

RAFAŁ UNRUG

## WSPÓŁCZESNY TRANSPORT I SEDYMENTACJA ŻWIROW W DOLINIE DUNAJCA

*The Transportation and Sedimentation of the Contemporary Gravels  
 in the Dunajec River Valley*

Badania nad współczesnym transportem i sedymentacją żwirów w dolinie Dunajca przeprowadzone zostały na zlecenie Pracowni Geologiczno-stratygraficznej PAN. Celem ich było poznanie przebiegu zmienności cech materiału żwirowego i ustalenie jej związku z długością transportu oraz poznanie mechanizmu depozycji żwirów. Dolina Dunajca stanowi teren szczególnie dogodny dla prowadzenia studiów nad transportem rzeczny, gdyż wśród niesionych przez tę rzekę żwirów można łatwo wyróżnić otoczaki skał tatrzańskich, dla których długość transportu może być dokładnie określona. Badania przeprowadzono na całej długości doliny Dunajca wynoszącej 247 km.

Cechami żwiru zmieniającego się w czasie transportu są: skład petrograficzny oraz wielkość, stopień obtoczenia i kulistość otoczek. Zmienność tych cech przebadana została na szeregu prób pobranych z warstwy przemytego żwiru zalegającego powierzchnię kamieńców. Skład petrograficzny żwiru oraz stopień obtoczenia i kulistość otoczek przebadane zostały w klasie wielkości 64 — 128 mm. Frakcja ta dominuje ilościowo w żwirach Dunajca oraz posiada największe rozprzestrzenienie w dolinie rzeki, można było prześledzić ją na odcinku długości 223 km.

Zmienność maksymalnych obserwowanych wielkości transportowanych fragmentów skalnych została przebadana na przykładzie bloków i otoczek granitowych. U wylotów dolin tatrzańskich, z których wypływają źródłowe potoki Dunajca, obserwuje się bloki granitowe o metrowej średnicy. Przy ujściu Dunajca do Wisły otoczaki granitowe nie przekraczają 5 cm średnicy. Zmniejszanie się wielkości otoczek w kierunku dolnego biegu rzeki spowodowane jest mechanicznym ich niszczeniem i selekcją ze względu na wielkość. Dominującą rolę w procesie niszczenia głazów granitowych odgrywa ścieranie. Zmniejszanie się średnic fragmentów skalnych wskutek ścierania w czasie transportu podlega prawu Sternberga, które pozwala obliczyć szybkość zmniejszania się średnic otoczek w zależności od długości transportu. Porównując maksymalne obserwowane średnice ze średnicami obliczonymi ze wzoru

Sternberga stwierdza się, że w najniższym i w najwyższym biegu Dunajca średnice obserwowane są mniejsze od obliczonych, natomiast w biegu środkowym istnieje dość dobra zgodność obserwacji z obliczeniami. Przyspieszenie zmniejszania się maksymalnych obserwowanych średnic bloków granitowych w górnym i najniższym biegu Dunajca spowodowane jest przez selektywny ze względu na wielkość transport, którego działanie sumuje się działaniem ścierania. Dwie strefy dużego nasilenia selektywnego transportu i akumulacji żwirów związane są ze zmianami gradientu Dunajca, który jest różny na obszarze Tatr, Karpat fliszowych i niziny podkarpackiej.

Zmienność składu petrograficznego żwirów Dunajca przebadana została na przykładzie materiału tatrzańskiego frakcji 64—128 mm. U wylotu doliny Kościeliskiej w Tatrach zachodnich najliczniejsze są otoczaki skał węglanowych, na drugim miejscu stoją granity, dalej kwarcyty i różne skały metamorficzne. Inne skały osadowe (z wyjątkiem wapieni i kwarcytów) występują w ilościach poniżej 1%. Najszybciej eliminowane są ze żwiru otoczaki skał metamorficznych i wapieni. Koło Nowego Targu żwirzy składają się już niemal wyłącznie z otoczków granitowych i kwarcytowych. Stosunek ilościowy otoczków tych dwóch skał jest różny na różnych odcinkach doliny Dunajca. W górnym biegu zwiększa się znacznie ilość otoczków kwarcytowych przy jednoczesnym spadku ilości granitów. W środkowym biegu Dunajca obserwuje się powolny wzrost ilości kwarcytów i zmniejszanie się ilości otoczków granitowych, a w dolnym biegu proces ten znów przebiega bardzo szybko.

Przyczyny wzbogacania się żwirów Dunajca w otoczaki kwarcytowe są różne na różnych odcinkach doliny. W górnym i środkowym biegu zwiększanie się ilości kwarcytów spowodowane jest donoszeniem przez dopływy Dunajca otoczków kwarcytowych z wysokich teras plejstoceńskich, które są silnie zubożałe w granity. W dolnym biegu Dunajca przyczyną wzbogacania się żwirów w otoczaki kwarcytowe jest wietrzenie granitów i spowodowane tym znaczne zmniejszenie się ich wytrzymałości.

Zmienność stopnia obtoczenia i kulistości przebadana została na przykładzie otoczków granitowych w klasie wielkości 64—128 mm. Średni stopień obtoczenia i średnia kulistość rosną w górnym biegu rzeki, w biegu środkowym wzrost ten staje się coraz powolniejszy, a w dolnym biegu Dunajca następuje spadek kulistości i stopnia obtoczenia. Dla średniego stopnia obtoczenia wartość początkowa u wylotu doliny Kościeliskiej wynosi 0,44, najwyższa wartość 0,80 osiągnięta jest po 130 km transportu, po czym następuje spadek do wartości 0,68 na 208 km doliny. Zmienność średniej kulistości przedstawia się następująco: wartość początkowa wynosi 0,34, wartość najwyższa 0,49 osiągnięta jest po 115 km transportu, po czym kulistość spada do wartości 0,35 na 208 km doliny. Zmniejszania się kulistości w dolnym biegu rzeki nie można wiązać z rozbijaniem otoczków, gdyż wobec małego spadku transport przebiega łagodnie. W czasie transportu następuje sortowanie osadu prowadzące do koncentrowania się w dolnym biegu otoczków o niskiej kulistości. Obserwowany spadek kulistości związany jest ze zmianą kształtu otoczków. W dolnym biegu koncentrują się otoczaki płaskie, tabliczkowate lub dyskoidalne. W danej klasie wielkości otoczaki

mniej kuliste mają mniejszą objętość i wagę niż otoczaki o wysokiej kulistości i jako lżejsze są łatwiej transportowane przez prąd. Nadto otoczaki o wysokiej kulistości mają kształty opływowe i stawiają mniejszy opór przepływającej obok nich wodzie niż ograniczone płaskimi ścianami otoczaki dyskoidalne lub tabliczkowate. Stopień obtoczenia jest proporcjonalny do kulistości otoczek.

Związek orientacji przestrzennej otoczek w żwirach rzecznych z kierunkiem transportującego je prądu jest powszechnie znany. Zależność orientacji otoczek od ich kształtu i wielkości jest natomiast poznana słabiej, chociaż jej istnienie nie budzi wątpliwości. W celu ustalenia tej zależności przeprowadzono pomiary orientacji osi otoczek dla różnych klas wielkości i różnych klas kształtu.

Diagramy zestawione dla pomiarów orientacji przestrzennej otoczek w różnych klasach wielkości wykazują, że otoczaki duże posiadają uprzywilejowany kierunek najdłuższych osi zgodny z kierunkiem prądu, większość osi średnich ustawiona jest poprzecznie do kierunku prądu, dominuje zapadanie płaszczyzny największego przekroju otoczek pod prąd. Otoczaki średnie, stanowiące główną masę osadu posiadają uprzywilejowany kierunek najdłuższych osi poprzeczny do kierunku prądu oraz wyraźne maksimum osi średnich ustawionych równoległe do kierunku prądu. Zapadanie pod prąd płaszczyzn największego przekroju otoczek dominuje jeszcze wyraźniej niż w poprzednim przypadku. Otoczaki małe posiadają najmniej wyraźną orientację w stosunku do kierunku prądu.

Zależność orientacji przestrzennej otoczek od ich kształtu występuje bardzo wyraźnie. Otoczaki wrzecionowate wykazują bardzo silne maksimum osi najdłuższych ułożonych równoległe do kierunku prądu i maksimum osi średnich ułożonych prostopadle do kierunku prądu. Otoczaki tabliczkowate wykazują uprzywilejowany kierunek najdłuższych osi poprzeczny do kierunku prądu oraz bardzo silne maksimum osi średnich ułożonych zgodnie z kierunkiem prądu. Niemal wszystkie płaszczyzny największego przekroju otoczek zapadają pod prąd. Otoczaki dyskoidalne wykazują uprzywilejowany kierunek najdłuższych osi zgodny z kierunkiem prądu. Różnica w orientacji najdłuższych i średnich osi jest tu nieco mniej wyraźna, co wytłumaczyć można niewielką różnicą długości tych osi.

Transport materiału klastycznego w łożysku Dunajca nie jest ciągły, ma on miejsce tylko w czasie dużych przyborów wody. Poszczególne otoczaki zachowują się w czasie transportu w ten sposób, by ruch ich odbywał się kosztem najmniejszej straty energii przez ośrodek transportujący. Dominującym typem ruchu jest toczenie otoczek dookoła ich najdłuższych osi ustawionych poziomo i prostopadle do kierunku prądu. Podczas opadania wody poszczególne frakcje żwiru poczynając od najgrubszych wypadają z masy transportowanego materiału. Największe otoczaki, których transport ustaje najwcześniej, zatrzymują się pośród masy toczącego się naprzód drobniejszego materiału i ustawiają się tak, by stawiać mu jak najmniejszy opór, najmniejszym przekrojem prostopadłym do kierunku prądu. Przy dalszym spadku prędkości osadzana jest zawarta w średnich frakcjach główna masa osadu. Reorientacja otoczek w czasie depozycji następuje tu na znacznie mniejszą

skale i orientacja osi pozostaje przeważnie taka sama jak w czasie transportu. Drobniejsze frakcje składane są pomiędzy większymi otoczkami i dostosowują swoje położenie do istniejących wolnych przestrzeni.

Wpływ kształtu otoczek na ich ułożenie zaznacza się podczas zmiany ich orientacji w momencie depozycji. W najsilniejszym stopniu ulegają reorientacji otoczki wrzecionowate, które nadto mają położenie trwałe nawet wtedy, gdy ich najdłuższa oś zapada zgodnie z kierunkiem prądu. Otoczki o innych kształtach ulegają reorientacji w mniejszym stopniu.

Przebieg krzywych zmienności składu petrograficznego, kulistości i stopnia obtoczenia podzielić można na trzy strefy: początkową strefę szybkich zmian składu petrograficznego oraz wzrostu kulistości i stopnia obtoczenia — środkową strefę, w której cechy te ulegają nieznacznym zmianom — oraz końcową strefę szybkich zmian składu petrograficznego oraz zmniejszania się kulistości i stopnia obtoczenia.

W strefie początkowej z przebiegu zmienności cech żwiru można określić kierunek transportu i oceniać w sposób przybliżony jego długość. W strefie środkowej możliwość oceny długości transportu i określenia jego kierunku jest bardzo znikoma. W strefie tej zmienność cech otoczek spowodowana procesami zachodzącymi w czasie transportu może mieścić się w granicach lokalnej zmienności cech w miejscach pobrania prób. W końcowej strefie zmian brak kryteriów dla oceny długości transportu, a określanie jego kierunku na podstawie zmienności stopnia obtoczenia i kulistości otoczek prowadzi do fałszywych wniosków. Przy określaniu kierunku transportu żwirów duże usługi oddać mogą pomiary orientacji przestrzennej otoczek. Przy interpretowaniu takich pomiarów należy brać pod uwagę różnice w zachowaniu się otoczek różnej wielkości i różnego kształtu.

#### DYSKUSJA

L. Koszarski zwraca uwagę na przedstawione przez referenta wykresy podające zależność orientacji otoczek od ich kształtu i wielkości. Podobne obserwacje przedmówca przeprowadzał na otoczkach w ławicach zlepieńców serii piaskowców ciężkowickich. Jak wynika z podanych wykresów, większość otoczek w żwirach Dunajca układa się swoją osią najdłuższą albo zgodnie z kierunkiem prądu, albo prostopadle do niego. Podobnie otoczki w piaskowcach ciężkowickich są ułożone albo zgodnie, albo prostopadle z kierunkiem prądu, a tylko około 20% otoczek ustawionych jest najdłuższą osią diagonalnie. W związku z tym nie ulega wątpliwości, że w odczytywaniu kierunku prądu z ułożenia otoczek lepsze rezultaty daje badanie orientacji płaszczyzn otoczek niż ich osi. Przedmówca zapytuje, jak duże są kąty nachylenia otoczek w żwirach Dunajca. W piaskowcach ciężkowickich nachylenie otoczek wynosi najczęściej 15 — 45°. Otoczek o nachyleniu poniżej 15° jest bardzo mało, zaledwie 2 — 6%. Interesujące jest również, czy w żwirach Dunajca można zaobserwować związek między wielkością i kształtem otoczek a kątem nachylenia. W piaskowcach

ciężkowiackich taka zależność często istnieje. Jako przykład można podać wyniki jednego pomiaru przedstawiającego zależność między stopniem spłaszczenia otoczków a ich nachyleniem: przy stopniu spłaszczenia

1,5	kąt nachylenia wynosi średnio	35°
1,8	„	30°
2,1	„	25°
2,5	„	20°

Jak widać z powyższego zestawienia, ze wzrostem spłaszczenia kąty maleją. W podanym przykładzie skład mineralny wszystkich otoczków był identyczny (kwarc), a także różnice wielkości były stosunkowo nieznaczne.

T. Wieser proponuje, żeby zamiast określenia „tabliczkowy“ stosować „elipsoidalny“, trójosiowy. Nie zgadza się on z wnioskiem prelegenta, że otoczki kuliste stawiają mniejszy opór aniżeli „tabliczkowe“ czy dyskoidalne. Wiemy z doświadczeń aerodynamicznych, że właśnie największy opór stawiają formy kuliste. Przy pomiarach należy również uwzględniać szczelinowatość i porowatość skały, gdyż ona predysponuje kształt otoczaka.

A. Gaweł przypomina, że Wołosowicz badając przed wojną odcinek ujścia Dunajca do Wisły stwierdził całkowity zanik granitów w otoczkach. Zapytuje prelegenta, czy próby pomiarowe były brane z samej powierzchni, gdyż w takim przypadku powinien się na nich zaznaczyć wpływ zapory w Rożnowie, która przedziela Dunajec na dwie części.

M. Klimaszewski zapytuje, czy wszystkie otoczki, które były badane przez referenta, są jednego wieku, gdyż możliwa jest domieszka materiałów starszych. Czy w dzisiejszych warunkach granity odbywają całą drogę z Tatr aż do Rożnowa, czy też w środkowym biegu Dunajca wędrują już tylko otoczki wymyte z teras? W geologicznej literaturze francuskiej istnieje tendencja, żeby żwiry o ułożeniu poprzecznym dłuższych osi do prądu uważać za osady morskie. Jak z przedstawionych badań wynika, samo poprzeczne ułożenie nie może jednak determinować tego zagadnienia. Zwraca uwagę na konieczność prześledzenia orientacji żwirów także i w osadach periglacialnych.

K. Łydka wyraża życzenie, aby wykresy opracowane przez prelegenta zostały jak najszybciej opublikowane. W Zakładzie Petrografii Uniwersytetu Warszawskiego są na ukończeniu prace dotyczące sedymentacji niecki śródsudeckiej od dewonu górnego do permu włącznie. Byłoby bardzo wskazane porównanie wyników badań współczesnych osadów z badaniami nad zbliżonymi genetycznie osadami kopalnymi.

St. Dzułyński wyraża powątpiewanie, czy prelegent będzie miał kontynuatora prac wykonanych przez siebie na Dunajcu. Oblicze tej rzeki zmienia się bardzo gwałtownie i Dunajec wkracza w fazę sztuczną, gdzie już nie będzie mógł być klasycznie badany. Już dwie zapory zaburzają jej swobodny spływ, projektowane są jeszcze dwie, zaprowadzana jest regulacja brzegów, a ponadto ludność miejscowa wybiera materiał żwirowy i silna eksploatacja kamieńców daje fałszywy obraz geologiczny.

L. Koszarski zapytuje, czy referent nie obserwował w żwirach Dunajca takich miejsc, gdzie by otoczki były pozbawione zupełnie orien-

tacji. W ławicach zlepieńców fliszowych o jednakowym typie warstwowania, np. frakcjonalnym, obserwuje się bowiem różny stopień orientacji otoczków. Jedne ławice posiadają orientację dobrą, inne gorszą, jeszcze inne nie posiadają żadnej orientacji otoczków. Przyjmując jako czynnik sedymentacyjny prądy zawieszinowe zjawisko to można by tłumaczyć tym, że prądy zawieszinowe mogły przemieszać się w różnej wysokości nad dnem. Ławice o dobrej orientacji mogły być osadzone przez prądy płynące bezpośrednio po dnie, a zatem oddziałujące trakcyjnie na osadzany materiał. Natomiast ławice, których otoczki pozbawione są orientacji, mogły powstawać z materiału wypadającego z prądu zawieszinowego przemieszczającego się wysoko ponad dnem.

K. B i r k e n m a j e r podnosi, że Dunajec stanowi jedyny w Polsce przykład dużej rzeki, która ma profil od górskich źródeł do ujścia na nizinę. Byłoby idealnie, gdyby nie miał on starszych tarasów. Materiał tarasowy zaburza jednak normalny układ żwirów rzecznych. Stopień wpływu tego zaburzenia na obraz transportu współczesnego jest trudny, a może nawet niemożliwy do określenia. Dla jego wyznaczenia należałoby odczytać charakterystykę sedymentacyjną żwirów na wszystkich tarasach poczynając od najwyższego, najstarszego, a skończywszy na najniższych. Najwyższe powinny być najbardziej „idealne“, ponieważ nie miałyby żadnych starszych domieszek, a materiał mógłby być interpretowany jako odpowiadający ściśle swojej pozycji w profilu rzeki. Niestety te najstarsze tarasy mamy tylko w kilku miejscach i w bardzo złych odsłonięciach; nie ma zatem mowy o dokładnym pomiarze.

A. O b e r c wspomina, że jak wynika z referatu, zmiana ułożenia otoczków zachodzi w czasie powodzi i zapytuje prelegenta, czy pobierał on próbki w tym samym miejscu przed i po powodzi.

M. K s i ą ż k i e w i c z podkreśla, że temat przedstawiony w referacie jest niewątpliwie trudny, osiągnięcia zaś prelegenta nowe. O trudnościach w opracowywaniu tego tematu mówili już poprzednicy. Trudności te wychodzą jeszcze ostrzej, jeśli się weźmie dane z literatury na ten temat, które są przeważnie ze sobą sprzeczne. Jeszcze więcej sprzeczności spotykamy w różnych podręcznikach. Prelegent wziął pod uwagę wpływ kształtu i wielkości otoczków na ich orientację. Na pewno nie są to jedyne czynniki, które rządzą orientacją ziarn i otoczków. Niewątpliwie duży wpływ ma prędkość i związany z prędkością sposób transportu. Dla orientacji nie jest obojętne, czy otoczek wędruje cały czas wleczony po dnie, czy też jest podbijany w górę innymi otoczkami lub wirami i wykonuje saltacje. Również duży wpływ musi mieć skład mechaniczny żwirów. Inaczej będą się układały żwiry w takich materiałach, gdzie jest dużo piasków a mało żwiru i odwrotnie. Z danych prelegenta wynika w każdym razie, że jest bardzo ryzykowne opierając się na ułożeniu otoczków w ławicy fliszowej wnioskować coś pewnego o kierunku prądu, gdyż jest dużo czynników, które jeszcze trudniej odtworzyć w pełnej warstwie żwiru aniżeli we współczesnym korycie rzeczonym. Jednakowoż nie wynika z tego, żeby zaniechać tej metody we fliszu, lecz trzeba materiały zbierać w sposób systematyczny, zwracając uwagę na ułożenie poszczególnych elementów zależnie od kształtu i wielkości tak, jak to przedstawił referent. Metodę tę należy stosować chociażby z tego względu, że nie zawsze w profilach fliszowych łatwo

odnotujemy hieroglify prądowe, a zwłaszcza serie gruboziarniste i żwirowe hieroglify tych mają mniej niż utwory o średnim i drobnym ziarnie. Należałoby się zastanowić, czy nie byłoby wskazane nie robić diagramów orientacji składników skoncentrowanych, ale różnymi znakami oddawać na diagramach kształty i wielkości otoczków.

### Odpowiedź R. Unru ga

W odpowiedzi na pytanie mgra L. Koszarskiego prelegent wyjaśnił, że kąty ułożenia otoczków są zgodne z tymi, które podaje A. Cailleux, tj. zamykają się w granicach  $40 - 15^\circ$ . W przedstawionych diagramach obtoczenia ograniczono się jedynie do granitów i kwarcytów, które są sferoidalne i dyskoidalne. Na termin „elipsoidalny“, zamiast „tabliczkowy“ prelegent się zgadza. Otoczki elipsoidalne w żwirach Dunajca to materiał fliszowy.

Oдноśnie do oporu stawianego przez otoczki kuliste, prelegent wyraża przekonanie, że tłumaczenie podane w referacie ma cechy prawdopodobieństwa. Za kulą w wodzie tworzy się wir, który powoduje opór, ale równocześnie przy turbulencji może ona być podnoszona drogą saltacji. Nie widać kryteriów, na których podstawie można by odróżnić materiał starszy, pochodzący z tarasów od obecnie transportowanego w odniesieniu do kwarcytów, natomiast granity w starszych tarasach są zwykle silnie zwiertzałe. Kwarcyty w znacznej mierze pochodzą z tarasów.

Poniżej zbiornika rożnowskiego stosunki sedymentacyjne Dunajca są silnie zaburzone. Rzeka jest tu uwolniona z ładunku i silnie eroduje na boki. Kamieńce w dolnym biegu rzeki są już bardzo wąskie i zanikają w okolicy Bogumiłowic. Tam już tylko w łożysku Dunajca są ławice żwirowe. W dolnej partii rzeki zatem nie następuje odsłanianie materiału starszego, otoczki zaś są bieżąco transportowane.

Orientacja otoczków była wykonywana przed i po powodzi sierpniowej 1955 r.; zawsze była ona wyraźna. Brak orientacji otoczków w ławicach żwirowych we fliszu może być spowodowany interferencją prądu.

Na zakończenie prelegent komunikuje, że przedstawione wyniki są efektem dwóch letnich sezonów, w czasie których pomierzono około 10 000 otoczków.

### SUMMARY

The studies have been made alongside the Dunajec river valley on the variability of the maximal size of granite blocks and pebbles, the variability of the petrographic composition of the gravel, the degree of roundness and sphericity of the granite pebbles and the dependance

of the orientation of pebbles upon their shape and size. Comparing the plots of variability of the maximal sizes of the granite blocks and pebbles with the variability calculated from Sternberg's Law the sectors of the valley in which the selective transportation and accumulation of gravels takes place have been determined. The variability of the petrographic composition of gravel is due to different causes in various sectors of the river. In the upper course the mechanical abrasion eliminates the pebbles of limestones, marls and other soft rocks, while in the lower course the chemical weathering of granite pebbles causes a relative increase of quartzite pebbles in the gravel. The degree of roundness and sphericity of pebbles after the initial increase in the upper course of the river decreases in its lower course. It has been shown that this is caused by the selection of pebbles on the basis of shape during transportation. This selection takes place earlier than the selection on the basis of the size of pebbles.

The orientation of pebbles depends upon their shape and size. On the basis of that dependence the course of the deposition of gravels has been reproduced. For the determination of the transportation direction of the fossil river gravels the measurements of the orientation of pebbles are of the greatest importance. At planning and interpreting of such measurements the differences in behaviour of pebbles of various size and shape should be taken under consideration.

#### ZAMKNIĘCIE KONFERENCJI

Zamknięcia konferencji dokonał prof. dr. Marian Książkiewicz, który podkreślił, że bardzo żywa i owocna dyskusja nad zagadnieniami poruszonymi w referatach doszła do skutku dzięki trzem instytucjom, to jest Pracowni Geologiczno-Stratygraficznej Polskiej Akademii Nauk, Polskiemu Towarzystwu Geologicznemu i Zakładowi Geologii Fizycznej Akademii Górniczo-Hutniczej (dawniej Uniwersytetu Jagiellońskiego). Jednakowoż należy podkreślić, że wysoki poziom dyskusji został osiągnięty także dzięki żywemu udziałowi w niej geologów Karpackiej Stacji Terenowej Instytutu Geologicznego w Krakowie, którzy wnieśli w dyskusję wiele interesującego materiału.