4. Klasyfikacja masywu skalnego według Bartona (wskaźnik $Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J} \times \frac{J}{(SRF)}$) (Kidybiński, 1982)

Table 4. Rock massif classification index Q after Barton (Kidybiński, 1982)

Jn	Liczba systemów spękań	Jr	Charakterystyka szorstkości szczelin	
0,5÷1,0	bez spękań, ewentualnie pojedyncze rysy	4	szorstka z zadziorami	
2	jeden system spękań oraz rzadkie dodatkowe szczeliny	3	szorstkie, nieregularne, pofalowane	
3				
4	dwa systemy spękań oraz rzadkie dodatkowe szczeliny	2	gładkie, pofalowane	
6				
9	trzy systemy spękań oraz rzadkie dodatkowe szczeliny	1,5	szkliste, pofalowane bądź szorstkie lecz płaskie	
12				
15	cztery lub więcej systemów szczelin	1,0	płaskie, gładkie (szczeliny wypełnione całkowicie luźnym materiałem ilastym lub piaszczystym w stopniu uniemożliwiającym bezpośredni kontakt ścianek skalnych)	
20	rumowisko skalne	0,5	szkliste, płaskie	
J_a	Charakterystyka zwietrzenia ścianek spękań	Jw	Przybliżone ciś. wody, MPa	Charakterystyka zawodnienia
0,75	brak lub spękania zagojone	1,0	do 0,1	suche lub lokalnie nieznaczne zwietrzenie
1	świeże, nie zwietrzałe czasem z lekkimi naciekami	0,66	0,1÷0,25	średni dopływ i lokalne rozmycie
2	nieznaczne, twarde powłoki zwietrzeniowe	0,5	0,25÷1	duży dopływ wód szczelinowych
3	cienkie powłoki zwietrzeniowe	0,33	0,25÷1	duży dopływ połączony z rozmywaniem zwietrzelin
4	miękkie powłoki zwietrzeniowe powyżej 2 mm grubości (kaolinit, chloryt, talk, gips, małe ilości minerałów pęczniących)	0,2÷0,1	>1	bardzo duży dopływ, cyklicznie pojawiający się
		0,1÷0,05	>1	bardzo duży, stały dopływ
5	strefy lub pasma zwietrzelin w stanie zwartym	Wskaźnik SRF	Warunki odprężenia masywu	
6	wypełnienia (do 5 mm grubości) zwartym materiałem ilastym nie pęczniącym	10	liczne strefy osłabienia, luźno spękane skały, duże strefy zwietrzenia	
		2,5÷3	pojedyncze strefy osłabienia, niewielki udział strefy zwietrzałej	
8	wypełnienia do 5 mm grubości z średnio lub słabo sprasowanego materiału ilastego nie pęczniącego	1	zwarty, zwięzły masyw, średnie naprężenia naturalne	
9÷12	ciągłe wypełnienie do 5 mm grubości materiałem pęczniącym (w podanym przedziale wartości J_a zależy od udziału materiału pęczniącego i dostępu wody)	2	zwarty, zwięzły masyw, wysokie naprężenia naturalne	
		5÷10	bardzo wysokie naprężenia naturalne, bądź średnio intensywne wyciskanie lub pęcznienie	
13÷20	grube, ciągłe wypełnienie materiałem ilastym w stanie plastycznym	10÷20	bardzo wysokie naprężenia naturalne, tapania lub intensywne wyciskanie i pęcznienie	

Tab. 5. Przykład mylącego uproszczenia klasyfikacji wietrzenia skał (projekt PrPN-B-04452), (Harmonizacja ..., 2000, załącznik K)

Table 5. Simplified erroneous classification of rock weathering after PrPN-B-04452 (Harmonizacja ..., 2000)

Stopień	Stopień rozkładu	Cechy charakterystyczne w próbkach i rdzeniach
I	skała zwietrzała	Brak widzialnych oznak wietrzenia materiału skalnego, możliwe nieznaczne odbarwienie na większych powierzchniach nieciągłości
II	słabo zwietrzała skała	Odbarwienie wskazuje wietrzenie materiału skalnego i nieciągłość warstw
III	średnio zwietrzała skała	Mniej niż połowa materiału skalnego jest rozłożona lub zamieniona w grunt. Niezwietrzała lub odbarwiona skała występuje w formie ciągłej lub jako „rdzenie kamienie”
IV	silnie zwietrzała skała	Więcej niż połowa materiału skalnego jest rozłożona lub zamieniona w grunt. Świeża lub odbarwiona skała jest przedstawiana także, jako nieciągły szkielet konstrukcji lub w postaci rdzenia”
V	bardzo silnie zwietrzała skała	Cały materiał skalny jest rozłożony lub zamieniony w grunt. Pierwotna „struktura masy” jest wciąż w dużej mierze nienaruszona
VI	grunt rezidualny	Cały materiał skalny jest zmieniony w grunt. Struktura i tekstura materiału są zniszczone. Występuje duża zmiana objętości, ale grunt zalega w miejscu wietrzenia

Norma czeska SN-731001/1988 n.t. Klasyfikacja skał dla posadowienia budowli (1988) powstała w 1988 r. i jest jak na „swoją wiek” dokumentem bardzo nowoczesnym. W normie tej rozróżniane są właściwości materiału skalnego (próbki skalnej) i masywu skalnego, a kategoryzacja

wytrzymałości jest oparta na klasyfikacji Browna. Podstawą klasyfikacji są tu zatem charakterystyki wytrzymałościowe, a opis czynników geologicznych, określają odrębne przepisy (norma CSN 731001). Granica pojęć skała/grunt w normie czeskiej jest postawiona przy wytrzy-

Tab. 6. Elementy klasyfikacji skał i masywów skalnych według ISO/DIS 148669 (ISO, 1997, 2000)
 Table 6. Rock classification and rock massif classification factors according to ISO/DIS 148669 (ISO 1997, 2000)

Wytrzymałość			Wielkość szczelin			Zawodnienie szczelin		
Nazwa	R _c [MPa] 1997	R _c [MPa] 2000	Nazwa	Opis	Rozstęp [mm]	Wypływ [l/s]	Nazwa	
Wyjątkowo mocna	>200	>250	zamknięte	bardzo zwarte	0,11	0,05–0,5	duże	
Bardzo mocna	100–200	100–250		zwarte	0,1–0,25			
				częściowo otwarte	0,25–0,5			
Mocna	50–100	50–100	rozwarne	otwarte	0,5	0,5–5	średnie	
Średnio mocna	12,5–50	25–50		u szerokie	2,5			
Średnio słaba	5–12,5	5–25		szerokie	10			
Słaba	1,25–5	1–5	otwarte	bardzo szerokie	10–100	>5	małe	
Bardzo słaba	<1,25	<1		wyjątkowo szerokie	100–1000			
				kawerny	>1 m			
Zwierzanie			Szorstkość powierzchni (ISO, 2000)			Rozstaw spękań		
Nazwa	Stopień	Opis	Nazwa	Stopień	Opis	Odstęp (1997) [mm]	Nazwa	Odstęp (2000) [mm]
Świeża	1	od całkowitego braku materiału zwietrzałego do całkowitego rozpadu materiału skalnego i zmiany objętości bez transportu	szorstka	1	schodkowa	>2000	bardzo szeroki	>2000
Słabo zwietrzała	2		gładka	2		600–2000	szeroki	600–2000
Średnio zwietrzała	3		śliska	3		200–600	średni	200–600
Bardzo zwietrzała	4		szorstka	4	falista	60–200	bliski	60–200
			gładka	5				
Całkowicie zwietrzała	5		śliska	6	płaska	20–60	bardzo bliski	<60
Grunt rezidualny	6	szorstka	7					
		gładka	8					
		śliska	9	<20	nadzw. bliski			

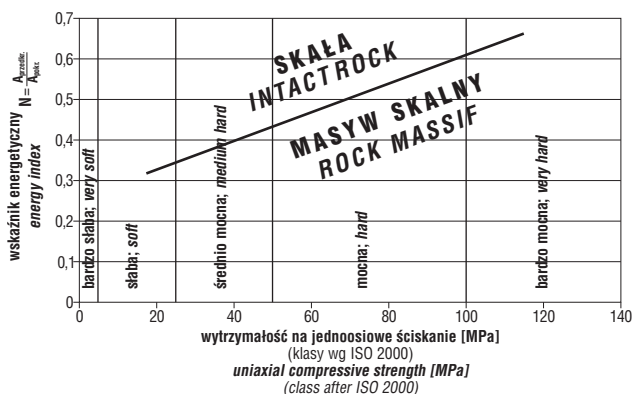
małości poniżej 1,5 MPa. W klasyfikacji skał według normy czeskiej poza wytrzymałością uwzględniona jest również odkształcalność skały poprzez moduł odkształcenia wyznaczony stycznie do krzywej deformacji przy naprężeniu wynoszącym 50% R_c, a dla oceny masywu jest charakteryzowana nieciągłość ośrodka i stopień zwierzania w sposób zbliżony do zasad wprowadzonych do projektu ISO. Główne, wybrane elementy tej klasyfikacji przedstawiono w tab. 7.

Przedstawione powyżej przykłady projektów norm wskazują, że międzynarodowe systemy waloryzacji cech geotech-

nicznych masywów skalnych, powstałe w ostatnim dziesięcioleciu są oparte na merytorycznie podobnych, uznanych cząstkowych wskaźnikach Deera i Millera, Browna, Bartona lub Bieniawskiego. Odnoszą się one w większości ocen do wytrzymałości i odkształcalności próbki skalnej oraz stanu spękania, szorstkości i wypełnienia powierzchni spękań oraz warunków zawodnienia masywu skalnego. To pozorne podobieństwo jest jednak przyczyną wielu nieporozumień ze względu na brak unifikacji tak klas wydzielen jak i stosowanej terminologii ocen. Narasta zatem swoista dezinformacja co do „jakości” danego masywu. Można to zaobserwować na przykładzie ocen wytrzymałości skał w 10 wybranych klasyfikacjach (tab. 8), w których np. przy wytrzymałości na ściskanie w przedziale rzędu 50 MPa do 100 MPa, skałę można określić jako średnio, mocno lub wysoko wytrzymałą, a granica wyznaczająca pojęcia skała/grunt zmienia się w zakresie od 0,2 do 1,5 MPa.

Równocześnie kryteria ocen masywu proponowane w zaleceniach CEN i ISO są odzwierciedleniem stanu badań lat siedemdziesiątych wieku dwudziestego, co zważywszy ogromny postęp wiedzy i technologii inżynierskiej, jaki nastąpił od tamtej pory jest bardzo konserwatywne. Należałoby zatem szukać nowych rozwiązań umiejscowionych w nowej generacji poglądów i doświadczeń konstrukcyjnych obecnego wieku.

Przebieg ewolucji geotechniki skalnej prezentowany przez Hooda i Browna (1999), wskazuje co prawda, że transfer nowych poglądów i rozwiązań oraz wiedzy do praktyki przebiega ze znacznym opóźnieniem. Lecz już



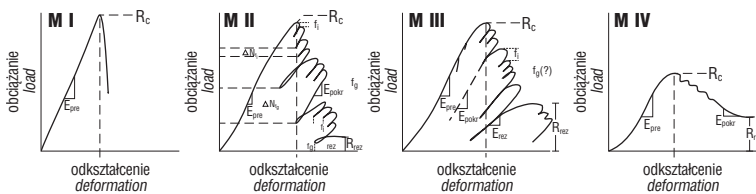
Ryc. 1. Przykład wyznaczania energetycznego wskaźnika wytrzymałości w podziale na klasy wg ISO/2000 (skały Jury Krakowsko-Czestochowskiej)

Fig. 1. The strength energy index diagram for Jurassic rocks (the Kraków–Czestochowa Upland); classes after ISO/2000

nawet w warunkach polskich sięgnięto do innych metod badawczych niż powszechnie stosowane i przedstawiono geotechniczne klasyfikacje skał i masywów skalnych uwzględniające polowe i laboratoryjne badania geofizyczne czy energetyczne kryteria zniszczenia.

W ostatnich latach Bestyński (1993) przedstawił geofizyczną, wskaźnikową klasyfikację skał fliszowych (KFG), opartą na wynikach badań polowych. Uwzględniono w niej prędkość sejsmicznej fali podłużnej (V_p), elektrooporność masywu (p) i wytrzymałość skały (R_c). Wskaźnik jakości masywu $KFG = aV_p + bp + c$; gdzie a , b i c to empiryczne współczynniki regionalne.

Innym rozwiązaniem jest kompleksowa geotechniczna wskaźnikowa ocena masywu fliszowego (KF) uwzględniająca ocenę wytrzymałości na ściskanie (R_c), rozstaw spękań, stopień zaburzeń tektonicznych, udział piaskowca w osadach oraz warunki zawodnienia (tab. 9). Na podstawie sumy ocen cząstkowych ustalić można jakość masywu fliszowego w zakresie klas I do V (Thiel, 1993).



Ryc. 2. Modele deformacji pokrytycznej przy jednoosiowym ściskaniu w warunkach stałego przyrostu odkształcenia obwodowego (Pinińska, 1992)

Fig. 2. Models of postcritical deformation under uniaxial compression. Test with constant circumferential strain (after Pinińska, 1992)

Obie powyższe klasyfikacje, mimo regionalnego charakteru wnoszą elementy uniwersalne, a oceny masywu fliszowego na podstawie wartości obu wskaźników KF i KFG są zbliżone i można je porównywać z wartością wskaźnika RMR.

Wprowadzenie sztywnych maszyn wytrzymałościowych umożliwiło laboratoryjne ustalenie pozniszczeniowej wytrzymałości rezidualnej, którą można porównywać z wytrzymałością masywu skalnego. Stan osłabienia próbki skalnej oraz wartość wytrzymałości rezidualnej można określić na podstawie wskaźników rozproszenia energii lub emisji akustycznej. Całkowita utrata wytrzymałości następuje, gdy w ciele skalnym powstanie określona, właściwa danej skale, liczba spękań wyniku, zarejestrowanych poziomem emisji akustycznej lub rozproszenia energii (Pinińska, 1992). Stany te można zatem przedstawić przy pomocy odpowiednich wskaźników wskazujących ekwiwalentne cechy osłabionego masywu skalnego. Jeżeli energia przedkrytyczna (A_{prz}) jest właściwa skale, a energia pokrytyczna (A_{pok}) odpowiada masywowi spękanemu, to relację tę wyraża wskaźnik energetyczny ($N = A_{prz}/A_{pok}$). Wskaźnik taki jest obiektywny, gdyż charakter deformacji odzwierciedla tak mechanizmy pęknięcia, jak i szorstkość powierzchni spękań oraz ich gęstość. Dla większości skał wskaźnik ten wzrasta wraz z wytrzymałością (ryc. 1). Należy zatem ustalić odpowiednie zależności dla różnych ośrodków skalnych i różnych modeli deformacji (ryc. 2), aby przy odpowiedniej wytrzymałości próbki wyznaczyć wskaźnik N masywu osłabionego. W podobny sposób, w zależności od modelu deformacji charakteryzować można spękania

Tab. 7. Elementy klasyfikacji skał i masywu według CSN-731001 (1988)

Table 7. Rock and rock massif classification according to CSN 731001 (CSN, 1988)

	Wytrzymałość				Odształcalność		Stopień zwietrzienia		Rozstaw spękań	
	Klasa	Rc [MPa]	Ocena	Opis	Przykłady skał	Moduł deformacji	%	Określenie	Odstęp	Opis
Skały	R1	>150	b. wysoka (w tym wyjątkowo wysoka >250)	skałę trudno rozbić młotkiem geologicznym	granity, diabazy, kwarcyty	>500	0	niezwietrzała	>2000	bardzo mały
	R2	50-150	wysoka		wapień, dolomity, piaskowce					0-150
	R3	15-50	średnia	skałę można łatwo rozbić młotkiem geologicznym	tufity, kataklazyty, lekko zwietrzałe skały klasy R1	200-500	10-35	lekko zwietrzała	200-600	średni
Półskały	R4	5-15	niska	skałę można zarysować nożem	łupki, fylity, ultramylonitycznie zwietrzałe skały klasy R1, i R2, lekko zwietrzałe i niezwietrzałe skały klasy R4					35-75
	R5	1,5-5	b. niska	skałę można ręcznie rozdrobnić	mułowce, ilowce, tufity, całkowicie zwietrzałe skały klasy R1, R2, silnie zwietrzałe skały klasy R3, zwietrzałe skały klasy R4	<200	>75	całkowicie zwietrzała	20-60	
Grunty	R6	0,5-1,5	ekstremalnie niska	skałę można zarysować paznokciem	całkowicie zwietrzałe skały klas wyższych, zwietrzliny					

masyw skalny przy zastosowaniu wskaźnika mobilizacji emisji akustycznej (Pinińska, 2000b).

Propozycje rozwiązań

Wydaje się, że w istniejącej sytuacji konserwatywności przepisów normowych, rozproszenia i niejasności pojęć co do granic klasyfikacyjnych, najpewniejszą drogą ustalenia uniwersalnej klasyfikacji będzie przystosowanie polskiego systemu do wskaźnikowej oceny masywu skalnego wywodzącej się od Deerea i Millera (1966), wskaźników Bieniawskiego (1989) i Bartona (1986), ale zarazem w ocenach wskaźnikowych uwzględniać bardzo dużą liczbę usystematyzowanych czynników charakteryzujących warunki geologiczne, unikając przy tym złożonej formy opisowej. Dzięki temu oceny te będą łatwo czytelne w praktyce inżynierskiej.

Do takich rozwiązań zmiierają współczesne, światowe inżynierskie systemy ocen masywów skalnych, tworzone w ślad za postępem technik badawczych. Opierają się one

w dużej mierze na badaniach empirycznych, sprawdzanych w warunkach *in situ*. Zawierają one elementy ocen stanów pokrytycznych, stanu rozproszenia energii oraz wpływu mechanizmu pęknięcia na ścieżkę deformacji.

Z przeglądu wielu światowych propozycji klasyfikacyjnych wynika, że warunki te najlepiej są wyrażone w zmodyfikowanych propozycjach Hoeka (1999) oraz Bartona (1999), pionierskich twórców klasyfikacji skał w okresie „renesansu” geotechniki skalnej. Uwzględniany jest w nich postęp wiedzy i są przystosowane dla celów praktyki przez syntetyzowanie danych we wskaźnikach i diagramach.

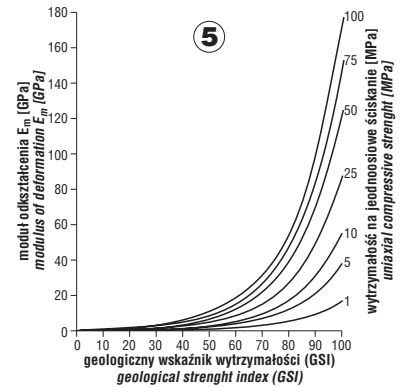
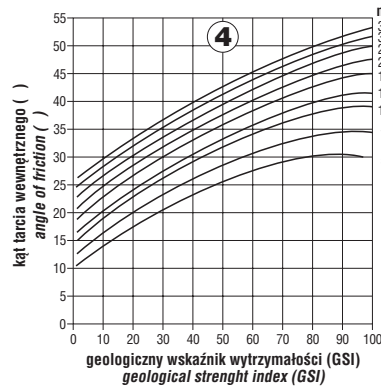
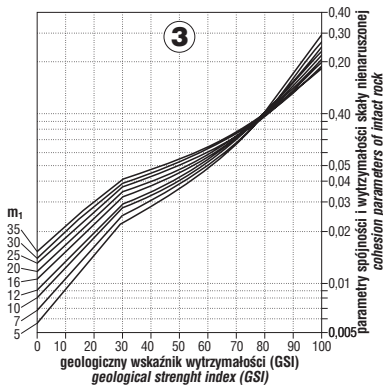
Propozycja Hoeka (1999) zaprezentowana w *Putting Numbers to Geology — an Engineer's Viewpoint* jest oparta na wskaźniku GSI (*Geological Strength Index*). Wskaźnik GSI został wprowadzony przez Hoeka i Browna już w 1997 r. i zawiera w sobie zespół informacji o wpływie strukturalnych czynników geologicznych na zachowanie masywu skalnego (ryc. 3). Hoek (1999) wprowadził również współczynnik redukcyjny — stałą m_1 , na podstawie której

Tab. 8. Wydzielenia klas wytrzymałości skał (R_c) w różnych klasyfikacjach i przepisach normowych (Pinińska, 2001)

Table 8. Comparison of rock strength (R_c) classes in various classifications, norms and norm directives (Pinińska, 2001)

R_c [MPa]	Deer Miller, 1966	Habenicht Brennsteiner, 1971****	ISRM 1973	Bieniawski, 1974 (punkty)	Brown, 1981	Miller, 1982	Polska norma 1986 *	Czeska norma 1989 ***	Thiel, 1993	ISO 1997	ISO 2000
250	bardzo mocna	I		15	R_6 wyjątkowo mocna	A bardzo wysoka	bardzo duża				wyjątkowo mocna
200			S_5		R_5 bardzo mocna	B wysoka	duża	R_1 bardzo wysoka			bardzo mocna
150	mocna	II		12					I bardzo mocna		
100			S_4	7	R_4 mocna	C średnia	średnia	R_2 wysoka			
50	średnia	III							II mocna		mocna
25	ślaba	IV		4	R_3 średnio mocna	D niska	mała	R_3 średnia	III średnia		średnio mocna
15			S_3	2					IV ślaba		
10	bardzo ślaba	V			R_2 ślaba	E bardzo niska		R_4 niska	V bardzo ślaba		ślaba
5			S_2	1			bardzo mała				średnio ślaba
1			S_1	0	R_1 bardzo ślaba			R_4 bardzo niska			ślaba
					R_0 wyjątkowo ślaba			R_4 ekstremalnie niska			bardzo ślaba
											wyjątkowo ślaba
	Granica grunt/skała		1,0		0,25		0,2 / 5 **	1,5		0,6	

* – PN 84/B-01080; ** – PN 84/B-02480; *** – CSN 731001/88, **** – vide Kidybiński, 1982



Ryc. 3. Zależność spójności od wskaźnika GSI (Hoek, 1999). Ryc. 4. Zależność kąta tarcia od wskaźnika GSI (Hoek, 1999). Ryc. 5. Zależność modułu odkształcenia od wskaźnika GSI (Hoek, 1999)

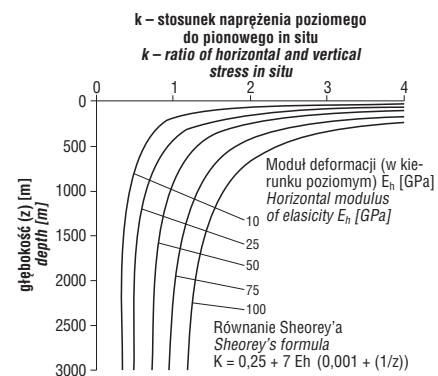
Fig. 3. Relationship between cohesion and GSI ((Hoek, 1999). Fig. 4. Relationship between angle of friction and GSI (Hoek, 1999). Fig. 5. Relationship between deformation modulus and GSI (Hoek, 1999)

Tab. 9. System klasyfikacji skał fliszowych według Thiela (1993)

Table 9. Flysch rock classification system after Thiel (1993)

Parametry oceny	Wartość parametrów	Ocena punktowa
Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie Rc [MPa]	<25	0
	25–30	1–3
	50–100	4–6
Rozstęp nieciągłości warstw (warstw i spękań) d [m]	<0,05	0
	0,05–0,3	1–5
	0,3–1,0	6–11
Stopień zaburzenia (uwarstwienia, spękania) T	silny, brekcje tektoniczne, spękania i przemieszczone bloki	0
	silny, nieciągłości i strefy intensywne sfałdowania	1–5
	średni, małe pojedyncze nieciągłości, sfałdowania	6–11
Litologia L [%]	bardzo mały, pojedyncze nieciągłości, sfałdowania	12–24
	<15	0
	15–50	1–5
Warunki wodne w	51–85	6–11
	>85	>11
	bardzo niekorzystne, wpływy o wysokim ciśnieniu	0
	wyływy i sączenia o średnim i małym ciśnieniu	1–5
masyw suchy		6
	masyw mokry	12

transformuje się cechy próbek na parametry masywu skalnego. Wartość stałej m_1 została ustalona doświadczalnie, jest związana z chropowatością powierzchni nieciągłości i w zależności od rodzaju skały wynosi od 4 do 35. Dolna granica oszacowania wartości m_1 odpowiada łupkom w kierunku równoległym do foliacji, a granica górna dotyczy monolitycznych granitów. Charakterystyczne parametry masywu skalnego można ustalać z odpowiednich diagramów na podstawie wskaźnika GSI oraz m_1 (ryc. 4–6). Jest to przykład, jak na podstawie znajomości regionalnych cech geologicznych skały można uzyskać redukcję wartości jej parametrów geotechnicznych dla oceny cech masywu *in situ*.



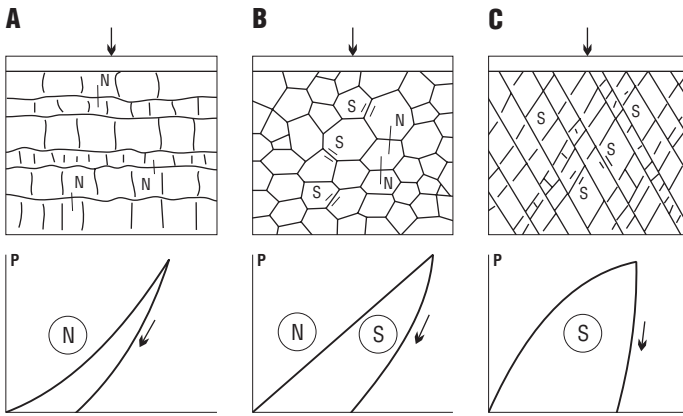
Ryc. 6. Zależność współczynnika k (naprężenia poziomego do pionowego) od głębokości (Hoek, 1999)

Fig. 6. Relationship between the k index (vertical to horizontal strain ratio) and GSI (Hoek, 1999)

Ponieważ w projektowaniu jest niezbędna znajomość stanu naprężeń w górotworze, a szczególnie proporcji naprężeń poziomych do pionowych (k), Hoek proponuje wyznaczanie tej wartości przy zastosowaniu równania Sheorey'a, co wiąże się z koniecznością oceny modułu deformacji w kierunku poziomym (ryc. 7). Wprowadza zatem do ostatecznej oceny masywu elementy anizotropii ośrodka.

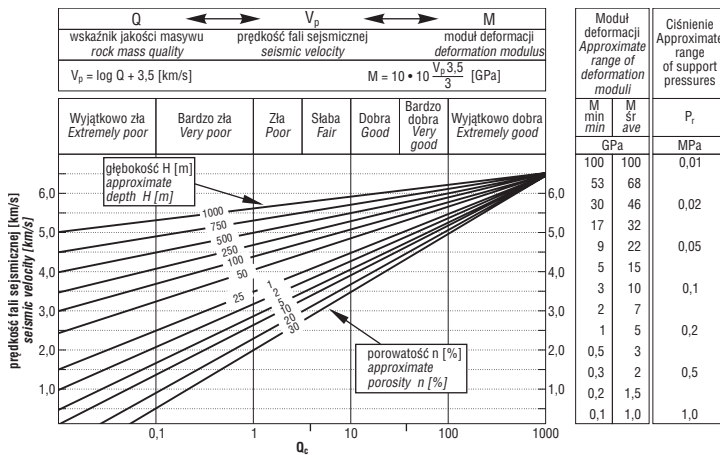
Z kolei propozycja Barton (1999) jest modyfikacją klasyfikacji z lat siedemdziesiątych. Proponuje uwzględnianie czynników strukturalnych w masywie poprzez modele deformacji (ryc. 8) z zamykaniem szczelin (N) o małych przemieszczeniach i ze ścinaniem (S) o dużych przemieszczeniach (Bandis, 1980; Barton, 1999). Masyw jest klasyfikowany na podstawie diagramu, przy zastosowaniu wskaźnika Q_c lub prędkości fali sejsmicznej (ryc. 9).

Obie przedstawione powyżej klasyfikacje są oparte na szerokim zakresie czynników geologicznych, ujętych w zwięzłą formę diagramów, łatwo czytelnych dla inżyniera bez pośrednich metod opisowych. Przyjęcie takich zasad oceny masywów skalnych na podstawie „wartości parametrów wyprowadzonych” wymaga jednak „doświadczenia porównywalnego” wynikającego z tradycji inżynierskich danego kraju. Dlatego w warunkach polskich koniecznością staje się prowadzenie większej liczby badań skał w nawiązaniu do obserwacji połowych i indywidualnego opracowania wskaźników i diagramów dla różnych regionów geologicznych.



Ryc. 7. Modele deformacji i ich wpływ na wielkość przemieszczeń; A — zamykanie szczelin (typ N), B — przemieszczenia mieszane (typ N+S), C — przemieszczenia ze ścinania (typ S), (Bandis, 1980; Barton, 1999)

Fig. 7. Relationship between deformation models and displacements; A — closing of openings/gaps/fractures/cracks (type N), B — combined displacements (type N+S), C — shearing displacements (type S) after (Bandis, 1980; Barton, 1999)



Ryc. 8. Diagram oceny parametrów Q , V_p , M , P_r , σ_c , n i H wg Barton (Hoek, 1999); P_r — ciśnienie na obudowę $P_r \approx 0,1 Q_c^{1/3}$ [MPa], M — moduł deformacji $M \approx 10 Q_c^{1/3}$ [GPa], σ_c — wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie, V_p — prędkość fali podłużnej, $V_p \approx 3,5 + \log Q_c$ [km/s], $L \approx 1/Q_c$ (1/min/m/10 atm. DP)

Fig. 8. Barton's diagram for characterization of Q_c , V_p , M , P_r , σ_c , n i H parameters (Hoek, 1999); P_r — pressure acting upon reinforcement walls, M — deformation modulus, σ_c — monoaxial compression strength, V_p — velocity of longitudinal wave

Podsumowanie

Z przedstawionego przeglądu ważniejszych geotechnicznych klasyfikacji skał i maszyw skalnych wynika, że zasadnicze kierunki oceny cech maszywu skalnego są oparte na podobnych założeniach i głównym ich celem jest uwzględnienie w możliwie zwartej formie dużej liczby losowych czynników geologicznych, stanowiących o złożoności maszywów skalnych.

Natomiast w tworzonych obecnie standardach uniijnych w zbyt małym stopniu jest uwzględniony rozwój wiedzy geologicznej, jak i wymagania wynikające z zaawansowanych technologii konstrukcji. Normy te stają się także coraz bardziej złożone i nieczytelne. Obserwuje się w nich bowiem opóźnioną tendencję do nadmiernego uwzględniania różnorodnych danych elementarnych i jednostkowych czynników geologicznych, zamiast stosowania wskaźników regionalnych opartych na syntezach naukowych. Wiele danych, których znaczenie poznawcze było nie do przecenienia w fazie kształtowania poglądów „wieku renesansu”, współcześnie nie powinno trafiać do klasyfikacji w nieprzetworzonej formie pierwotnej.

Znamienny jest konserwatyzm twórców standardów norm międzynarodowych. Wobec obecnego stanu zaawansowania technik laboratoryjnych i polowych oraz wyników realizacji skomplikowa-

nych obiektów inżynierskich, nie sięgnęli oni w swoich propozycjach do innych metod badawczych niż powszechnie stosowane, jak również nie zalecili stosowania współczesnych nomogramów, w których uwzględnione byłyby empiryczne osiągnięcia nauki i praktyki.

Tab. 10. Diagram oceny maszywu skalnego na podstawie Geological Strength Index (GSI) (Hoek, 1999)

Table 10. The Geological Strength Index (GSI) rock mass characterization diagram (Hoek, 1999)

WSKA NIK GSI Na podstawie struktury i opisu jakości powierzchni skały należy wybrać przeciętną wartość GSI. Kryterium oznaczenia GSI można stosować, gdy bloki skalne są małe w stosunku do wykopu	BARDZO DOBRA szorstka, świeża, niezwiertzała powierzchnia	DOBRA szorstka, lekko zwiertzała, żaluzowana powierzchnia	SLABA gładka, średnio zwiertzała i zmienna powierzchnia	ZŁA poślizgowa, silnie zwiertzała powierzchnia z wypełnieniem zwartym, ostrokrawędzistym materiałem	BARDZO ZŁA poślizgowa, silnie zwiertzała z wypełnieniami ilastymi
NIENARUSZONA ALBO MASYWNA nienaruszone próbki skalne albo maszyw in situ z bardzo małą ilością odległych nieciągłości	90	80			
BŁOKOWA bardzo dobrze pozazębiane bloki skalne złożone z regularnych brył, uformowanych przez trzy prostopadłe komplety nieciągłości		70			
BARDZO BŁOKOWA pozazębiane, częściowo zaburzony maszyw z wielościennymi, ostrokrawędzistymi bryłami, uformowanymi przez cztery lub więcej komplety nieciągłości		60			
BŁOKOWA / ZABURZONA zafaludowana i/lub splekana z ostrokrawędzistymi blokami, uformowanymi przez wiele przecinających się zespołów splekań			50		
ROZLU NIONA źle zazębiony, mocno pokruszony z mieszaniną regularnych i nieregularnych odłamków skalnych			40		
UWARSTWIONA / ROZWARSTWIONA pośladowany tektonicznie, pościerany maszyw skalny; złupkowacenie przeważa nad innymi zespołami nieciągłości, zupełny brak bloczności				30	
				20	
					10
					5

W istniejącej sytuacji, opracowanie polskich klasyfikacji gruntów skalistych winno polegać na ustalaniu parametrów masywu i sporządzeniu regionalnych diagramów oceny wskaźnikowej np. GSI, RMR oraz Q_c , dla różnych genetycznych skał, w różnych stanach naprężeń. Jest to bowiem jedyna droga syntetycznego wprowadzenia wieloletniej, współczesnej wiedzy o skałach i masywach skalnych do praktyki inżynierskiej.

W transferze wiedzy o skałach do praktyki inżynierskiej przodującą rolę odgrywają obecnie ośrodki brytyjskie, norweskie, amerykańskie, australijskie i południowoafrykańskie. W tych krajach najbardziej zaznaczył się postęp w uwzględnianiu czynników geologicznych w ocenach wytrzymałości podłoża skalnego. Z ich doświadczeń należy więc korzystać przy tworzeniu polskich norm skalnych o standardzie międzynarodowym.

W prezentowanym przeglądzie klasyfikacji skał przedstawiono tylko kluczowe problemy harmonizacji polskich norm skalnych z normami europejskimi. W polskiej geotechnice skalnej ciągle brak syntetycznych ocen empirycznych, wskaźników i nomogramów, pozwalających na płynne wyeliminowanie sztucznych podziałów na skały i grunty. Tym niemniej wydaje się, że w środowisku polskich praktyków ugruntowało się już przekonanie, iż dla projektowania geotechnicznego konieczna jest ocena cech masywu skalnego a nie tylko wytrzymałości skały nienaruszonej.

Można zatem sądzić, że zasady klasyfikacji masywów skalnych oparte na diagramach i „parametrach wyrowadzonych”, syntetycznie ujmujących złożone cechy geologiczne skał mogłyby być łatwe do zastosowania w polskiej praktyce inżynierskiej i na tle lokalnych komentarzy i wytycznych nie wywoływać oporów przy ich wdrażaniu.

Literatura

- BANDIS S.C. 1980 — Experimental studies of scale effects on shear strength, and deformation of rock joints. Ph. D. Theses Univ. of Leeds, England.
- BARTON N. 1976 — Rock mechanics review: The shear strength of rock and rock joints, *Int. J. Rock Mech. Min. Sc. & Geomech. Abstr.*, 13: 255–279.
- BARTON N. 1986 — Deformation phenomena in jointed rock. 8th Laurits Bjerrum Memorial Lecture. *Geotechnique*, 36: 147–167.
- BARTON N. 1999 — General report Concerning Some 20th Century Lessons and 21st Century Challenges in Applied Rock Mechanics, Safety and Control of the Environment. *Proc. 9th Inter. Congr. Rock Mech. ISRM. Paris.*
- BARTON N.R., LIEN R. & LUNDE J. 1974 — Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mech.*, 6: 189–236.
- BAŻYŃSKI J., DRAGOWSKI A., FRANKOWSKI Z., KACZYŃSKI R., RYBICKI S. & WYSOKIŃSKI L. 1999 — Zasady sporządzania dokumentacji geologiczno-inżynierskich. Państw. Inst. Geol.
- BESTYŃSKI Z. 1993 — Geophysical Flysch Rock Mass Classification (KFG). *Mat. Sem. Nauk. Wyd. Inst. Meteorol. i Gosp. Wodnej. Warszawa*: 17–27.
- BIENIAWSKI Z. T. 1974 — Geomechanics classification of rock masses and its application in tunneling. *Proc. 3rd Congr. Inter. Soc. Rock Mech.*, Denver, 2A: 27–32.
- BIENIAWSKI Z. T. 1989 — *Engineering Rock Mass Classification*. Wiley.
- BROWN E.T. (ed.) 1981 — *Rock characterisation, testing and monitoring — ISRM suggested methods*. Oxford, Pergamon.
- CEN. Eurocode 7, 1997 — *Projektowanie geotechniczne*.
- CSN. 731001, 1988 — *Analizy porównawcze i obliczeniowe fundamentów bezpośrednich wg różnych algorytmów*. Załącz. 1. *Polit. Rzeczowska*, 1989: 24–29.
- DEERE D.U. 1964 — Technical description of rock core for engineering purposes. *Rock Mech. Eng. Geol.*, 1: 17–22.
- DEERE D.U. & MILLER R.P. 1966 — *Engineering classification and index properties for intact rock*: Tech. Rep., AFWL-TR-65-116, Univ. of Illinois, Urbana.
- HALLBAUER D.K., WAGNER H. & COOK N.G.W. 1973 — Some observations concerning the microscopic and mechanical behaviour of quartzite specimens in stiff, triaxial compression tests. *Int. Jour. Rock Mech. Min. Sc. Geomech. Abstr.*, 10: 713–726.
- HOEK E. 1999 — Putting numbers to geology—an engineer's viewpoint. „Felsbau” *Rock and Soil Engineering. J. Eng. Geol., Geomechanics and Tunnelling*, 3. Innsbruck.
- HOEK E. & BRAY J. W. 1974 — *Rock slope engineering*. London, Inst. Min. Metall.
- HOOD M. & BROWN E.T. 1999 — Mining rock mechanics, yesterday, today and tomorrow. *Proc. 9th Inter. Congr. Rock Mech. ISRM. Paris*: 26–51.
- IAEG, 1981 — International Association of Engineering Geology Rock and Soil Description and Classification for Engineering Geological Mapping. *Bull. IAEG*, 24: 235–274.
- ISO, 2000 — *Geotechnical engineering — Identification and description of rock*. ISO 14689.CEN/TC 250/S.C. 7. N 324.
- ISO, 1997 — *Voting. ICS.93.020. Geotechnics in civil engineering — Identification and description of rock*. (Geotechnika w budownictwie — oznaczenia i opis skał; wersja polska nie datowana ICS 93.020).
- ISRM, 1978 — International Society of Rock Mechanics suggested methods for quantitative description of discontinuities in rock masses. *Inter. Jour. Rock Mech. Mining Sc.*, 15: 319–368.
- JEAGER J.C. & COOK N.G.W. 1979 — *Fundamentals of rock mechanics*. 3rd ed. London, Chapman & Hall.
- JONSON R.B. & GRAFF van der J. 1994 — *Geotechnical engineering for the preservation of historic sites*. Eng. Geol. Mac Millan Publ. Comp. New York.
- KIDYBIŃSKI A. 1982 — *Podstawy geotechniki kopalnianej*. Wyd. Śląsk. Katowice.
- KRAJEWSKI R. 1984a — Problemy geologiczno-inżynierskie masywów skalnych. *Mat. Sesji Nauk. Wyd. AGH. Kraków*: 4–8.
- KRAJEWSKI R. 1984b — Terminologia i klasyfikacja masywów skalnych. *Prz. Geol.*, 32: 617–620.
- Harmonizacja** Polskich Norm Geotechnicznych z systemem Norm Europejskich, 2000 — Konferencja naukowo-techniczna. Tom I, II. Inst. Tech. Bud. Mragowo.
- LISZKOWSKI J. & STOCHLAK J. (red.) 1976 — *Szczelinowatość masywów skalnych*. Wyd. Geol.
- MERWE van der J. N. 1999 — Summary analysis of papers submitted for theme 1: rock engineering, environmental safety and control. CSIR Miningtek, Johannesburg.
- PINIŃSKA J. 1980 — Wpływ wysokich temperatur na właściwości fizyczno-mechaniczne piaskowców krośnieńskich. *Biul. Inst. Geol. z Bad. Geol.-Inż.*, 9: 105–168.
- PINIŃSKA J. 1992 — Emisja akustyczna ośrodków skalnych w stanach naprężeń pokrywicznych. *Prz. Geol.*, 40: 727–733.
- PINIŃSKA J. 2000a — Od skały do gruntu — mechanizm pęknięcia w skałach. *Wyd. Polit. Warszawskiej, Inst. Dróg i Mostów. Zakład Geotech. i Budowli Podziemnych; PAN: Warszawa*: 201–210.
- PINIŃSKA J. 2000b — Wskaźnik mobilizacji emisji akustycznej jako efekt degradacji wytrzymałości skały. *Wyd. Kat. Geomechaniki Górniczej i Geotechniki, AGH. Kraków*: 353–362.
- PINIŃSKA J. 2001 — Ku wskaźnikowym ocenom geotechnicznej przydatności masywów skalnych. XXIV Zimowa Szkoła Mechaniki Górniczej. *Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej. Wrocław*: 395–404.
- Polska** Norma PN-84/B-01080, 1984 — *Kamień dla budownictwa i drogownictwa. Podział i zastosowanie wg własności fizyczno-mechanicznych*. PKNiM, Warszawa.
- Polska** Norma PN-86/B-02480, 1986 — *Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów*. PKNiM, Warszawa.
- SALOMON M.D.G. 1974 — Rock mechanics of underground excavations, in *Advances in Rock Mechanics, Proc. 3rd Cong. Int. Soc. Rock Mech.*, Vol. 1, Part B, Nat. Acad. Sc., Washington DC, 951–1099.
- THIEL K. 1980 — *Mechanika skał w inżynierii wodnej*. PWN.
- THIEL K. 1993 — *Wprowadzenie. Mat. Sem. Nauk.*” *Budowle podziemne wykonywane w złożonych warunkach geologicznych*. Wyd. Inst. Meteorol. i Gosp. Wodnej, Warszawa.
- WAWERSIK W.K. & FAIRHURST C. 1970 — A study of brittle rock fracture in laboratory compression experiments. *Int. J. Rock Mech. Min. Sc.*, 7: 561–575.