

Joanna Pinińska

Szczelinowatość masywów skalnych po 30 latach w świetle normy PN-EN ISO14689-1 – badania geotechniczne, rozpoznanie i klasyfikacja skał

Discontinuity of the rock mass according to PN-EN ISO14689-1 standard – geotechnics in civil engineering – identification and description of rock: thirty years after

Streszczenie: W pracy zanalizowano na tle współczesnej wiedzy oraz obecnych, europejskich zapisów normowych, metodykę oceny nieciągłości masywu skalnego opublikowaną przed trzydziestu laty w wydawnictwie „Szczelinowatość masywów skalnych” pod redakcją Jerzego Liszkowskiego oraz Janusza Stochlaka. Retrospekcja zawartych w tym wydawnictwie danych dowiodła, że chociaż w obecnej epoce powszechnego zastosowania technik komputerowych metodyka pomiarowa elementów szczelinowatości, przetwarzanie danych oraz wizualizacja systemów nieciągłości uległy radykalnej zmianie, to jednak idee badawcze zaprezentowane w „Szczelinowatości...” pozostają nadal aktualne, a stworzone przed 30 laty systemy ocen, terminologia i metody badawcze stworzyły podstawy współczesnych standardów.

Słowa kluczowe: szczelinowatość, skała, masyw skalny, szorstkość, fragmentacja, normy, identyfikacja

Abstract: Paper is an review of the procedure of fractured rock mass discontinuity identification, on a basis of methodology published 30 years earlier by J. Liszkowski and J. Stochlak (eds) in the book titled „Fractured Rock Massifs” and the recent knowledge and standards. The retrospective analyses shows, that the research methods as presented in the book remain actual despite of radical changes of data collection and their processing and visualizing, due to computer technologies. What is more, the 30 years old system of rock assessment, classification terminologies, and rock examination procedures as proposed in the “Fractured Rock Massifs” remain a foundation of contemporary researches and standards.

Key words: discontinuity, rock, rock mass, roughness, blocks, standards, identification

W roku 1976 ukazała się książka pt. „Szczelinowatość masywów skalnych” pod redakcją Jerzego Liszkowskiego oraz Janusza Stochlaka.

W tym zbiorowym wydawnictwie zgromadzono wszechstronną wiedzę o nieciągłości ośrodków skalnych w ujęciu do dzisiaj niepowtarzalnym. Zawartość pracy i dobór autorów był wyrazem twórczej myśli Jerzego Liszkowskiego. Książka wpisała się niezwykle trafnie w trend aktywnego rozwoju geotechniki lat 70. i 80. ubiegłego wieku, określonego przez Hooda i Browna (1999) jako „wiek renesansu” inżynierii skalnej.

Kamieniem milowym tego okresu było wprowadzenie przez Hoecka opisu „małych i dużych” nieciągłości w masywie skalnym, odróżnienie cech *skaly* od zespołu *bloków skalnych* i wprowadzenie do ich opisu pojęć zaczerpniętych z geologii strukturalnej. W konsekwencji narzucona została potrzeba geologiczno-inżynierskiej oceny *nieciągłego* masywu skalnego jako całości, a nie tylko jego litych fragmentów.

Ten właśnie wątek jest myślą przewodnią „Szczelinowatości masywów skalnych”. Odbicie w polskiej praktyce inżynierskiej znalazł niestety nie od razu. Przez długie lata nie została w kraju sporządzona formalna i nieformalna kompleksowa analiza znaczenia nieciągłości w klasyfikacji masywów skalnych. Zwrot nastąpił po upowszechnieniu przez Kidybińskiego (1982) punktowych klasyfikacji masywu skalnego (Bieniawski, 1974; Barton, Lien, Lunde, 1974). Pewne elementy znalazły się normie w PN-86/B-02480, która „grunt skalisty” opisuje jako „grunt rodzimy lity bądź spękany o nie przesuniętych blokach, lecz niejasności terminologicznych nie rozwiązano do chwili obecnej (Pinińska, 2000a i b).

Na tym tle mimo szeregu dezaktualizacji metodycznych „Szczelinowatość...” do dzisiaj pioniersko precyzuje szereg pojęć dotyczących nieciągłości masywu, wytycza wiele nowych kierunków badań, które stały się tematem specjalistycznych konferencji światowych. Przesłanie autorów, że **szczelinowatość jest podstawową cechą strukturalną masywów skalnych**, jest obecnie punktem wyjścia poprawnego procesu projektowania i pełni czołową rolę przy podejmowaniu decyzji o lokalizacji i realizacji obiektu (Bieniawski, 1992). Prezentowany w „Metodologii projektowania” Bieniawskiego diagram prac (ryc. 1) ewidentnie wskazuje, w jakim stopniu niekorzystne nieciągłości strukturalne wpływają w dalszym procesie na poprawną lokalizację obiektu.

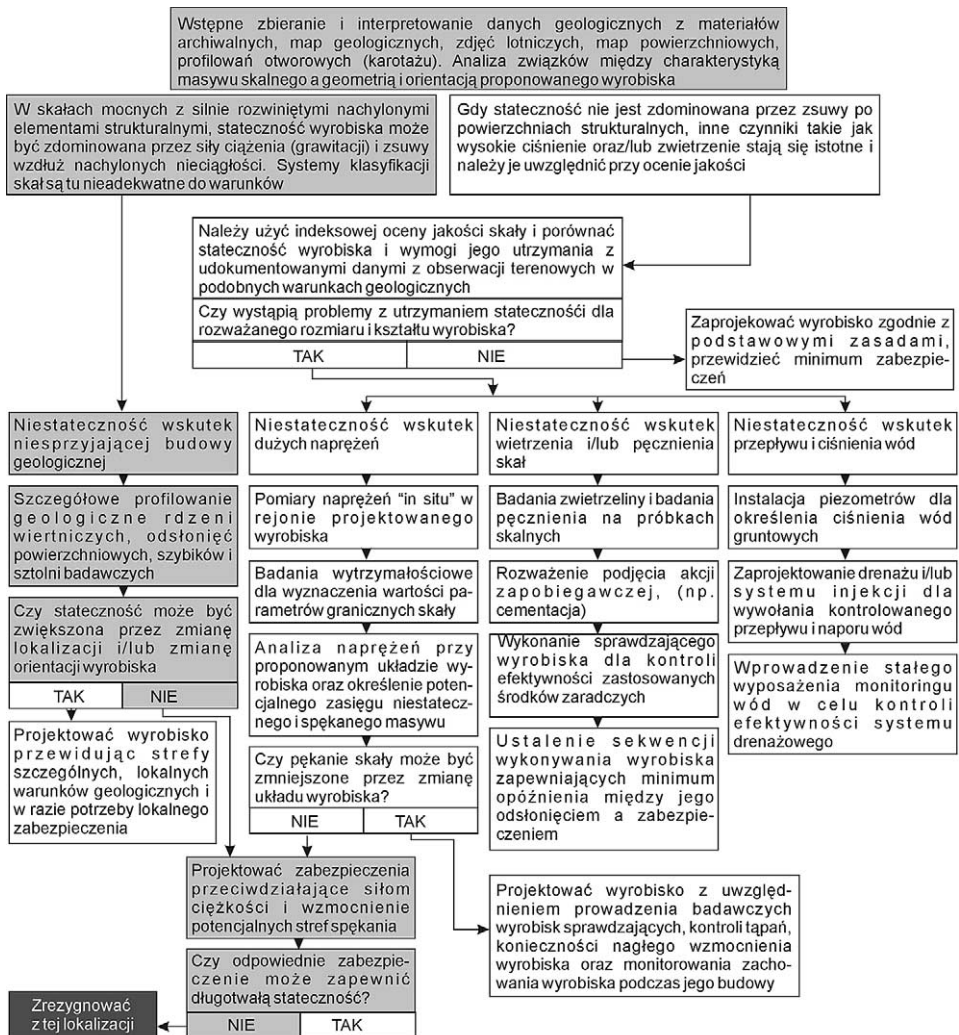
Z upływem lat od czasu wydania „Szczelinowatości...” upowszechniono punktowe oceny masywu skalnego. Decydującą rolę w tych ocenach odegrały rozpoczęte w roku 1976 i stale rozwijane **oceny szorstkości powierzchni nieciągłości** (Barton, 1976, 1986, 1999). Doskonalone przez jego zespół nowe techniki pomiarowe (Chrystathakis, Barton, 1990, Makurat i in., 1990) i **wskaźnikowe oceny empiryczne** wynikające z doświadczeń wielkich tunelowych inwestycji norweskich. Doprowadziły one do wprowadzenia opisów szorstkości do standardów europejskich. Rozwinęły się także systemy ocen właściwości spękanego materiału w strefach uskokowych metodą obrazów cyfrowych (ryc. 2) służące modelowaniu numerycznemu (Kawamoto i in., 1990).

Konstruowane są wariogramy łączące rozstaw spękań, ich odległość, gęstość i częstotliwość (Villaescusa, Brown, 1990). Pojawiają się opisy morfologii spękań

(ryc. 3) oraz anizotropii wytrzymałościowej ich powierzchni (Huang, Dong, 1990; Clerici, 1990; Gentier, Riss, 1990; Dziedzic, 2004) i ich opisy fraktalne (Domonik, 2004, 2006).

Powstaje również nowa dziedzina geomechaniki służąca modelowaniu przepływów, wymagająca tworzenia złożonych siatek spękań (ryc. 4).

Przełom wieku owocuje modelami konstytutywnymi spękań i próbami matematycznego ujęcia zmiennej szorstkości ich powierzchni, która może zmieniać się



Ryc. 1. Diagram projektowania wyrobiska w skałach (Hoek, Brown, za Bieniawskim 1992)
Fig. 1. Diagram of excavation processing in the rock mass (Hoek, Brown, after Bieniawski 1992)

od mikronów do metrów, za pomocą opisów probabilistycznych i fraktalnych (Liu, 1990; Domonik, 2006).

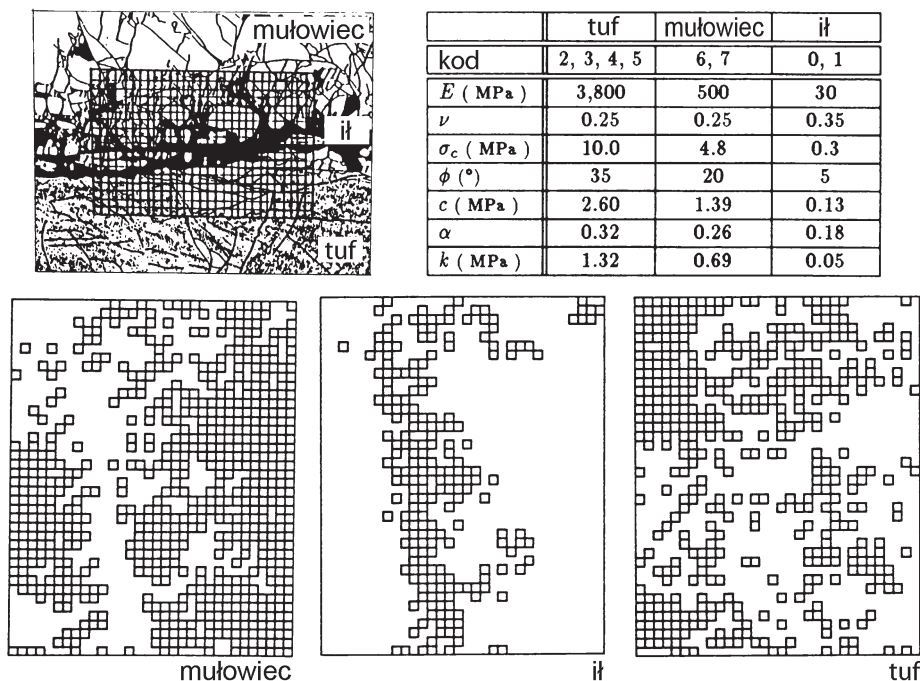
Teoretyczne i laboratoryjne profile powtarzalnych i zanikających powierzchni szorstkości wprowadzane są do obliczeń oporów ścinania (Ueng, Chang, 1990) (ryc. 5).

Zastosowanie tomografii cyfrowej (Brown, 1990) dalej rozszerza możliwości rejestracji zjawisk stanowiących o oporach poślizgu na powierzchniach nieciągłości i odniesienie ich do klas Bartona (ryc. 6) (Miller i in., 1990; Pinińska, 2004).

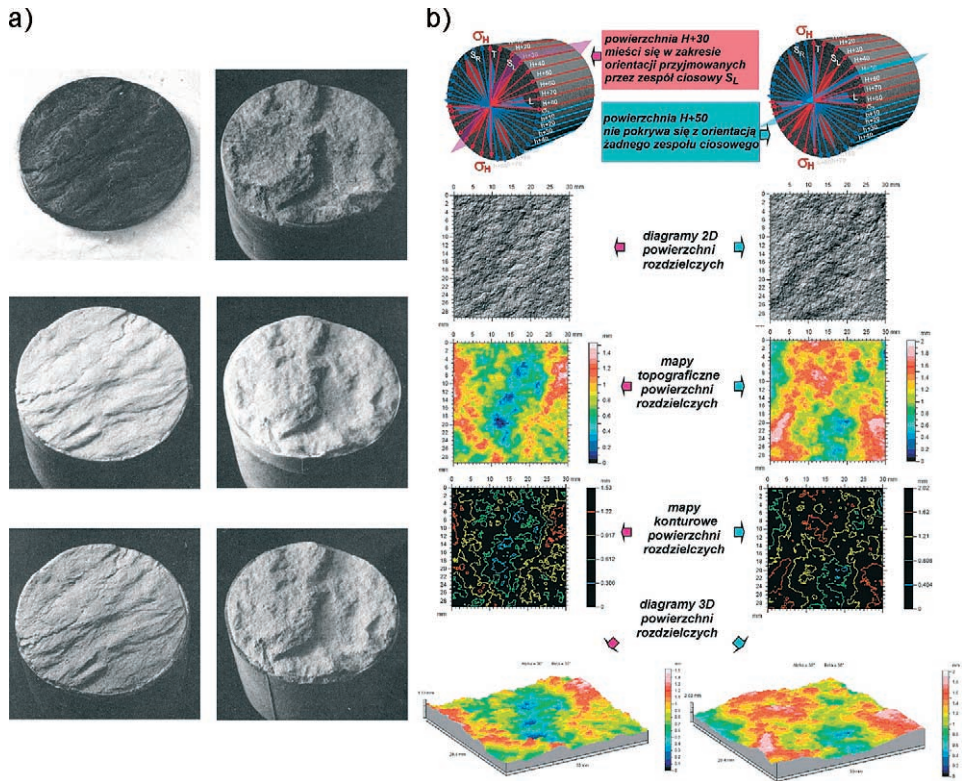
W związku z rozwojem budownictwa i górnictwa wielkowymiarowego pojawiła się również konieczność oceny wpływu nieciągłości masywu na fragmentację skał przy wybuchach (Ghosh i in., 1990).

Klasyfikacyjne graficzne wzorce oraz wskaźniki Bartona i in. (1974) Q , Bieniawskiego (1974) RMR oraz Laubschera (1984) MRMR są z biegiem lat dyskutowane i „ulepszane”. Milne (1990) bada współczynnik szorstkości i wyznacza jego graficzne poprawki, dyskutując z kategoriami szorstkości Bartona jako poprawnej jedynie dla skał mocnych o lekko szorstkich powierzchniach bez wypełnienia. Wprowadza również pewne graficzne poprawki do systemu MRMR w skałach suchych.

Ten obecnie tak rozbudowany przez 30 lat zakres ocen nieciągłości masywu, w każdym aspekcie znalazł jednak inicjalny wyraz w „Szczelinowatości masywów

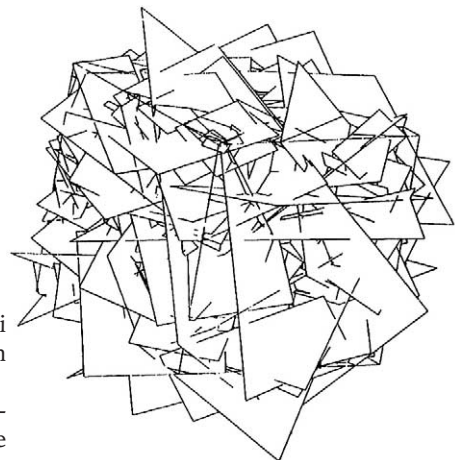


Ryc. 2. Cyfrowy obraz rzeczywistego masywu skalnego przetworzony na model numeryczny
Fig. 2. Digital model of rock mass and its display and material properties (Kawamoto et al., 1990)



Ryc. 3. Naturalne i wymuszone powierzchnie spękań wg: a) Huang, Dong (1990), b) Domonik (2006)

Fig. 3. Natural and forced surfaces of joints: a) Huang, Dong (1990), b) Domonik (2006)



Ryc. 4. Złożona siatka spękań w celu symulacji przepływu zależnie od rozwarcia szczelin (Stratford i in., 1990)

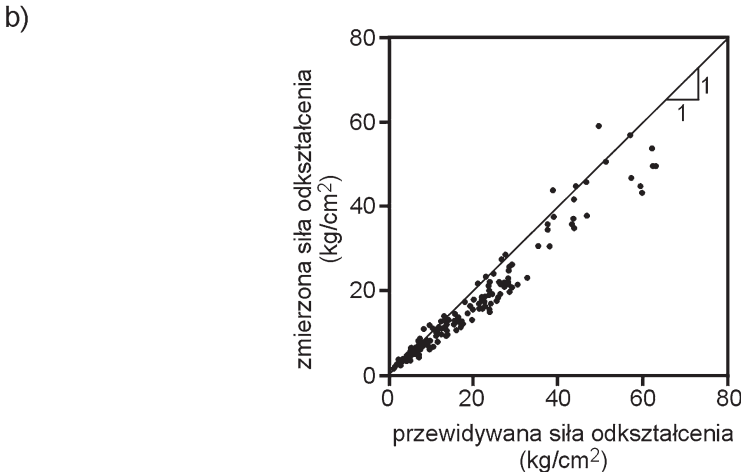
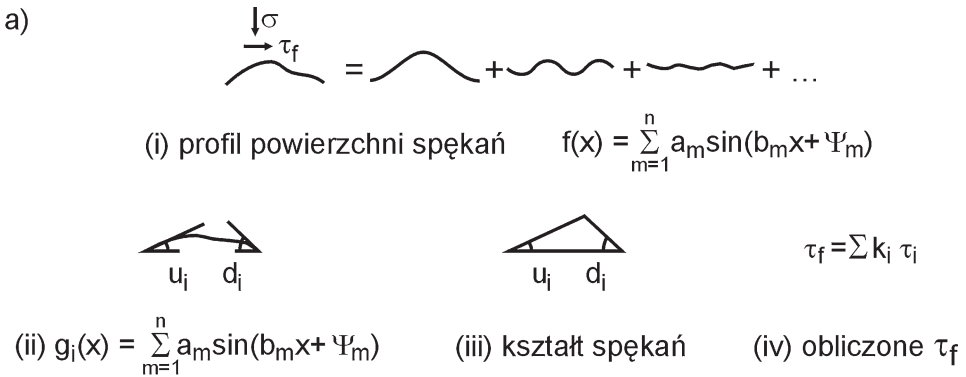
Fig. 4. Complex joints net for simulation of water flow due to the discontinuity aperture (Stratford et al., 1990)

skalnych”. Praca wykraczała zatem poza ramy powszechnej ówczesnej wiedzy. Świadczy również o tym, jak trudny i długotrwały jest transfer nauki do praktyki i zapisów normowych.

Dopiero we wprowadzanej obecnie w Polsce normie PN-EN ISO 14689-1, Badania geotechniczne – rozpoznanie i klasyfikacja skał, znalazły się te elementy, których zwiastuny opublikowano w „Szczelinowatości masywów skalnych”.

Norma PN-EN ISO 14689-1 oparta jest na klasycznych doświadczeniach światowych Bieniawskiego, Bartona, HoECKa, Browna i innych klasyków inżynierii skalnej. Odnosi się do oznaczania oraz opisu masywu skalnego i materiału skalnego nie tylko na podstawie ich składu mineralnego, genezy, struktury, wielkości ziaren, lecz **nieciągłości ośrodka**.

W *Szczelinowatości masywów skalnych* już w roku 1976 wprowadzono termin **masyw skalny** z synonimem **górotwór** w górnictwie, określony jako *dowolna, dostępna*



Ryc. 5. Wpływ szorstkości powierzchni na opory ścinania: a) teoretyczny b) doświadczalny (Ueng, Chang, 1990)

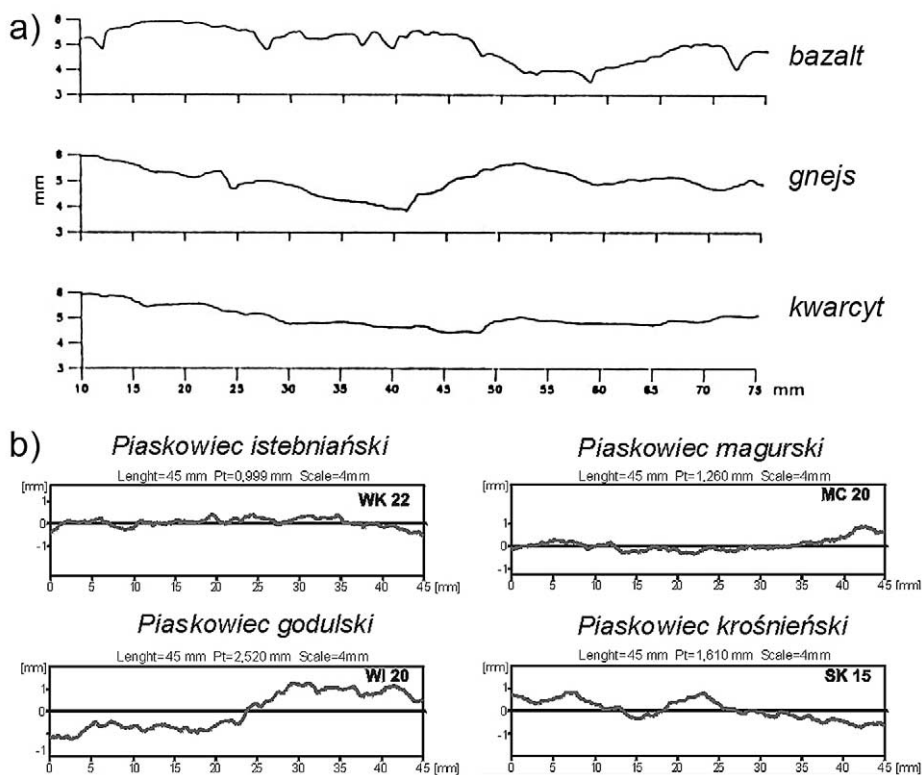
Fig. 5. Roughness impact on shear strenght a) teoretical, b) experimental (Ueng, Chang, 1990)

dla działalności ludzkiej część ośrodka skalnego, których **nieodłącznymi składnikami są skały i powierzchnie nieciągłości** składające się na ich strukturę.

Norma wprowadza trzy pojęcia: **skała** – występujący w warunkach naturalnych skonsolidowany, scementowany lub w inny sposób ze sobą związany zespół minerałów, tworzących materiał o większej wytrzymałości i zwięzłości niż grunt; **masyw skalny** – skała in situ wraz z powierzchniami nieciągłości i strefami zwierztałymi oraz **materiał skalny** – monolityczny fragment masywu skalnego ograniczony powierzchniami nieciągłości.

Pojęcia te dla nieprofesjonalnych użytkowników normy uzupełnione są o termin **rodzaj skały** (odmiana skały o zdefiniowanym składzie petrograficznym, uziarnieniu i genezie oraz charakterystycznej strukturze i teksturze).

W pracy z 1976 r. termin **struktura** ujęty jest jako suma dających się geometrycznie określić cech masywu skalnego (górotworu). Skałą jest fragment masywu skalnego (górotworu) o mezoskopowo ciągłym wykształceniu, określonej objętości i cechach litologicznych. Nie ma tu więc znaczniejszych rozbieżności z normą, a



Ryc. 6. Profile szorstkości: a) bazalt, gnejs, kwarcyt (wg Millera i in., 1990) b) piaskowce fli-szowe (wg Pinińska, 2004)

Fig. 6. Roughness profiles: a) basalt, gneiss and quartzite (after Miller et al. 1990), b) flish sandstone (after Pinińska, 1994)

terminy geologiczne ze względu na profesjonalizm autorów „Szczelinowatości...” są bardziej poprawne niż w normie.

Istotą pracy z 1976 r. jest wprowadzenie **powierzchni nieciągłości**, którymi są wszelkie powierzchnie i płaszczyzny dzielące masyw skalny na oddzielne bloki o różnym kształcie i wielkości. Powierzchnie te dzielą na makroskopowe ($>10^2$ m), mezoskopowe (10^2 m do 10^4) i mikroskopowe ($<10^4$ m). Tym podziałom autorzy starają się przypisać geologiczne czynniki genetyczne, co jest w praktyce niezbyt przydatne.

Nurtuje ich jednak znaczenie pojęcia **spękanie** powszechnie stosowanego w języku polskim. Nazywają **spękaniami** każdą lokalną powierzchnię przerwania ciągłości masywu skalnego niezależnie od pochodzenia, orientacji przestrzennej i miejsca występowania.

Autorzy dyskutują także nad pojęciami **spękanie/szczelina** i biorąc pod uwagę ich cechy geometryczne, uznają, że *szczelinę charakteryzuje mierzalny w warunkach terenowych parametr – rozwarcie*. Nieprecyzyjność obu tych pojęć pojawia się nie tylko w literaturze polskiej, ale także anglojęzycznej (crack, fracture, joint, discontinuities). W niedawno wydanej „Geoinżynierii” (Stryczek i Gonet, 2000) dla oceny „właściwości spękanych gruntów skalistych i oraz szczelinowatego masywu skalnego” nie rozróżniono tych terminów, traktując pobieżnie na tle orientacji przestrzennej jako synonim *szczeliny i spękania* syngenetyczne, tektoniczne, wietrzeniowe.

Autorzy „Szczelinowatości...” są bardziej ściśli i rozdzielają **płaszczyznę i powierzchnię spękania**. Tę pierwszą stanowi *płaszczyzna, wzdłuż której pęknięta jest warstwa skalna*, element wyidealizowany, a który wyznacza jej bieg i upad. Rzeczywista powierzchnia spękania jest urzeźbiona morfologicznie.

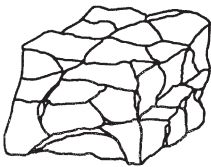

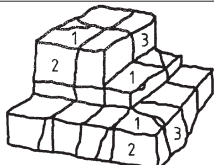
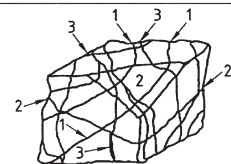
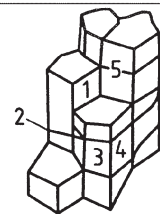
Norma PN-EN ISO 14689-1 uwzględnia tylko jedno pojęcie **nieciągłości**. Są to *powierzchnie oddzielności rozwarte lub zamknięte, naruszające ciągłość masywu skalnego, mogące się ujawnić pod wpływem naprężeń wywołanych pracami inżynierskimi*. Przykłady to: warstwowanie, cios, szczeliny, kliważ i uskoki w masywie skalnym.

Autorzy „Szczelinowatości...” już w roku 1976 porządkują pojęcia **podzielność, cios, łupność**, stosowane w różnym rozumieniu praktycznym przez różnych autorów (Krajewski, 1955; Nieć, 1973) i przywołują konieczność oceny **zespołu spękań i systemu spękań**. Wyprzedzają zatem sformułowania normy, w której wprowadzono **system spękań** jako **układ spękań** dzielących skałę na poszczególne bloki lokalne lub w **system spękań** o podobnej charakterystyce.

Tytułowy termin **szczelinowatość** autorzy pracy z 1976 r. rozumieją dwojako: bądź jako *właściwość skał wynikającą z istnienia w nich spękań*, bądź jako *wszystkie spękania* dzielące dany fragment masywu skalnego na bloki. Charakteryzujące szczelinowatość parametry to orientacja przestrzenna spękań, ich liniowe wymiary, stopień spękania masywu, stopień rozdzielności masywu, porowatość szczelinowa, cechy fizyczne powierzchni spękań.

Zagadnienia te są w normie bardzo rozbudowane. Norma zaleca, by poza opisem typów nieciągłości, ich orientacji, rozstawu, regularności, szorstkości, rozwarcia i rodzaju wypełnienia szczelin oraz charakterystyki zawodnienia, podać także liczbę ich systemów oraz wielkość bloków ograniczonych tymi nieciągłościami, a dane te należy uzyskać **na podstawie obserwacji terenowych w odslonięciach**.

Norma stosuje jednak uproszczone geologicznie spojrzenie na kształt bloków skalnych (ryc. 7).

Określenie	Wygląd	Opis
Wieloboczne		Nieregularny i nieuporządkowany w system zespół powierzchni nieciągłości, bloki nieregularne, niewielki zasięg.
Płytowe		Dominuje jeden system równoległych nieciągłości (1) a inne nieciągłości mają niewielki zasięg – np. system powierzchni uławicenia z poprzecznymi spękaniami; grubość bloków jest wyraźnie mniejsza niż ich długość lub szerokość.
Pryzmatyczne		Dominują dwa systemy równoległych nieciągłości (1) i (2), w przybliżeniu prostopadłe do siebie, trzeci system przebiega nieregularnie i nie jest równoległy do pozostałych; grubość bloków jest wyraźnie mniejsza niż ich długość lub szerokość.
Równoboczne		Trzy dominujące systemy nieciągłości (1, 2 i 3) ze sporadycznymi nieregularnymi spękaniami tworzą w przybliżeniu ortogonalny system bloków.
Romboidalne		Zespół trzech (lub więcej) dominujących skośnych względem siebie systemów nieciągłości (1, 3 i 3), ogranicza romboidalne (skośnościenne) bloki.
Słupowe		Zespół kilku (zwykle więcej niż 3) regularnych systemów spękań ciosowych (1, 2, 3, 4 i 5) przecina system na ogół nieregularnych szczelin. Długość bloków znacznie większa od pozostałych wymiarów.

Ryc. 7. Określenia struktur masywu skalnego i kształt bloków skalnych wg PN-EN ISO 14689-1

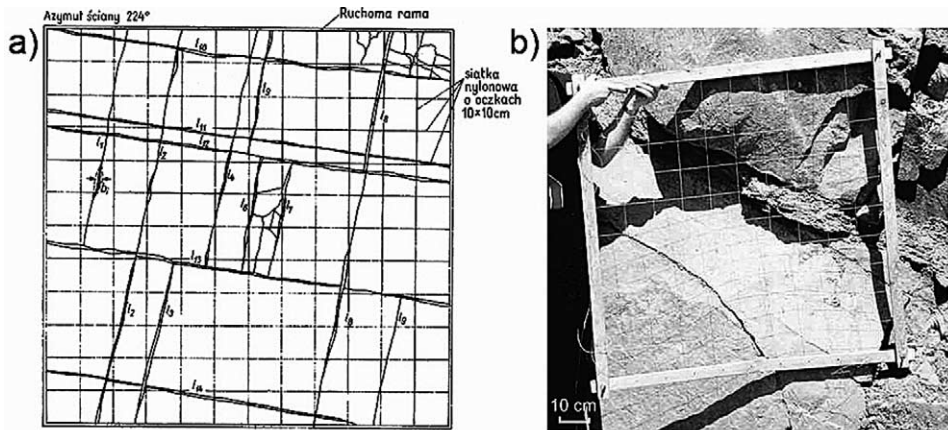
Fig. 7. Indices for rock mass structure and block shapes after PN-EN ISO 14689-1

Schemat przedstawiony w „Szczelinowatości...” (Liszkowski, Stochlak, 1976) bardziej oddaje geologiczną naturę masywu skalnego, szczególnie że pokazany jest na tle stosowanej do dzisiaj terenowej siatki pomiarowej (ryc. 8).

Praca z 1976 r. ujmuje także szeroko obecnie podkreślaną **szorstkość powierzchni nieciągłości**, którą zgodnie z normą należy przeprowadzić na trzech poziomach dokładności: a) w małej skali (kilku milimetrów) – szorstka lub gładka; b) skali średniej (kilku centymetrów) – płaska, schodkowa, falista; c) w dużej skali (kilku metrów) – falista, zakrzywiona, prosta; stosując wzorce wskazane na rycinie 9.







Przeprowadzona analiza porównawcza zapisów normowych w pełni potwierdza, że zastosowany w pracy „Szczelinowatość masywów skalnych” opis niejednorodności ośrodka skalnego jest niezwykle nowatorski, wnikliwy i wyprzedzający ówczesny stan wiedzy nie tylko w Polsce, ale i na świecie. Odzwierciedla złożoną naturę wpływu nieciągłości na cechy skał i masywów skalnych, a zalecane w standardach europejskich współczesne opisy są kontynuacją prezentowanych w pracy poglądów. Praca ta wytyczyła zatem do dzisiaj aktualne kierunki ocen szczelinowatości skał i co najważniejsze – stworzyła podstawy terminologii, tak bardzo ciągle rozbieżnej, dyskusyjnej i pełnej nieprofesjonalnych neologizmów.

Jak w każdej dziedzinie, tak i w zakresie ocen nieciągłości masywu skalnego wiodące ośrodki naukowe kreują nowe alternatywy i wymuszają postęp wiedzy w zastosowaniach praktycznych, za którą nie nadążają przepisy normowe. Obecne trendy to inżynierskie oceny wskaźnikowe oparte na wieloletnim doświadczeniu i znajomości cech danego masywu skalnego. W ocenach wskaźnikowych opracowywanych wg ustalonego schematu można bowiem uwzględnić bardzo dużą liczbę usystematyzowanych czynników przyrodniczych, unikając złożonej formy opisowej, którą jest np. przepełniona norma PN-EN ISO14689-1.



Ryc. 8. a) Przebieg powierzchni nieciągłości dzielących masyw skalny na bloki (wg Liszkowskiego i Stochlaka 1976), b) siatka pomiarowa szczelinowatości

Fig. 8. a) Display of discontinuities and blocks fragmentation of the rock mass (after Liszkowski and Stochlak 1976), b) joints grid

	Szorstka (nierówna)	Gładka
Schodkowa	1 	2 
	3 	4 
Płaska	5 	6 

Ryc. 9. Określenia szorstkości powierzchni nieciągłości (rysunek nie w skali) wg PN-EN ISO 14689-1

Fig. 9. Terms for discontinuity roughness (figure not in scale) after PN-EN ISO14689-1

<p>WSKAŹNIK GSI</p> <p>Na podstawie struktury i opisu jakości powierzchni skały należy wybrać przeciętną wartość GSI.</p> <p>Kryterium oznaczania GSI można stosować, gdy bloki skalne są małe w stosunku do wykopu</p>	<p>BARDO DOBRA</p> <p>szorstka, silnie zwięzła, niezwięzła powierzchnia</p>	<p>DOBRA</p> <p>szorstka, lekko zwięzła, zwięzła, żałaziona powierzchnia</p>	<p>SŁABA</p> <p>gładka, średnio zwięzła i zmniejszona powierzchnia</p>	<p>ZŁA</p> <p>poślizgowa, silnie zwięzła powierzchnia z wypełnieniem z twarym, ostrokrawędzistym materiałem</p>	<p>BARDO ZŁA</p> <p>poślizgowa, silnie zwięzła z wypełnieniami ilastymi</p>					
	90	80	70	60	50	40	30	20	10	5
<p>NIENARUSZONA ALBO MASYWNA</p> <p>nienaruszone próbki skalne albo masyw in situ z bardzo małą ilością odległych nieciągłości</p>										
<p>BLOKOWA</p> <p>bardzo dobrze pozazębiane bloki skalne złożone z regularnych brył, uformowanych przez trzy prostopadłe komplety nieciągłości</p>										
<p>BARDO BLOKOWA</p> <p>pozazębiana, częściowo zaburzony masyw z wielościennymi, ostrokrawędzistymi bryłami, uformowanymi przez cztery lub więcej komplety nieciągłości</p>										
<p>BLOKOWA / ZABURZONA</p> <p>zafałdowana i/lub spękana z ostrokrawędzistymi blokami, uformowanymi przez wiele przecinających się zespolów spęknięć</p>										
<p>ROZLUŻNIONA</p> <p>żle zazębiona, mocno pokruszona z mieszaniną regularnych i nieregularnych odłamków skalnych</p>										
<p>UWARSTWIWIONA / ROZWARSTWIWIONA</p> <p>pofałdowana tektonicznie, pościerana masyw skalny; złupkowacenie przeważa nad innymi zespolami nieciągłości, zupełny brak bloczności</p>										

Ryc. 10. Diagram klasyfikacji masywu skalnego na podstawie Geological Strength Index (GSI) wg Hoeka (1999)

Fig. 10. Diagram of rock mass classification due to the Geological Strength Index (GSI) after Hoek (1999)

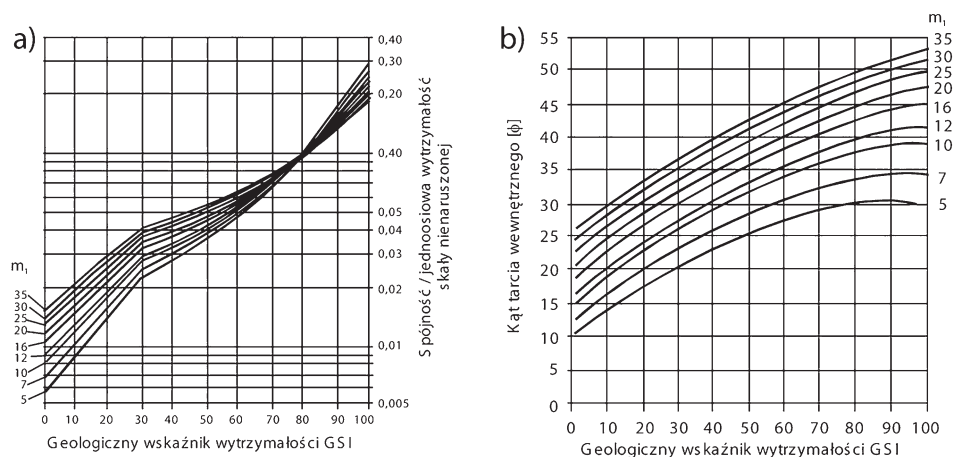
Do takich rozwiązań łatwo czytelnych dla projektantów zmierną współczesne, światowe inżynierskie systemy ocen maszywów skalnych. Uwzględniają one postęp wiedzy i są przystosowane dla celów praktyki przez syntetyczną formę wskaźników i diagramów.

Należy tu zwłaszcza wskaźnik GSI (Geological Strength Index), wprowadzony przez Hoeka i Browna (1997) oparty na stałej materiału skalnego m_1 (Holk, 1999). Stała m_1 charakteryzuje cechy geologiczne skały i zależy od kąta tarcia na powierzchni nieciągłości, a zatem od jej szorstkości. Charakterystyki cech masywu skalnego można więc dokonać na podstawie wybranego parametru GSI (ryc.10) oraz m_1 z odpowiednich diagramów (ryc. 11).

Równocześnie Barton (1999) wprowadził trzy wskaźnikowe modele zachowań masywu skalnego ($A < B < C$) charakteryzujące wpływ powierzchni nieciągłości na przebieg deformacji ze wzrastającym udziałem procesu ścinania (S) w spękanym masywie (ryc. 12). Wskazują one, jak skała przemieszczeń trwałych uwarunkowana jest charakterem tych spękań.

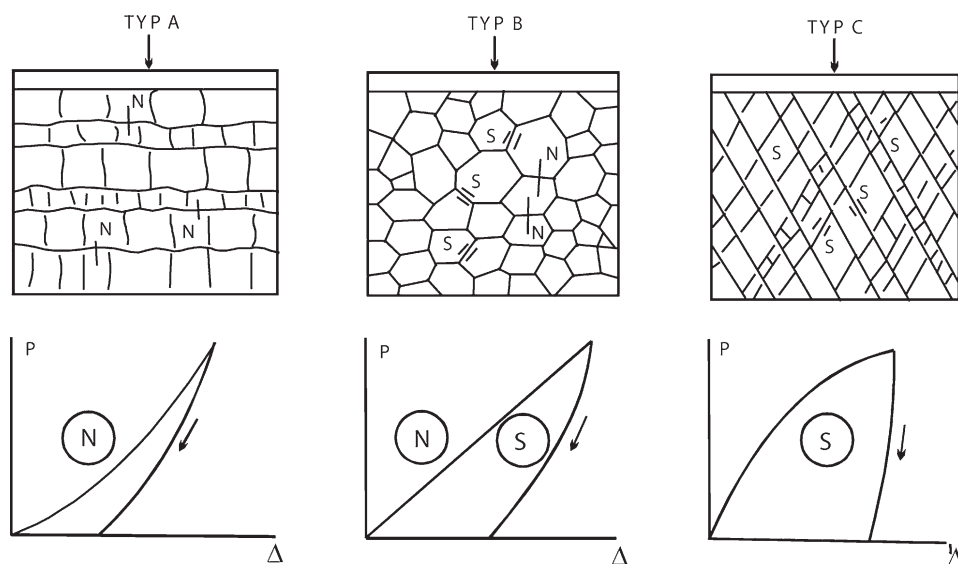
W „Szczelinowatości...” przykłady ocen wskaźnikowych umieszczono w załącznikach. Są one w zakresie praktyki inżynierskiej znacznie skromniejsze niż współczesne analizy Bartona lub Hoeka, lecz szeroko dostosowane do aspektów geologicznych: diagramów strukturalnych spękań i ich orientacji przestrzennej, analiz strukturalno-tektonicznych oraz geologiczno- inżynierskich ocen masywu.

Rozwój numerycznych metod obliczeniowych, stosowanie programów FLAC 3D lub szczególnie UDEC umożliwi relatywnie szybko analizę zachowań ośrodka skalnego podzielonego na bloki stykające się wzdłuż powierzchni nieciągłości i doskonali możliwości prognozowania wpływu nieciągłości na jego zachowanie (Zabuski, 2004). Do skonstruowania modelu niezbędne są jednak dane i geologiczne doświadczenie analityka.



Ryc. 11. Zależność spójności a) i kąta tarcia wewnętrznego b) od wskaźnika GSI wg Hoeka (1999)

Fig. 11. Relationship between GSI index and a) cohesion, b) angle of friction after Hoek (1999)



Ryc. 12. Zamykanie szczelin (N) i przemieszczenia ze ścinania (S) oraz ich wpływ na przebieg deformacji masywu skalnego wg Bartona (1999)

Fig. 12. Closing of the joints (N) and shearing displacement (S) and their impact on deformation path of the rock mass, after Barton (1999)

W podsumowaniu rozważań nad opublikowaną przed 30 laty „Szczelinowatością masywów skalnych” należy więc podziwiać zasoby zawartych w pracy informacji i wizjonerstwo systemowe autorów. Na tle współczesnej wiedzy i usankcjonowanych obecnie standardami europejskimi zapisów normowych świadczą one o wysokim poziomie polskiej geologii inżynierskiej. Jest bowiem oczywiste, że w epoce informatyzacji metodyka badań elementów szczelinowatości, przetwarzanie danych, ich wizualizacja uległy radykalnej zmianie, natomiast idee zawarte w omawianym dziele pozostają stale aktualne.

Literatura

- Barton N., 1976. The shear strength of rock and rock joints. *Int. Journal of Rock Mechanics. Min. Sci. and Geomechanics* 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 Int. Congr. Rock Mech. ISRM. Paris.*
- Bieniawski Z.T., 1989. *Engineering Rock Mass Classification*. Wiley.
- Bieniawski Z.T., 1992. *Metodologia projektowania*
- Brown E.T. (red.), 1981. *Rock characterisation, testing and monitoring – ISRM suggested methods*. Pergamon, Oxford.

- Brown S.R., 1990. Surface roughness and the physical properties of fractures. *Mechanics Contributions and Challenges*. Balkema, Rotterdam, s. 269–276.
- Clerici A., 1990. Some remarks on site shear strength measurement along joints in rock with a rigid behaviour. *Bull. IAEG* 41: 57–62.
- Chryssanthakis P., Barton N., 1990. Joint roughness (JRC_n) characterization of a rock joint and joint replica at 1 m scale. *Rock Joints*. Balkema, Rotterdam, s. 27–33.
- Domonik A., 2004. Geomechaniczne implikacje kompresji tektonicznej w Karpatach fiszowych na przykładzie piaskowców cergowskich jednostki dukielskiej. *The Problems Geomorphology and Paleogeography of Ukrainian Carpathians and Adjacent Areas*. Wyd. Univ. I. Franko, Lwów, s. 65–83.
- Domonik A., 2006. Geomechaniczna analiza powierzchni ciosowych w piaskowcach cergowskich z Komańczy. Praca doktorska. Wyd. Geologii UW, Warszawa.
- Dziedzic A., 2004. Kierunkowa zmienność K_{lc} w piaskowcach krośnieńskich z Mucharza. *Mat. z XXVII Zim. Szk. Mech. Górniczo-Geotechnicznej*. T. 1. Geotechnika i budownictwo specjalne. Wyd. AGH, Kraków, s. 53–62.
- Gentier S., Riss J., 1990. Quantitative description and modelling of joints morphology. *Rock Joints*. Balkema, Rotterdam, s. 375–390.
- Ghosh A., Daemen J.J.K., van Zan D., 1990. Fractal-based approach to determine the effect of discontinuities on blast fragmentation. *Mechanics Contributions and Challenges*. Balkema, Rotterdam, s. 905–912.
- Hoek E., 1999. Putting numbers to geology – an engineer’s viewpoint. „Felsbau” *Rock and Soil Engineering*. J. of Eng. Geol., Geomechanics and Tunnelling 3. Innsbruck.
- Hood M., Brown E.T., 1999. Mining rock mechanics, yesterday, today and tomorrow. *Proc. 9th Int. Congr. Rock Mech. ISRM*. Paris, s. 26–51.
- Huang T.H., Doong Y.S., 1990. Anisotropic strength of rock joints. *Rock Joints*. Balkema, Rotterdam, s. 211–219.
- ISO-1, 2000. Geotechnical engineering – Identification and description of rock. ISO 14689. CEN/TC 250/S.C. 7. N 324.
- ISRM. 1978. International Society of Rock Mechanics suggested methods for quantitative description of discontinuities in rock masses. *Inter. Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 15: 319–368.
- Kawamoto T., Kyoya T., Ichikawa Y., 1990. Evaluating material properties of faulted zones by image analysis and numerical methods. *Rock Joints*. Balkema, Rotterdam, s. 59–74.
- Kidybiński A., 1982. Podstawy geotechniki kopalnianej. Wyd. Śląsk, Katowice, s. 1–515.
- Krajewski R., 1984b. Terminologia i klasyfikacja masywów skalnych. *Przeg. Geol.* 12: 617–620.
- Liszkowski J., Stochlak J. (red.), 1976. Szczelinowatość masywów skalnych. Wyd. Geologiczne, Warszawa.
- Liu H., Sterling R.L., 1990. *Mechanics Contributions and Challenges*. Balkema, Rotterdam, s. 277–281.
- Makurat A., Barton N., Vik C., Monsen K., 1990. Jointed rock mass modelling. *Mechanics Contributions and Challenges*. Balkema, Rotterdam, s. 647–656.
- Milde D., 1990. Standardized joint descriptions for improved rock classification. *Mechanics Contributions and Challenges*. Balkema, Rotterdam, s. 35–41.
- Miller S.M., Williams P.C., Kerkering J.C., 1990. Ambiguities in estimating fractal dimensions of rock fracture surfaces. *Mechanics Contributions and Challenges*. Balkema, Rotterdam, s. 471–478.
- Pinińska J., 2000a. Od skały do gruntu – mechanizmy pęknięcia w skałach. Wyd. Zakład Geotech. i Budowli Podziemnych, PAN, Warszawa, s. 201–210.
- Pinińska J., 2000 b. Klasyfikacja gruntów skalistych. *Mat. Konf.: „Harmonizacja polskich norm geotechnicznych z systemem norm europejskich”*. Wyd. ITB, s. 117–133.

- Pinińska J., 2004. Właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe skał. Cz. IV. Karpaty fliszowe. T. 8. Objasnienia i interpretacja. Wyd. UW, Warszawa.
- Polska Norma PN – 86/B-02480. Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów. PKNiM, Warszawa.
- PN-EN ISO 14689-1:2006. Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie skał. Cz. 1: Oznaczanie i opis.
- Stratford R.G., Herbert A.W., Jackson C.P., 1990. A parameter study of the influence of aperture variation on fracture flow and the consequences in a fracture network. Balkema, Rotterdam, s. 413–422.
- Stryczek S., Gonet A., 2000. Geoinżynieria. Studia i rozprawy. IGSMiE. PAN 71. Kraków.
- Ueng T.S., Chang W.C., 1990. Shear strength of joint surface profiles. Mechanics Contributions and Challenges. Balkema, Rotterdam, s. 245–251.
- Villaescusa E., Brown E.T., 1990. Characterizing joint spatial correlation using geostatistical methods. Rock Joints. Balkema, Rotterdam, s. 115–122.
- Zabuski L., 2004. Mechanika skał – wybrane zagadnienia. Mat. Badawcze Inst. Met. i Gosp. Wodnej. Seria inżynierii wodnej 16. Warszawa.

