

## Rozkłady spękań ciosowych w płaszczynie magurskiej polskich Karpat zewnętrznych w świetle analizy statystycznej\*

Witold Zuchiewicz\*\*

### Distribution of jointing within Magura Nappe, West Carpathians, Poland, in the light of statistical analysis

**S u m m a r y.** The paper focuses on statistical parameters of joint sets identified within Upper Cretaceous through Oligocene flysch strata in the Magura Nappe, Outer West Carpathians, Poland. More than 120 stations, each of them numbering 100 measurements, have been studied. The joint set distributions have been described by computed normalized eigenvalues plotted on diagrams devised by Woodcock (1977), as well as by parameters that denote fabric strength (C) and girdle/cluster tendencies of the distributions studied (K). The fabric strength measures (C) attain higher values, indicating better-defined joint fabric, within progressively younger strata, as well as when proceeding from the west to the east. Such a tendency could result from the clockwise, eastward-directed, diachronous migration of Miocene folding along the Carpathian arc; it could also suggest that older, i.e. Upper Cretaceous, strata might have been affected by at least two episodes of folding.

Celem pracy jest wstępna charakterystyka zespołów spękań ciosowych, pomierzonych w różnowiekowych ogniwach litostratygraficznych fliszu polskiego sektora płaszczyny magurskiej (ryc. 1), ze szczególnym uwzględnieniem stopnia uporządkowania (*fabric*) spękań analizowanego na podstawie diagramów Woodcocka (1977). Wykorzystano ok. 125 diagramów spękań w skałach górnej kredy i trzeciorzędu zachodniej i środkowej części płaszczyny magurskiej Karpat polskich, porównując uzyskane wyniki z wieloma innymi jeszcze danymi dla pozostałych płaszczyn.

### Metoda

Analiza stopnia uporządkowania orientacji przestrzennej elementów kierunkowych, niezbędna w geologii strukturalnej, badaniach paleomagnetycznych, czy też sedimentologii, napotyka na wiele trudności. Dane kierunkowe najczęściej przedstawia się w odwzorowaniach stereograficznych i równopowierzchniowych, stosując różne techniki konturowania. Porównując ze sobą różne grupy danych wygodnie jest jednak używać wybranych parametrów charakteryzujących kierunki średnie, lub bieguny łuków najlepiej aproksymujących położenie elementów przestrzennych (Scheidegger, 1965; Watson, 1966; Mardia, 1972; Woodcock, 1977). Zastosowany w niniejszym opracowaniu diagram Woodcocka (1977) wykorzystuje procedurę opartą na obliczeniu wektorów własnych (*eigenvectors*) i wartości własnych (*eigenvalues*) tensorów opisanych przez dane kierunkowe, traktowanych jak wektory jednostkowe. Technika ta, wprowadzona przez Scheideggera (1964) i Watsona (1965), polega na obliczeniu znormalizowanej macierzy kosinusów kierunkowych, tj. tensora orientacji, charaktery-

zowanego przez trzy wektory własne ( $v_1, v_2, v_3$ ) i odpowiadające im wartości własne ( $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ). Wektor własny  $v_1$  oszacowuje kierunek średni, natomiast wektor  $v_3$  wiąże się z największym momentem bezwładności i oszacowuje położenie bieguna łuku najlepszego dopasowania danych kierunkowych. Wektor  $v_2$  jest prostopadły do dwóch pozostałych. Suma wartości własnych odpowiada liczbie obserwacji; często jednak wykorzystuje się znormalizowane wartości własne  $S_j = \lambda_j/N$ , tak że:  $S_1 + S_2 + S_3 = 1$ . Znormalizowane wartości własne stanowią miarę stopnia grupowania się analizowanych danych kierunkowych wokół odpowiednich wektorów własnych. Graficzna prezentacja obliczonych wartości własnych, w formie zaproponowanej przez Woodcocka (1977), nawiązuje do diagramu analizującego elipsoidy odkształceń, wprowadzonego przez Flinna (1962) i zmodyfikowanego przez Ramsaya (1967). Zgrupowania jednoosiowe grupują się na takim diagramie wzdłuż linii  $\ln(S_2/S_3) = 0$ , tj. wówczas gdy  $S_2 = S_3$ . Pozostałą część diagramu zajmują rozkłady typu łukowego, lub o charakterze zgrupowań.

Parametr C jest miarą stopnia zgrupowania orientacji spękań wokół określonego kierunku:

$$C = \ln(S_1/S_3);$$

gdzie:  $S_1, S_2, S_3$  reprezentują znormalizowane wartości własne (*normalized eigenvalues*). Wzrastające wartości C sugerują rosnące uporządkowanie (*fabric*) układu elementów przestrzennych. Parametr K natomiast określa typ rozkładu orientacji tych elementów na stereogramach (zgrupowania/łuki):

$$K = \ln(S_1/S_2); \ln(S_2/S_3);$$

gdzie: K = 1 definiuje granicę między zgrupowaniami a łukami. K określa nachylenie prostych rozchodzących się promieniście od punktu początkowego diagramu. Łuki (*girdles*) występują pod linią  $K = 1$  na diagramie Woodcocka ( $0 \leq K < 1$ ); zgrupowania (*clusters*) plasują się powyżej, gdzie  $1 < K < \infty$ .

### Materiał

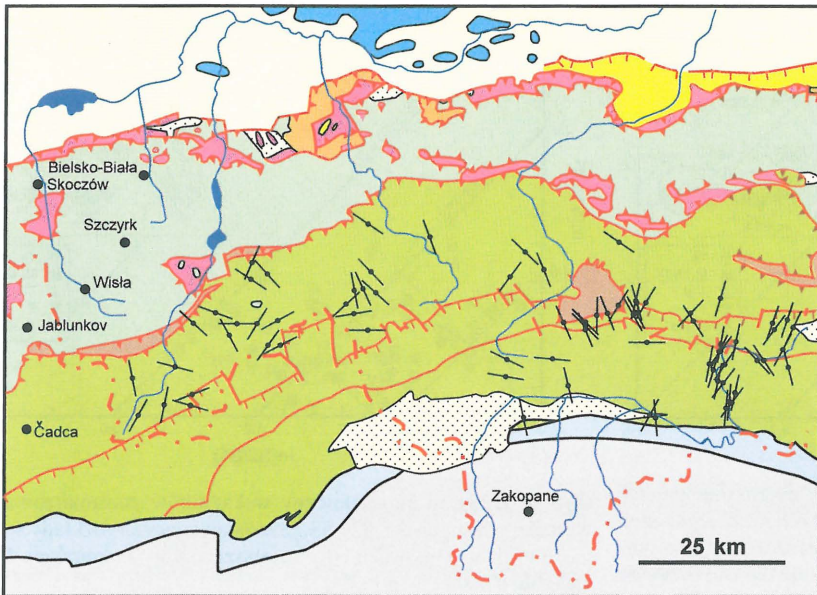
Podstawą obliczeń statystycznych były diagramy konturowe spękań blisko 125 stanowisk w różnowiekowych ogniwach litostratygraficznych górnej kredy (34) i trzeciorzędu (90) płaszczyny magurskiej (ryc. 1), a także pojedyncze stanowiska pomiarów ciosu w pozostałych płaszczynach oraz molasach neogeńskich i czwartorzędowych Karpat polskich i ukraińskich. W zdecydowanej większości stanowisk mierzono każdorazowo 100 spękań, klasyfikując je według zasad opisanych w pracach Zuchiewicza (1997) oraz Zuchiewicza i in. (1997).

Największa liczba stanowisk reprezentuje skały górnoeocenu (29%) i środkowego (17%) eocenu oraz senonu-paleocenu (12%). Wśród stanowisk trzeciorzędowych najliczniej są reprezentowane kompleksy fliszu grubo- i bardzo gruboławicowego (64,5%), rzadziej cienkoławicowego (13,3%), natomiast w obrębie stanowisk górnokredowych przeważają kompleksy gruboławicowe (44%) oraz cienko- i średnioławicowe (23,5%) i cienkoławicowe (18%).

Na ryc. 1 przedstawiono rekonstruowane położenie osi

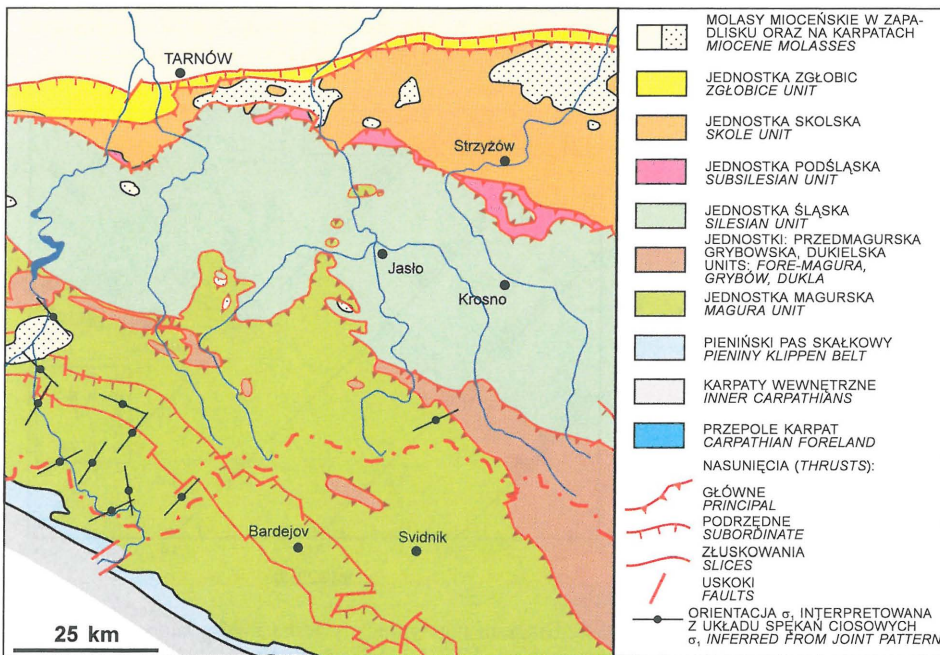
\*Badania zrealizowano w ramach grantu KBN 9 T12B 020 09 (dla A. K. Tokarskiego)

\*\*Instytut Nauk Geologicznych UJ, ul. Oleandry 2A, 30-063 Kraków; e-mail: witold@ing.uj.edu.pl



**Ryc. 1.** Szkic tektoniczny płaszczowiny magurskiej Karpat polskich i rekonstruowane położenie osi maksymalnego nacisku tektonicznego, interpretowane z układu spekań ciosowych w skałach trzeciorzędowych

**Fig. 1.** Tectonic sketch of the Magura Nappe, Polish Carpathians, showing reconstructed position of the maximum compression axes inferred from analysis of joint pattern within Tertiary strata



dla populacji spekań w seriach fliszowych o różnym wieku i zróżnicowanych miąższościach ławic.

Zróżnicowanie wartości parametru C, wskazującego na stopień uporządkowania (*fabric*) ciosu, wykazuje pewną zależność od wieku warstw, w których mierzono spekania ciosowe. W skałach całej płaszczowiny magurskiej wartości uśrednione są wyższe dla populacji spekań w utworach trzeciorzędowych (2,03) w porównaniu z górnokredowymi (1,883). Spośród kompleksów górnokredowych (ryc. 2) najlepsze uporządkowanie wykazują spekania w warstwach kampanu

maksymalnej kompresji tektonicznej dla ciosu w warstwach trzeciorzędowych płaszczowiny magurskiej. Zaznacza się tutaj wyraźnie dominacja czterech kierunków, związanych z różną orientacją struktur fałdowych w kolejnych segmentach płaszczowiny: N60°W, N25°W, N50–70°E oraz N15°E. W zachodniej części płaszczowiny przeważają orientacje NW–SE, w środkowej NNW–SSE do N–S, w części wschodniej natomiast dominuje  $\sigma_1$ , zorientowana NE–SW. Radialny układ trajektorii głównych naprężeń sugeruje związek ciosu z zasadniczym etapem fałdowania basenu magurskiego. Rekonstruowane położenie osi maksymalnych naprężeń dla ciosu w seriach górnokredowych ujawnia natomiast duży rozrzut kierunków (por. dyskusję w pracach Oszczypko i in., 1991 oraz Zuchiewiczza, 1997).

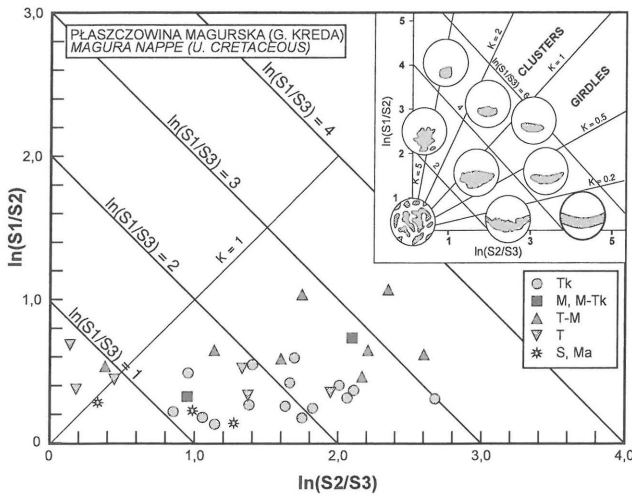
## Wyniki

Analizę statystyczną rozkładów orientacji spekań ciosowych przeprowadzono na diagramach Woodcocka (1977)

(2,246), najgorsze — turonu i santonu (1,241). Natomiast w profilu trzeciorzędu (ryc. 3–6) wyraźny spadek wartości C wykazują spekania w warstwach dolnego eocenu (1,665), a w coraz młodszych ogniwach litostratygraficznych stopień uporządkowania sukcesywnie wzrasta: od 1,939 w eocenie środkowym do 2,315 w oligocenie, osiągając wartości porównywalne z kompleksami paleoceńskimi (2,284).

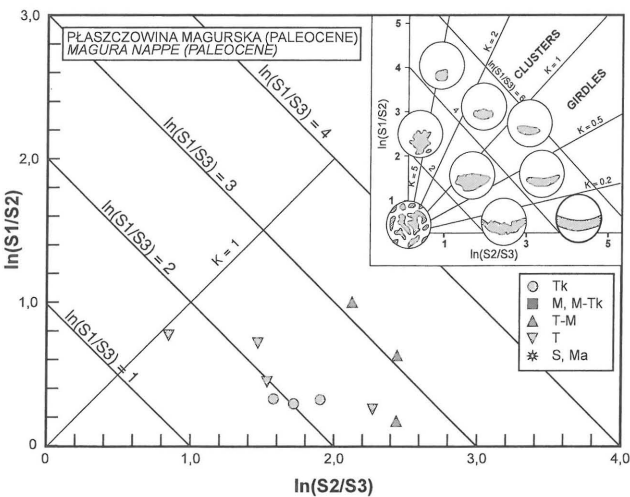
Z kolei średnie wartości parametru K, przedstawiające typ rozkładu elementów przestrzennych (łuki/zgrupowania), nie wykazują większego zróżnicowania, zmieniając się od 0,535 dla spekań w skałach górnokredowych do 0,393–0,605 w trzeciorzędzie (ryc. 6). Najniższe wartości K, a zatem najlepiej wykształcone rozkłady typu łukowego, charakteryzują spekania w warstwach kampanu (0,383) i mastrychtu (0,269). Wyższe wartości wykazują spekania w warstwach dolnego (0,704) i górnego eocenu (0,647).

Wartości parametru C w utworach trzeciorzędowych płaszczowiny magurskiej Karpat polskich zmieniają się od 0,873 do 3,987. Wartości średnie, obliczone dla populacji



**Ryc. 2.** Diagram logarytmiczny wskaźników znormalizowanych wartości własnych S1, S2 i S3, przedstawiających rozkłady spękań ciosowych w warstwach górnokredowych płaszczyny magurskiej. Diagram w prawym górnym rogu pokazuje typowe rozkłady dla określonych przedziałów znormalizowanych wartości własnych (*clusters* — zgrupowania, *girdles* — łuki) w ujęciu Woodcock'a (1977); Kompleksy litologiczne: Tk — grubo- i bardzo gruboławicowe, M-Tk — średnio- do gruboławicowych, M — średnioławicowe, T-M — cienko- do średnioławicowych, T — cienkoławicowe, S — łupkowe, Ma — margliste

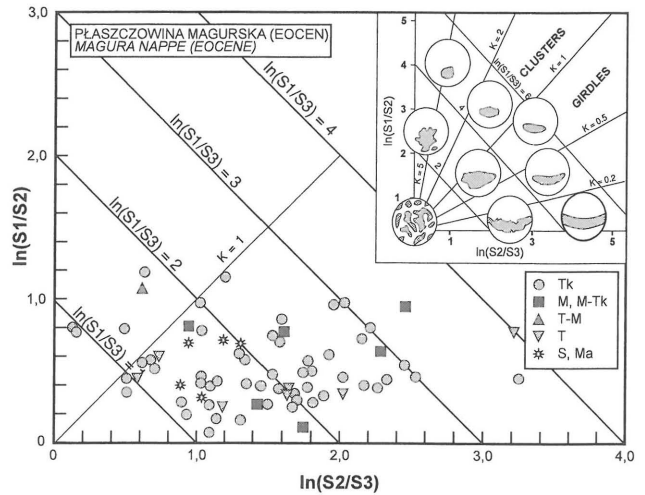
**Fig. 2.** Two-axis logarithmic plot of ratios of normalized eigenvalues S1, S2 and S3, showing joint distribution patterns within Upper Cretaceous strata of the Magura Nappe. Inset diagram shows typical arrangements of girdle/cluster distributions, depending on ratios of normalized eigenvalues (adapted from Woodcock, 1977) Lithological complexes: Tk — thick- and very thick-bedded, M-Tk — medium- to thick-bedded, M — medium-bedded, T-M — thin to medium-bedded, T — thin-bedded, S — shale, Ma — marl



**Ryc. 3.** Diagram logarytmiczny wskaźników znormalizowanych wartości własnych S1, S2 i S3 przedstawiających rozkłady spękań ciosowych w warstwach paleocenu płaszczyny magurskiej. Pozostałe objaśnienia — por. ryc. 2

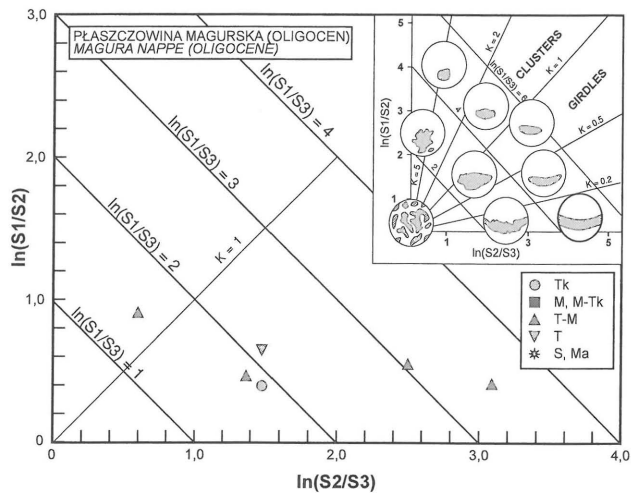
**Fig. 3.** Two-axis logarithmic plot of ratios of normalized eigenvalues S1, S2 and S3, showing joint distribution patterns within Palaeocene strata of the Magura Nappe. For other explanations — see Fig. 2

spękań zmierzonych w warstwach o różnej miąższości, ujawniają pewną prawidłowość (ryc. 7, 8). Wartości najwyższe wykazują kompleksy średnio- i gruboławicowe (2,482)



**Ryc. 4.** Diagram logarytmiczny wskaźników znormalizowanych wartości własnych S1, S2 i S3, przedstawiających rozkłady spękań ciosowych w warstwach eocenu płaszczyny magurskiej. Pozostałe objaśnienia — por. ryc. 2

**Fig. 4.** Two-axis logarithmic plot of ratios of normalized eigenvalues S1, S2 and S3, showing joint distribution patterns within Eocene strata of the Magura Nappe. For other explanations — see Fig. 2

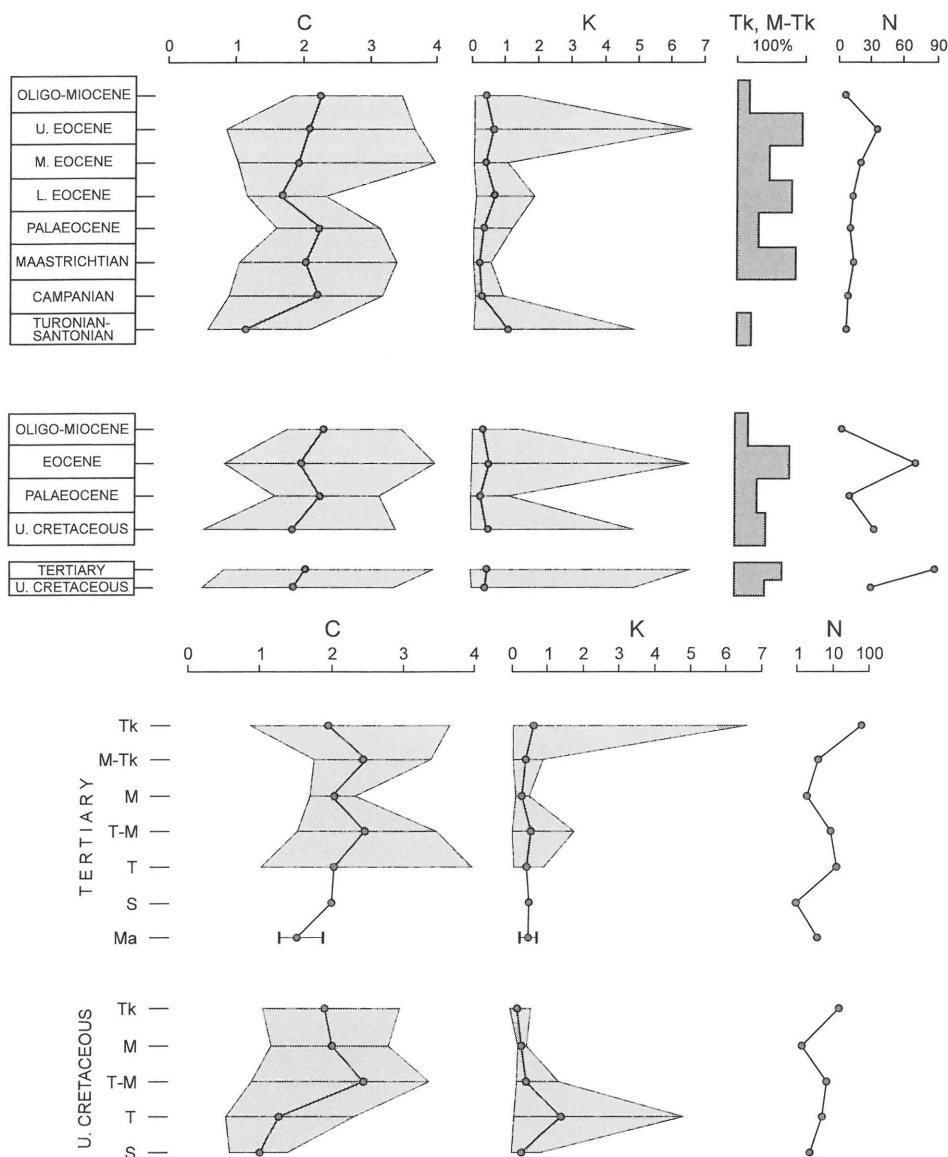


**Ryc. 5.** Diagram logarytmiczny wskaźników znormalizowanych wartości własnych S1, S2 i S3, przedstawiających rozkłady spękań ciosowych w warstwach oligocenu płaszczyny magurskiej. Pozostałe objaśnienia — por. ryc. 2

**Fig. 5.** Two-axis logarithmic plot of ratios of normalized eigenvalues S1, S2 and S3, showing joint distribution patterns within Oligocene strata of the Magura Nappe. For other explanations — see Fig. 2

oraz cienko- do średnioławicowych (2,478), natomiast grubo- i bardzo gruboławicowe piaskowce odznaczają się stosunkowo niskimi wartościami średnimi (1,962) i znacznym rozrzutem wartości dyskretnych (0,873–3,657). Najgorsze uporządkowanie ujawniają spękania ciosowe w marglach środkowego eocenu (1,542). Podobną prawidłowość notuje się w warstwach górnokredowych, przy czym we wszystkich przypadkach obliczone wartości średnie parametru C są niższe od ich odpowiedników trzeciorzędowych (ryc. 6, 8). Najlepsze uporządkowanie wykazuje cios w kompleksach fliszu cienko- do średnioławicowego (2,454); najgorsze — w pakietach cienkoławicowych (1,358) oraz łupkowych (1,081).

Średnie wartości parametru K zmieniają się w skałach trzeciorzędowych od 0,340 (kompleksy średnioławicowe)



**Ryc. 6.** Zróżnicowanie wartości średnich i skrajnych parametrów C i K rozkładów spękań ciosowych w różnowiekowych utworach płaszczowiny magurskiej. Tk, M-Tk — udział kompleksów gruboławicowych oraz średnio-do gruboławicowych; N — liczba stanowisk

**Fig. 6.** Average and extreme values of C and K parameters calculated for joint distributions within strata of different age of the Magura Nappe; Tk, M-Tk — percentage of thick- and medium-thick-bedded complexes; N — number of stations studied

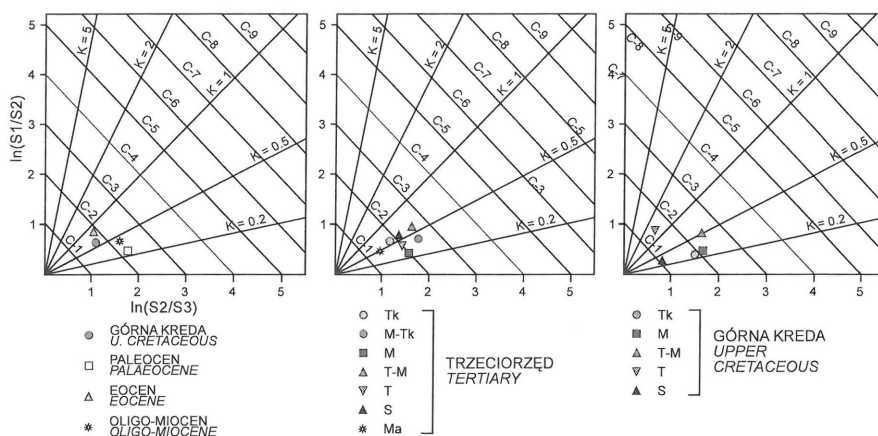
do 0,621 (gruboławicowe), a w utworach górnokredowych od 0,224 (kompleksy gruboławicowe) do 1,467 (cienkoławicowe). Anomalnie wysokie wartości K, sugerujące rozkłady typu pojedynczych zgrupowań na stereogramach, notuje się w stanowiskach usytuowanych w pobliżu dużych uskoków w ogniwie piaskowców z Popradu (6,592), a także w spągu nasunięcia magurskiego, w chaotycznych diamiktytach warstw z Poręby (4,943).

### Dyskusja

Porównanie z dostępnymi, pojedynczymi danymi dla pozostałych jednostek tektonicznych Karpat polskich przedstawia się następująco. Średnie wartości C dla skał trzeciorzędowych płaszczowiny dukielskiej wynoszą 2,492 (1,199–3,691), a wartości K sięgają 0,329 (0,075–1,296). Pojedyncze stanowisko piaskowców cergowskich (oligocen) w jednostce grybowskiej ujawnia niskie wartości C (1,909), natomiast spękania w skałach oligocenijskich wschodniej części płaszczowiny śląskiej (1,781) oraz górnokredowo-paleocenijskich warstwach płaszczowiny skolskiej (1,507) wykazują wartości jeszcze niższe. Stosunkowo wysokie średnie C cechuje populacje spękań w utworach górnej kredy zachodniej części płaszczowiny śląskiej (2,638). Spękania w warstwach oligocenijskich jednostki przedmagurskiej Karpat Zachodnich wykazują wartości C i K, odpowiednio 2,169 i 0,324 (ryc. 9), a w obrębie kom-

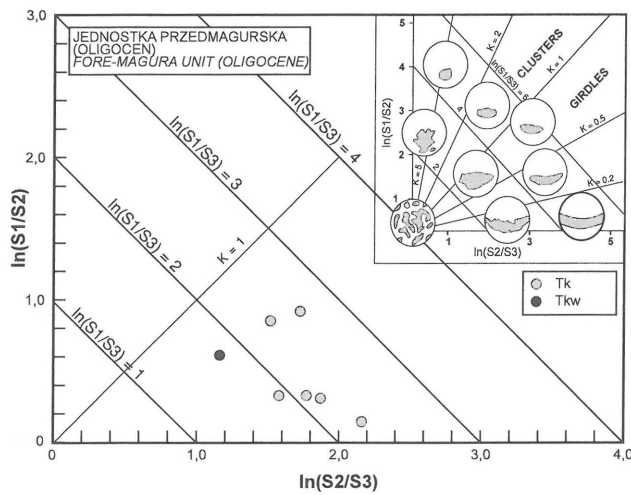
**Ryc. 7.** Zróżnicowanie wartości średnich i skrajnych parametrów C i K w kompleksach fliszowych o różnej miąższości płaszczowiny magurskiej. Symbole litologiczne — por. ryc. 2; N — liczba stanowisk

**Fig. 7.** Average and extreme values of C and K parameters calculated for joint distributions within strata of different thickness in the Magura Nappe. Lithological symbols — see Fig. 2; N — number of stations studied



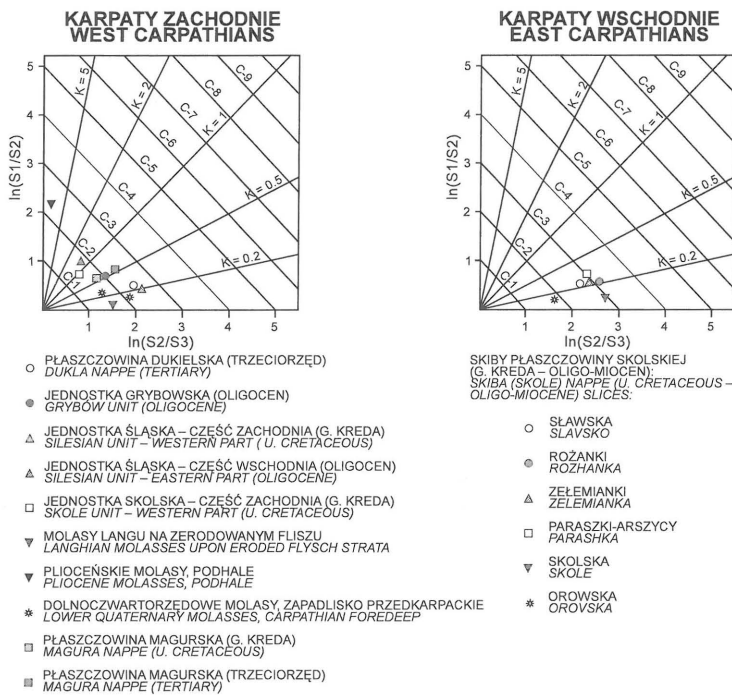
**Ryc. 8.** Zestawienie uśrednionych wartości parametrów statystycznych rozkładów spękań ciosowych w różnowiekowych kompleksach fliszowych płaszczowiny magurskiej. Symbole litologiczne — por. ryc. 2

**Fig. 8.** Summary diagrams showing average values of statistical parameters of joint distributions, calculated for different lithostratigraphic complexes of the Magura Nappe. Lithological symbols — see Fig. 2



Ryc. 9. Diagram logarytmiczny wskaźników znormalizowanych wartości własnych S1, S2 i S3, przedstawiających rozkłady spekań ciosowych w warstwach oligocenu jednostki przedmagurskiej Karpat polskich. Tk — piaskowce grubo- i bardzo gruboławicowe, Tkw — gruboławicowe wapień

Fig. 9. Two-axis logarithmic plot of ratios of normalized eigenvalues S1, S2 and S3, showing joint distributions within Oligocene strata of the Fore-Magura unit in the Polish Carpathians. Tk — thick- and very thick-bedded sandstones, Tkw — thick-bedded limestones



Ryc. 10. Diagramy zbiorcze uśrednionych parametrów rozkładów spekań ciosowych w różnych jednostkach tektonicznych Karpat Zewnętrznych  
Fig. 10. Summary diagrams showing average values of statistical parameters of joint distributions throughout different tectonic units of the Outer Carpathians

pleksów fliszu górno kredowego-miocenowego płaszczowiny skibowej (skolskiej) Karpat Ukraińskich (por. Zuchiewicz i in., 1997) wynoszą 2,6 oraz 0,2 (ryc. 10). W tej ostatniej płaszczynie średnie wartości C są zdecydowanie wyższe, niż w płaszczynie magurskiej Karpat polskich i wykazują istotną zmienność w zależności od wieku skały macierzystej: wartości najwyższe charakteryzują populacje spekań w warstwach górno-kredowych, eocenowych i oligocenowych, najniższe natomiast obserwuje się w gruboławicowych na ogół piaskowcach paleocenu i oligocenu.

Zróżnicowane, ale przeważnie niewielkie wartości C (ryc. 10) charakteryzują spekania w molasach badeńskich leżących na zerodowanym fliszu wschodniej części Karpat polskich (Dubiecko; 1,663), jak również w fanglomeratach plioceńskich na Podhalu (Domański Wierch; 2,402) oraz

dolnoczwartorzędowej serii witowskiej w zapadisku przedkarpackim (Witów; 1,674–2,187).

### Wnioski

Przedstawione zestawienie parametrów statystycznych rozkładów spekań ciosowych w różnych ogniwach litostratygicznych płaszczowiny magurskiej ujawnia wyraźną zależność obliczonych wartości własnych od wieku warstw. Skały górno-kredowe wykazują na ogół większy rozrzut dominujących kierunków spekań w porównaniu z utworami trzeciorzędowymi, sugerując oddziaływanie różnych pól naprężeń. W miarę przesuwania się ku wschodowi stopień „uporządkowania” rozkładów spekań (*fabric*) wzrasta, co może się wiązać z diachroniczną migracją ruchów fałdowych wzdłuż rozciągłości łuku karpackiego z zachodu na wschód.

### Literatura

FLINN D. 1962 — J. Geol. Soc., 118: 385–433.  
MARDIA K. V. 1972 — Statistics of orientation data. Academic Press, New York: 1–357.  
OSZCZYPKO N., CIESZKOWSKI M. & ZUCHIEWICZ W. 1991 — Bull. Pol. Acad. Sci., Earth Sci., 39: 88–107.  
RAMSAY J. G. 1967 — Folding and fracturing of rocks. McGraw-Hill Book Co., New York: 1–568.  
SCHEIDEGGER A. E. 1964 — Bull. Seismol. Soc. Amer., 54: 1519–1528.  
SCHEIDEGGER A. E. 1965 — U.S. Geol. Survey Prof. Paper 525-C: 164–167.  
WATSON G. S. 1965 — Biometrika, 52: 193–203.  
WATSON G. S. 1966 — J. Geology, 74: 786–797.  
WOODCOCK N. H. 1977 — Bull. Geol. Soc. Amer., 88: 1231–1236.  
ZUCHIEWICZ W. 1997 — Prz. Geol., 45: 105–109.  
ZUCHIEWICZ W., BUBNIAK I. M. & RAUCH M. 1997 — Ibidem, 45: 408–413.