

Paweł ALEKSANDROWSKI\*

## STEP-LIKE TECTONIC LINEATION IN THE MAGURA FLYSCH WESTERN OUTER CARPATHIANS)

(Pl. I—VI and 4 Figs.)

### *Schodkowa lineacja tektoniczna we fliszu magurskim*

(Pl. I—VI i 4 fig.)

**Abstract:** The present paper gives the first description of tectonic lineation parallel to fold axes from the area of the Polish Outer Carpathians. The lineation is defined by the intersection of bedding planes and surfaces of bedding fissility with slip-surfaces of step micro-faults. The origin of the micro-faults and, consequently, the lineation is connected with shear failure of buckled sandstone layers.

#### STEP-LIKE LINEATION

In several outcrops of folded but unmetamorphosed Magura flysch deposits (mainly of Paleogene age — see Bieda, Jednorowska, Książkiewicz, 1967) of the Babia Góra region, sets of linear structures are observable on the surfaces of sandstone layers. Sometimes, on slightly weathered bedding surfaces, they resemble crenulation lineation known from metamorphic terrains, in other cases — small asymmetric ripples (Pl. I, II, III and IV).

The presence of these sets of structures simultaneously on the upper and lower surfaces of layers, as well as on the surfaces of bedding fissility (Pl. II Fig. 2) suggests their tectonic origin. This supposition has been confirmed by parallelism of these structures to axes of mesoscopic folds (Fig. 1) and by observations made on polished sections of hand specimens (Figs. 2, 3 and 4; Pl. V Fig. 2; Pl. VI).

The discussed linear structures, being penetrative with regard to surrounding rock medium (*sensu* Turner, Weiss, 1963, pp. 21—22), may be termed lineation (*Ibid.*, pp. 31, 101). The latter has most often been

---

\* Instytut Nauk Geologicznych PAN, Pracownia Geologii Młodych Struktur, 31-002 Kraków, Senacka 3.

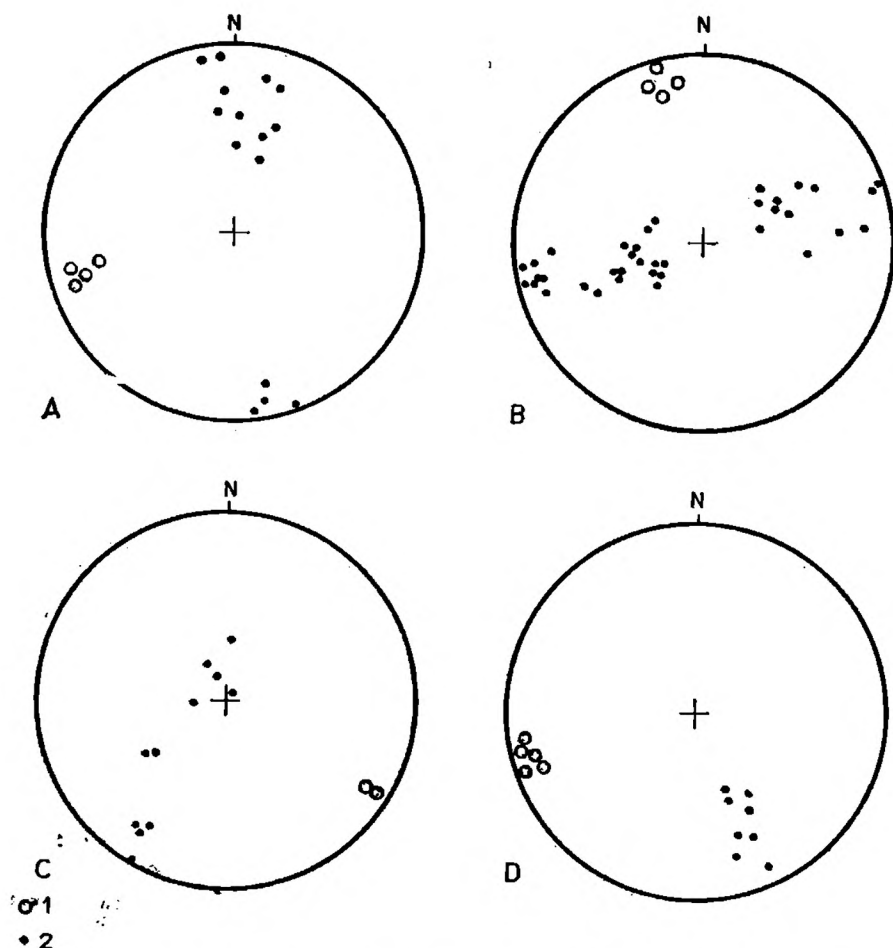


Fig. 1. Orientation of the step-like lineation with respect to mesoscopic folds. Projection on the upper hemisphere of the equal-area net. 1 — step-like lineation; 2 — poles to orientation of the bedding surface measured within the folds. A. Zawoja Gołynia, sandstones of the Hieroglyphic beds; B. Juszczyn Frydlówka, sandstones of the Hieroglyphic beds; C. Zubrzyca Górna, marly shales of the Beloveza beds; D. Juszczyn Polany, the Magura sandstone

Fig. 1. Orientacja lineacji schodkowej w obrębie fałdów mezoskopowych. Projekcja na górną półkulę siatki równopowierzchniowej. 1 — lineacja schodkowa; 2 — bieguny sfałdowanych powierzchni uławiczenia. A. Zawoja Gołynia, piaskowce warstw hieroglifowych; B. Juszczyn Frydlówka, piaskowce warstw hieroglifowych; C. łupki margliste warstw beloveskich; D. Juszczyn Polany, piaskowce magurskie

observed in thick- and medium-bedded sandstones of the Magura beds as well as in medium-bedded sandstones of the Hieroglyphic and Łącko beds. It seems that the increase in thickness of sandstone layers is a factor favourable for producing the lineation. Another prerequisite is the neighbourhood of a fold hinge and the curvature of layers connected with it. In the case of the thin-bedded Beloveza and Hieroglyphic beds, the discussed lineation may also be present in marly shales (Pl. III fig. 2).

Analogous structures have also been observed in the Magura unit east of the investigated area (the Dunajec River Valley in the vicinity of Tylmanowa; Pl. III fig. 1; Pl. IV; A. K. Tokarski, personal communication).

It is here proposed to term the described structure the step-like lineation.

### DESCRIPTION

Our lineation has the shape of more or less parallel, rectilinear or somewhat curved sets of steps, which are from a fraction of a millimetre to about one centimetre high. Successive steps are a few millimetres to some centimetres apart (when measured along the bedding plane perpendicularly to the structures). Sometimes, steps of two orders of magnitude appear: the smaller ones are parallelly superimposed on the larger ones (Pl. II Fig. 1).

In some cases, the step-like lineation is associated with slickenside striae on the fissility surfaces parallel to bedding. The striae are then perpendicular to the lineation (Pl. II Fig. 1; Pl. III Fig. 1) and are probably caused by bedding — and fissility-slip phenomena during folding (Pl. V Fig. 2).

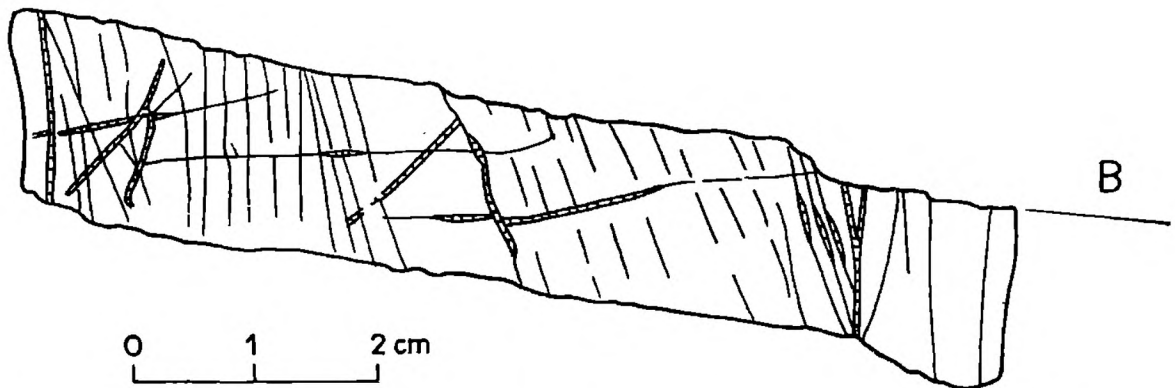


Fig 2. Schematic sketch of micro-dislocations visible on a polished section cut perpendicularly to the step-like lineation (cf. Pl. II Fig. 1). Sandstone from the Hieroglyphic beds, Ochlipów. B — fissility plane parallel to bedding; calcite fillings hatched

Fig. 2. Schematyzowany szkic mikrodyslokacji na powierzchni zglądu piaskowca (por. pl. II fig. 1). Warstwy hieroglifowe. Ochlipów. Lineacja schodkowa prostopadła do powierzchni rysunku. B — powierzchnia oddzielności równoległa do uławiczenia, zakreskowane — wypełnienia kalcytowe

Investigations of the lineation in natural exposures and on polished sections proved that the sets of parallel steps had been produced within a layer as a result of slip-movements along sets of step-micro-faults (the term „micro-fault” is here used after Hills, 1963, p. 25, although, on the ground of their size, the minor faults under consideration obviously must be classed as mesoscopic structures) and/or, less often, micro-flexures (Figs. 2, 3 and 4; Pl. V Fig. 2; Pl. VI). The micro-faults usually do not exceed the boundaries of individual sandstone layers, being compensated by ductile deformation within adjoining shales. The slip-planes most often intersect with the bedding plane at an angle of  $60^{\circ}$ — $80^{\circ}$ ; sometimes the angle increases up to  $90^{\circ}$  or may be somewhat less than  $60^{\circ}$ . The micro-dislocations (faults and flexures) are, as a rule, normal ones (Figs. 2 and

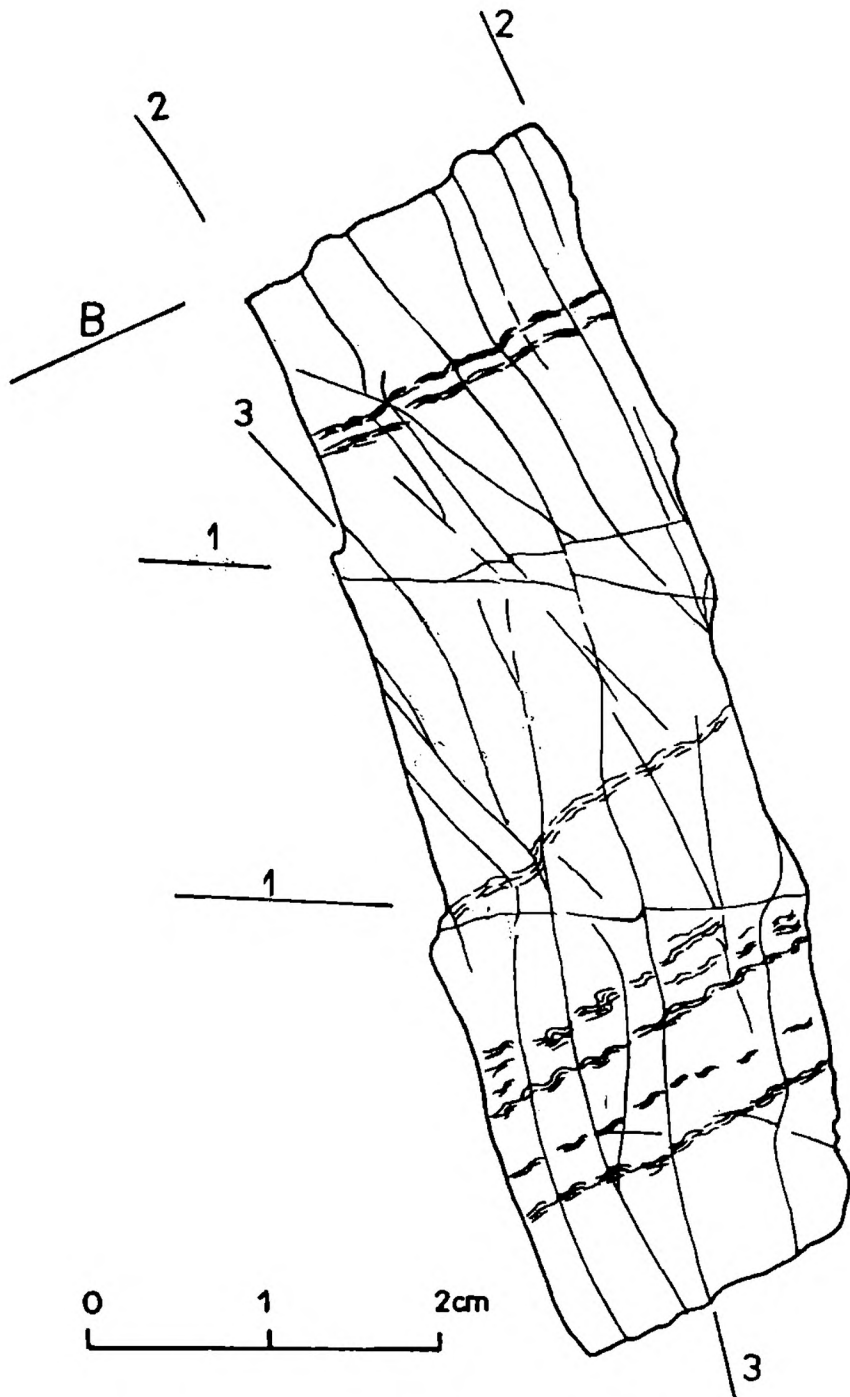


Fig. 3. Schematic sketch of micro-faults visible on a polished section cut perpendicularly to the step-like lineation. Sandstone of the Hieroglyphic beds. Ochlipów. B — bedding plane; 1 — fractures older than the micro-faults; 2 — surfaces of longitudinal joints; 3 — micro-dislocations. The lamination is locally marked

Fig. 3. Schematyzowany szkic mikrodyslokacji na powierzchni zglądu, prostopadłego do lineacji schodkowej. Piaskowce warstw hieroglifowych. Ochlipów. B — powierzchnia ławicy; 1 — spękania starsze od mikrouskoków; 2 — powierzchnie ciosowych spękań podłużnych; 3 — mikrodyslokacje. Fragmentarycznie uwzględniono laminację

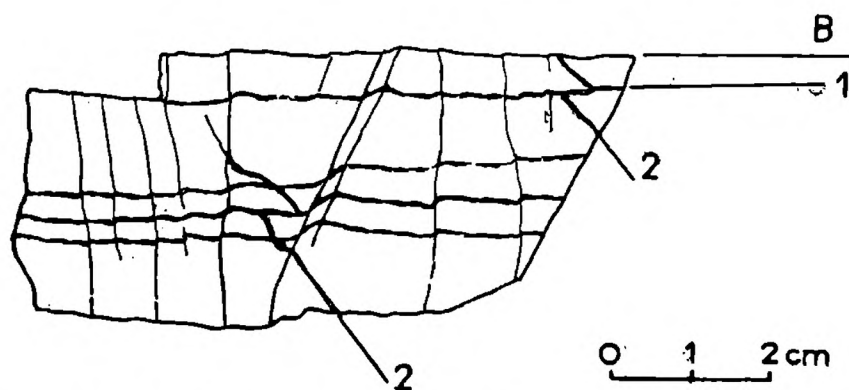


Fig. 4. Schematic sketch of a polished section of a sandstone specimen cut perpendicularly to the step-like lineation. The Hieroglyphic beds, Ochlipów. B — fissility plane parallel to bedding; 1 — locally marked lamination; 2 — calcite filled fractures marking the flexural-slip movements

Fig. 4. Schematyzowany szkic powierzchni zglądu, prostopadłego do lineacji schodkowej. Piaskowce warstw hieroglifowych. Ochlipów. B — powierzchnia oddzielności równoległa do uławicenia; 1 — lokalnie zaznaczona laminacja; 2 — spękania wypełnione kalcytem, odzwierciedlające ruch ślizgowy równoległy do uławicenia, wynikający z fałdowania przez zginanie

4), seldom they are reverse (some of the faults on Fig. 4; Pl. V Fig. 2). Normal micro-faults in one part and reverse ones in the other part of the layer have also been observed (Fig. 3). One can often see conjugate sets of micro-faults (Fig. 4; Pl. V Fig. 2; Pl. VI) but usually one of these sets is predominant in producing the step-like lineation. Subtile sets of micro-faults are often hardly perceptible or even invisible on polished sections in the case when lamination is lacking. When the step-like lineation is well developed, slickenside striae on the surfaces of micro-faults, running usually perpendicularly to the lineation, may sometimes be observed. The planes of micro-faults are only seldom covered with calcite (Fig. 2).

#### ORIGIN

In the light of the above data, the step-like lineation is a tectonic lineation defined by intersection of a bedding surface and/or internal fissility planes parallel to it with slip surfaces of micro-dislocations. The formation of sets of micro-dislocations is most probably connected with the folding process, as is shown by their regular orientation with respect to fold axes. The development of conjugate sets of non-kathetal dislocations<sup>1</sup> can be explained by the process of shear failure of the layers being folded by buckling, after exceeding their ability for elastic flow (Jaroszewski, 1974, p. 226, Fig. 248). In such a case, the normal or reverse character of dislocations would depend mainly on their position within the folded layer (on the inner or outer side of the neutral surfa-

<sup>1</sup> Kathetal dislocation — dislocation perpendicular to bedding planes.

ce; cf. Fig. 3). As may be inferred from the above consideration, the presence of sets of shear planes in a cross section of the layer is the necessary criterion to identify the step-like lineation. If only a bedding surface is accessible for inspection, the step-like lineation may be confused with other structures, which sometimes have similar appearance (small ripple-marks, step-like breaks running across slickensides, intersection traces of cross-bedding on bounding surfaces of layers or, crenulation lineation, although the latter is absent in the Babia Góra region).

It should be also mentioned that dip-slip movements synchronous with folding occurred not only along the surfaces of micro-dislocations in question but also along the joint planes: the pre-existing ones or produced simultaneously with folding (see Książkiewicz, 1968; Tokarski, 1975). The resultant steps on bedding surfaces may also be more or less parallel to fold axes but differ considerably from the step-like lineation in their scale and morphology (Pl. V Fig. 1). Such steps should not be confused with the step-like lineation as well.

Folds in the sandstone layers of the investigated area, characterized by concentric geometry (at least on the microscopic scale) and—most often — by approximately monoclinic symmetry, were formed by buckling. It may be inferred that these folds were produced by a mechanism close to flexural-slip folding (slip-movements parallel to bedding are possible within the sandstone beds due to the development of bedding fissility — Pl. V Fig. 2) with a component of flow added in the case of shaly members of the flysch sequence (where departures from constant thickness and concentric geometry of folded layers may be noticed). Based on the symmetry of observed folds and the deduced folding mechanism (see Turner, Weiss, 1963, pp. 400, 478), a parallelism may be assumed between the direction of step-like lineation (parallel, in turn, to fold axes) and the *b* kinematic axis. This rule should be treated with caution and applied only on a local scale. This limitation, which also concerns the assumed monoclinic symmetry of folds, is due to strongly marked noncylindricity of fold structures in the area investigated.

#### COMPARISONS

Analogous lineations were sometimes described as pseudo-ripple-marks. Ingerson (1940) gave examples of pseudo-ripple-marks from metamorphic Weisner quartzite of the Southern Appalachians. They appear along shear-zones intersecting at a high angle with the bedding surface. The petro-structural analysis shows that the muscovite flakes are arranged parallel to the shear-zones in the quartzite and that the orientation of quartz optical axes, when plotted on the stereo-net, makes a pole girdle perpendicular to the shear-planes and another, non-continuous girdle, the

axis of which is parallel to the pseudo-ripple-marks. These features show, according to Ingerson, that the pseudo-ripple-marks are perpendicular to the  $b$  kinematic axis and parallel to the  $a$ -axis.

„Tectonic ripples” on bedding surfaces of greywackes (the Aberystwyth Grits) are known from Wales. They are parallel to axes of minor folds and were interpreted by Price (in Wood, 1958, p. 28, Pl. 1) as shear structures related to drag folds.

Hills (1963, p. 25) described pseudo-ripple-marks from Ordovician sandy slates of the South-Eastern Australia and interpreted them as a result of slip-movements along cleavage planes.

#### FINAL REMARKS

The step-like lineation here described has not been known from the area of the Polish Outer Carpathians so far. Due to its rather infrequent occurrence (at least in the investigated region), its geological significance should not be overestimated. Being parallel to fold axes, the lineation may be helpful — if caution in the interpretation is being kept in mind — in determining of their local orientation. Being synchronous with folding, it may also help to prove the pre- or post-folding ages of various mesoscopic structures.

**A c k n o w l e d g e m e n t s.** Professor Dr. K. Birkenmajer, Dr. A. K. Tokarski and Dr. S. J. Porębski have discussed the results of the present study. Their criticism, as well as helpful remarks of Doc. Dr. W. Jaroszewski are acknowledged with gratitude.

*Manuscript received December 1979  
accepted April 1980*

#### REFERENCES — WYKAZ LITERATURY

- Bieda F., Jednorowska A., Książkiewicz M. (1967), Stratigraphy of the Magura Series around Babia Góra. *Inst. Geol. Biul.* 211: 293—324, Warszawa.
- Hills E. S. (1963), *Elements of structural geology*, 483 p., Methuen, London.
- Ingerson E. (1940), Fabric criteria for distinguishing pseudo-ripple-marks from ripple-marks. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 51: 557—70.
- Jaroszewski W. (1974), Tektonika uskoków i fałdów (Tectonics of faults and folds; in Polish only), 296 p., Wyd. Geol., Warszawa.
- Książkiewicz M. (1968), Spostrzeżenia nad rozwojem ciosu w Karpatach fliaszowych (Observations on jointing in the Flysch Carpathians). *Rocz. Pol. Tow. Geol.*, 38, 2—3: 335—84.
- Tokarski A. K. (1975), Structural analysis of the Magura Unit between Krościenko and Zabrzeż (Polish Flysch Carpathians). *Rocz. Pol. Tow. Geol.*, 45, 3—4: 327—59.

- Turner F. J., Weiss L. E. (1963), *Structural analysis of metamorphic tectonites*, p. 545. Mc Graw-Hill Book Co. Inc., New York.
- Wood A. (1958), Whitsun Field Meeting of Aberystwyth, 7—11 June 1957. *Proc. Geol. Assoc. Lond.* 69: 28, London.

## STRESZCZENIE

W niektórych odsłonięciach fliszu magurskiego w rejonie Babiej Góry na powierzchniach ławic piaskowców można napotkać zespoły struktur liniowych, przypominające czasem gufraż bądź drobne riplemarki (pl. I, II; pl. III fig. 1; pl. IV). O ich tektonicznej genezie świadczy obecność tych struktur na powierzchniach stropu i spągu ławic, jak również na równoległych do nich wewnątrzławicowych powierzchniach oddzielności (pl. II fig. 2), równoległość ich do osi fałdów mezoskopowych (fig. 1) oraz rezultaty badań nad powierzchnią zglądów (fig. 2, 3, 4; pl. V fig. 2; pl. VI).

Ze względu na swą penetratywność względem otaczającego ośrodka skalnego struktury powyższe mogą być określane jako lineacja (Turner, Weiss, 1963, s. 21—22). Proponuje się dla niej nazwę lineacji schodkowej.

Wykształceniu opisywanej lineacji zdaje się sprzyjać wzrost miąższości ławic piaskowcowych oraz bliskość przegubów fałdów. Lineację schodkową obserwowano w warstwach magurskich, łąckich i hieroglifowych. W cienkoławicowych warstwach belowskich notowano jej obecność w łupkach marglistych (pl. III fig. 2). Podobne struktury napotkał A. K. Tokarski (inf. ustna; pl. III fig. 1; pl. IV) również w dolinie Dunajca.

Opisywana lineacja ma wygląd równoległych, schodkowo ułożonych stopni o wymiarach (wysokość, odstępy) rzędu 0,1—10 mm. Zespoły równoległych stopni wytworzyły się wskutek poprzesuwania względem siebie poszczególnych fragmentów ławicy wzdłuż zespołów schodowych mikrouskoków (terminu „mikrouskoki” użyto tu za Hillsem, 1963, s. 25, chociaż rozważane tu drobne uskoki mieszczą się jeszcze w zakresie skali mezo-) rzadziej mikrofleksurek (fig. 2, 3, 4; pl. V fig. 2; pl. VI). Najczęściej obserwuje się obecność sprzężonych zespołów mikrodyslokacji (fig. 4; pl. V fig. 2; pl. VI) z przewagą jednego z tych zespołów w tworzeniu lineacji schodkowej.

Opisywaną strukturę uznać należy za lineację z przecięcia powierzchni oddzielności, równoległych do uławicenia, z powierzchniami ślizgowymi mikrodyslokacji. Powstanie lineacji schodkowej można odnieść do procesu fałdowania i wyjaśnić ścięciowym zniszczeniem ławicy fałdowanej przez zginanie po przekroczeniu zdolności materiału do płynięcia sprężystego (Jaroszewski, 1974, s. 226, ryc. 248).

Do zrzutowych ruchów ślizgowych doszło podczas fałdowania nie tylko wzdłuż powierzchni mikrodyslokacji, lecz również wzdłuż powierzchni spekań oiosowych. Powstałe w tym ostatnim procesie schodkowe stopnie



na powierzchniach ławic mogą być również równoległe do osi fałdów, ale różnią się od lineacji schodkowej morfologią i większymi rozmiarami (pl. V fig. 1).

Bez rozpoznania na poprzecznym przekroju ławicy mikrodyslokacji odpowiedzialnych za wytworzenie lineacji, można, na podstawie obserwacji dokonanych jedynie na powierzchni uławicenia, pomylić lineację schodkową z innymi strukturami, niekiedy przypominającymi ją wyglądem (gufraż, drobne riplemarki, schodkowe zadziory tektoniczne, ślady przecięcia powierzchni uławicenia przez warstwowanie przekątne). Ze względu na panujący we fliszu magurskim mechanizm fałdowania przez zginanie z poślizgiem (por. pl. V fig. 2), z ewentualnym udziałem płynięcia w obrębie wkładek łupkowych i na jednoskośną symetrię powstałych fałdów (założenie to można przyjąć dla niewielkiego pola obserwacji), można utożsamiać kierunek lineacji schodkowej z lokalnym kierunkiem kinematycznej osi *b* (Turner, Weiss, 1963, s. 400, 478).

Podobne lineacje opisywano kilkakrotnie jako pseudoriplemarkę (Ingerson, 1940; Wood, 1958; s. 28, pl. 1; Hills, 1963, s. 25).

Znaczenie geologiczne lineacji schodkowej, opisanej tu po raz pierwszy z obszaru polskich Karpat zewnętrznych, jest ograniczone jej sporadycznym (przynajmniej w rejonie babiogórskim) występowaniem. Przy ostrożnej interpretacji może być ona pomocna w lokalnym wyznaczaniu osi fałdów, jak również w określaniu względnego wieku różnych mezostruktur w stosunku do deformacji fałdowej.

## EXPLANATION OF PLATES — OBJAŚNIENIE PLANSZ

### Plate — Plansza I

- Fig. 1. Step-like lineation on the bedding surface of the Magura sandstone. Juszczyń Polany.  
Fig. 1. Lineacja schodkowa na powierzchni ławicy piaskowca magurskiego. Juszczyń Polany.  
Fig. 2. Step-like lineation on the bedding fissility plane in the Magura sandstone. Juszczyń Polany.  
Fig. 2. Lineacja schodkowa na równoległej do stropu wewnątrzławicowej powierzchni oddzielności w piaskowcu magurskim. Juszczyń Polany.

### Plate — Plansza II

- Fig. 1. Step-like lineation on the bedding fissility surface of the sandstone bed. The Hieroglyphic beds. Ochlipów. The steps are of two orders of magnitude. The polished section is shown in the Fig. 2 in the text.  
Fig. 1. Lineacja schodkowa na wewnątrzławicowej powierzchni oddzielności piaskowca. Warstwy hieroglifowe. Ochlipów. Schodkowe stopnie dwóch rzędów wielkości. Powierzchnia zglądu jest przedstawiona na fig. 2 w tekście.  
Fig. 2. Step-like lineation on two neighbouring bedding fissility surfaces in the Magura sandstone. Grzechynia.

Fig. 2. Lineacja schodkowa na dwóch sąsiednich wewnątrzławicowych powierzchniach oddzielności w piaskowcu magurskim. Grzechynia.

Plate — Plansza III

Fig. 1. Step-like lineation on the intra-layer fissility surface in the Magura sandstone. Dunajec River Valley near Tylmanowa (specimen collected by A. K. Tokarski). Note the slickenside striae on the fissility plane.

Fig. 1. Lineacja schodkowa na wewnątrzławicowej powierzchni oddzielności w piaskowcu magurskim. Dolina Dunajca koło Tylmanowej (okaz zebrany przez A. K. Tokarskiego). Na powierzchniach oddzielności widoczne rysy ślizgowe prostopadłe do lineacji.

Fig. 2. Step-like lineation in marly shale from a hinge zone of a mesoscopic fold (cf. Fig. 1c in the text). The Beloveza beds. Zubrzyca Górna.

Fig. 2. Lineacja schodkowa w łupku marglistym, występująca w przegubie fałdu mezoskopowego (por. fig. 1c w tekście). Warstwy beloweskie. Zubrzyca Górna.

Plate — Plansza IV

Step-like lineation on the bedding surface of the Magura sandstone. Dunajec River Valley near Tylmanowa (photo by A. K. Tokarski).

Lineacja schodkowa na powierzchni ławicy piaskowca magurskiego. Dolina Dunajca koło Tylmanowej (fot. A. K. Tokarski).

Plate — Plansza V

Fig. 1. Steps on the bottom surface of a sandstone layer produced by the slip-movement along the longitudinal joint planes (L). The Hieroglyphic beds Zawoja Gołynia. Some L-joints are filled with calcite or shaly material. The calcite-covered joint plane in the foreground belongs to the transversal set (T)

Fig. 1. Schodkowe stopnie na spągowej powierzchni piaskowca, spowodowane ślizgiem na płaszczyznach podłużnych spękań ciosowych (L). Warstwy hieroglify. Zawoja Gołynia. Niektóre spękania L są wypełnione kalcytem bądź materiałem ilastym. Widoczna na pierwszym planie, pokryta kalcytem powierzchnia ciosu należy do zespołu poprzecznego (T).

Fig. 2. Polished section of a sandstone specimen cut perpendicularly to the step-like lineation. The Hieroglyphic beds. Ochlipów. Note the slip-effect parallel to the bedding observable in the calcite-filled fracture (f). This effect is caused by flexural-slip folding.

Fig. 2. Powierzchnia zglądu w piaskowcu, prostopadła do lineacji schodkowej. Warstwy hieroglify. Ochlipów. Wypełnione kalcytem pęknięcie (f) zarejestrowało ruch ślizgowy równoległy do uławicenia, spowodowany fałdowaniem przez zginanie z poślizgiem.

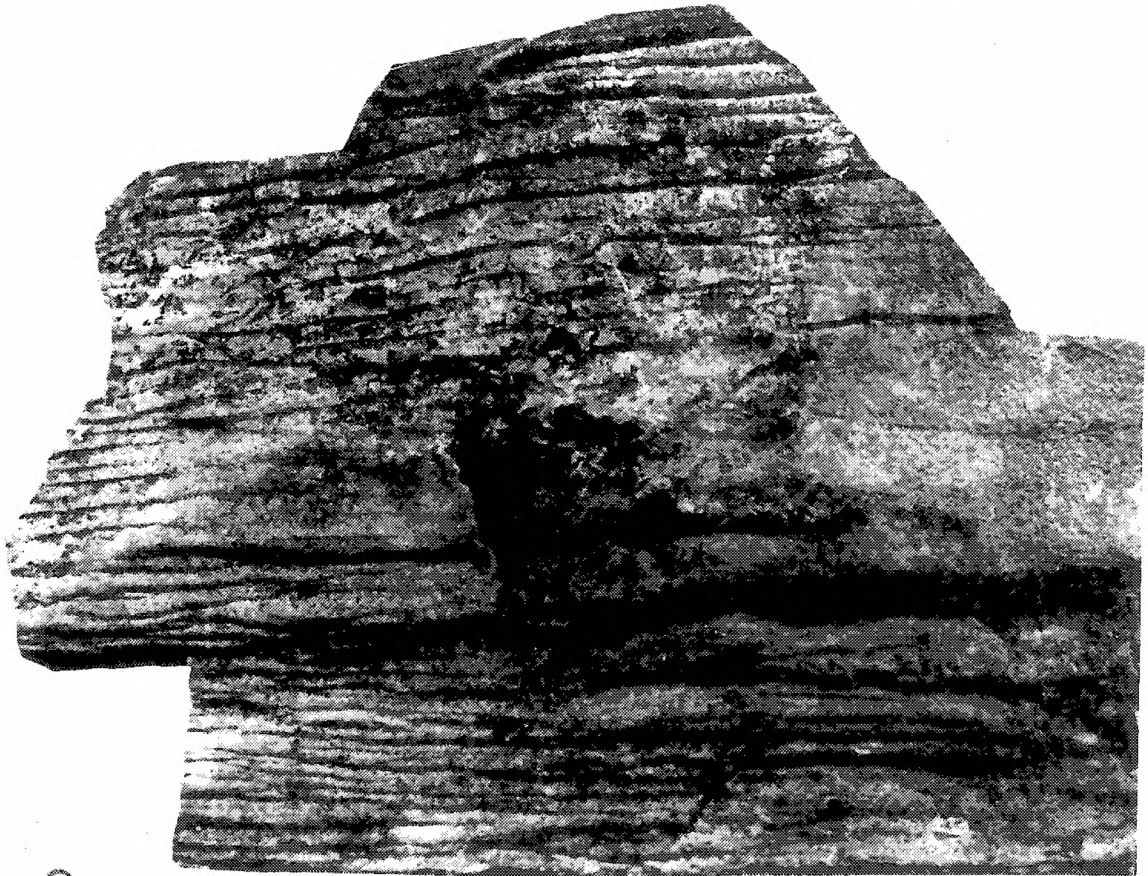
Plate — Plansza VI

Fig. 1. Polished section of a sandstone specimen cut perpendicularly to the step-like lineation (which is present on the upper surface of the specimen — B — bottom plate of the layer). The Hieroglyphic beds. Zawoja Gołynia. Note two conjugate sets of minor faults: the prevailing one (2) and the set not so prominent (1).

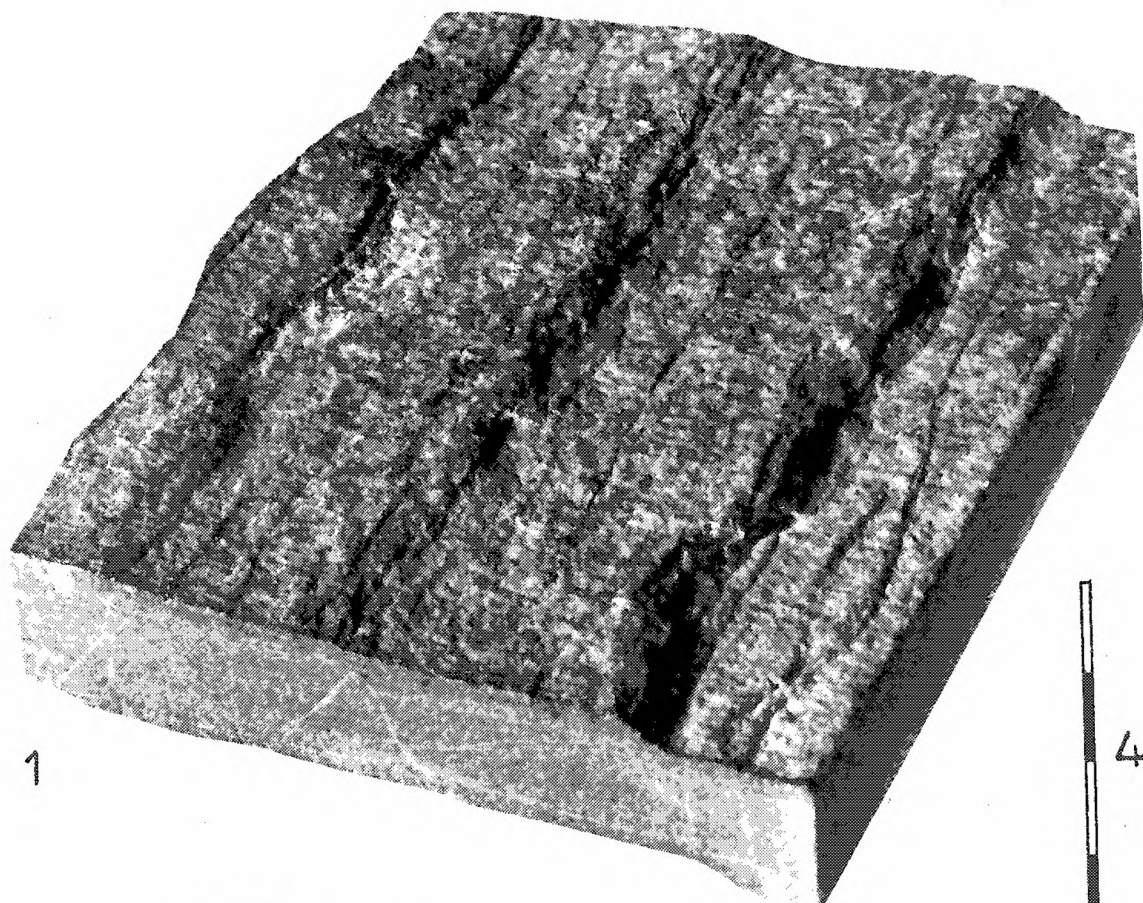


1

4cm

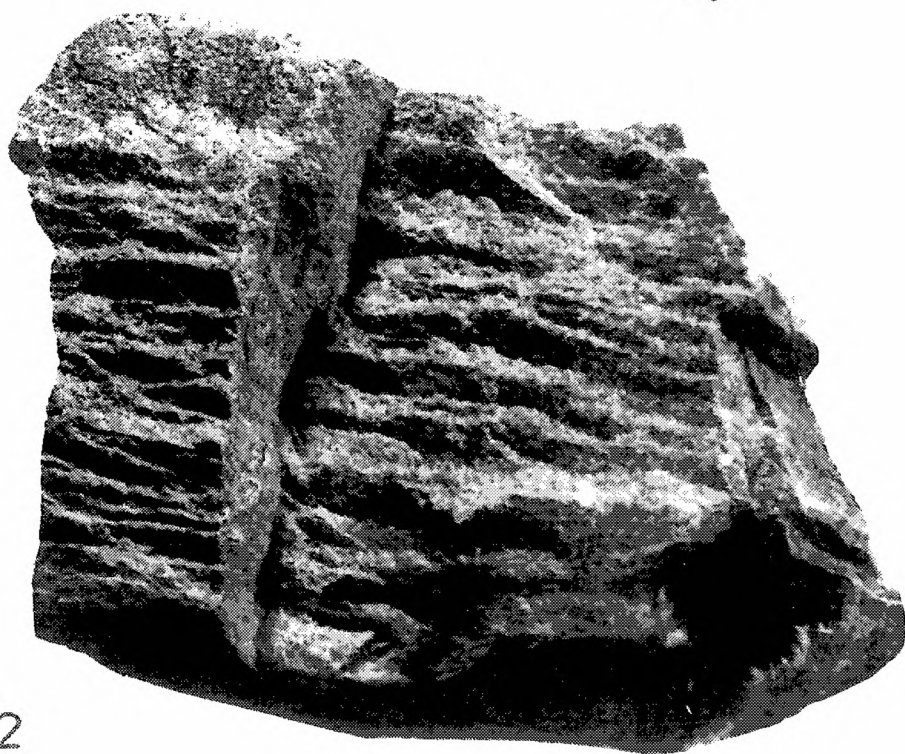


2



1

4cm



2

4cm

Fig. 1. Powierzchnia zglądu w piaskowcu, prostopadła do lineacji schodkowej (występującej na górnej powierzchni okazu — B — powierzchni spągowej ławicy). Warstwy hieroglifowe. Zawoja Gołynia. Widoczne dwa zespoły sprzężone drobnych uskoków: zespół przeważający (2) i słabiej zaznaczony (1).

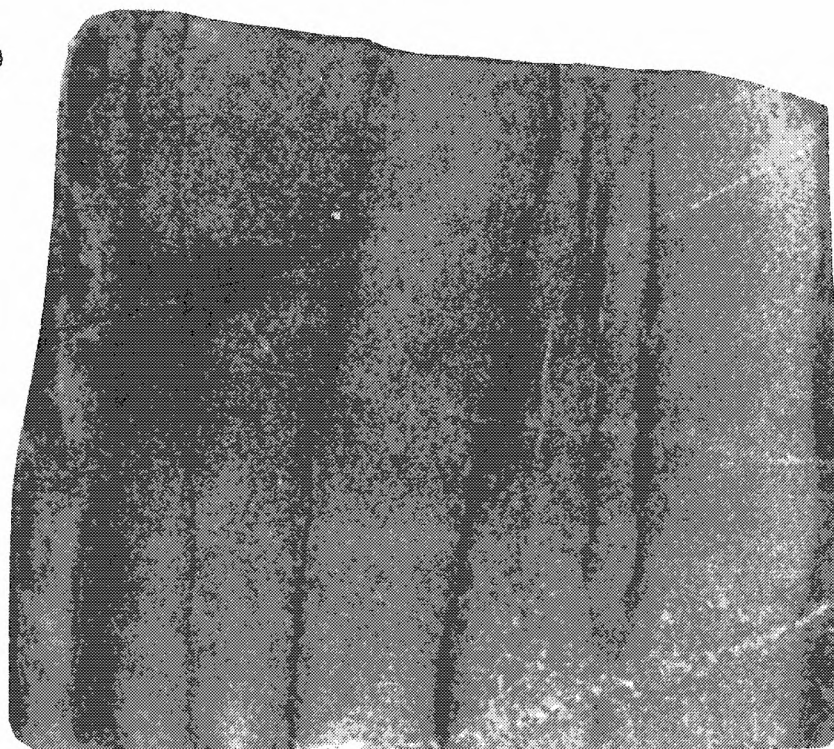
In all the plates — scale in centimetres

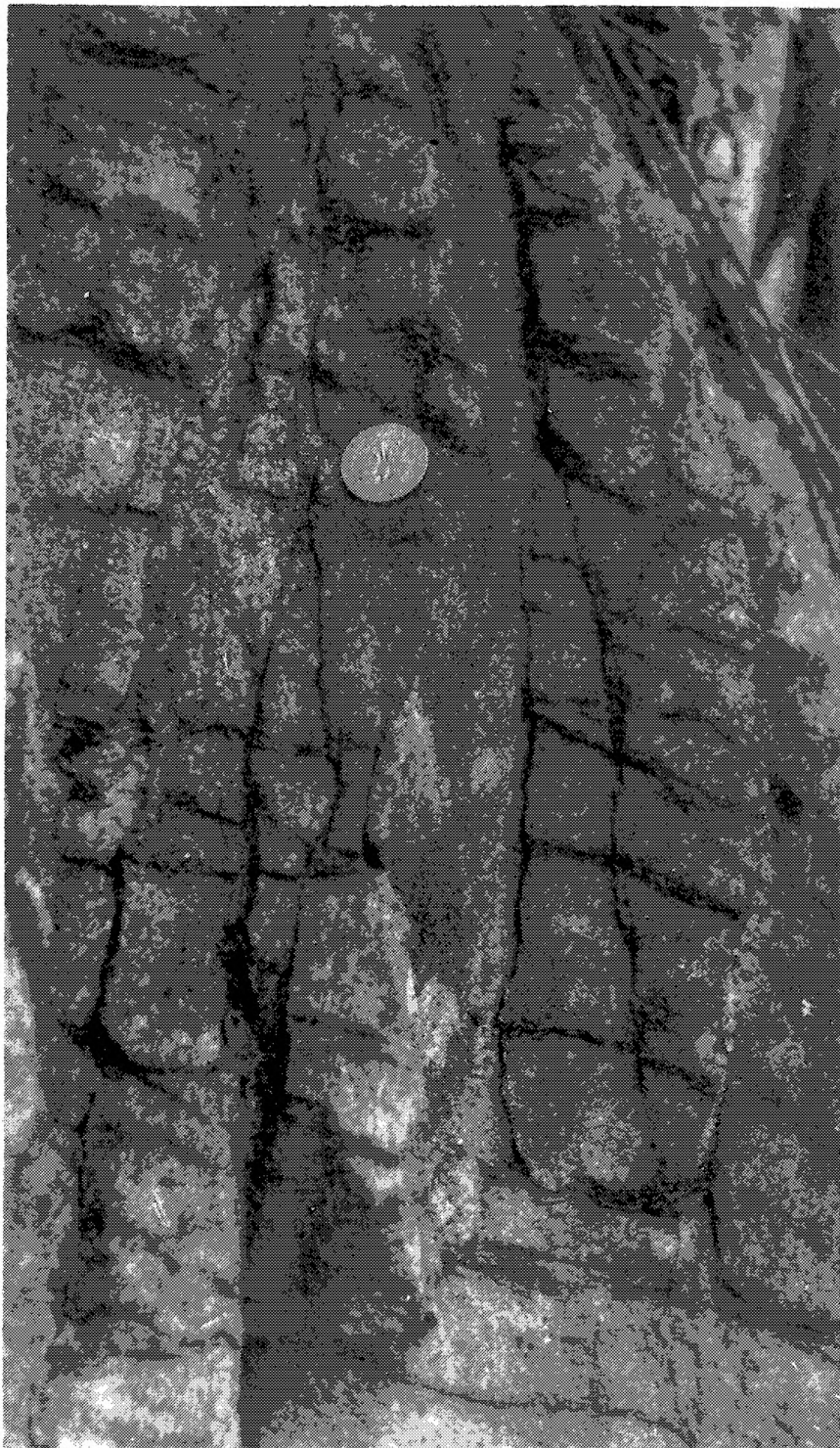
Na wszystkich planszach — skala w centymetrach.

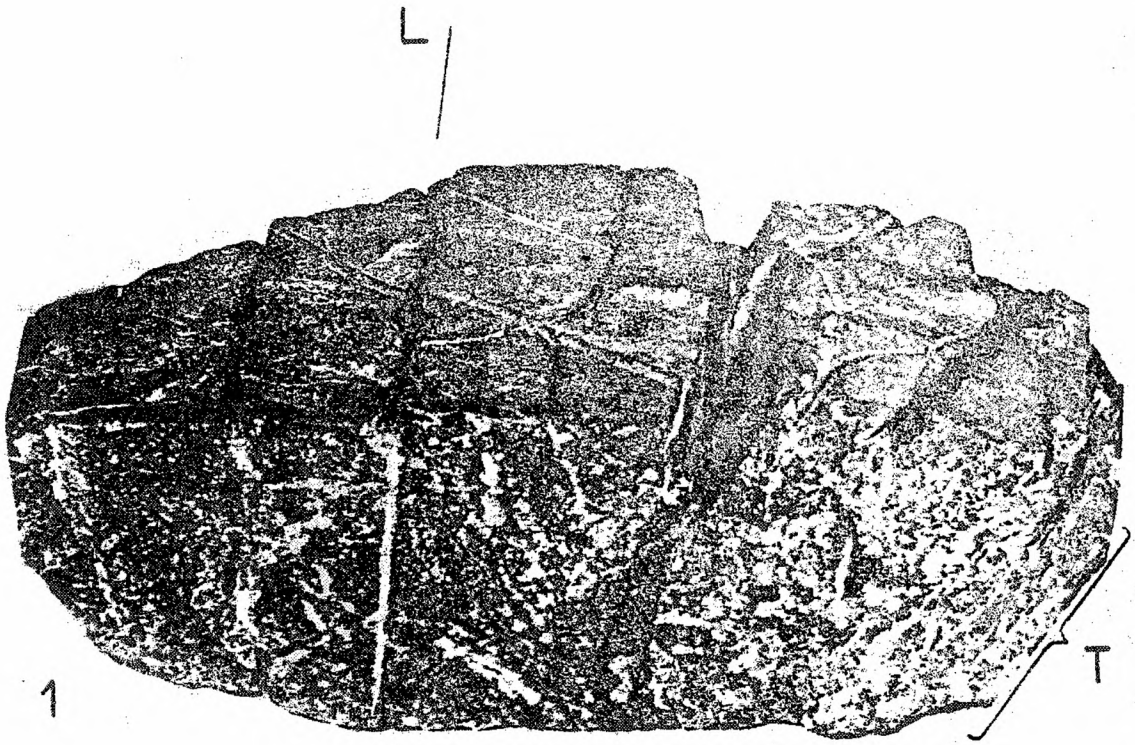


4 cm

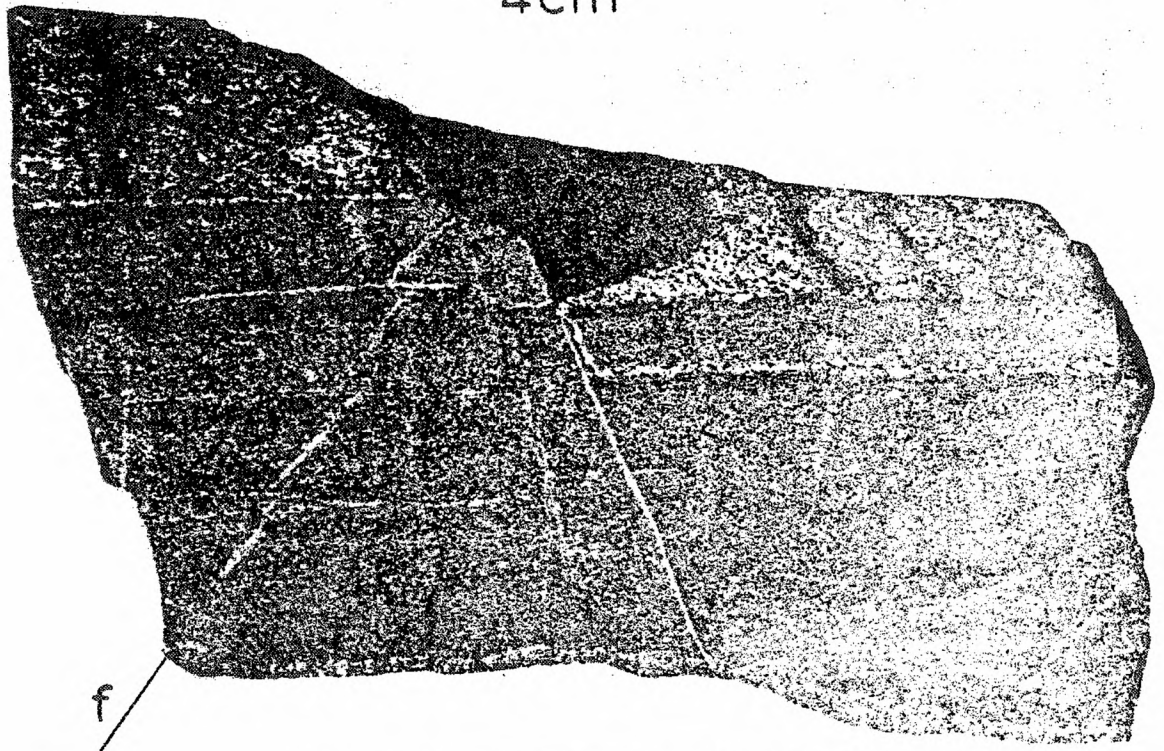
2







4 cm



4 cm



