

**Witold BOCHENEK, Eugeniusz GIL**

Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN  
Stacja Naukowo-Badawcza w Szymbarku  
Institute of Geography and Spatial Organization of Polish Academy of Sciences  
Research Station at Szymbark

## **Procesy obiegu wody, erozji gleb i denudacji chemicznej w zlewni Bystrzanki\***

### **Water circulation, soil erosion and chemical denudation in flysh catchment area**

**Słowa kluczowe:** spływ powierzchniowy, spływ podpowierzchniowy, erozja gleby, denudacja chemiczna

**Key words:** surface runoff, subsurface runoff, soil erosion, chemical denudation

#### **Wprowadzenie**

Obieg wody na stokach i w zlewniach fliszowych oraz związane z nimi procesy erozji gleb, denudacji chemicznej i odprowadzania materiału ze stoków i zlewni są jednymi z najważniejszych współcześnie zachodzących procesów morfogenetycznych w środowisku Karpat Fliszowych (Starkel 1960, 1979, Słupik 1973, 1981, Gerlach 1976).

Przebieg i mechanizm obiegu wody i związane z nim procesy erozji mechanicznej i chemicznej prowadzone są po-

zez badania w zlewniach, na polstkach doświadczalnych oraz przez eksperymenty laboratoryjne (Kribky i Chorley 1967, Józefaciuk i Józefaciuk 1996). Zmierzają do poznania mechanizmu i funkcyjnych zależności procesów obiegu wody i erozji gleb zachodzących w środowisku naturalnym i zmienionym przez gospodarczą działalność człowieka. Literatura dotycząca tych zagadnień jest bardzo bogata (Jansson 1982). Wyniki badań procesów erozji na polstkach badawczych i eksperymentalnych doprowadziły do wyznaczenia wielu zależności funkcyjnych określających wielkość erozji, z których najbardziej jest znane Universal Soil Loss Equation (Wischmeier i Smith 1965), uwzględniające opady, podatność gleb na erozję, długość i nachylenie stoku, sposób zagospodarowania i rodzaj upraw. Wzór ten

\*Publikację przygotowano w ramach grantu zamawianego PBZ-KBN 086/PO4/2003 „Ekstremalne zdarzenia meteorologiczne i hydrologiczne w Polsce (Ocena zdarzeń i prognozowanie ich skutków dla środowiska życia człowieka)”. Zadanie 5.1.

jest modyfikowany, ponieważ w sposób bezpośredni nie zawsze odpowiada różnym regionalnym warunkom (Rejman i in. 1998).

W badaniach prowadzonych w Karpatach opierano się najczęściej na kilkuletnich seriach badawczych, stosując metodę kartowania i pomiarów skutków procesów erozyjnych, badań quasi-poletkowych lub badania zmienności profili glebowych w przekroju zbocza (Reniger 1955, Woźniak 1963, Gerlach 1966, Święchowicz 2002). Powszechnie stosowana jest też ocena procesów erozyjnych w zlewni na podstawie transportu zawiesiny w korytach rzecznych (Brański 1972).

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie rozmiarów spływu powierzchniowego, podpowierzchniowego, erozji gleb i denudacji chemicznej, prowadzonych w latach 1969–2000 na poletkach doświadczalnych i w zlewni fliszowej Bystrzanki oraz przedstawienie zależności funkcyjnych w relacjach spływu powierzchniowego i podpowierzchniowego do opadów oraz relacji erozji gleb do opadów i spływu powierzchniowego. Przedstawiono również dynamikę ługowania substancji chemicznych na stokach i w zlewni oraz relacje natężenia procesów zachodzących na stokach do odprowadzania zawiesin i substancji chemicznych ze zlewni.

### **Charakterystyka terenu i metoda badań**

Zlewnia Bystrzanki położona jest na wysokości 300–753 m n.p.m., w północno-zachodniej części Beskidu Niskiego, graniczącego od północy z Po-

górzem Ciężkowickim. Zbudowana jest z utworów płaszczowiny magurskiej: piaskowców magurskich (grzbiety beskidzkie), łupkowych i iłolupkowych warstw eoceńskich i łupkowo-piaskowcowych warstw inoceramowych (garby pogórskie). Średnie nachylenie stoków pogórskich wynosi 9°50', grzbietów beskidzkich 15°. Wysokości względne garbów pogórskich przekraczają 150 m, natomiast grzbietów górskich 300–400 m (Gil 1976, Zintegrowany... 1994).

Procesy erozji gleb, ściśle nawiązujące do szaty roślinnej, związane są z obszarem upraw rolnych, które zajmują prawie całą powierzchnię garbów pogórskich. Część beskidzka zlewni niemal w całości jest zalesiona.

Miąszość pokryw zwietrzelinowych wynosi od 80–100 cm w partiach wierzchowinowych do 200–350 cm w dolnych fragmentach stoków. Udział frakcji szkieletowych w pokrywach stokowych wzrasta wraz z głębokością – od 50–80% na utworach piaskowcowych do 20–40% na łupkowo-piaskowcowych. Gleby zlewni wykształcone są na glinach średnich i ciężkich, z dużą zawartością części spławialnych, a zwłaszcza łu koloidalnego (Słupik 1973, Adamczyk i in. 1973).

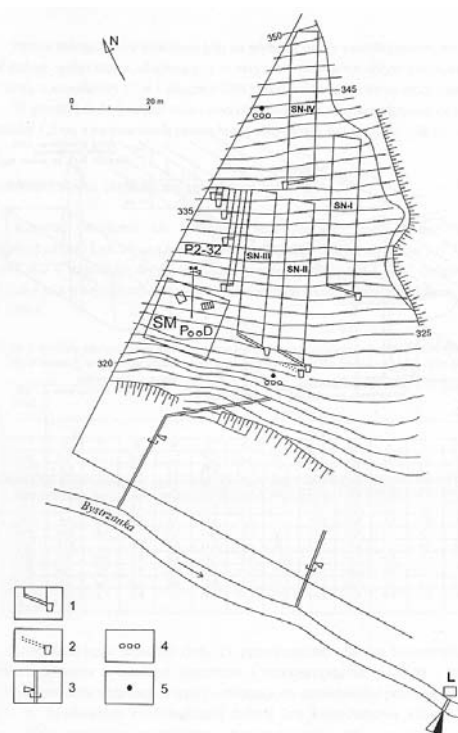
Porowatość ogólna (w % objętości) gleb użytków rolnych na garbach pogórskich wynosi 40,7–51,2%, kapilarna 33,3–42,5%, a pojemność infiltracji 0,07–11,4 mm·min<sup>-1</sup>. Natomiast w glebach na zalesionych stokach beskidzkich wartości te wynoszą odpowiednio: 46,1–60,3%, 36,8–53,4% i 0,8–42,0 mm·min<sup>-1</sup> (Słupik 1973, 1981).

Stok doświadczalny Stacji Naukowo-Badawczej IGiPZ PAN w Szymbarku znajduje się w dolnej części zlewni

Bystrzanki, na wysokości 310–350 m n.p.m. Nachylenie stoku o ekspozycji SE wynosi 11–12°. Podłoże geologiczne stanowią łupkowo-piaskowcowe warstwy inoceramowe, okryte gliniasto-kamienną pokrywą zwietrzelinową o miąższości od 1–1,5 m w górnej części stoku do 2,5 m w dolnej (Słupik 1973, Gil 1976).

Pomiary nad obiegem wody i erozją gleb oraz denudacją chemiczną prowadzone są na polkach doświadczalnych (rys. 1), reprezentujących powierzchnie użytkowane rolniczo: zboża, okopowe, łąka. Reprezentatywność badań zapewnia odpowiednia wielkość poltek oraz uprawa zgodna z powszechnie stosowaną w regionie karpackim. Zmianowanie upraw w cyklu 2–3-letnim prowadzone było na 3 polkach (SN-I – SN-III), poltka z łąką (SN-IV) stanowiło trwały użytek zielony.

Poltka do pomiaru spływu powierzchniowego i erozji, odizolowane od stoku, mają rozmiary 60 × 10 m, a spływu podpowierzchniowego wody (do głębokości 1 m) 180 × 10 m – pas stoku od wododziału do miejsca rejestracji, (Zintegrowany... 1994, Gil 1999). Stany wód gruntowych i ich skład chemiczny rejestrowane były na 5 stanowiskach piezometrycznych rozmieszczonych w profilu stoku (Bochenek 2005). Zastosowany system pomiarowy (rynny zbiorcze i zbiorniki z limnigrafami na dolnej granicy poltek) pozwala na rejestrację każdego zachodzącego procesu. Opracowanie (w zależności od rodzaju użytku w cyklu zmianowania upraw) oparte jest na 450–800 zarejestrowanych przypadkach spływu powierzchniowego i 300–500 przypadkach erozji gleb. Spływ podpowierzchniowy zarejestrowano w ponad 5000 dniach okresu badawczego.



RYSUNEK 1. Stok doświadczalny Stacji Naukowej Instytutu Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN w Szymbarku; poltka doświadczalne: SN-I–SN-III – pola orne, SN-IV – łąka, P2-32 – poltka eksperymentalne, SM – stacja meteorologiczna (P – pluwiograf, D – deszczomierz), L – stacja hydrometryczna (z limnigrafem); 1 – spływ powierzchniowy, 2 – spływ podpowierzchniowy, 3 – odpływ ze stoku, 4 – tensjometry, 5 – piezometry

FIGURE 1. The experimental slope at Szymbark (Research Station of the Institute of Geography and Spatial Organization of the Polish Academy of Sciences); experimental plots: SN-I–SN-II – arable land, SN-IV – meadow, P2-32 – experimental plots, SM – meteorological station (P – pluviograph, D – rain-gauge), L – hydrometric station (with limnigraph); 1 – surface runoff, 2 – subsurface runoff, 3 – outflow from slope (weir with limnigraph), 4 – tensiometers, 5 – piezometers

W profilu wodowskazowym zamykającym zlewnię Bystrzanki, oprócz pomiaru odpływu wody (limnigraf KB2), pobierane są próbki wody (minimum 1 × dziennie) w celu określenia odprowadzania poza zlewnię głównych jonów oraz materiału zawieszzonego.

Za okres obliczeniowy przyjęto rok hydrologiczny, nawiązujący wyraźnie do okresów wegetacyjnego i pozawegetacyjnego, które mają istotne znaczenie w przebiegu procesów.

## Wyniki badań

Przebieg procesów spływu powierzchniowego wody i erozji gleb na stokach użytkowanych rolniczo, przy podobnych cechach naturalnych środowiska, zależą głównie od rodzaju i gęstości szaty roślinnej (tab. 1, rys. 2) i związanym z nimi zmianowaniem upraw,

zabiegami agrotechnicznymi, wielkością i układem działek uprawowych (Gil 1976, 1986, 1999, Świąchowicz 2002, Bochenek i Gil 2005).

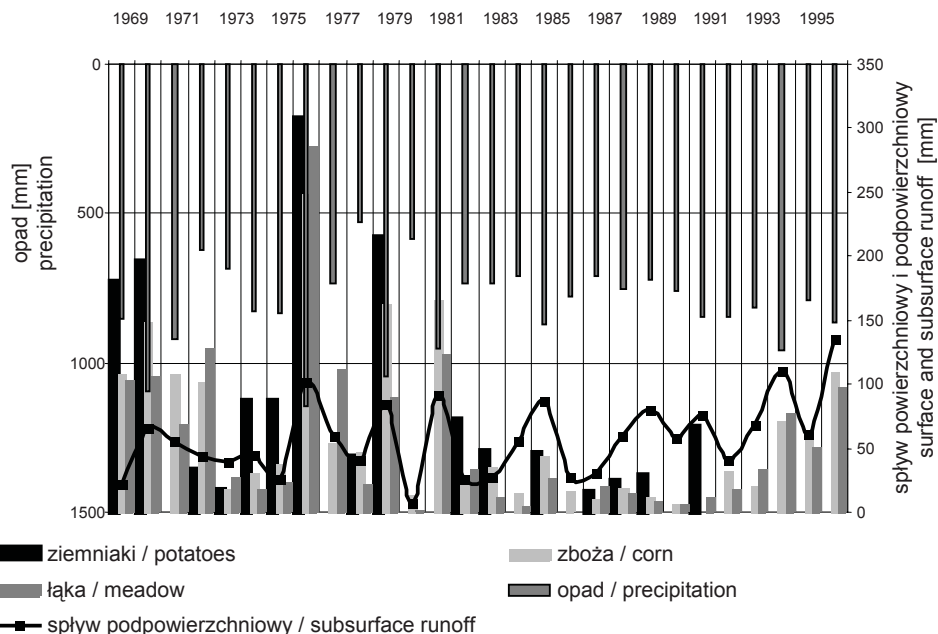
W relacji do rocznej sumy opadów, wynoszącej średnio 811 mm w latach 1969–2000 (tab. 1), największy spływ powierzchniowy notowany jest na polstkach z uprawą ziemniaków – 11,2% opadu; na uprawach zbożowych i łąkowych wynosi odpowiednio: 8,0 i 7,5%. Spływem podpowierzchniowym odprowadzane jest ze stoku 7,5% wody opadowej.

Największe różnice w wielkości spływu wody na powierzchniach z różnymi użytkami rolnymi występują podczas krótkotrwałych opadów o dużej intensywności, przekraczającej możliwość wsiąkania wody w podłoże, tzw. spływ nienasycony (Horton 1933, za Słupikiem 1973), a o szybkości i wielkości spływu decyduje gęstość roślinności. Podczas

TABELA 1. Spływ powierzchniowy i podpowierzchniowy wody oraz erozja gleby na stoku użytkowanym rolniczo w latach hydrologicznych 1969–2000, IGI PAN Szymbark

TABLE 1. Surface and subsurface runoff and soil erosion on farming use slope in hydrological years 1969–2000, IGSO PAS Szymbark

Opad [mm] Precipitation	Ziemniaki / Potatoes		Zboże / Corn		Łąka / Meadow		Spływ podpowierzchniowy [mm] Subsurface runoff
	Spływ powierzchniowy [mm] Surface runoff	Erozja gleby [t·ha <sup>-1</sup> ] Soil erosion	Spływ powierzchniowy [mm] Surface runoff	Erozja gleby [t·ha <sup>-1</sup> ] Soil erosion	Spływ powierzchniowy [mm] Surface runoff	Erozja gleby [t·ha <sup>-1</sup> ] Soil erosion	
Rok / Year (XI–X)							
811,0 100%	90,8 11,2%	25,56 100%	65,0 8,0%	1,24 100%	60,5 7,5%	0,087 100%	60,5 7,5%
Półrocze zimowe / Winter half-year (XI–IV)							
264,6 32,6%	24,8 9,4%	0,85 3,3%	26,7 10,1%	0,77 62,7%	24,3 9,2%	0,03 35,0%	36,2 13,7%
Półrocze letnie / Summer half-year (V–X)							
546,6 67,4%	66,0 12,1%	24,71 96,7%	38,2 7,0%	0,46 37,3%	33,0 6,0%	0,056 65,0%	24,3 4,4%



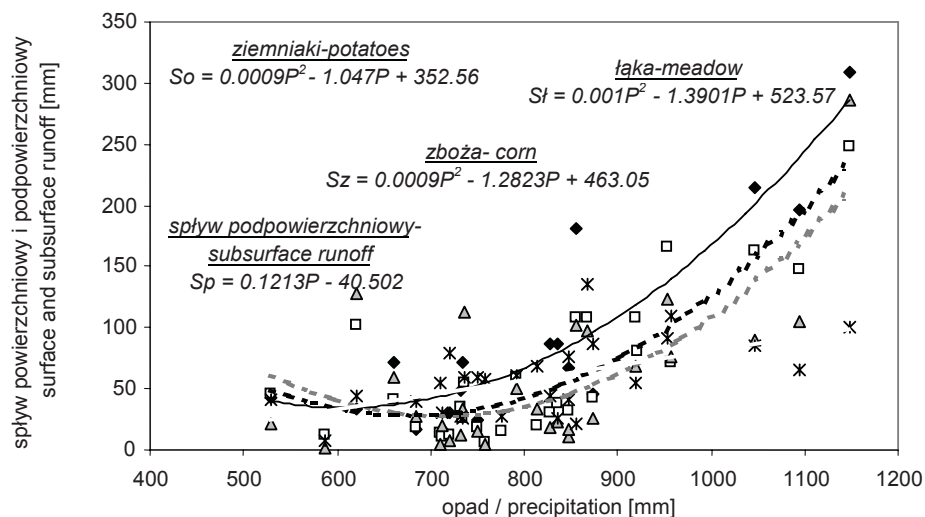
RYSUNEK 2. Spływ powierzchniowy i podpowierzchniowy na stoku użytkowanym rolniczo w latach hydrologicznych 1969–2000, IGiPZ PAN Szymbark  
 FIGURE 2. Surface and subsurface runoff on farming use slope in hydrological years 1969–2000, IGSO PAS Szymbark

opadów rozlewnych, przy pełnej saturacji podłoża, spływ powierzchniowy, tzw. spływ nasycony na poszczególnych użytkach rolnych jest podobnej wielkości, a jego natężenie i objętość nawiązują do wysokości i intensywności opadów. W tej sytuacji o rozdziale wody opadowej na poszczególne składowe jej obiegu decyduje pojemność wodna podłoża (Słupik 1973, 1981).

W półroczu hydrologicznym letnim spływ powierzchniowy na uprawach ziemniaków wynosi 12,1% sumy opadów i jest prawie dwukrotnie większy aniżeli na pozostałych powierzchniach stoków. Decydujące znaczenie w tych relacjach ma gęstość szaty roślinnej, największa na stokach łąkowych, najmniejsza na uprawach ziemniaczanych.

W półroczu hydrologicznym zimowym spływ powierzchniowy na stokach z oziminami i na powierzchniach łąkowych jest większy aniżeli na polu zaoranim (tab. 1). Decyduje o tym wyrównana powierzchnią pola z oziminą w porównaniu z reliefem i większą przepuszczalnością oraniny, przy powolnej na ogół dostawie wody z tającego śniegu (Słupik 1973, Gil 1999).

Wielkość spływu powierzchniowego w poszczególnych latach wahała się w zakresie: 16,7–308,6 mm na uprawach ziemniaków, 6,3–248,3 mm na uprawach zbożowych i 2,0–286,0 mm na łąkach (rys. 2). Zależność spływu powierzchniowego od opadów na prezentowanych 3 użytkach rolnych najlepiej opisuje wielomian 2. stopnia (rys. 3).



◆ ziemniaki / potatoes □ zboża / corn ▲ łąka / meadow ✕ splyw podpowierzchniowy / subsurface runoff

RYSUNEK 3. Relacja splywu powierzchniowego i podpowierzchniowego do opadów na różnych użytkach rolnych w latach hydrologicznych 1969–2000, IGiPZ PAN Szymbark

FIGURE 3. Relationship between surface and subsurface runoff on different farming land to precipitation in hydrological years 1969–2000, IGSO PAS Szymbark

Najwyższy współczynnik korelacji  $r = 0,91$  ( $p < 0,000001$ ,  $N = 17$ ) pomiędzy sumą opadów a splywem powierzchniowym w roku hydrologicznym występuje na uprawach ziemniaczanych. W przypadku tego rodzaju upraw decydujący wpływ na rozmiary splywu mają opady letnie, o dużym natężeniu, kiedy splyw powierzchniowy zachodzi bardzo szybko, uwarunkowany relacją natężenia opadu do przepuszczalności gleby (Gil 1986, 1998a). Mała gęstość roślin nie stwarza przeszkód w swobodnym splywie wody, zwłaszcza gdy rzędy ziemniaków ukierunkowane są zgodnie z nachyleniem stoku.

Wysoki współczynnik korelacji splywu z opadami,  $r = 0,87$  ( $p < 0,000001$ ,  $N = 29$ ), występuje na uprawach zbóż ozimych. Na tak wysoki współczynnik

korelacji mają wpływ długotrwałe opady typu rozlewnego, zachodzące przy pełnym nasyceniu wodą podłoża, oraz stosunkowo wysoki splyw wody w okresie odwilży i roztopów zimą.

Również wysoki współczynnik korelacji splywu powierzchniowego z opadami,  $r = 0,74$  ( $p = 0,0001$ ,  $N = 27$ ), występuje na stokach łąkowych. Na tych użytkach splyw powierzchniowy notowany jest w warunkach zbliżonych do pełnej saturacji podłoża i w zasadzie występuje podczas długotrwałych opadów lub podczas głębokich odwilży śródziemnych i roztopów wiosennych, lub ograniczonej infiltracji w okresie jeszcze zamrożonego podłoża. Podczas gwałtownych krótkotrwałych ulew letnich splyw powierzchniowy na łące jest bardzo mały (Słupik 1973, Gil 1999).

Najniższa korelacja występuje w relacji opadów do spływu podpowierzchniowego, określona współczynnikiem  $r = 0,58$  ( $p = 0,001216$ ,  $N = 28$ ). Spływ ten jest bardzo ważnym ogniwem „szybkiego” odprowadzania wody na stokach i w zlewniach, a jego przebieg związany jest ze stopniem saturacji pokryw zwietrzelinowych przez opady lub tajanie pokrywy śnieżnej (Gil 1999). W szczególnych przypadkach stanowi on główny składnik odpływu ze zlewni – powolne tajanie pokrywy śnieżnej, długotrwałe opady o małej intensywności (Gil i Soja 1976).

Maksymalne rezerwy retencyjne w 1-metrowej warstwie pokryw zwietrzelinowych, określone przez Słupika (1973, 1981) na 100 mm, a razem z pojemnością nadkapilarną – na 160 mm, zostały potwierdzone we wrześniu 1992 roku, kiedy po dłuższym okresie bezdeszczowym ciągły opad pięciodniowy wyniósł ponad 100 mm (Bochenek 2005).

Średnia roczna wielkość spływu podpowierzchniowego w wieloleciu 1969–2000 wyniosła 60,5 mm, co stanowiło 7,5% opadu – tabela 1 (Gil 1999, Bochenek i Gil 2005). Zakres rocznych wielkości zamknął się w granicach od 7,2 mm (1984) do 135,7 mm (2000). W półroczu hydrologicznym zimowym średni spływ podpowierzchniowy stanowił 13,7% sumy opadów, natomiast w półroczu letnim – 4,4%. W stosunku do rocznego odpływu w korycie rzeczonym udział spływu podpowierzchniowego kształtował się w granicach 4,2–12,6%, stanowiąc w półroczu hydrologicznym zimowym 6,6–25,5%, a w półroczu letnim 6,9–20,5%.

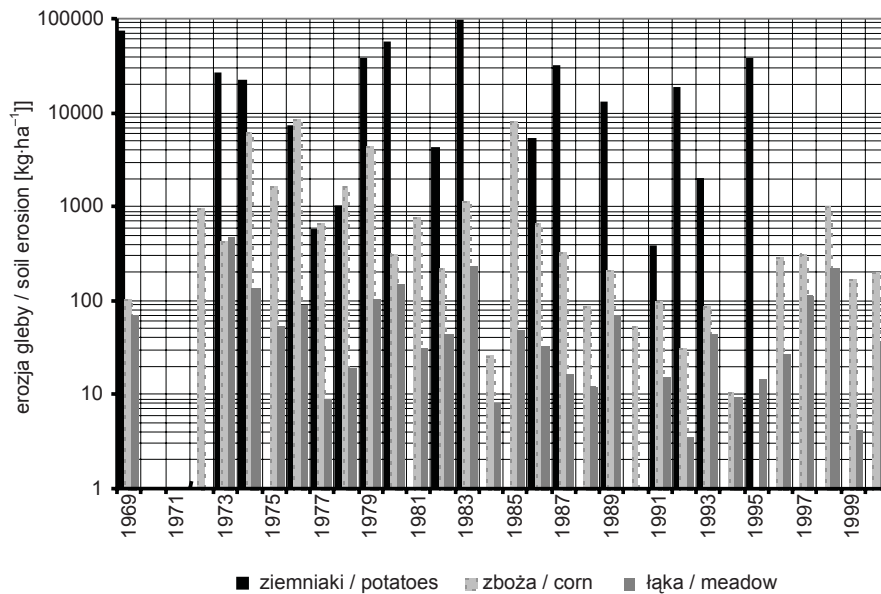
Procesy erozji mechanicznej na stokach zależne są od użytkowania zie-

mi, wysokości i intensywności opadów i natężenia spływu wody na stokach (Bennet 1939). Wielkość erozji gleb w poszczególnych latach jest bardzo zróżnicowana (rys. 4). Największe jej rozmiary obserwuje się w okresach letnich podczas opadów nawalnych o natężeniu przekraczającym  $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  – rysunek 5 (Gerlach 1976, Gil 1974, 1976, 1986b, 1998a, 1999). Na splukiwanie gleby w tym okresie bardzo duży wpływ ma proces „rozbryzgu” wywołany przez energię kropli deszczu bezpośrednio działającymi na nieosłonięte roślinnością podłoże (Wischmeier i Smith 1958, Gerlach 1976, Froehlich i Słupik 1980, Śmietana 1987).

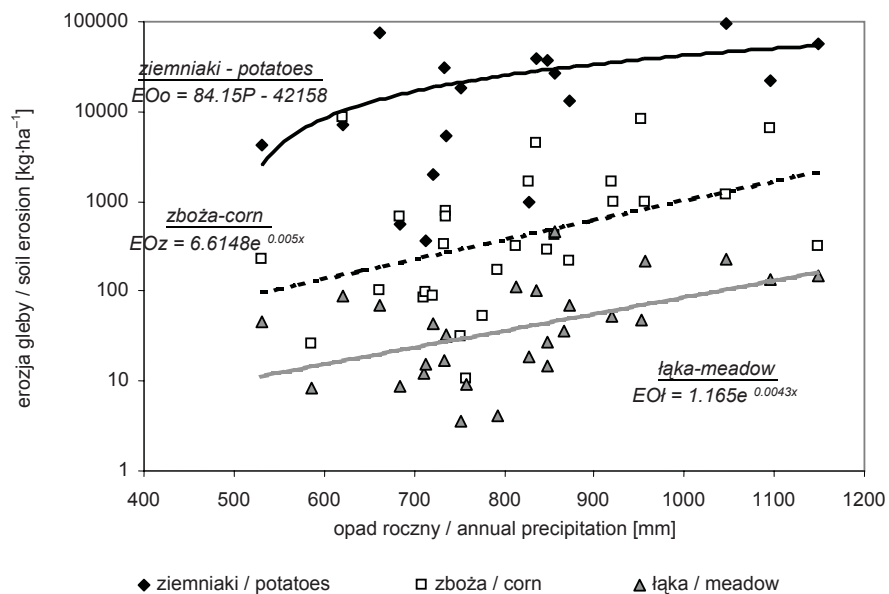
Ze względu na zabiegi agrotechniczne związane z uprawami rolnymi oraz okresem występowania deszczów o dużym natężeniu procesy erozyjne największe natężenie osiągają w okresie maj–lipiec. Erozja gleb podczas tego typu opadów może stanowić ponad 95% jej rocznej wartości (Gil 1986).

Relację wysokości opadów do wielkości erozji gleb w roku hydrologicznym na ziemniakach najlepiej opisuje funkcja liniowa, a współczynnik korelacji  $r = 0,50$  ( $p = 0,0410$ ,  $N = 17$ ) – rysunek 6. Tę samą relację na uprawach zbozowych i łąkach opisują funkcje wykładnicze, a współczynnik korelacji wynosi odpowiednio:  $r = 0,42$  ( $p = 0,0233$ ,  $N = 29$ ) – zboża, i  $r = 0,50$  ( $p = 0,0067$ ,  $N = 28$ ) – łąka.

Znacznie wyższe współczynniki korelacji występują w relacji między wielkością erozji a wielkością spływu powierzchniowego (rys. 7). Związek ten opisują funkcje potęgowe. Współczynniki korelacji w relacji wielkość erozji – spływ powierzchniowy są zbliżone, nie-

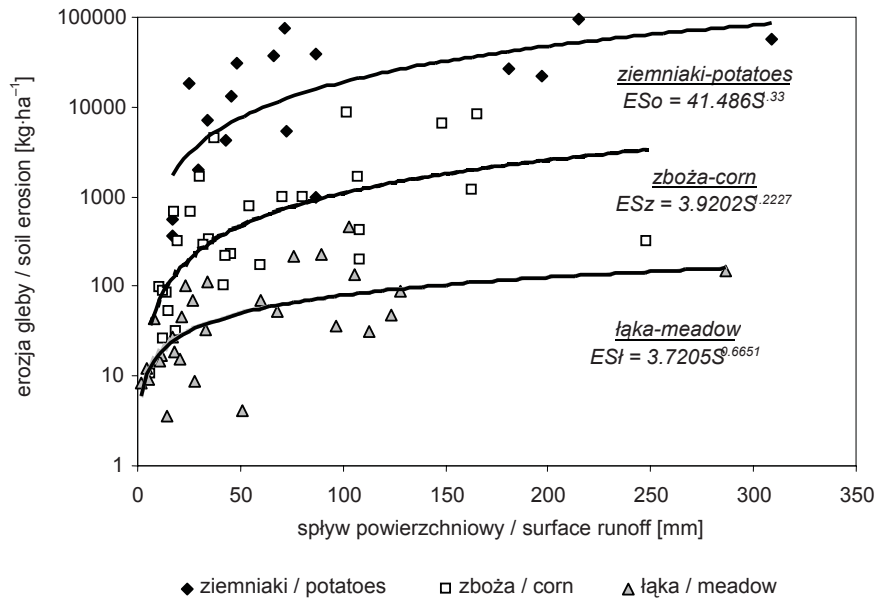


RYSUNEK 4. Erozja gleby na stokach użytkowanych rolniczo w latach hydrologicznych 1969–2000, IGiPZ PAN Szymbark  
 FIGURE 4. Soil erosion on farming use slope in hydrological years 1969–2000, IGSO PAS Szymbark



RYSUNEK 5. Relacja erozji gleb do rocznej sumy opadów na różnych użytkach rolnych w latach hydrologicznych 1969–2000, IGiPZ PAN Szymbark  
 FIGURE 5. Relationship between soil erosion and annual total precipitation on different farming land in hydrological years 1969–2000, IGSO PAS Szymbark





RYSUNEK 6. Relacja erozji gleb do splywu powierzchniowego na rónnych u¿ytkach rolnych w latach hydrologicznych 1969–2000, IGIPIZ PAN Szymbark  
 FIGURE 6. Relationship soil erosion to surface runoff on different farming land in hydrological years 1969–2000, IGSO PAS Szymbark

co wy¿sze na uprawach ziemniaczanych i zbo¿ach ani¿eli na łąkach. Na uprawach ziemniaczanych współczynnik korelacji wynosi  $r = 0,68$  ( $p = 0,0027$ ,  $N = 17$ ), na zbo¿ach  $r = 0,69$  ( $p = 0,00005$ ,  $N = 29$ ), a na łąkach  $r = 0,63$  ( $p = 0,00043$ ,  $N = 27$ ). Wynika stąd wniosek, że wielkość i intensywność splywu wody odgrywa wiêkszą rolê w erozji, a zwlászcz w odprowadzaniu ze stoku materiału glebowego, ani¿eli wysokość opadów.

Wielkość denudacji przeliczona na warstwê splykiwanego materiału (przyjmujac średni ciê¿ar objêtościowy  $1 \text{ m}^3 = 2,0 \text{ t}$ ), w zale¿ności od typu u¿ytkowania wynosi średniorocznie: 1,2 mm na uprawach ziemniaczanych, 0,1 mm na zbo¿ach i 0,004 mm na łąkach. Maksymalne splykiwanie roczne wynosiło na uprawach ziemniaków  $95 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ,

a najwiêksze jednorazowe rozmiary erozji  $60 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  podczas gwałtownej ulewy o intensywności opadu ponad  $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Biorac pod uwagê stosowane zmianowanie upraw w okresach 2–3-letnich, średnie splykiwanie gleby na stokach fliszowych wynosi  $0,5 \text{ mm} \cdot \text{rok}^{-1}$ .

Eksperymentalne pomiary na poletkach bez roślinności (czarny ugór) nad wpływem długości stoku (od 2 do 32 m – rys. 1) wskazujac, że zarówno splyw powierzchniowy, jak i erozja gleb wzrastajac wraz z długością stoku, a malejac wraz ze wzrostem powierzchni (Gil 1998b).

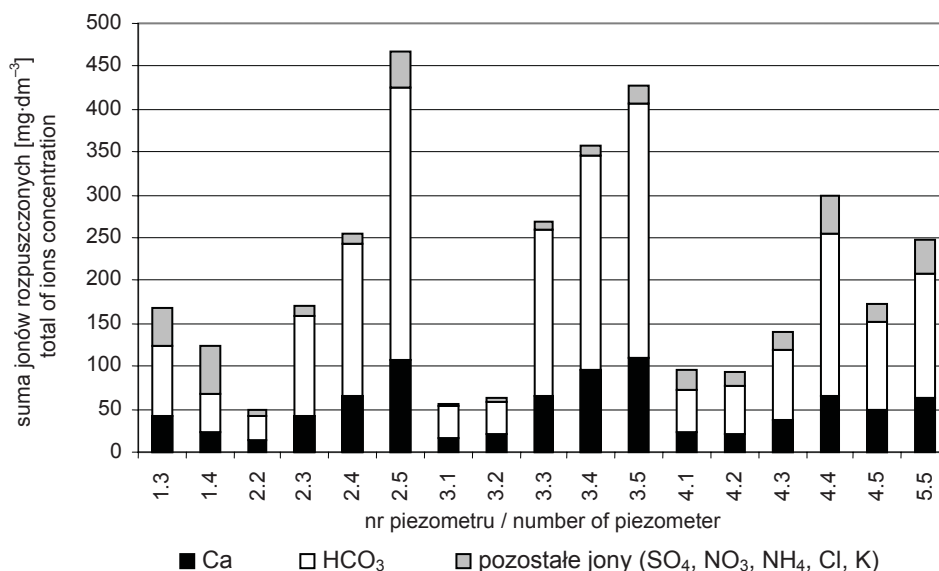
Badania dynamiki wody w pokrywach stokowych, prowadzone na stanowiskach piezometrycznych i uzupełnione analizami własciwości mechanicznych pokryw, wskazujac na powstawanie nieciaglych, niezale¿nych poziomów

wody ponad utworami o składzie mechanicznym glin ciężkich, które występują już na głębokości 70–90 cm (Bochenek 2005). Przeprowadzone pomiary właściwości fizyczno-chemicznych wody na różnej głębokości wskazują na względnie duże wylugowanie płytkich pokryw stokowych. Zasadnicze zmiany przewodności elektrolitycznej właściwej wody oraz wzrost stężeń jonów powszechnie występujących w podłożu łupkowo-piaszczystym następuje poniżej głębokości 1 metra (rys. 7).

Użytecznym „wskaźnikiem” zmineralizowania wody jest przewodność elektrolityczna właściwa, wykazująca prostoliniowy, dodatni związek z sumą jonów rozpuszczonych (Janiec 1982, Stach 2003).

Obliczone dla lat hydrologicznych 1995–2002 średnie roczne ważone war-

tości przewodności elektrolitycznej wody spływu podpowierzchniowego zamknęły się w granicach 12,3–80,6  $\mu\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ , przy średniej wartości 49,0  $\mu\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ . Nie stwierdzono znaczącej różnicy między średnimi wieloletnimi wartościami przewodności elektrolitycznej w obydwu półroczach hydrologicznych: półrocze zimowe – 50,9  $\mu\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ , półrocze letnie – 47,8  $\mu\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ . Na podstawie średnich miesięcznych wartości stwierdzono, że woda w pokrywach stokowych jest od 3 do 30 razy mniej zmineralizowana niż woda odpływająca z całej zlewni. W czasie występowania różnego typu wezbrań ten gradient jest znacznie mniejszy, spowodowany zasilaniem cieku przez wodę dopływającą powierzchniowo, o znikomej mineralizacji. Wyniki te różnią się znacząco od uzyskanych przez Welca (1985), który prowadził pomiary



RYSUNEK 7. Średnie sumy stężeń jonów w wodzie pobieranej z otworów piezometrycznych w IGIPZ PAN Szymbark w latach 2000–2003

FIGURE 7. Average totals of ion concentrations in water sampled from piezometer holes; the IGSO PAS Szymbark slope; 2000–2003

na tym samym stanowisku. Autor wzrost mineralizacji, szczególnie w stosunku do obszaru magurskiego, przypisuje składnikowi nawozowemu. Ograniczanie nawożenia mineralnego w ostatnich latach wpływa znacząco na zmniejszenie ilości rozpuszczonego materiału.

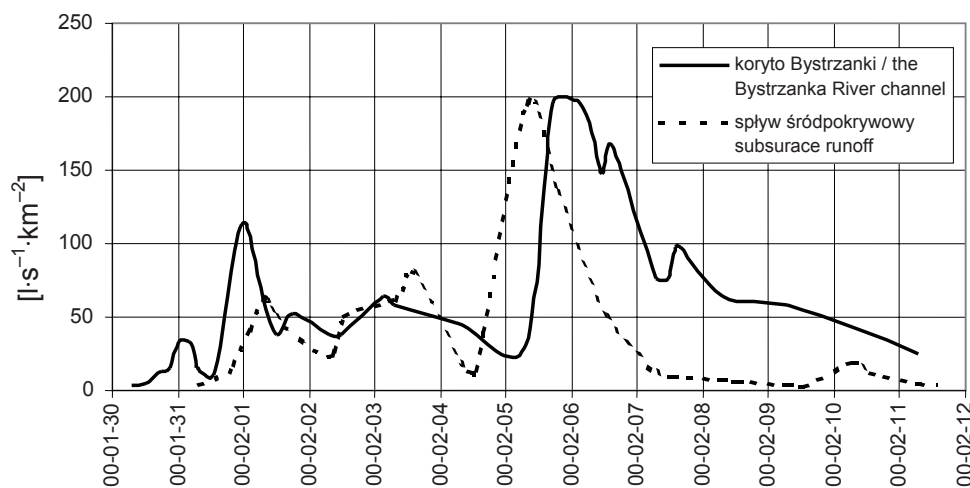
Koryto rzeczne zasilane jest przez różne źródła dostawy wody (Słupik 1981, Froehlich 1982). Ich rola w kształtowaniu odpływu zmienia się w czasie. Ilustracją tego jest przebieg intensywności odpływu wody z pokryw stokowych (spływ podpowierzchniowy) i z całej zlewni w czasie wezbrania roztopowego na przełomie stycznia i lutego 2000 roku (rys. 8).

Początkowe zasilanie koryta przez spływ powierzchniowy przechodzi w fazę zasilania spływem podpowierzchniowym, po której następuje główna faza odpływu rzecznego i podpowierzchniowego wodą z tajania pokrywy śnieżnej i wsiąkającą w niezamarznięte podło-

że. W końcowej fazie roztopów nastąpił wyraźny wzrost odpływu rzecznego i podpowierzchniowego, lecz kulminacja spływu podpowierzchniowego „wyprzedzała” kulminację wezbrania w rzece (Gil i Soja 1976).

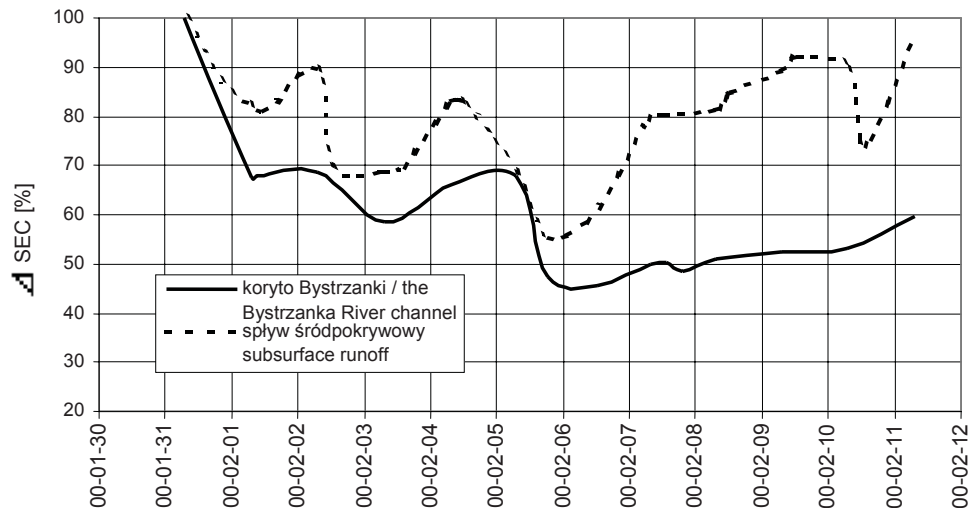
Dla stwierdzenia dynamiki właściwości chemicznych wody posłużono się przewodnością elektrolityczną właściwą (SEC), odnosząc wszystkie wyniki do pomiaru przeprowadzonego na początku wezbrania i czasu wystąpienia spływu podpowierzchniowego (rys. 9).

Przewodność elektrolityczna wody spływającej podpowierzchniowo charakteryzuje się większą dynamiką z pomiaru na pomiar, związaną z intensywnością tajania śniegu w ciągu dnia i nocy. Wielkość przewodności elektrolitycznej właściwej wody spływu podpowierzchniowego w końcowej jego fazie powraca do poziomu z początku spływu. Przewodność wody rzecznej przez znacznie dłuższy okres powraca do stanu z po-



RYSUNEK 8. Dynamika spływu śródpokrywowego i odpływu ze zlewni Bystrzanki podczas wezbrania roztopowego na przełomie stycznia i lutego 2000 roku

FIGURE 8. Dynamic of subsurface runoff and outflow from the catchment area during snowmelt flow on January and February 2000



RYSUNEK 9. Dynamika przewodności elektrolitycznej wód splywu podpowierzchniowego i odpływających ze zlewni w korycie rzeczonym podczas wezbrania roztopowego na przełomie stycznia i lutego 2000 roku

FIGURE 9. Dynamic of special electric conductivity (SEC) of subsurface runoff and river water during snowmelt flow on January and February 2000

czątku wezbrania. Spowodowane to jest zasilaniem cieków wodą infiltrującą przez kamienisto-żwirowe aluwia, budujące dno doliny Bystrzanki.

Dynamikę procesów erozji modelujących współcześnie zlewnię charakteryzuje relacja między wielkością materiału przemieszczanego na stokach a odprowadzaniem ze zlewni. Wielkości te obliczone dla lat 1973–1980 (Zintegrowany... 1994) przedstawiają się następująco: średnie roczne rozmiary erozji gleb na stokach wynoszą  $555 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ , odprowadzanie w formie zawiesiny ze zlewni wynosi  $328 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ , a materiału rozpuszczonego  $81 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ .

Ilość materiału przemieszczanego na stokach fliszowych użytkowanych rolniczo jest znacznie większa aniżeli odprowadzana w formie zawiesiny ze zlewni (Józefaciuk i Józefaciuk 1996). Stąd rozmiarów erozji gleb nie można oszacować, biorąc pod uwagę wyłącznie wyniki pomiarów zawiesin odprowadzanych w korytach rzecznych, ponieważ duża część materiału wynoszonego ze zlewni pochodzi z erozji w obrębie samych koryt rzecznych i dróg polnych (Froehlich i Słupik 1980, Froehlich 1982). W obrębie stoków i den dolin zachodzą jednocześnie procesy splukiwania i akumulacji (Starkel 1960, 1979, Gerlach 1966, Gil 1998a, Święchowicz 2002), a wyniki pomiarów odpływu wody i materiału denudacyjnego ze zlewni stanowią tylko przybliżoną informację o tych procesach.

Podsumowanie i wnioski

### Podsumowanie i wnioski

Dla współczesnego przebiegu i natężenia procesów obiegu wody i erozji na stokach i w zlewniach fliszowych istotne

znaczenie mają warunki naturalne środowiska oraz użytkowanie ziemi.

Największy średnioroczny spływ powierzchniowy (w roku hydrologicznym) występuje na uprawach ziemniaków, stanowiąc 11,2% średnich opadów (811 mm) i jest 1,4–1,5 razy większy od spływu wody na uprawach zbożowych i łąkach.

Roczna wielkość spływu powierzchniowego wykazuje wysoką korelację z roczną sumą opadów na wszystkich uprawach, a zależność tę opisuje funkcja wielomianowa drugiego stopnia. Istotnym elementem „szybkiego” odpływu wody ze stoku jest spływ podpowierzchniowy, który stanowi 7,5% sumy opadów rocznych, opisany funkcją liniową.

Na stokach użytkowanych rolniczo rozmiary erozji gleb zależą od rodzaju upraw. Erozja gleby na uprawach ziemniaków przekracza średnio  $25 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  w roku i jest większa 20 razy od erozji na uprawach zbożowych i prawie 300 razy anizeli na łąkach.

Roczne rozmiary erozji wykazują wyższą korelację ze spływem powierzchniowym anizeli z opadami. Relacje erozji do spływu powierzchniowego opisują równania potęgowe, natomiast do opadów równania potęgowe na zbożach i łące, a na uprawach ziemniaków funkcja liniowa.

Możliwości w zakresie ochrony gleb przed erozją przez zmianę użytkowania ziemi są duże, w przeciwieństwie do możliwości zmian w obiegu wody.

Dynamika denudacji chemicznej na stokach i w zlewni wskazuje na małe jej różnice w zimowym i letnim półroczu hydrologicznym. Mały stopień zmineralizowania wód spływających podpowierzchniowo ze stoków w stosunku do

odpływających ze zlewni wskazuje na duże wylugowanie pokryw zwietrzelinowych.

Przewaga rozmiarów erozji gleb na stokach nad ilością zawieszin odprowadzanych ze zlewni wskazuje na etapowe przemieszczanie materiału, uwarunkowane użytkowaniem rolniczym w profilu stoku oraz procesem jego akumulacji w dnach dolin.

Obserwowana w ostatnich latach zmiana użytkowania ziemi zmienia obieg wody na stokach w kierunku wzrostu spływu podpowierzchniowego i wilgotności dolnych części stoków. Jednocześnie zwiększenie powierzchni zabudowanych i dróg przyspiesza odprowadzanie wody ze stoków i wzrost fali kumulacyjnej w korytach rzecznych. Te różnokierunkowe oddziaływania na przebieg procesów obiegu wody i denudacji wpływają znacząco na współczesne zmiany w środowisku przyrodniczym.

## Literatura

- ADAMCZYK B., MACIASZEK W., JANUSZEK K. 1973: Gleby gromady Szymbark i ich wartość użytkowa. *Dokum. Geogr.* 1: 15–72.
- BENNET H.H. 1939: Soil consevation. Mc Graw-Hill, New York and London.
- BOCHENEK W. 2005: Krążenie wody i ługowanie pokryw w profilu podłużnym pogórskiego stoku fliszowego. Maszynopis rozprawy doktorskiej.
- BOCHENEK W., GIL E. 2005: Badania procesów morfogenetycznych na stokach i w zlewniach fliszowych. Stacja Naukowo-Badawcza IGiPZ PAN w Szymbarku. VII Zjazd Geomorfologów Polskich. Przewodnik do sesji terenowej: 69–77.
- BRAŃSKI J. 1972: Ocena denudacji zlewni rzek karpackich na podstawie wyników pomiarów transportu rumowiska rzeczneego [w:] Mate-

- riały z Sympozjum „Problemy gospodarki górskiej w badaniach krajów europejskich”, Kraków.
- FROELICH W. 1982: Mechanizm transportu fluwialnego i dostawy zwietrzelin do koryta górskiej zlewni fliszowej. *Prace Geogr. IGiPZ PAN* 143.
- FROELICH W., SŁUPIK J. 1980: Importance of splash in erosion process within a small flysch catchment basin. *Studia Geomorph. Carpatho-Balcan.* 14: 77–112.
- GERLACH T. 1966: Współczesny rozwój stoków w dorzeczu górnego Grajcarka. *Prace Geogr. IG PAN* 52.
- GERLACH T. 1976: Współczesny rozwój stoków w Polskich Karpatach Fliszowych. *Prace Geogr. IG PAN* 122.
- GIL E. 1974: An attempt to determine the size of washing in the Bystrzanka catchment basin near Szymbark. *Stud. Geomorph. Carpatho-Balcan.* 8: 105–114.
- GIL E. 1976: Spłukiwanie gleby na stokach fliszowych w rejonie Szymbarku. *Dokum. Geogr.* 2.
- GIL E. 1986a: Rola użytkowania ziemi w przebiegu splywu powierzchniowego i spłukiwania na stokach fliszowych. *Przeg. Geogr.* 58: 1–2, 31–48.
- GIL E. 1986b: Ruissellement et érosion sur les versants du flysch d’après les résultats de parcelles expérimentales. *Bull. Assoc. Gëogr. Franç. Paris* 5: 351–356.
- GIL E. 1998a: Splyw wody i procesy geomorfologiczne w zlewniach fliszowych podczas gwałtownej ulewy w Szymbarku w dniu 7 czerwca 1985 roku. *Dokum. Geogr.* 11: 85–107.
- GIL E. 1998b: Wpływ długości stoku na rozmiary splywu powierzchniowego i spłukiwania (badania eksperymentalne) [w:] Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Biblioteka Monitoringu Środowiska (red.) A. Kostrzewski, Warszawa: 105–112.
- GIL E. 1999: Obieg wody i spłukiwanie na fliszowych stokach użytkowanych rolniczo w latach 1980–1990. *Zeszyty IGiPZ PAN* 60.
- GIL E., Soja R. 1976: Udział splywu powierzchniowego w całkowitym odpływie ze zlewni fliszowej. *Zesz. Nauk. Polit. Krak. Bud. Wod. i Inż. Sanit.* 3, 24.
- HORTON R. 1933: The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Trans. Am. Geophys. Un.* 14.
- JANIEC B. 1982: Badania denudacji chemicznej metodą konduktometryczną. *Annales UMCS XXXVII*, B: 119–140.
- JANSSON M.B. 1982: Land erosion by water in different climates. UNGI Rapport No 57, Uppsala University.
- JÓZEFACIUK C., JÓZEFACIUK A. 1996: Zmiany rzeźby terenu w Werbkowicach pod wpływem erozji w latach 1950–1980. *Pam. Puławski* 83: 165–177.
- KRIBKY M.J., CHORLEY R.J. 1967: Trough-flow and Overland Flow and erosion. *Bull. IASH* 12: 5–21.
- REJMAN J., TURSKI R., PALUSZEK J. 1998: Spatial and temporal variation in erodibility of loess soil. *Soil&Tillage Research* 46, 61–68.
- RENIGER A. 1955: Erozja glebna terenie podgórskim w obrębie zlewni potoku Łukawica. RNR. Ser. F-71-1
- SŁUPIK J. 1973: Zróżnicowanie splywu powierzchniowego na fliszowych stokach górskich. *Dokum. Geogr.* 2.
- SŁUPIK J. 1981: Rola stoku w kształtowaniu odpływu. *Prace Geogr. IGiPZ PAN* 142.
- STACH A. 2003: Uwarunkowania i funkcjonowanie procesów denudacji chemicznej w mikrozelewni na obszarze młodoglacjalnym. Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań.
- STARKEL L. 1960: Rozwój rzeźby Karpat fliszowych w holocenie. *Prace Geogr. IG PAN* 22.
- STARKEL L. 1979: On some questions of the contemporary modelling of slopes and valley bottoms in the flysch Carpathians. *Studia Geomorph. Carpatho-Balcan.* 13: 191–206.
- ŚMIETANA M. 1987: Zróżnicowanie rozbrzygu gleby na użytkowanych rolniczo stokach fliszowych. *Studia Geomorph. Carpatho-Balcan.* 21: 161–182.
- ŚWIĘCHOWICZ J. 2002: Współdziałanie procesów stokowych i fluwialnych w odprowadzaniu materiału rozpuszczonego i zawiesiny ze zlewni pogórskiej [w:] *Przemiany środowiska na Pogórzu Karpackim*. Instytut Geografii UJ, Kraków: 1–152.
- WELC A. 1985: Zmienność denudacji chemicznej w Karpatach fliszowych (na przykładzie zlewni potoku Bystrzanka). *Dokum. Geogr.* 1986.

- WISCHMEIER W.H., SMITH D.D. 1958: Rainfall energy and its relationship to soil loss. *Transaction American Geophysical Union* 39: 285–291.
- WISCHMEIER W.H., SMITH D.D. 1965: Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains – guide for selection of practices for soil and water conservation. *Agric. Handb.* 282.
- WOŹNIAK Z. 1963: Przebieg i rozmiary współczesnego modelowania zlewni Potoku Bilczyckiego przez procesy denudacyjne. *Dokum. Geogr.* 5.
- Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego, Stacja Bazowa Szymbark (Karpaty Fliszowe). 1994. (red.) L. Starkel, E. Gil. Biblioteka Monitoringu Środowiska.

There were evaluate the surface runoff and erosion values on different kinds farming land on base of long-term measurements. Annual size surface flow and soil erosion were correlated mutually and with precipitation. The subsurface runoff is important element of water circulation. Authors showed the amount and course this process. There were showed the course of chemical denudation process in selected periods towards water circulation. There also compared relation between soil erosion processes on slope and in the river channel.

## Summary

**Water circulation, soil erosion and chemical denudation in flysh catchment area.** These processes are conditioned by natural parameter of environment and its using.

### Authors' address:

Witold Bochenek, Eugeniusz Gil  
Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN  
Stacja Naukowo-Badawcza w Szymbarku  
38-311 Szymbark 430  
Poland