

Andrzej Karol TEISSEYRE\*

## PHYSIOGRAPHY OF BED-LOAD MEANDERING STREAMS 2: DEPOSITION OF CHANNEL-PHASE SANDS AND THE DISPERSION OF RIPPLE- AND DUNE-GENERATED CROSS-LAMINATION

### CONTENTS

Abstract	7
Introduction	7
Deposition of sand in mountain meandering streams	8
Field procedures and results	13
Discussion of the results	15
Conclusions	16
References	17
Fizjografia żwironośnych rzek meandrujących 2: depozycja piasku w korytach i rozrzut kierunków zapadu laminacji skośnej — streszczenie	18

### Abstract

In mountain meandering streams sand is transported as bed-load mostly in local areas confined to large separation bubbles. Separation of flow takes place on a large scale in bank niches and at the inner banks of meander bends just downstream the axis of bend. In such areas channel sand bars accumulate owing to sediment discharge in the form of dunes, dunes with ripples superimposed, and ripples. The direction of movement of the bedforms is controlled by rather a complex flow system existing in a separation bubble and — in so being — is largely unrelated, to local (paleo) slope. Systematic field measurements of ripple-, dune-, and bar slip-faces as well as bar stoss-sides have demonstrated that: (1) Almost all currents in a separation bubble may ripple sand and the dispersion in dip directions of ripple slip-faces is the greatest with mean dip of  $23^\circ$  and standard deviation of  $7.5^\circ$ ; (2) Countercurrents in sand-bottom separation bubbles are too weak to produce typical backflow dunes. Consequently, dune slip-faces dip mostly bankwards or obliquely upchannel at a mean angle

of  $27^\circ$  ( $\sigma = 7^\circ$ ); (3) Bar slip-faces dip either bankwards or upchannel with mean angle of dip similar to that for dunes; and (4) Bar stoss-sides dip channelwards at a mean angle of  $15^\circ$  ( $\sigma = 6^\circ$ ). The measurements have been also analyzed using cumulative contour diagrams and "current roses" in order to visualize the distribution of slip-face dip directions (i.e., azimuths of dip of cross-lamination) in relation to a local downchannel direction. The resultant current roses are strikingly bimodal with the least number of readings in the direction of flow and grand vector means pointing upchannel (= upslope). It has been found that preservation potential of such channel sand bars is fairly good and they were commonly observed both in the Quaternary and the Lower Carboniferous fluvial deposits of the Central Sudetes. Generally, channel-phase sands are typically associated with bar-platform gravels, i.e., lower portion of a point bar sequence between meander pool and vegetated supraplatform bar. Deposits of similar origin may also occur embedded in fine-grained overbank alluvia 0.

### INTRODUCTION

In bed-load mountain meandering streams sand is transported primarily as suspended load. With low-stage discharge, however, one can observe local areas in which sand is carried as bed-load. This may

be realized either in the phase of lower flat bed or in lower-regime sand waves. Genetically, the areas show evidence of having resulted either from flow separation or secondary helical flow. To the latter

\* Institute of Geological Sciences, the University, ul. Cybulskiego 30, 50-205 Wrocław.

category belong harrow marks (e.g., Karcz 1967, 1972) and similar streaks of rippled sand. These, however, have rather a slender chance of being preserved in the deposits of mountain meandering streams and are not treated further in this paper.

Separation of flow may be developed on a small scale, for instance, behind relatively small roughness elements protruding from the river bed (cf. Karcz 1968, 1972; Richardson 1968; Ostromecki 1971; Sengupta 1966). On the other hand, large separation bubbles occur in places where channel width increases suddenly or at the inner banks of meander bends (Braden 1950; Rouse 1959; Taylor *et al.*, 1971; Klimek 1972; Rachocki 1974 and others). Small-scale flow separation results in tiny local accumulations of sand and fine gravel and seems to be a less important geologic agent. In this paper we shall consider only those bedforms whose origin is related to large separation bubbles. Fine-grained deposits (mostly sandy), which tend to be accumulated in such areas, may have here better chances to be preserved than elsewhere in the channel of a mountain stream. In fact, field experience teaches us that the large separation bubbles are the most important loci producing cross-laminated channel-phase sands and

fine gravels. Thus, a primary objective of this study was to determine the dispersion in dip directions of ripple-, dune-, and bar slip-faces (and thereby cross-lamination) generated in the large separation bubbles by systems of secondary flows. A more detailed knowledge of the distribution seems to be of importance for both (paleo) geographic and (paleo)-hydraulic studies. The investigations have been performed exclusively in the field on some natural and semi-natural study reaches of the Sudetic mountain rivers, mostly in the drainage basins of the upper River Bóbr and Strzegomka. The hydrologic characteristics of the study reaches is the following: channel width (low stage) 0.4 to 12 m, depth (low stage) several centimetres to 2.1 m, mean low discharge less than 1.5 m<sup>3</sup>/s, bankful discharge 40–150 times the mean-stage discharge, mean flow velocity (low stage) 0.5 to 2.6 m/s, channel sinuosity 1.25 to 3.2, slope ranging from 0.002 to at least 0.025. Bed material varied from large boulders to sandy granule-pebble gravel (cf. Teisseyre, 1977). This work is part of a wider investigation into fluvial processes being carried out at the Geological Institute of the University of Wrocław.

## DEPOSITION OF SAND IN MOUNTAIN MEANDERING STREAMS

Channel pattern of many mountain meandering streams involves both sinuous reaches and low-sinuosity between-meander ones. Owing to numerous obstructions and the inhomogeneity in bank materials, the latter are rather irregular in plan consisting of alternating expansions and contractions (fig. 1). Contraction of flow results in jet flow and flow separation at points of abrupt change in channel width. In wide portions of the channel the character

of flow changes markedly. A short distance down-channel the feeding contraction jet flow submerges in relatively quiet water and impinges upon bottom with the resultant erosional pool (fig. 2). Here, the flow divides into two or three flows, one directed downchannel and the other (or others) running towards the channel banks. In turn, the flow directed bankwards leads to the formation of two bank flows, one moving upchannel and the other going downchannel (fig. 2). Thus, the development of backflow appears to be a direct consequence of flow separation at the points of separation (fig. 1, 2).

The succession of sedimentation processes in the channel expansion shown in figure 2 was the following. During the spring flood in early March '77 caused by a sudden melting of snow and ice the expansion was a place of intense erosion. When the stage subsided the left bank niche was free from fine deposits. The bottom was floored with cobbles and pebbles. The first structure observed to develop here was a submerged longitudinal ridge composed of fine gravel and coarse sand (4 in figure 2). The ridge started to grow at the point of separation, S, and gradually expanded downchannel. The ridge was found to lie in the plane of separation of turbulent

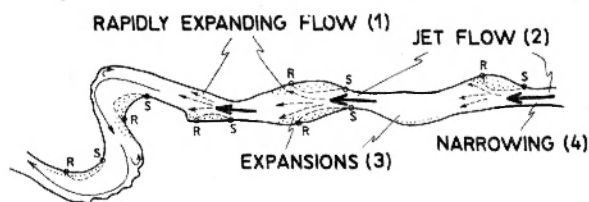


Fig. 1

Schematic flow pattern in a small mountain meandering stream. Mean channel width about 2 m

S — point of flow separation, R — point of re-attachment of turbulent boundary layer. Dots indicate main areas of deposition of channel-phase sands. Unpatterned — gravel floor

Schematyczny układ prądów w małym, górskim strumieniu meandrującym. Średnia szerokość koryta wynosi około 2 m. S — punkt oderwania prądu, R — punkt powrotu (przyłgnięcia) turbulentnej warstwy przyściennej. Kropki oznaczają główne obszary sedymentacji piasków korytowych. Bez szrafury — dno żwirowe

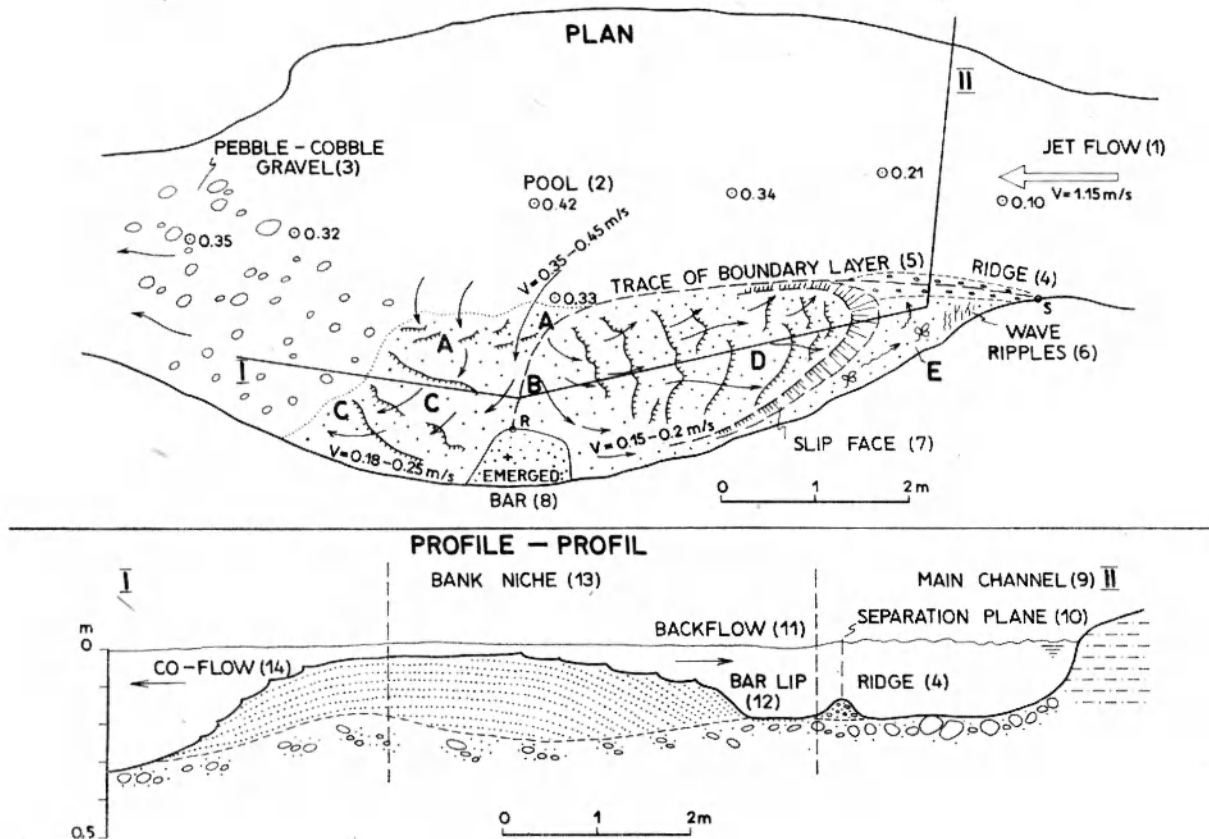


Fig. 2

Flow pattern and deposition of sand in a bank niche, Chwaliszówka brook, Stare Bogaczowice study reach

S - point of flow separation, R - point of re-attachment of turbulent boundary layer. Figures in main channel indicate depth (m). See text for explanation

Układ prądów i sedymentacja piasku w niszy brzegowej, potok Chwaliszówka, odcinek badawczy w Starych Bogaczowicach

S - punkt oderwania prądu, R - punkt ponownego przyłączenia turbulენტnej warstwy przyściennej; 1 - wpływ z przewężenia (efekt wpływu z dyszy), 2 - przegłębienie korytowe, 3 - żwir 4-128 mm, 4 - podwodny grzbiet, 5 - ślad warstwy przyściennej, 6 - riplemarki falowe, 7 - ściana zsypu, 8 - wynurzona część łachy, 9 - główne koryto, 10 - płaszczyzna oderwania prądu, 11 - przepływ wsteczny, 12 - krawędź ściany zsypu, 13 - nisza brzegowa, 14 - prąd zgodny z przepływem głównym. Liczby na planie wskazują głębokość koryta w metrach. Dalsze objaśnienia w tekście

boundary layer. At the same time, coarse sand was accumulating in the zone of emergence of the bank-directed flow (zone A in fig. 2). First, a sheet of coarse sand was deposited migrating relatively fast upslope the channel bank (see profile in fig. 2). Moving against the local slope, the flow was typically decelerating and the rate of deposition increased towards the point of re-attachment, R (fig. 2). This resulted in the accumulation here of a sand mound, which increased in height bankwards and soon became emerged. During the time of field investigation, conditions of sediment discharge changed from lower flat bed in deeper parts of the zone A, through low, quickly moving "washed-out" ripples, to normal ripples in the zones C and D (fig. 2). The rate of sedimentation in the zone C was rather low as the co-flow was typically accelerating. The character of the backflow (zone D in fig. 2) was more complex. Its velocity diminished over the flat bar top and gentle sloping bankward surface, but increased substantially near the bar lip and over steeper channel-

ward slope. It is evident from velocity measurements that the thickness of the sand bar is the greatest in the area of decelerating flow. The stilling zone E (fig. 2) was characterized by very weak currents and rather a slow deposition of mud, very fine-grained sand and tiny plant fragments. Slightly stronger secondary flow existed only in a narrow channel between the bar slip-face and the left bank. However, the flow was competent enough to transport at least part of detrital material avalanching down the bar slip-face.

Thus, it is evident that the arrangement and direction of movement of both the ripples and the bar slip-face shown in figure 2 were governed by the complex flow system operating in the large separation bubble. And, in so being, neither ripples nor bar slip-face were related to the regional slope; they even seem to be unrelated to local slopes in the bank niche. It can be also concluded that foreset cross-lamination produced by migration of the bar slip-face dips in all directions except downchannel.

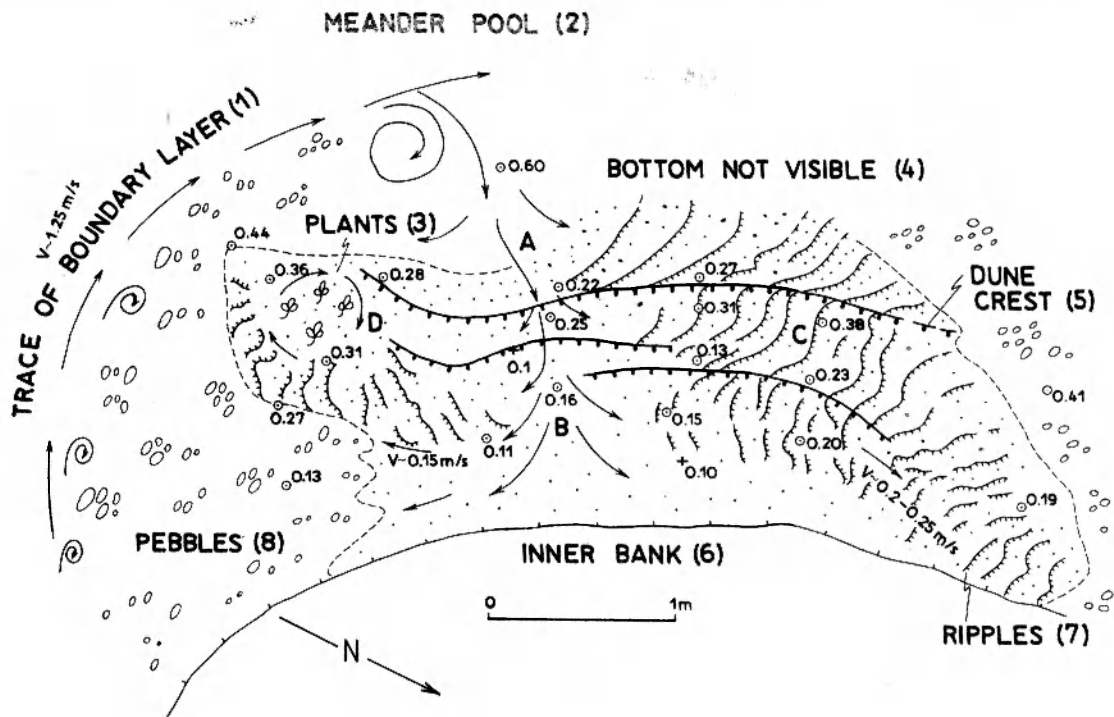


Fig. 3

Flow pattern and deposition of sand on a slope of point bar platform, Lesk Creek, Jazków study reach

Capital letters indicate the same zones as in figure 2. Figures refer to depth below mean low stage. Detrital material varied from very coarse sand with granules in zones A and B to medium-fine sand at distal end of bar. See text for more information

Układ prądów i depozycja piasku na skłonie platformy łachy meandrowej, rzeka Lesk, odcinek badawczy w Jazkowie

Duże litery oznaczają te same strefy, co na figurze 2. Liczby oznaczają głębokość poniżej średniej niskiej wody; 1 – ślad turbulენტnej warstwy przyściennej, 2 – przegłębienie meandrowe, 3 – nagromadzenie napławionej roślinności, 4 – dno niewidoczne, 5 – grzbiet podwodnej duni, 6 – brzeg wewnętrzny, 7 – riplemarki, 8 – żwir (4–64 mm). Materiał detrytyczny stanowił bardzo gruboziarnisty piasek ze żwirkiem (2–4 mm) w strefach A i B z przejściami do piasku średnio- i drobnoziarnistego na oddalonych krańcach łachy. Dalsze objaśnienia w tekście

The example discussed above may be considered to be a universal model for deposition of sand and fine gravel in a bank niche of a low-sinuosity mountain stream. In the field, however, many particular variants of the model can be found depending on local hydrodynamic conditions, channel configuration and width, bank material, and the rate and character of sediment discharge.

Sand bars of somewhat larger mountain rivers may reveal more or less regular dunes or dunes with ripples superimposed. Such larger bars may show similar zones as illustrated in figure 2. In general, however, flow pattern over dune-covered bed is much more complex. It is especially true for between-dune troughs. Separation of flow at dune crests results in generation here of a complex three-dimensional secondary flow, which as a rule is strong enough to ripple sand in the troughs. These ripples move characteristically perpendicular to the dune crests. It has been observed many times in the field that the direction of movement of such ripples is a discharge-controlled phenomenon. Generally, with high discharge the ripples tend to migrate upstream, while the reversal seems to be true for low-stage discharges (pl. III).

Deposition of sand at the inner banks of meander bends are shown in figures 3 and 4 and plates I and II. Figure 3 illustrates deposition of channel-phase sand in the lower Lesk Creek, a small meandering river of relatively low gradient (ca. 0.0031) and pebbly-sandy bed load. One can distinguish here similar zones as in figure 2. The point of flow separation was situated just downchannel the axis of bend of the inner bank. The sand bar shown in figure 3 accumulated during a period of subsiding flow in mid-March '77. First, when the discharge was much higher than normal (1.5–1.7 m<sup>3</sup>/s, mean annual discharge is about 0.5 m<sup>3</sup>/s) and water still turbid, the bar was covered with dunes. These paralleled the channel banks and migrated towards the inner bank. Three weeks later when the discharge subsided to about 0.7 m<sup>3</sup>/s the dunes were inactive and covered by ripples running obliquely or even perpendicular to the dune crests. The bar was the thickest in the zone B (zone of decelerating flow) where the coarsest sand was accumulated. The activity of ripples modified slightly the original dune topography. The main change was accumulation of sand in the dune troughs with the resultant diminishing in dune height (pl. IV).

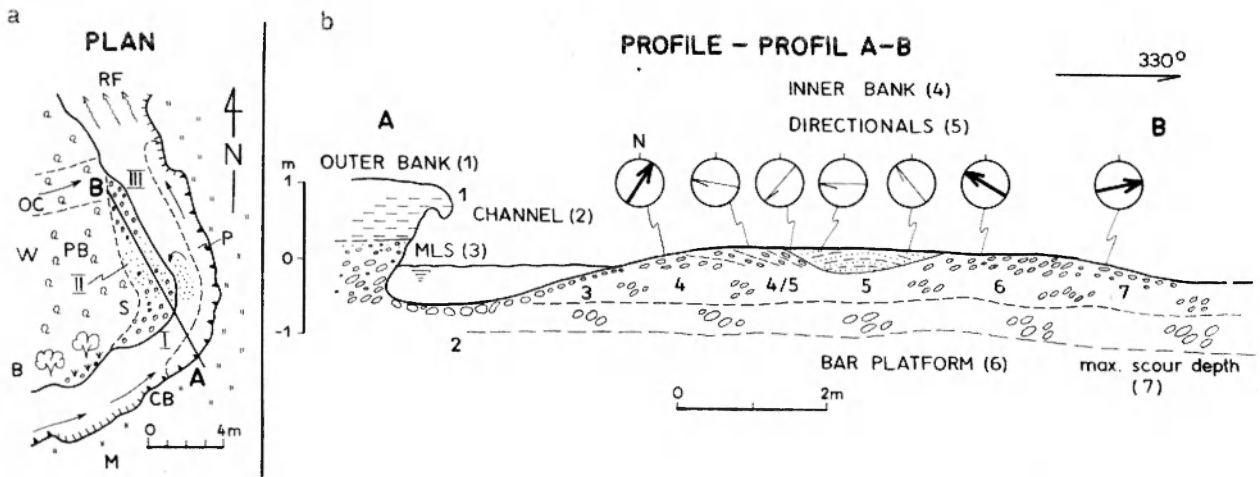


Fig. 4

Flow pattern and sedimentation on bar platform of a high-gradient cobbly meandering river (Złotna Creek, Miskowice study reach)

*a* – portion of meander No *M*–2 in plan: *PB* – point bar, *A*–*B* – cross-section line; subdivisions of bar platform: *I* – head, *II* – mid, *III* – tail; *S* – point of flow separation, *P* – pool, *RF* – riffle, *CB* – outer cutbank, *OC* – overflow channel, *M* – meadow, *W* – willows, *B* – burdock. After flood in May '77; *b* – facies distribution in *AB* profile: *MLS* – mean low stage, Subenvironments and subsfacies: *1* – outer cut bank (no deposition), *2* – meander pool (cobble-boulder gravel), *3* – bar-platform slope (cobble-pebble gravel), bar platform: *4* – bar head (pebble-cobble gravel), *4/5* – transition (sandy granule-pebble gravel, crossbedded), *5* – mid bar (medium-to-very coarse sand), *6* – bar tail (cobble-pebble gravel), *7* – end of overflow channel (cobble gravel). Heavy arrows indicate current directions read on imbricated pebbles, light arrows – dip of cross-strata. Mean downvalley direction is 70°. See text for more information

Układ prądów i sedymentacja na skłonie platformy łacy meandrowej w żwironośnej rzece o dużym spadku (Złotna, odcinek badawczy w Miskowicach)

*a* – wycinek planu meandra *M*–2: *PB* – łaca meandrowa, *A*–*B* – linia przekroju; części platformy łacy meandrowej: *I* – część górna, *II* – część środkowa, *III* – część dolna; *S* – punkt oderwania strumienia, *P* – przegłębienie meandrowe, *RF* – bystrzyk, *CB* – zewnętrzny, erodowany brzeg, *OC* – koryto przelewowe, *M* – łąka, *W* – wierzy, *B* – łopian. Po powodzi w maju '77, *b* – rozmieszczenie facji w profilu *AB*: (*1*) – brzeg zewnętrzny, (*2*) – przegłębienie meandrowe (gruby żwir 64–450 mm), *3* – skłony platformy łacy meandrowej (żwir 4–128 mm), platforma łacy meandrowej: *4* – część górna (żwir 4–128 mm), *4/5* – strefa przejściowa (piaszczysty żwir 2–64 mm, skośnie warstwowany), *5* – część środkowa (piasek od średnioziarnistego do bardzo gruboziarnistego), *6* – część dolna (żwir 4–128 mm), *7* – wylot koryta przelewowego (żwir 64–256 mm). Dalsze objaśnienia w tekście

Figure 4 illustrates deposition of sand in a high-gradient, cobbly sinuous river (local slope is 0.0154). During the spring flood of May, 21–23 '77 flow separation took place near the axis of bend of the inner bank (see plan in figure 4). The flood resulted in recession of the outer bank by a metre or so. At the same time submerged gravelly spur accreted at the inner bank just below the point of separation. The accumulation is here spoken of as bar platform, i.e., the lower part of a point bar between meander pool and vegetated supraplatform bar (cf. Bluck 1971; Levey 1977). Three main subenvironments can be distinguished in the newly formed bar platform including bar head (4 in fig. 4), mid-bar (5 in fig. 4), and bar tail (6 in fig. 4). In flood the bar head was affected by strong vortexes resulted from a sudden break down of free turbulent boundary layer under conditions of high Reynolds and Froude numbers. (The vortexes included descending left-handed whirlpools and ascending left-handed ring vortexes migrating very fast downchannel). The resultant bar-head deposit was strongly imbricated, tightly packed sand-free cobble-pebble gravel. However, pebble size diminished downchannel and the surface of

accumulation became higher in the same direction (the stoss-side dipped upchannel at angles of 7–15°). The modifications in pebble size and bottom elevation reflected a progressive cessation of turbulence generated at the point of separation. In turn, this resulted in the formation of an almost "closed" bubble of relatively quiet water that occurred slightly further downstream (zone 4/5 in fig. 4), close to what is usually a point of re-attachment. It is characteristically this zone, which develops cross-bedding in bar-platform deposits of mountain meandering streams. Dip directions of cross-lamination originated here are shown in figure 4. In flood the mid-bar (zone 5 in fig. 4) was a gravel-floored depression separating the bar head from the bar tail. The tail was an area of slow lateral accretion of strongly imbricated pebble-cobble gravel. Finally, a sand mound was deposited above the mid-bar gravel (5 in fig. 4) in a phase of subsiding stage when gravel-covered bottom was already stationary.

Flow pattern responsible for the deposition of the sand bar was similar to that in figure 3. During a low-stage discharge climbing ripples were observed moving fast upslope towards the inner bank. The

flow was typically decelerating and the thickness of the bar increased bankwards. Trenches dug on the emerged bar have shown form-concordant lamination that was inclined at moderate angles ( $10\text{--}15^\circ$ ) to the main channel on one side of the bar and at high angles ( $25\text{--}40^\circ$ ) to the inner bank on the other

side. Ripple cross-lamination was never found, however. The bar summit corresponded closely to the zone of re-attachment of turbulent boundary layer. This — under conditions of a much lower discharge — was more stable than in flood.

Assuming that the mean local channel trend

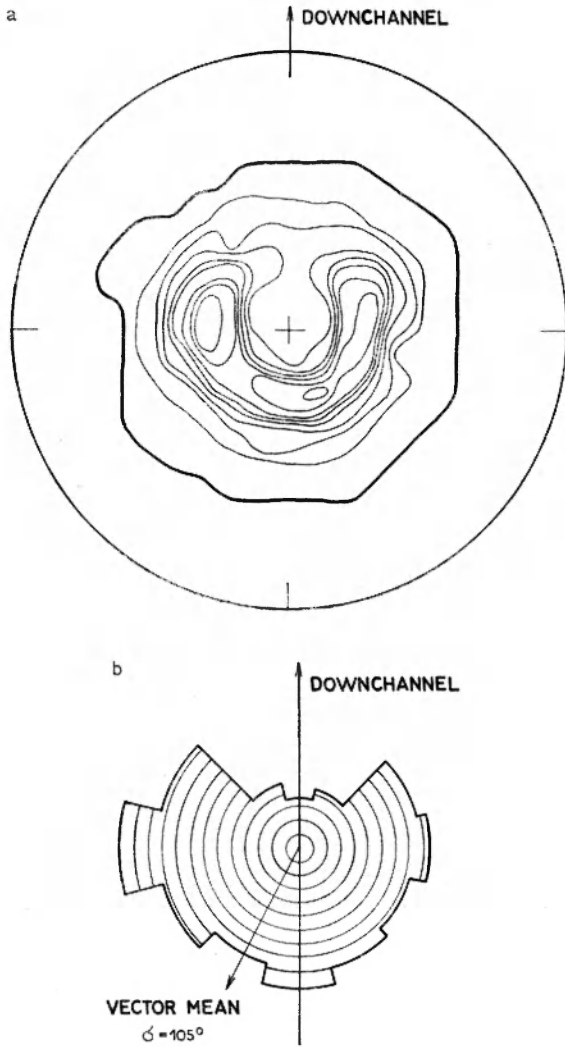


Fig. 5

Distribution of dip directions of ripple slip-faces (or ripple-generated cross lamination) in channel-phase sands of mountain meandering rivers as related to mean downchannel direction

*a* — cumulative diagram, upper hemisphere. Contour lines one per cent apart (with maximum of 8.9 per cent). Based on 1.192 readings. Distribution of dip angles is perfectly normal (Gaussian) with mean dip (= median dip) of  $23^\circ$  and standard deviation of  $7.5^\circ$ ; *b* — sector diagram for the same measurements. Light circles one per cent apart

Rozrzut kierunków zapadu ścian zsyłu riplemarków (lub laminacji skośnej riplemarkowej) w piaskach fazy korytovej górskich rzek meandrujących względem średniego kierunku koryta (strzałka)

*a* — diagram zbiorczy, górna półkula. Warstwy co 1%, maksimum = 8,9%. Na podstawie 1192 pomiarów. Rozrzut kątów zapadu jest normalny. Średni kąt zapadu =  $23^\circ$ , odchylenie standardowe =  $7,5^\circ$ ; *b* — diagram sektorowy tych samych pomiarów. Cienkie koła na diagramie co 1%. Wektor wypadkowy (veter mean) wskazuje kierunek w górę koryta

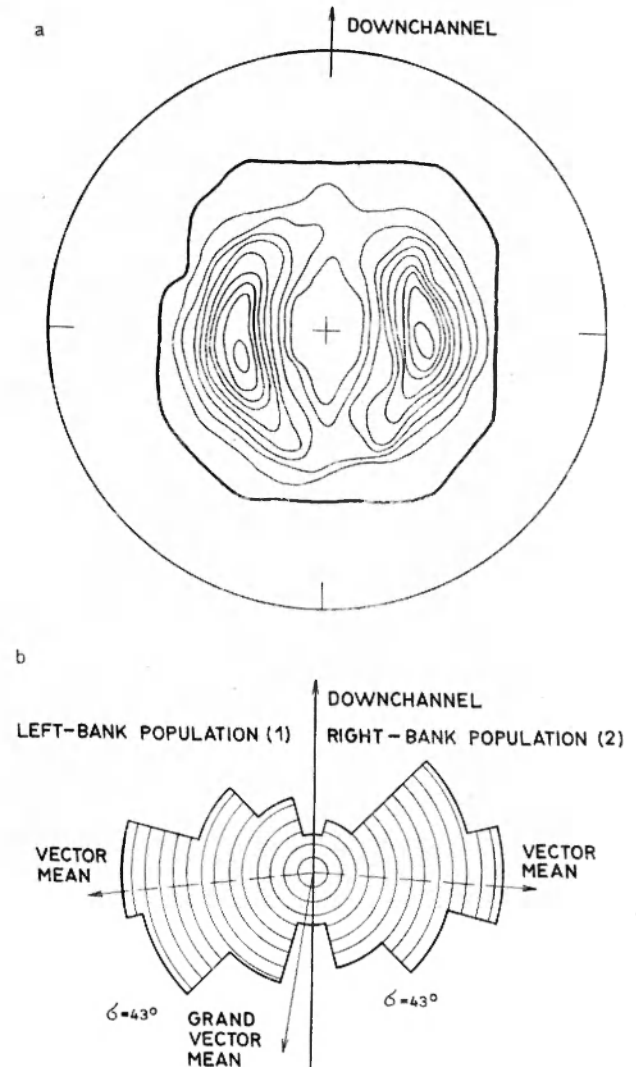


Fig. 6

Distribution of dip directions of dune- and bar slip-faces in channel-phase sands of mountain meandering rivers as related to mean downchannel direction

*a* — cumulative diagram, upper hemisphere. Contour lines one per cent apart (with maxima of 10 per cent). Based on 698 readings. Distribution of dip angles is normal with mean dip of  $27^\circ$  and standard deviation of  $7^\circ$ ; *b* — sector diagram for the same measurements. Light circles one per cent apart. See text for explanation

Rozrzut kierunków zapadu ścian zsyłu podwodnych diun i łach piaszczystych w piaskach korytowych górskich rzek meandrujących względem średniego kierunku koryta (strzałka)

*a* — diagram kumulacyjny, górna półkula. Warstwy co 1% (maksima = 10%). Na podstawie 698 pomiarów. Rozrzut kątów zapadu jest normalny. Średni kąt zapadu wynosi  $27^\circ$ , odchylenie standardowe  $7^\circ$ ; *b* — diagram sektorowy tych samych pomiarów. Współśrodkowe koła co 1%; 1 — populacja brzegu lewego, 2 — populacja brzegu prawego. Dalsze objaśnienia w tekście

is 0° and directions deviated clockwise from the channel trend are labelled “+”, while those deflected counterclockwise are “-” we shall be able to characterize the dispersion in local directionals as follows:

1. Bar head, imbricated gravel (4 in fig. 4) = 0°,
2. Mid-bar, crossbedded gravel (4/5 in fig. 4) = -50 ÷ -60°,
3. Mid-bar, cross-laminated sand (5 in fig. 4) = -50 ÷ -110° and

4. Bar tail, imbricated gravel (6 in fig. 4) = -20 ÷ -30°.

Here, similarly as elsewhere in bar-platform deposits, all the directionals are “minus”. In other words, all the directionals point towards the inner bank, i.e., the point bar. And, finally, it is only bar-head gravel which indicates accurately the mean downchannel direction.

FIELD PROCEDURES AND RESULTS

Azimuths and angles of dip of ripple-, dune-, and bar slip-faces as well as bar stoss-sides were measured on 186 randomly selected sand bars in channels of the bed-load mountain Sudetic rivers. The number of measurements on a bar ranged from 3 to 41 for ripples and from 3 to 12 for dunes. A total of 1,192 readings for ripples, 698 for dune and bar slip-faces, and 558 for bar stoss-sides have been gathered in the field. The readings were converted directly in the field to angular deviations from a mean local downchannel direction. All measurements were

estimated as accurate to ± 5°. The results thus obtained are presented in cumulative- and sector diagrams in figures 5, 6, and 7. The measurements of slip-faces of ripples and dunes produce characteristically low concentration cumulative diagrams of striking monoclinic symmetry. Similar symmetry is also characteristic of the diagram for bar stoss-sides. This, however, exhibits the greatest concentration of measurements. The axis of symmetry of all the diagrams coincides closely with a mean downchannel direction. Median dip angle is the lowest for bar

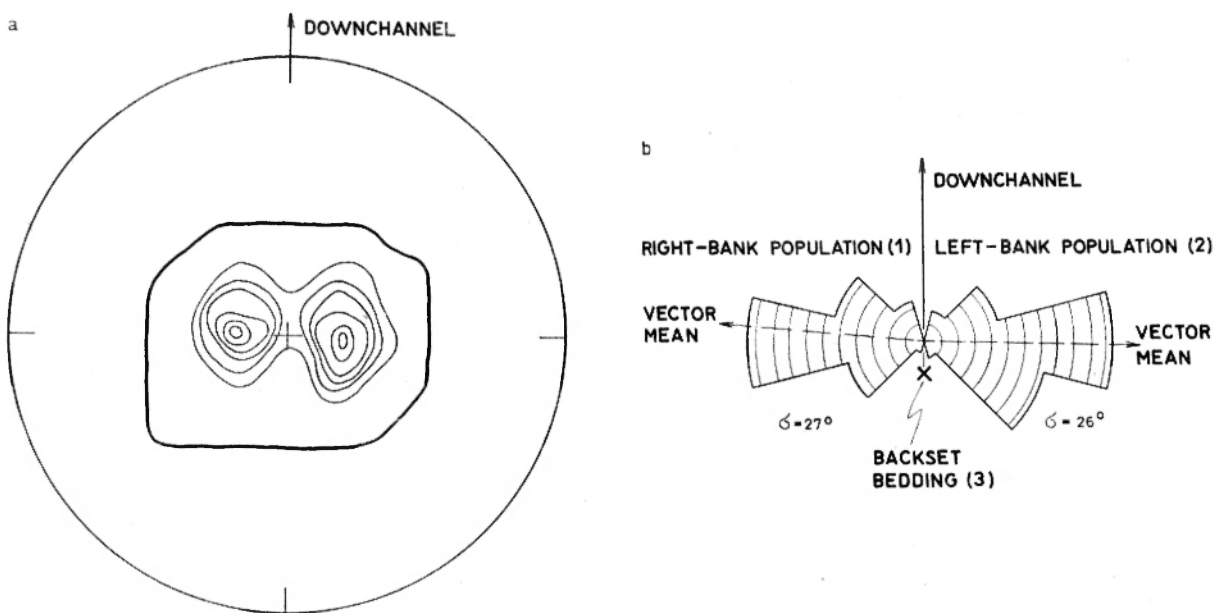


Fig. 7

Distribution of dip directions of stoss surfaces of channel sand bars in mountain meandering rivers as related to mean downchannel direction

a - cumulative diagram, upper hemisphere. Contour lines for 4 per cent apart (with maxima of 25 per cent). Based on 558 readings. Distribution of dip angles is normal with mean dip of 15° and standard deviation of 6°; b - sector diagram for the same measurements. Light circles two per cent apart. Grand mean is practically zero but with backset bedding being also included it will point upchannel

Rozrzut kierunków zapadu powierzchni naprądowych piaszczystych łach korytowych w górskich rzekach meandrujących względem średniego kierunku w dół koryta (strzałka)

a - diagram kumulacyjny, górna półkula. Warstwice co 4% (maksima = 25%). Na podstawie 558 pomiarów. Rozrzut kątów zapadu jest normalny. Średni kąt zapadu wynosi 15°, odchylenie standardowe 6°; b - diagram sektorowy tych samych pomiarów. Współśrodkowe koła co 2%. Wektor wypadkowy jest praktycznie równy zero. Jeżeli uwzględnimy jednak warstwowanie nachylone podprądowe (backset bedding, 3) wówczas wektor ten będzie skierowany w górę koryta; 1 - populacja brzegu prawego, 2 - populacja brzegu lewego

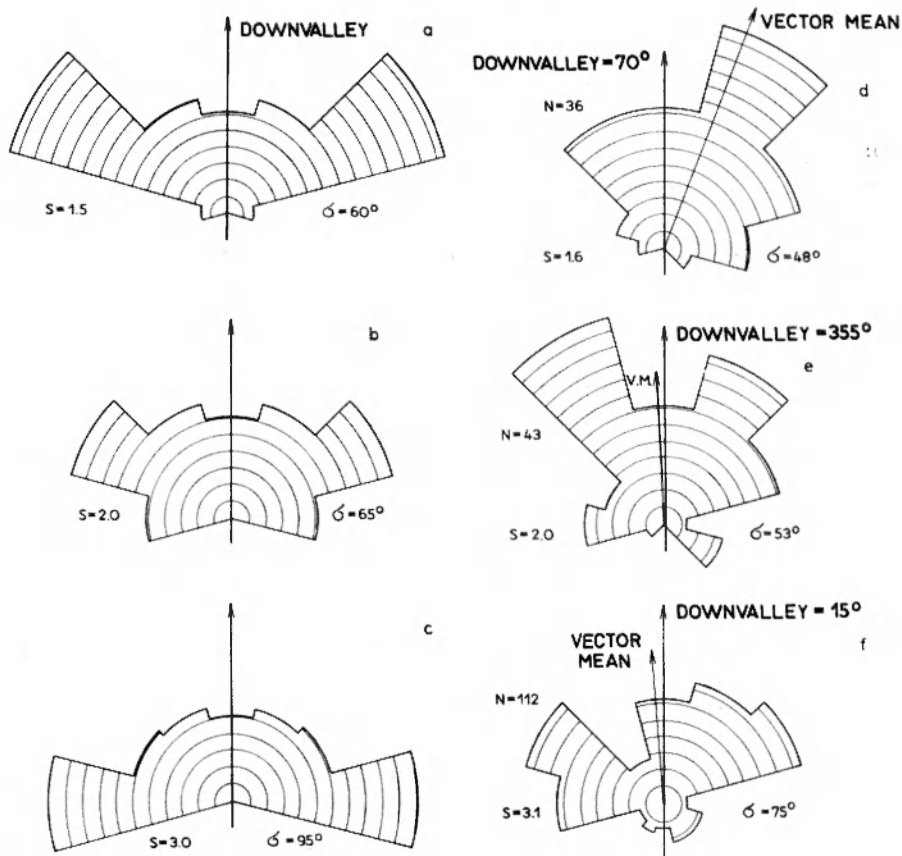


Fig. 8

Distribution of channel trends around mean downvalley direction as a function of channel sinuosity ( $S$ )

$a-c$  – for regular sine-generated paths,  $d-f$  – for natural sine-generated channels;  $d$  – Polski Potok brook, Bogaczowice study reach,  $e$  – Lesk Creek, Czarny Bór study reach, new meandering channel developed in last 40 years,  $f$  – as above, old abandoned channel from times before river regulation

Rozrzut kierunków koryt wokół średniego kierunku w dół doliny (downvalley) jako funkcja krętości koryta ( $S$ )

$a-c$  – dla regularnych koryt,  $d-f$  – dla koryt naturalnych;  $d$  – Polski Potok, odcinek badawczy w Bogaczowicach,  $e$  – Lesk, odcinek badawczy w Czarnym Borze, nowe koryto meandrujące powstałe w ciągu ostatnich 40 lat,  $f$  – jak wyżej, ślad starego, opuszczonego koryta z okresu przed regulacją. Cienkie strzałki oznaczają wektor wypadkowy (vector mean)

stoss-sides (i.e., for inclined bedding dipping towards the main channel),  $15^\circ$ , intermediate for ripple slip-faces,  $23^\circ$ , and the greatest for dune and bar slip-faces (i.e., foresets dipping towards the banks),  $27^\circ$ .

It is evident from figures 5 and 6 that grand vector means for both ripple- and dune-generated cross-lamination point upchannel (= upslope). The result is by no means unexpected in light of hydrodynamic conditions of the accumulation of channel-phase sand in mountain meandering rivers. The same may be true for inclined bedding dipping channelwards if only backset bedding is also taken into account. As it was expected the dispersion in dip azimuths is the greatest for ripples and ripple-generated cross-lamination. For dunes and bar stoss-sides (i.e., for dune-generated foresets and inclined bedding) it is possible to distinguish two populations of cross-lamination: one developed at the right bank and

the other at the opposite bank of the channel. Even though dune cross-lamination or inclined bedding fail to produce a significant vector mean, they can be always used to indicate the direction of flow, i.e., mean channel trend, while its sense may be read from another directionals as imbrication or backset bedding, for instance. In turn, it can be easily demonstrated that a mean channel trend coincides well with a mean downvalley direction irrespective of channel sinuosity (fig. 8). Finally, it can be concluded that the essential difference in distribution of dip azimuths of cross-lamination generated by ripples and dunes results from the fact that countercurrents depositing sand bars are as a rule too weak to produce typical backflow dunes. Thus, typical countercurrent dunes are practically absent, while backflow ripples are extremely common.

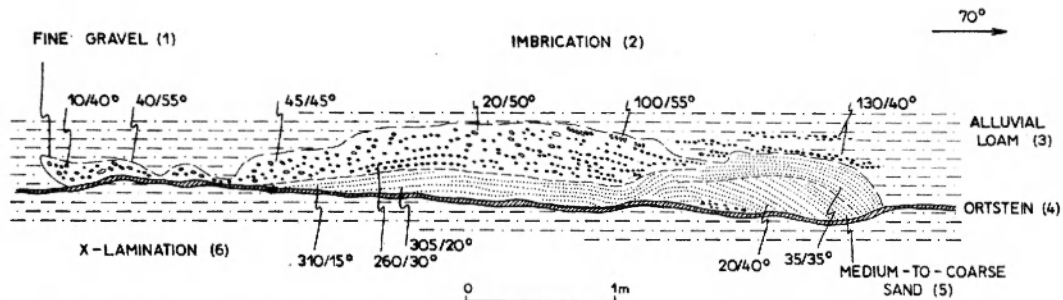


DISCUSSION OF THE RESULTS

That cross-lamination in the deposits of meandering streams dip in various directions and particularly towards the channel banks is known at least from the investigations by Reineck (1958) and Wright (1959). A similar opinion was also expressed by Professor Stanisław Dżułyński (personal communication, 1965), who was accustomed to say that: "in fluvial deposits cross-bedding may dip in all directions except the direction of flow". Allen (1966, 1967, 1968, 1970) ascribed such a large dispersion in cross-bedding dip directions to the activity of large systems of secondary flows developed in large zones of flow separation. Similar results concerning the dispersion in dip directions of cross-lamination in modern fluvial deposits were published by McGowen and Garner (1970), Bluck (1971, 1974, 1976), Taylor *et al.* (1971) and Jackson II (1976). Lane (1963), on the other hand, believed that low-angle cross-strata dipping upstream originated on stoss-sides of megaripples.

The results presented above came exclusively from high-gradient meandering streams and cannot be applied without verification to deposits of lowland sinuous rivers. The distribution in dip directions of cross-lamination in the deposits of such large rivers may be different (cf., e.g., Potter and Pettijohn 1963, fig. 4-9). However, it is not clear enough what structures were measured on the Vermillion River point bars illustrated by the authors and what was their environment of deposition (plate 8B in the book cited illustrates a typical supraplatform-bar microdelta). Personal inspection by the present writer of the River Odra near Wrocław (a relatively large, sandy lowland river), have demonstrated the existence of large countercurrent systems, which may easily ripple sand and produce backflow ripples on distances of tens and hundreds meters. Bankward migrating dunes are also common bedforms. If so, countercurrent ripples and bankward dipping dune cross-lamination is to be expected in channel-phase

a. VERTICAL SECTION IN RIVER CUTBANK



b. INTERPRETATION IN PLAN

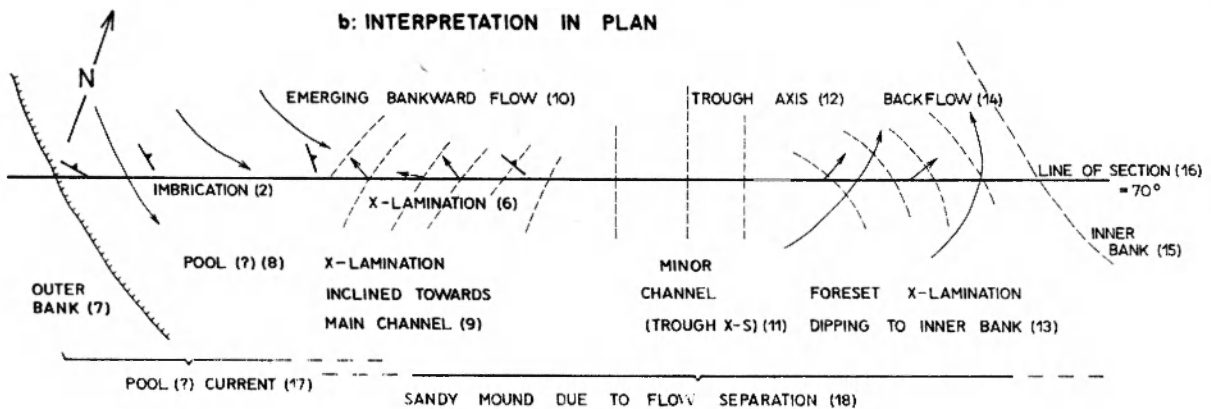


Fig. 9

Channel-phase sands and gravels in the Holocene deposits of the Lesk Creek, Jaczków study reach, meander No J-3

a - as seen in vertical section of river cutbank; b - interpretation in plan

Piaski i żwiry korytowe w utworach holocenijskich Lesku, odcinek badawczy w Jaczkowie, meander J-3

a - przekrój przez ścianę podcięcia brzegowego: 1 - drobnoziarnisty żwir, 2 - pomiary imbrykacji, 3 - gliny aluwialne, 4 - orsztyń, 5 - piasek średnioziarnisty do gruboziarnistego, 6 - pomiary laminacji skośnej; b - interpretacja w planie: 7 - brzeg zewnętrzny, 8 - przegłębienie korytowe, 9 - laminacja skośna nachylona w kierunku koryta głównego, 10 - wynurzający się prąd dobrzewowy, 11 - drugorzędne koryto (warstwowanie skośne nieckowate), 12 - oś niecki, 13 - warstwowanie skośne zapadające w kierunku brzegu wewnętrznego, 14 - prąd powrotny, 15 - brzeg wewnętrzny, 16 - linia przekroju, 17 - prąd przegłębienia, 18 - łacha piaszczysta utworzona w wyniku oderwania prądu

deposits of lowland meandering streams and the distribution of cross-lamination in such deposits seems to be much more complex than it is sometimes suggested in the geologic literature. The dispersion in dip directions of cross-lamination in the deposits of supraplatform bars of mountain meandering streams is still intensely investigated by the author and the results will be published in a forthcoming paper.

It seems appropriate to discuss now the preservation potential of channel-phase sand bars in the environment of a mountain meandering stream. Niche accumulations of cross-laminated sands have little chance to be preserved in the geologic record. Sand bars accreted at the inner bank of a meander bend have a good chance of being preserved and, in fact, have been observed not uncommonly in the Quaternary deposits exposed in river cutbanks (pl. V). Perhaps the most useful criterion that enables us to identify such fossil sand bars is their association with bar-platform gravels. However, fossil deposits of similar origin, i.e., deposited in a core of a large separation bubble can be also identified within fine-grained overbank alluvia (fig. 9). The bar is thought to have been originated in what was possibly a sinuous temporary channel on a river flood plain. Similar fossil channels can be also recognized in lithified alluvial deposits, e.g., the Lower Carboniferous of the Intrasudetic Basin (Teisseyre 1975, fig. 21).

To summarize, the most typical position of channel-phase sands in alluvia of high-gradient meandering streams is the following (from bottom to top):

1. Meander-pool gravel — very coarse to coarse,

strongly imbricated gravel, sometimes with relics of erosional pools and fragments of outer cutbanks. No sand as individual units;

2. Bar-platform gravel and sandy gravel — medium to fine gravel, strongly imbricated, sometimes with crude inclined bedding dipping channelwards. Typically associated with cross-laminated sand or fine gravel deposited in large-scale separation bubbles;

3. Supra-platform sands and gravels — variously textured sediments deposited on vegetated supraplatform bars. Sand not uncommonly homogeneous with roots and bioturbations. Some supraplatform bars may contain numerous layers of coarsening-upwards sediments;

4. Overbank sands and muds — horizontally bedded deposits of a flood plain.

The structures originated in the cores of large separation bubbles vary greatly among themselves in their potential for preservation. In general, ripples are rather ephemeral bedforms and ripple cross-lamination is rarely — if ever — encountered in the deposits. This may be accounted for by flow conditions prevailing in the areas of ripple propagation (high sediment discharge and avalanching rather continuous than intermittent) and the character of sand itself (predominance of coarse, well sorted sands). In trenches dug through newly emerged bars ripple cross-lamination may be sometimes observed on naturally “weathered” surfaces. Dune cross-lamination, on the other hand, is commonly preserved and may be regarded a good directional in the coarse-grained alluvia of high-gradient streams.

## CONCLUSIONS

The following can be concluded from this preliminary field study of channel-phase sand bars in bed-load, mountain meandering streams:

1. In high-gradient streams sand is transported mostly as suspension load or saltation load even during low-stage discharges;

2. Genetically, the deposition of channel-phase sands results from processes of flow separation and areally is restricted to cores of large separation bubbles. Separation of flow developed on a large scale exists either in bank niches (mostly in low-sinuosity reaches) or at the inner banks of meander bends just downstream the axis of bend;

3. Sand bars accumulating in the separation bubbles accrete laterally and vertically owing to propagation of dunes, dunes with ripples superimposed, lower flat bed, or ripples. The direction of

travel of the bedforms is controlled by rather a complex flow pattern existing actually in the zones of separation. And, in so being, neither dunes nor ripples are related to local (paleo) slope;

4. The dispersion in dip directions of ripple and dune-generated cross-lamination as related to a mean local downchannel direction is considerable. Cumulative contour diagrams exhibit a striking monoclinic symmetry with planes of symmetry indicating exactly the mean channel direction. Current roses are typically bimodal with the least number of measurements in the direction of flow and grand vector means pointing upchannel (= upslope);

5. Almost all currents existing in a separation bubble may ripple sand. Consequently, the dispersion in dip directions of ripple slip-faces (or ripple generated cross-lamination) is usually the greatest. Mean angle

of dip of ripple slip-faces is  $23^\circ$  ( $\sigma = 7.5^\circ$ ). It has been also found that countercurrents flowing over sand bars are too weak to produce dunes. Thus, dune slip-faces dip mostly towards the channel banks. Mean angle of dip of dune slip faces (or dune-generated cross-lamination) is  $27^\circ$  ( $\sigma = 7^\circ$ ). Bar slip-faces dip at similar angles either bankwards or upchannel. Bar stoss-sides (or inclined bedding) dip channelwards at a mean angle of  $15^\circ$  ( $\sigma = 6^\circ$ );

6. The preservation potential of channel-phase sand bars is fairly good except those accumulated in bank niches. Ripples and ripple-generated cross-lamination are rather sporadically seen either in newly emerged bars and in fossil deposits. On the

other hand, dune cross-lamination and bar slip-face lamination have a good chance of being preserved and were commonly observed in the Quaternary and the Lower Carboniferous fluvial deposits of the Intrasudetic Basin;

7. Channel-phase sands of high-gradient meandering streams are associated generally with bar-platform gravels. These are underlain by coarser meander-pool gravels and overlain by finer supra-platform-bar deposits. The two differ markedly in texture from the bar-platform deposits. However, sand bars accumulated in large separation bubbles may be embedded in fine-grained overbank alluvia as well.

## REFERENCES

- ALLEN J. R. L., 1966: On bed forms and palaeocurrents. *Sedimentology*, vol. 6, p. 153–190.
- 1967: Notes on some fundamentals of palaeocurrent analysis, with reference to preservation potential and sources of variance. *Ibidem*, vol. 9, p. 75–88.
- 1968: The nature and origin of bed-form hierarchies. *Ibid.* vol. 10, p. 161–182.
- 1970: Physical processes of sedimentation. *Earth Science Series*, No 1, George Allen and Unwin LTD, London, p. 1–248.
- BLUCK B. J., 1971: Sedimentation in the meandering River Endrick. *Scott. Journal. Geol.*, vol. 7, p. 93–138.
- 1974: Structure and directional properties of some valley sandur deposits in southern Iceland. *Sedimentology*, vol. 21, p. 533–554.
- 1976: Sedimentation in some Scottish rivers of low sinuosity. *Trans. Royal Soc. Edinburgh*, vol. 69, No. 18, p. 425–456.
- BRADEN G. E., 1950: Turbulence, diffusion and sedimentation in stream channel expansions and contractions. *Oklahoma Acad. Sci., Proc.*, 1950, p. 73–77.
- JACKSON II R. G., 1976: Largescale ripples of the lower Wabash River. *Sedimentology*, vol. 23, p. 593–623.
- KARCZ I., 1967: Harrow marks, current aligned sedimentary structures. *J. Geol.*, vol. 75, p. 113–121.
- 1968: Fluvial obstacle marks from the wadis of the Negev (southern Israel). *J. Sed. Petrol.*, vol. 38, p. 1000–1012.
- 1972: Sedimentary structures formed by flash floods in southern Israel. *Sedim. Geology*, vol. 7, p. 161–182.
- KLIMEK K., 1972: Współczesne procesy fluwialne i rzeźba równiny Skeidararsandur (Islandia). Present-day fluvial processes and relief of the Skeidararsandur Plain (Iceland). *Pr. Geogr.* nr 94, p. 1–139.
- LANE D. W., 1963: Cross-stratification in San Bernard River, Texas, point bar deposit. *J. Sed. Petrol.*, vol. 33, p. 350–354.
- LEVEY R. A., 1977: Bedform distribution and internal stratification of coarse-grained point bars, upper Congaree River, S. C. First Internat. Symposium on Fluvial Sedim., Program and Abstracts, Calgary, p. 19.
- McGOWEN J. H., GARNER L. E., 1970: Physiographic features and stratification types of coarse-grained point bars: modern and ancient examples. *Sedimentology*, vol. 14, p. 77–111.
- OSTROMĘCKI A., 1971: Obstacle marks on the top surface of sandstones. *Bull. Acad. Pol. Sci., Ser. Sci. de la Terre*, vol. XIX, p. 271–276.
- POTTER P. E., PETTIJOHN F. J., 1963: Paleocurrents and basin analysis. Springer-Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg, p. 1–296.
- RACHOCKI A., 1974: Przebieg i natężenie współczesnych procesów rzecznych w dolinie Raduni. Course and intensity of present-day fluvial processes in the Radunia River as example. *Dok. Geogr.*, z. 4, p. 1–121.
- REINECK H.-E., 1958: Longitudinale Schrägschichten im Watt. *Geol. Rundschau*, vol. 47, p. 73–82.
- RICHARDSON P. D., 1968: The generation of scour marks near obstacles. *J. Sed. Petrol.*, vol. 38, p. 965–970.
- ROUSE H., 1959: Advanced mechanics of fluids. John Wiley and Sons, New York, p. 1–444.
- SENGUPTA S., 1966: Studies on orientation and imbrication of pebbles with respect to cross-stratification. *J. Sed. Petrol.*, vol. 36, p. 362–369.
- TAYLOR G., CROOK K. A. W., WOODYER K. D., 1971: Upstream-dipping foreset cross-stratification: origin and implications for paleoslope analyses. *J. Sed. Petrol.*, vol. 41, p. 578–581.
- TEISSEYRE A. K., 1975: Pebble fabric in braided stream deposits, with examples from Recent and “frozen” Carboniferous channels (Intrasudetic Basin, Central Sudetes). Ułożenie otoczków w osadach roztek. *Geol. Sudetica*, vol. X, nr 1, p. 7–56.
- 1977: Współczesne procesy rzeczne w dorzeczu górnego Bobru i Strzegomki (Sudety Środkowe). Recent fluvial processes in drainage-basins of the upper Bóbr and Strzegomka Rivers in the Central Sudetes. *Geol. Sudetica*, vol. XII, nr 2.
- WRIGHT M. D., 1959: The formation of cross-bedding by a meandering or braided stream. *J. Sedim. Petrol.*, vol. 29, p. 610–615.

## FIZJOGRAFIA ŻWIRONOŚNYCH RZEK MEANDRUJĄCYCH 2: DEPOZYCJA PIASKU W KORYTACH I ROZRZUT KIERUNKÓW ZAPADU LAMINACJI SKOŚNEJ

### Streszczenie

W żwironośnych, górskich rzekach meandrujących piasek jest transportowany najczęściej w formie obciążenia zawieszinowego. W warunkach niskiego przepływu można jednakże stwierdzić występowanie lokalnych stref, w których piasek wleczony jest w trakcji dennej. Zazwyczaj transport ten odbywa się w formie płaskiego, ruchomego dna ustroju spokojnego lub poprzez riplemarki i podwodne diuny. Warunki sprzyjające takiej formie transportu istnieją w rzece górskiej przede wszystkim w jądrach dużych stref oderwania prądu (fig. 1), w miejscach nagłych zmian szerokości koryta lub przy brzegu wewnętrznym zakoli (Braden 1950; Rouse 1959; Taylor *et al.* 1971; Klimek 1972; Rachocki 1974). W takich strefach odbywa się z reguły sedimentacja drobnoziarnistych, skośnie warstwianych osadów, przede wszystkim piasków i drobnoziarnistych żwirów. Z wyjątkiem osadów nagromadzonych w niszach brzegowych utwory te mają dużą szansę zachowania się w stanie kopalnym.

Celem niniejszej pracy było przede wszystkim ustalenie rozrzutu kierunków zapadu ścian zsypania (slip faces) riplemarków, podwodnych diun i brzegów łach piaszczystych, które powstają we wspomnianych dużych strefach oderwania prądu. Tym samym można określić rozrzut kierunków zapadu laminacji skośnej, jako że migracja wspomnianych form dennych powoduje przyrastanie osadów, których laminacja naśladuje zazwyczaj dokładnie kształt tych form (form-concordant bedding). Charakterystykę hydrologiczną badanych rzek można znaleźć w pracy autora (Teisseyre 1977).

Górskie rzeki meandrujące składają się często z naprzemianległych odcinków meandrowych i odcinków o małej krętości. Te ostatnie są zazwyczaj bardzo nieregularne w planie, a w szczególności ujawniają następujące po sobie zwężenia i rozszerzenia koryta (fig. 2). Zwężenia powodują powstanie efektu wpływu z dyszy (jet flow), który szybko rozprzestrzenia się we względnie spokojnej wodzie rozszerzenia. W miejscu uderzenia takiego wypływu o dno tworzy się przegłębienie, a sam przepływ rozdziela się na dwie lub trzy strugi. Jedna z tych strug kieruje się w dół koryta, pozostałe zaś ku brzegom. Z kolei struga skierowana ku brzegowi ulega ponownemu rozszczepieniu dając dwa prądy brzegowe — prąd postępowy i prąd wsteczny (fig. 2). Sedimentacja w niszy brzegowej przedstawionej na figurze 2 zaczęła się od narastania

wydlużonego, podwodnego grzbietu piaszczysto-żwirkowego (fig. 2). Przebieg tego grzbietu wyznacza położenie płaszczyzny oderwania turbulენტnej warstwy przyściennej. Jednocześnie w miejscu wynurzenia prądu dobrzegovego (strefa A) gromadził się piasek wleczony przez ten prąd w górę stoku, ku brzegowi koryta. Prąd dobrzegovy ma charakter prądu zwalnającego, co powoduje wzrost natężenia sedimentacji detrytycznej w miarę zbliżania się do brzegu. Dość szybko narasta więc tu podwodny pagór piaszczysty, który ulega wynurzeniu w miejscu ponownego przylgnięcia warstwy przyściennej (punkt R, fig. 2). Układ prądów i kierunki grzbietów riplemarków w strefach C i D są zaznaczone na figurze 2. Pomiary prędkości przepływu wykonane w terenie wykazały, że strefa największej miąższości łachy piaszczystej pokrywa się dokładnie ze strefą, w której dominują prądy zwalnające.

Przykład zilustrowany na figurze 2 wskazuje, że kierunki zapadu laminacji skośnej riplemarkowej oraz laminacji skośnej związanej z migracją krawędzi łachy nie są zależne od lokalnego skłonu. Kierunki te są natomiast wymuszone i kontrolowane przez złożony układ prądów istniejący w dużej strefie oderwania turbulენტnej warstwy przyściennej. Kierunki te w dużym stopniu są niezależne nawet od lokalnego ukształtowania dna. Okazuje się także, że laminacja skośna związana z migracją ściany zsypania łachy piaszczystej zapada we wszystkich kierunkach, z wyjątkiem kierunku w dół koryta.

Powyższy przykład może stanowić uniwersalny model sedimentacji piasku i drobnego żwiru w niszy brzegowej górskiej rzeki o małej krętości. Od tego ogólnego modelu istnieją liczne odstępstwa podyktowane przez warunki lokalne, a także uwarunkowane szerokością i głębokością koryta. W większych rzekach górskich łachy piaszczyste gromadzące się w niszach brzegowych mogą być pokryte diunami lub diunami z nałożonymi riplemarkami.

Warunki sedimentacji piasku przy wewnętrznym brzegu meandra w górskiej rzece o względnie małym spadku (0,0031) przedstawia figura 3. Można tu wyróżnić podobne strefy i zbliżony układ prądów, jak w niszy przedstawionej na figurze 2. Podwodne diuny widoczne na rysunku 3 pochodzą z wcześniejszego okresu, gdy przepływ był dużo wyższy od średniego. Grzbiety diun biegnęły prawie równoległe do brzegu, a same formy denne migrowały w kierunku brzegu wewnętrznego.

\* Instytut Nauk Geologicznych Uniwersytetu Wrocławskiego, ul. Cybulskiego 30, 50-205 Wrocław.

Przy przepływie zbliżonym do średniego (w dniu wykonywania rysunku) diuny były już nieaktywne i pokryły się riplemarkami, których grzbiety zaznaczone są na figurze 3 (por. pl. I—IV).

Warunki sedymentacji w żwironośnej, krętej rzece górskiej o dużym spadku (około 0,0154) przedstawia figura 4. Forma akumulacyjna pokazana na rysunku powstała w wyniku powodzi w maju '77. Zgodnie z terminologią zaproponowaną przez Blucka (1971) autor określa takie odsypy mianem platformy łachy meandrowej. W jej obrębie można wyróżnić trzy części: górną, środkową i dolną. Część górna i dolna pokryte były silnie zimbrykowanym żwirem osadzonym w warunkach przepływu silnie turbulentnego. Warstwowanie skośne w żwirach strefy 4/5 (fig. 4) powstało natomiast w miejscu pęcherza względnie spokojnej wody, tuż poniżej punktu oderwania prądu. Skośnie warstwowany pagór piaszczysty strefy 5 powstał natomiast jako struktura fazy opadania wód. Kierunki warstwowań skośnych i azymuty zapadu zimbrykowanych otoczków płaskich pokazane są na figurze 4. Układ prądów, które osadziły łachę piaszczystą (5) był podobny jak na figurze 3. Po przekopaniu łacha ta ukazała grubą laminację, której przebieg naśladował zarys łachy. Od strony koryta występowały laminy nachylone łagodnie w jego stronę (10–15°), podczas gdy silnie nachylone warstwy skośne (25–40°) drugiej części łachy zapadały w kierunku brzegu wewnętrznego. Nie udało się natomiast dostrzec laminacji skośnej riplemarkowej związanej z wstępującymi riplemarkami, które były obserwowane na skłonie naprądowej części łachy. Z wyjątkiem żwirów górnej części łachy wszystkie wskaźniki kierunkowe transportu były zwrócone ku brzegowi wewnętrznemu, czyli ku łasze meandrowej. Odchylenie tych kierunków od średniego lokalnego kierunku koryta wynosiło 20–110°.

\*  
\*   \*  
\*

W toku prac terenowych zbadano 186 przypadkowo wybranych piaszczystych łach korytowych w korytach górskich rzek meandrujących, w dorzeczach górnego Bobru i Strzegomki. Uzyskano 1192 pomiary azymutów i kątów zapadu powierzchni zsypanych riplemarków, 698 pomiarów powierzchni zsypanych podwodnych diun i 558 pomiarów naprądowych powierzchni łach (stoss sides). Wyniki tych pomiarów przedstawiają figury 5, 6 i 7. Osiągnięte wyniki wskazują, że wektory wypadkowe dla ścian zsypanych riplemarków i diun (czyli laminacji skośnej riplemarkowej i diunowej) wskazują kierunek w górę koryta, czyli przeciw skłonowi. W świetle znajomości warunków hydrodynamicznych rządzących akumulacją piasku w krętej rzece górskiej nie jest to wynik zaskakujący. W przypadku powierzchni naprądowych łach (czyli warstwowania nachylonego) wektor wypadkowy będzie wskazywał także kierunek w górę koryta, zwłaszcza jeżeli uwzględnimy także warstwowanie nachylone podprądowe (backset bedding). Jak należało oczekiwać, rozrzut kierunków zapadu ścian zsypanych riplemarków jest największy. W przypadku ścian zsypanych diun i powierzchni naprądowych łach można wyróżnić dwie populacje: brzegu prawego i brzegu lewego (fig. 6, 7). Nawet w przypadku, jeżeli pomiary warstwowania skośnego diunowego lub laminacji nachylonej nie pozwolą na uzyskanie liczącego się wektora wypadkowego mogą być użyte do wyznaczenia kierunku transportu (czyli średniego kierunku koryta), podczas gdy zwrot może być ustalony na podstawie innych wskaźników kierunkowych transportu. Z kolei łatwo wykazać, że średni kierunek koryt wyznacza dość dokładnie lokalny kierunek w dół doliny, niezależnie od krętości koryta (fig. 8). W końcu warto nadmienić, że zasadnicza różnica między rozrzutem azymutów zapadu laminacji

skośnej riplemarkowej i diunowej wynika z faktu, że prądy wsteczne osadzające łachy piaszczyste są za słabe, by utworzyć typowe diuny wsteczne. Diuny wsteczne zatem praktycznie nie występują, gdy tymczasem riplemarki wsteczne są niezwykle pospolite.

\*  
\*   \*

Wiadomo od dawna, że warstwowanie skośne w osadach rzek krętych zapada w różnych kierunkach, a zwłaszcza w stronę brzegów koryta (Reineck 1958, Wright 1959, Dżułyński, wiadomość ustna, 1965). Na duży rozrzut kierunków zapadu warstwowania skośnego we współczesnych osadach rzecznych wskazują także badania Lane'a (1963), McGowena i Garnera (1970), Blucka (1971, 1974, 1976), Taylora i współpracowników (1971) oraz Jacksona II (1976). Nie jest natomiast całkowicie jasne jaki jest rozrzut kierunków zapadu warstwowań skośnych w aluwiach dużych, nizinnych rzek meandrujących (por. Potter i Pettijohn 1963, fig. 4–9). Wydaje się jednak, że rozrzut ten jest znacznie większy niż to wynikałoby z dotychczas opublikowanych danych.

Szanse zachowania się w stanie kopalnym opisanych w tej pracy warstwowań, struktur i form dennych są duże z wyjątkiem akumulacji piasku w niszach brzegowych odcinków o małej krętości oraz riplemarków w ogólności i związanej z nimi laminacji skośnej riplemarkowej. Skośnie warstwowane łachy piaszczyste utworzone w jądrach dużych stref oderwania prądu przy wewnętrznym brzegu meandrów były często obserwowane w utworach czwartorzędowych odsłaniających się w podcięciach badanych rzek (pl. V). Z reguły łachy takie są stowarzyszone ze żwirami platformy łachy meandrowej choć nie brak ich także wśród osadów pozakorytowych (fig. 9). Formy akumulacyjne o podobnej genezie obserwowano też w utworach dolnego karbonu niecki śródsudeckiej (Teisseyre 1975, fig. 21).

Dotychczasowe badania nad mechanizmem sedymentacji piasków korytowych w żwironośnych, krętych rzekach górskich można przedstawić następująco:

1. W rzekach o dużym spadku piasek jest transportowany głównie jako obciążenie zawieszinowe lub saltacyjne, nawet w okresach niskich stanów wody;

2. Depozycja piasku w korytach takich rzek jest ograniczona do lokalnych stref związanych z dużymi pęcherzami oderwania. Oderwanie turbulentnej warstwy przyściennej zachodzi w niszach brzegowych (zwłaszcza w odcinkach o małej krętości) lub przy wewnętrznym brzegu meandrów poniżej osi meandra;

3. Łachy piaszczyste tworzące się w jądrach dużych stref oderwania prądu narastają dzięki dostawie piasku z koryta w formie riplemarków, diun lub diun z nałożonymi riplemarkami. Układ grzbietów tych form dennych i kierunki ich migracji są kontrolowane przez skomplikowane systemy prądów wtórnych istniejących w strefach oderwania. W szczególności kierunki migracji wspomnianych form dennych są niezależne od lokalnego (paleo) skłonu;

4. Rozrzut kierunków zapadu laminacji skośnej związanej z riplemarkami i diunami mierzony względem lokalnego kierunku koryta jest bardzo duży. Diagramy kumulatywne ukazują uderzającą symetrię jednoskośną, przy czym płaszczyzna symetrii takich diagramów wskazuje dokładnie średni kierunek koryta. Różne kierunków są bimodalne z wektorami wypadkowymi wskazującymi kierunek w górę koryta (przeciw skłonowi);

5. Prawie wszystkie prądy istniejące w strefach oderwania prądu mogą powodować tworzenie się riplemarków. W konsek-

wencji rozrzut kierunków zapadu ścian zsyłu riplemarków (czyli laminacji skośnej riplemarkowej) jest największy. Średni kąt zapadu wynosi  $23^\circ$  ( $\sigma = 7,5^\circ$ ). Prądy wsteczne istniejące ponad dnem piaszczystym są natomiast z reguły za słabe by utworzyć diuny wsteczne. Dlatego też ściany zsyłu diun zapadają głównie w kierunku brzegu pod średnim kątem  $27^\circ$  ( $\sigma = 7^\circ$ ). Kąt zapadu ścian zsyłu czoła łąch jest podobny, przeważają kierunki zapadu ku brzegowi i w górę koryta. Naprądowe skłony łąch (czyli warstwowanie nachylone) zapadają w kierunku koryta pod średnim kątem  $15^\circ$  ( $\sigma = 6^\circ$ );

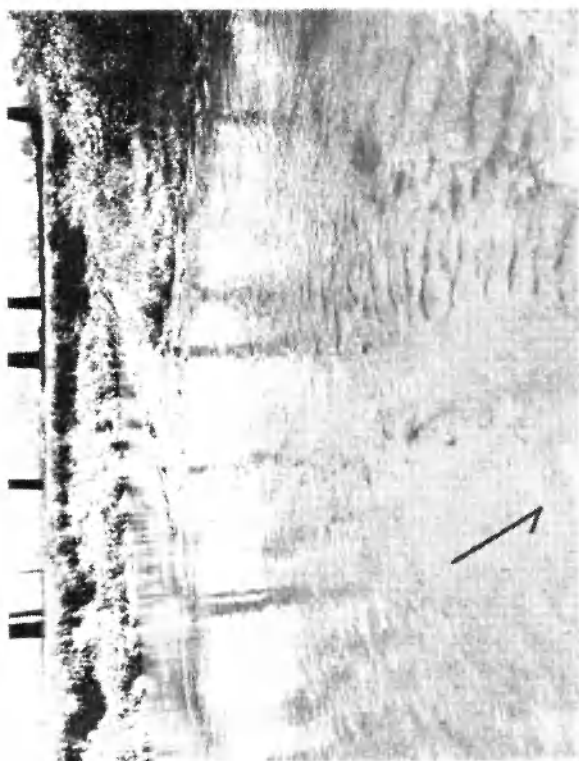
6. Szanse zachowania się w stanie kopalnym opisanych

form dennych i struktur są duże z wyjątkiem riplemarków i związanej z nimi laminacji skośnej oraz łąch piaszczystych utworzonych w niszach odcinków o małej krętości. Kopalne osady powstałe w dużych strefach oderwania prądu zostały rozpoznane w rzecznych utworach czwartorzędowych i osadach dolnego karbonu Sudetów Środkowych;

7. W utworach czwartorzędowych łąchy piaszczyste powstałe w strefach oderwania prądu są zazwyczaj stowarzyszone ze żwirami skłonu platformy łąch meandrowych. Podobne genetycznie osady mogą też występować wśród drobnoziarnistych utworów równin zalewowych.

PLATE I  
PLANSZA I

1. Zadrna Creek — a small pebbly meandering river. Note zones of low turbulence and backflow just downstream the points of flow separation (*S*). Jawiszów study reach, late August '77  
Rzeka Zadrna — przykład małej, żwironośnej rzeki meandrującej. Widoczne są strefy małej turbulencji i prądów powrotnych tuż poniżej punktów oderwania prądu (*S*). Odcinek badawczy w Jawiszowie, sierpień '77.
2. Progressive (co-flow ripples) on submerged bar-platform sand downstream the point of re-attachment. Lesk Creek, Jaczków study reach, May '77  
Postępowe riplemarki na zanurzonej łasze piaszczystej skłonu platformy łachy meandrowej utworzone poniżej punktu przyłgnięcia oderwanej warstwy przyściennej. Lesk, odcinek badawczy w Jaczkowie, maj '77
3. Emerged bar-platform sands passing gradually into supraplatform sands. Bar-tail deposits accreted in a large separation bubble, downstream the point of separation (*S*). Lesk Creek, Jaczków study reach, March '77  
Wynurzone piaski skłonu platformy łachy meandrowej przechodzące stopniowo w piaski łachy ponadplatformowej. Osady dolnej części łachy meandrowej utworzone w dużym pęcherzu oderwania prądu, poniżej punktu separacji (*S*). Odcinek badawczy w Jaczkowie, marzec '77
4. Emerged bar-platform accumulation of sand developed in a large separation bubble. Note slip faces dipping towards the inner bank. Bar top was originally rippled. Jaczków study reach, April '77  
Wynurzona łacha piaszczysta skłonu platformy łachy meandrowej powstała w dużym pęcherzu oderwania prądu. Widoczne są ściany zsypana zapadające w stronę brzegu wewnętrznego. Odcinek badawczy w Jaczkowie, kwiecień '77



2



4



1



3

Andrzej Karol TEISSEYRE --- Physiography of bed-load meandering streams 2: deposition of channel-phase sands and the dispersion of ripple- and dune-generated cross-lamination  
Fizjografia żwironośnych rzek meandrujących 2: depozycja piasku w korytach i rozrzut kierunków zapadu laminacji



PLATE II  
PLANSZA II

1. A small-scale model for the development of bar-platform sandy deposits. Temporary channel on river flood plain, Zlotna Creek, Miskowice study reach. After flood in August '77  
Model sedimentacji piasków platformy łachy meandrowej. Okresowe koryto na równinie zalewowej, Zlotna, odcinek badawczy w Miskowicach. Po powodzi w sierpniu '77
2. The same meander bend. Note point of flow separation (left), trace of turbulent boundary layer (short bars), and emerging bar platform composed of sand  
Ten sam meander. Widoczny punkt oderwania prądu (z lewej), ślad turbulენტnej warstwy przyściennej (krótkie kreski) oraz wyrzająca się platforma łachy meandrowej zbudowana z piasku
3. Head portion of the bar platform with the point of flow separation (left centre). Ripple slip faces dip towards the inner bank  
Górna część platformy łachy meandrowej z punktem oderwania prądu (z lewej). Ściany zsypu riplemarków zapadają ku brzegowi wewnętrznemu
4. Tail portion of the same bar. Ripple slip faces dip towards the inner bank  
Dolna część tej samej platformy łachy meandrowej. Ściany zsypu riplemarków zapadają w stronę brzegu wewnętrznego



Andrzej Karol TEISSEYRE — Physiography of bed-load meandering streams 2: deposition of channel-phase sands and the dispersion of ripple- and dune-generated cross-lamination  
Fizjografia żwironośnych rzek meandrujących 2: depozycja piasku w korytach i rozrzut kierunków zapadu laminacji

PLATE III  
PLANSZA III

- 1-2. Backflow ripples on top of sand wedge deposited by countercurrent in the lee of gravel bar developed in a large separation bubble. Arrows indicate co-flow. Lesk Creek, Jaczków study reach, late August '77  
Rioplemarki wsteczne na powierzchni nasypu piaszczystego osadzonego przez prąd powrotny w cieniu ściany zsyłu lachy żwirowej utworzonej w dużym pęcherzu oderwania prądu. Strzałki wskazują przepływ w dół koryta. Lesk, odcinek badawczy w Jaczkowie, sierpień '77
3. Backflow ripples in a small bank niche. Short arrows indicate flow pattern in the separation bubble. Chwaliszówka Brook, Bogaczowice study reach, March '77  
Rioplemarki wsteczne w małej niszy brzegowej. Krótkie strzałki wskazują prądy w pęcherzu oderwania. Chwaliszówka, odcinek badawczy w Bogaczowicach, marzec '77
4. Flow pattern and backflow ripples in a separation bubble just downstream the point of separation at the inner bank of a small meander. Location as above, July '77  
Układ prądów i rioplemarków wstecznych w pęcherzu oderwania prądu poniżej punktu oderwania przy wewnętrznym brzegu małego meandra. Lokalizacja jak wyżej, lipiec '77



2



4



1



3

Andrzej Karol TEISSEYRE — Physiography of bed-load meandering streams 2: deposition of channel-phase sands and the dispersion of ripple- and dune-generated cross-lamination  
Fizjografia żwironośnych rzek meandrujących 2: depozycja piasku w korytach i rozrzut kierunków zapadu laminacji

PLATE IV

PLANSZA IV

1. Dunes and ripples in a separation bubble. Note trace of turbulent boundary layer and accumulation of dark (rotten) plant fragments (dark patch in left centre). Lesk Creek, Jaczków study reach, May '77  
Podwodne diuny i riplemarki w dużym pęcherzu oderwania prądu. Widoczny ślad turbulentnej warstwy przyściennej i nagromadzenie ciemnych, zbutwiałych szczątków roślinnych (ciemna plama w pobliżu środka). Lesk, odcinek badawczy w Jaczkowie, maj '77
2. Progressive ripples migrating downchannel perpendicular to dune crests. Location as above  
Riplemarki postępowe migrujące w dół koryta prostopadle do grzbietów diun. Lokalizacja jak wyżej
3. Climbing ripples migrating bankwards in a small separation bubble. Note trace of boundary layer. Chwaliszówka Brook, Bogaczowice study reach, April '77  
Wstępujące riplemarki migrujące w stronę brzegu w małym pęcherzu oderwania prądu. Widoczny ślad warstwy przyściennej. Chwaliszówka, odcinek badawczy w Bogaczowicach, kwiecień '77
4. Ripples and dunes migrating towards the inner bank, sandy bar-platform deposit just downstream the point of separation. Lesk Creek, Czarny Bór study reach, March '77  
Riplemarki i diuny migrujące w stronę brzegu wewnętrznego. Osad skłonu platformy łachy meandrowej złożonej tuż poniżej punktu oderwania prądu. Lesk, odcinek badawczy w Czarnym Borze, marzec '77



2



4



1



3

Andrzej Karol TEISSEYRE — Physiography of bed-load meandering streams 2: deposition of channel-phase sands and the dispersion of ripple- and dune-generated cross-lamination  
Fizjografia żwironośnych rzek meandrujących 2: depozycja piasku w korytach i rozrzut kierunków zapadu laminacji

PLATE V  
PLANSZA V

1. Emerged sandy bar-platform deposit. Note cross-lamination dipping towards the inner bank (to the left). Złotna Creek, Miskowice study reach, late August '77  
Wynurzona, piaszczysta platforma łachy meandrowej. Widoczna laminacja skośna zapadająca w stronę brzegu wewnętrznego (na lewo). Złotna, odcinek badawczy w Miskowicach, sierpień '77
2. "Structureless" sand of emerged bar-platform accumulation. Note slip face dipping to the inner bank (to the right). Lesk Creek Jaczków study reach, March '77  
„Bezstrukturalny” piasek wynurzonej platformy łachy meandrowej. Ściana zsypu zapada w stronę brzegu wewnętrznego (na prawo). Lesk, odcinek badawczy w Jaczkowie, marzec '77
3. Cross-laminated sand and fine gravel preserved in a fossil channel. Possibly formed in a large separation bubble. Paleoflow was towards the observer, cross-laminae dip upchannel. Holocene alluvial deposits, Lesk Creek, Jaczków study reach, September '77  
Skośnie laminowany piasek i drobny żwir zachowany w kopalnym korycie. Prawdopodobnie osad dużego pęcherza oderwania prądu. Paleoprąd ku obserwatorowi, laminy skośne zapadają w górę koryta. Holocenijskie aluwia Lesku, odcinek badawczy w Jaczkowie, wrzesień '77
4. Inclined bedding in sands overlying bar-platform gravels. Paleoflow towards the viewer. Holocene deposits of the Lesk Creek, Czarny Bór study reach, outcrop in river cutbank, October '77  
Warstwowanie nachylone w piaskach przykrywających żwiry skłonu platformy łachy meandrowej. Paleoprąd ku obserwatorowi. Holocenijskie osady Lesku, odcinek badawczy w Czarnym Borze, odsłonka w podcięciu rzeki, październik '77

All photos by the author  
Wszystkie zdjęcia autora



2



4



1



3

Andrzej Karol TEISSEYRE — Physiography of bed-load meandering streams 2: deposition of channel-phase sands and the dispersion of ripple- and dune-generated cross-lamination  
Fizjografia żwironośnych rzek meandrujących: 2 depozycja piasku w korytach i rozrzut kierunków zapadu laminacji