

Ewa Smolska

Wydział Geografii i Studiów Regionalnych
Uniwersytet Warszawski
e-mail: e.smolska@uw.edu.pl

POMIARY EROZJI GLEBY NA POLETKACH I STOKACH EKSPERYMENTALNYCH

Soil erosion measurements on plots and experimental slopes

Abstract: In years 2007-2009 soil erosion measurements were conducted on plots and hillslopes with not separated area. The separated plots were closed by the Gerlach troughs with collectors. Measurements with not separated area were carried with the modified collectors of Słupik (entrance width 0,5 m). The aim of the paper is to compare the results and to evaluate the usefulness of the small collectors. Annual amounts of eroded soil occurred to be 12% smaller for cereals and 26% smaller for potatoes in comparison with erosion recorded in the separated plot. On a convex slope amounts of eroded material were higher (20% on average). On the other hand, the erosion on a concave slope was less effective (c. 35%) during any rainfall conditions. Mass of soil material collected in 10 collectors situated near each other was compared. It is calculated that measurement error due to the collector effectiveness and local differentiation of the geomorphic processes is $\pm 6\%$ if only two neighbouring collectors are considered and up to $\pm 4\%$ if tree catchers are taken into consideration. This error increase up to $\pm 30\%$ during small erosivity rainfalls ($EI_{30} < 20 \text{ MJ mm ha}^{-1}\text{h}^{-1}$).

Słowa kluczowe: erozja gleby, łapacze, poletka, stok eksperymentalny

Key words: soil erosion, runoff collectors, plots, experimental slope

WPROWADZENIE

Pomiary erozji gleby na stokach są prowadzone różnymi metodami i z zastosowaniem różnego typu urządzeń zbierających spływ wraz z erodowaną glebą. Uzyskiwane wyniki zawsze obciążone są błędem wynikającym z dokładności pomiaru oraz sprawności urządzenia pomiarowego. Określenie błędu pomiaru jest przeważnie pomijane. Na zagadnienie to niezbyt często zwraca się uwagę (Froehlich 1982, 1992, Loughran 1989, Klimczak 1992). W przypadku badań

procesu w naturalnym środowisku na otrzymywany wynik ilościowy ma wpływ również wiele lokalnych uwarunkowań jak mikrorzeźba, właściwości i stan gleby, okrywa roślinna, itp.

Zasilanie może zachodzić tylko z części powierzchni testowej, w związku z tym wielkość i kształt powierzchni testowej na jakiej prowadzone są pomiary również ma wpływ na otrzymywane wyniki (Froehlich 1992, Gil 1998, Rejman, Usowicz 2002, Bagarello, Ferro 2004). Zarówno przy pomiarach spłukiwania jak i rozbryzgu podkreślano, że im mniejsza powierzchnia testowa, tym wyższa wartość jednostkowa erozji. Stąd wiele wątpliwości budzi bezpośrednie porównywanie wyników uzyskiwanych na podstawie pomiarów prowadzonych na poletkach o różnej wielkości. Poza tym wyniki badań poletkowych dotychczas nie były porównywane z wynikami badań na stokach, prowadzonymi metodą bez wydzielonych powierzchni testowych.

Pomiary łapaczami o niewielkich rozmiarach, instalowanymi na stokach eksperymentalnych wg metody T. Gerlacha (1966), bez wydzielania powierzchni testowej dla poszczególnych stanowisk były prowadzone w różnych regionach kraju (Gerlach 1976, Słupik 1973, 1981, Klimczak 1993, Smolska 1993, 2002, 2005, Świąchowicz 2002, Rodzik, Stępniewski 2005). Do oszacowania erozji jednostkowej uwzględniano umowną powierzchnię pasa stoku o szerokości wlotu łapacza i długości stoku od działu wodnego do miejsca jego instalacji.

Na Pojezierzu Suwalskim w latach 2007-2009 były prowadzone badania erozji gleby zarówno z zastosowaniem wydzielonej powierzchni testowej, jak i metodą T. Gerlacha (1966) z zastosowaniem niewielkich łapaczy (Smolska 1993). Celem niniejszego opracowania jest analiza i porównanie wyników pomiarów erozji gleby uzyskanych tymi dwiema metodami, wskazanie na znaczenie długości stoku oraz oszacowanie błędu pomiaru przy zastosowaniu niewielkich łapaczy.

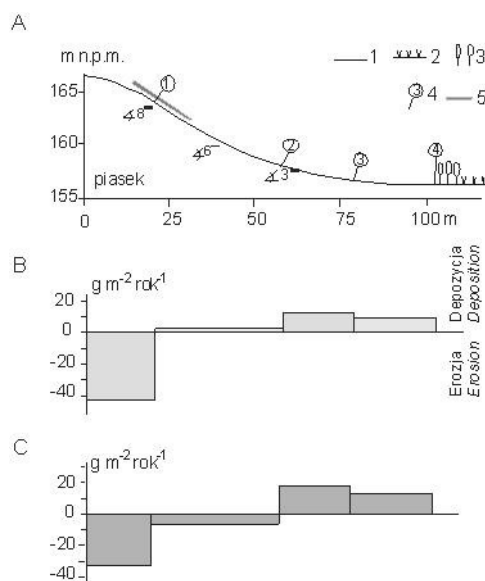
OBSZAR BADAŃ

Badania prowadzono w okolicy wsi Udziejek, położonej na północ od Suwałk. Jest to obszar o typowej rzeźbie młodoglacjalnej. Przeważają tu stoki krótkie, nachylenia są zróżnicowane. Rolniczo użytkowane stoki mają przeważnie spadki nie przekraczające 15°. Stoki o większym nachyleniu są zalesione lub wykorzystywane jako pastwiska. Litologia obszaru nawiązuje do urozmaiconej rzeźby polodowcowej. Brak tu rozległych terenów o jednorodnych utworach powierzchniowych (Ber 1967). Często obok stoków piaszczysto-gliniastych występują piaszczyste, mułkowe, żwirowe, sporadyczne spotykane są także osady ilaste.

Klimat Pojezierza Suwalskiego jest umiarkowany, z cechami klimatu kontynentalnego (Stopa-Boryczka, Martyn 1985). Średnia roczna suma opadów w latach 1987-2006 wynosiła 593 mm, średnia roczna temperatura 6,8°C. Okres

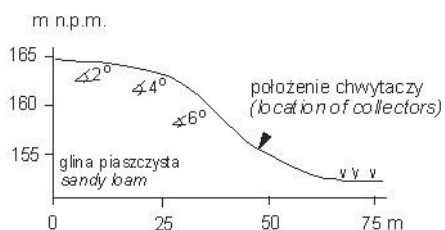
3-letnich badań był cieplejszy prawie o 1° , natomiast pod względem opadów zróżnicowany od 453 mm (2008) do 638 mm (2009). Zdecydowanie przeważały krótkotrwałe deszcze o wydajności 8-20 mm i niewielkiej średniej intensywności (poniżej $0,2 \text{ mm min}^{-1}$). Wystąpiło także kilka opadów powyżej 20 mm i o większej średniej intensywności ($0,2-0,4 \text{ mm min}^{-1}$).

Pomiary prowadzone były na piaszczystym stoku o długości około 105 m ($54^{\circ}15'16,0''\text{N}$; $22^{\circ}53'0,63''\text{E}$ – Udziejek Górny). Jest to stok o profilu wypukło-wklęsłym, o nachyleniu w górnej części $8-10^{\circ}$, w środkowej 6° , a w dolnej $1-3^{\circ}$ (rys. 1A). Eksperyment dotyczący sprawności łapaczy został przeprowadzony na stoku gliniasto-piaszczystym ($54^{\circ}15'25,48''\text{N}$; $22^{\circ}53'07,22''\text{E}$ – Udziejek I), także wypukło-wklęsłym (rys. 2). Nachylenie jego jest nieco mniejsze, nie przekracza 6° , stok ma wyraźnie krótszy segment wklęsły. Oba stoki były użytkowane rolniczo, zajęte pod uprawę zboża lub ziemniaków.



Rys. 1. Profil stoku w Udziejku Górnym (A) oraz, średnie roczne spłukiwanie (B) i spłukiwanie podczas opadu 25.05.2007 r. (C); 1 – grunt orny, 2 – łąka, 3 – las, 4 – łapacze, 5 – położenie poletek

Fig. 1. Profile of Udziejek Górny slope (A), mean annual sheet wash (B) and sheet wash during rainfalls 25.05.2007 (C); 1 – arable land, 2 – meadow, 3 – forest, 4 – small collectors, 4 – location of plots



Rys. 2. Profil stoku Udziejek I
Fig. 2. Profile of Udziejek I slope

METODY BADAŃ

Zastosowane łapacze o szerokości wlotu 0,5 m to zmodyfikowane worki Słupika (1973). Worki z grubej folii zostały przymocowane do specjalnej ramy z łątą w celu łatwego ich instalowania na stoku jak i zabierania na czas prac polowych (fot. 1) (Smolska 1993).

Z powierzchni stoku w Udziejku, w jego środkowej części, został wydzielony zespół poletek o różnej długości oraz szerokości 2 m (fot. 2). Najdłuższe poletko (standardowe wg USLE) miało 22,1 m długości, pozostałe 11 m, 5,5 i 2,75 m. Lokalizację poletek i stoku eksperymentalnego przedstawia fot. 2. Wzdłuż dolnej krawędzi poletek umieszczono instalacje zbiorcze spływu powierzchniowego i zmywanej gleby, składające się z półrynien i systemu rur odprowadzających wodę oraz osad do pojemników zbiorczych. Obok pierwszego z poletek o długości 22,1 m na tym samym stoku umieszczono 2 łapacze o szerokości wlotu 0,5 m każdy (fot. 3). Zarówno na wydzielonym poletku jak i na stoku obok poletka prowadzono te same uprawy: w roku 2007 i 2009 było to zboże jare (odpowiednio mieszanka jęczmienia z owsem i owies), zaś w 2008 roku ziemniaki.



Fot. 1. Łapacz - zmodyfikowany worek Słupika
Photo 1. Runoff collector - modified Słupik's bag

Na tym samym stoku, kilkanaście metrów od wydzielonych poletek prowadzono pomiary erozji gleby metodą zaproponowaną przez T. Gerlacha (1966). Według tej metody poszczególne stanowiska pomiarowe umieszczane są wzdłuż profilu podłużnego stoku, w miejscach zmiany jego kształtu i nachylenia, bez wydzielania powierzchni zbiorczej. W metodzie tej zakłada się, że każ-



Fot. 2. Układ poletek i położenie stoku eksperymentalnego (zaznaczono strzałką), na którym prowadzono pomiary erozji gleby łapaczami, bez wydzielonej powierzchni zbiorczej

Photo 2. Pattern of runoff plots and experimental slope (shown by indicator), were conduct measurements of soil erosion use small runoff collectors at not separated area



Fot. 3. Położenie łapaczy obok poletek

Photo 3. Location of small runoff collectors next to the runoff plots

de urządzenie pomiarowe zbiera spływającą wodę wraz z materiałem glebowym z pasa stoku o szerokości wlotu łapacza i jego odległości od działu wodnego. Jest to powierzchnia stanowiąca podstawę do przeliczeń uzyskanych wyników. Taką metodę pomiarów stosowano przede wszystkim ze względu na poznanie redystrybucji gleby w obrębie stoku, wyznaczenie stref erozji i depozycji materiału oraz dynamiki procesu w odniesieniu do morfologii stoku. Stanowiska położone były w odległości 22 m, 57 m, 79 m i 105 m od działu wodnego (rys. 1). W latach 2007 i 2009 na stoku eksperymentalnym uprawiane było zboże jare (mieszanka, owies), a 2008 roku ozime (żyto).

Materiał zgromadzony w łapaczach jak i w urządzeniach zbiorczych, w które zaopatrzone były poletka, był wybierany w tym samym czasie i po wysuszeniu ważony z dokładnością do 0,001 g.

Eksperyment przeprowadzony na stoku Udziejek I (rys. 2) polegał na umieszczeniu obok siebie 10 łapaczy. Przyjęto, że każde z tych urządzeń mogło zebrać osad wraz ze spływającą wodą z pasa stoku o szerokości 0,5 m i długości równej odległości od działu wodnego, co łącznie pozwoliło na pomiary w pasie stoku o szerokości 5 m i długości 47 m. Na tej podstawie obliczono średnią wartość erozji gleby z 10 łapaczy oraz błąd względny δ_x , wyrażony w %:

$$\delta_x = \frac{|x - x_0|}{x_0} \cdot 100\%$$

gdzie: x – dana wartość, x_0 – wartość średnia.

WYNIKI BADAŃ

Porównanie pomiarów prowadzonych na poletku i na stoku bez wydzielonej powierzchni

Umieszczenie 2 łapaczy obok poletka o wymiarach 22,1 m x 2 m pozwoliło na porównanie wyników otrzymanych metodą poletkową i na podstawie pomiarów niewielkimi łapaczami na stoku, bez wydzielonej powierzchni. W przypadku łapaczy jako powierzchnię zbiorczą przyjęto odległość od górnej krawędzi pola 22 m x szerokość wlotu 2 łapaczy czyli 1 m. Wyniki otrzymane dla kolejnych okresów pomiarowych zestawiono w tabeli 1. Przy pomiarach poletkowych w 2007 r. otrzymano dla zboża erozję 39,4 g m⁻², natomiast z zastosowaniem łapaczy 35,8 g m⁻², za rok 2009 wartości te kształtowały się odpowiednio 16,4 i 15,2 g m⁻². W uprawie ziemniaków w 2008 r. erozja gleby zmierzona na wydzielonym poletku wyniosła 102,7 g m⁻², natomiast zmierzona łapaczami bez wydzielonej powierzchni 77,5 g m⁻². Porównanie tych wyników wskazuje, że roczne wartości erozji były nieco niższe w przypadku pomiarów prowadzonych łapaczami. W przypadku zboża różnica była niewielka, natomiast w uprawie ziemniaków niższa o 25%. Analizując poszczególne okresy pomiarowe można

zauważyć, że łapaczami zazwyczaj otrzymywano nieco większe wartości erozji gleby podczas opadów o małej erozyjności, natomiast mniejsze w przypadku opadów o większej intensywności, szczególnie w uprawie ziemniaka (tab. 1).

Tabela 1. Porównanie pomiarów erozji gleby na poletku wg USLE i chwytaczami bez wydzielonej powierzchni na tle opadów P [mm] i czynnika EI₃₀ [M mm ha⁻¹h⁻¹]

Table 1. Comparison of soil erosion measurements with runoff collectors on USLE plot and no separated area on the background precipitation P [mm] and EI₃₀ factor [M mm ha⁻¹h⁻¹]

Data pomiaru Date of measurement	P	EI ₃₀	Uprawa Crop	Powierzchnia zbiorcza Contributing area	
				Wydzielona Separated	Niewydzielona No separated
				Erozja gleby – Unit soil erosion [g m ⁻²]	
19.04.2007	7,4	5,7	Mieszanka zbóż jarych owsa i jęcz- mienia spring oats + barley	0,46	0,23
11.05.2007	15,8	6,1		0,43	0,56
9.06.2007	45,7	136,5		20,43	20,45
16.07.2007	158,9	607,2		17,01	14,47
10.08.2007	56,5	116,2		0,27	0,83
17.09.2007	92,7	148,1		0,28	0,41
27.10.2007	23,6	16,7		0,50	0,65
Suma - total	400,6	1036,5		39,38	37,60
11.12.2007	28,9	44,4	Ziemniaki Potatoes	0,64	0,36
7.04.2008	81,2	125,3		0,85	1,30
30.05.2008	20,6	12,8		3,07	4,43
1.07.2008	41,3	63,2		26,14	20,94
26.07.2008	55,2	127,4		10,80	10,00
21.08.2008	58,4	119,7		58,77	39,33
27.09.2008	24,2	6,0		0,80	0,28
10.11.2008	32,6	9,0	1,67	0,89	
Suma - total	342,4	507,9		102,7	77,5
7.03.2009	91,9	91,5	Owies jary Spring oats	2,47	1,59
5.04.2009	33,4	42,4		0,62	0,75
8.06.2009	94,6	63,6		2,01	2,28
5.07.2009	71,7	167,2		8,13	7,58
29.07.2009	49,0	44,2		0,68	0,76
31.08.2009	50,9	190,7		1,78	1,58
17.09.2009	10,5	3,1		0	0,02
30.10.2009	78,2	40,1	0,73	0,66	
Suma - total	480,2	642,8		16,4	15,2

W tym samym okresie prowadzono pomiary spłukiwania metodą T. Gerlacha (Gerlach 1966) na stoku wypukło-wklęsłym o długości 105 m (Udziejek Górny), położonym w sąsiedztwie stoku z poletkami. Największą ilość materiału glebowego notowano zazwyczaj w łapaczach na stanowisku położonym w odległości 20 m od działu wodnego, obejmującym wypukły fragment stoku, sporadycznie na kolejnym stanowisku usytuowanym w odległości 57 m od działu wodnego, które obejmowało fragment stoku o profilu wypukłym w górnej części i lekko wklęsłym w dolnej, ale jeszcze o znacznym nachyleniu – ponad 6° (rys. 1A).

W stosunku do pomiarów poletkowych w górnej wypukłej części stoku wartości erozji były wyższe w każdych warunkach opadowych, natomiast w środkowej nieco wklęsłej notowano zazwyczaj znacznie mniejsze wartości erozji niż na wydzielonym poletku.

Jeśli z wyższej części stoku do danej strefy dociera więcej materiału niż jest odprowadzane, to strefę taką cechuje tendencja do depozycji erodowanego materiału glebowego. Ta tendencja zaznacza się jeszcze wyraźniej, gdy wartości erozji zostaną przedstawione na jednostkę powierzchni. Na podstawie pomiarów prowadzonych w latach 2007-2009 obliczono średnie roczne natężenie spłukiwania na stoku Udziejek Górny (rys. 1B). Obliczone wartości wskazują na wyraźną erozję górnej wypukłej jego części i akumulację o zróżnicowanym natężeniu na pozostałej, wklęsłej części. W początkowym fragmencie stoku wklęsłego (środkowa część stoku, st. 2) obserwowano najbardziej zróżnicowany przebieg spłukiwania. Podczas opadów o przeciętnym natężeniu w strefie tej następowała depozycja znacznej ilości materiału pochodzącego z erozji górnej wypukłej części stoku, a podczas większego natężenia opadu erozja - zgromadzony tu materiał był przemieszczany ku podstawie stoku. Erozja w tej części stoku piaszczystego była wyraźnie związana z występowaniem opadów o erozyjności co najmniej $> 100 \text{ MJ mm ha}^{-1}\text{h}^{-1}$ (rys. 1C).

Oszacowanie błędu pomiaru metodą łapaczy

Pomiary erozji gleby z zastosowaniem 10 łapaczy umieszczonych obok siebie na stoku Udziejek I wykonano dwukrotnie: w lipcu 1987 r. i powtórzono w maju 2007 r. Wyniki pierwszych pomiarów zostały omówione w pracy E. Smolskiej (2005). Wówczas pomiarem objęto 2 niewielkie deszcze (1-15.07.1987) o wydajności 5,4 i 9,8 mm, dla których wskaźnik erozyjności EI_{30} wyniósł odpowiednio 10,4 i 16,7 $\text{MJ mm ha}^{-1}\text{h}^{-1}$. Za drugim razem, w czasie objętym pomiarem 25-26 maja 2007 r. wystąpiły opady o nieco większej wydajności: 10,9 i 9,4 mm, dla których obliczony wskaźnik EI_{30} był znacznie większy i wynosił odpowiednio: 63,2 i 38,8 $\text{MJ mm ha}^{-1}\text{h}^{-1}$. W obu przypadkach spłukiwanie miało przebieg rozproszony. Stok był zajęty pod uprawę pszenicy jarej. W maju 2007 roku nie stanowiła ona dobrej ochrony dla gleby, natomiast w lipcu 1987 znacznie ograniczyła erozję.

Wyniki pomiarów – straty gleby z pasa stoku o szerokości 1 m z obu eksperymentów zawiera tabela 2. Po dwóch niewielkich opadach w lipcu 1987 r. o łącznej sumie 15,2 mm straty gleby kształtowały się od 0,22 g (pomiar w granicach błędu wynikającego z opróżniania łapacza) do 4,23 g m^{-1} , przy średniej wartości z 10 łapaczy 2,37 g m^{-1} . Jeśli do obliczenia erozji gleby zostaną uwzględnione kolejno po 2 sąsiednie łapacze (szerokość pasa stoku 1 m) otrzymane wyniki pomiaru są wyraźnie mniej zróżnicowane, ale i wówczas błąd względny jest bardzo duży i wynosi $\pm 26\%$. Przy uwzględnieniu 3 sąsiednich łapaczy, czyli pasa stoku o szerokości 1,5 m, błąd wyniósł $\pm 15\%$. W kolejnym

Tabela 2. Zróznicowanie wyników pomiarów erozji gleby - eksperyment z 10 łapaczami; obliczenia z uwzględnieniem 1 łapacza oraz 2 i 3 sąsiednich

Table 2. Differentiation of soil erosion – measurements from 10 runoff collectors; calculations based on 1 collectors, 2 or 3 consecutive collectors

Nr łapacza No of collector	Erozja całkowita z pasa stoku o długości 47 m i szerokości 1 m Total erosion from belt of slope 47 m length and 1 m width [g]					
	1-15.07.1987			25-26.07.2007		
	Ilość chwytaczy - Number of collectors					
	1	2	3	1	2	3
1	3,73	-	-	26,4	-	-
2	2,8	3,27	-	24,9	25,65	-
3	0,6	1,7	2,38	34,6	29,75	28,63
4	4,23	2,42	2,54	25,4	30,00	28,30
5	0,4	2,32	1,74	28,1	26,75	29,37
6	2,76	1,58	2,46	21,4	25,95	25,77
7	1,85	2,31	1,67	31,3	27,55	27,73
8	0,22	1,04	1,61	27,1	29,20	27,40
9	3,53	1,88	1,87	23,8	24,25	26,60
10	3,6	3,57	2,45	30,6	26,00	26,37
Średnia - Average	2,372			27,36		
Odchyl. stand. Std. deviation	1,43	0,76	0,38	3,72	1,91	1,15
Współ. Zmienności [%] Variation coefficient [%]	60,2	31,9	15,9	13,60	7,01	4,18
Błąd względny δ_x Relative error [%]	± 54	± 26	$\pm 15,5$	$\pm 11,07$	$\pm 6,2$	$\pm 3,64$

powtórzeniu pomiarów w maju 2007 r. przy słabym rozwoju okrywy roślinnej i opadzie o większej wydajności i erozyjności otrzymane wartości strat gleby z poszczególnych łapaczy były znacznie mniej zróżnicowane. Średnia ilość materiału, jaka uległa erozji z pasa stoku o szerokości 1 m wyniosła 27,8 g, a ekstremalne wartości pomiaru to 21,4 i 34,6 g. Zarówno przy uwzględnieniu 1 jak i 2 czy 3 sąsiednich łapaczy błąd względny był mniejszy i wynosił odpowiednio $\pm 11\%$, $\pm 6\%$ i $\pm 4\%$. Można przypuszczać, że jest to zakres dokładności pomiaru. Wynika on zarówno ze sprawności łapacza jak i nierównomierności w przebiegu procesu na powierzchni stoku. Na podstawie przeprowadzonego eksperymentu można stwierdzić, że dużym błędem względnym w rzeczywistości odpowiadają niewielkie wartości strat gleby, mieszczące się w zakresie 1-3 g suchej masy materiału glebowego. Natomiast wraz ze wzrostem natężenia procesu błąd względny jest znacznie mniejszy. Zagadnienie dokładności pomiarów splukiwania rozproszonego wymaga dalszego rozpoznania w zróżnicowanych warunkach opadowych, okrywy roślinnej a także litologii.

Pomiary na poletkach o zróżnicowanej długości

Erozja gleby i przemieszczanie materiału glebowego po stoku, wzdłuż którego zmienia się nachylenie i kształt są uwarunkowane jego morfologią. Wpływ długości stoku i powierzchni zbiorczej na wielkość spływu i erozję gleby piasz-

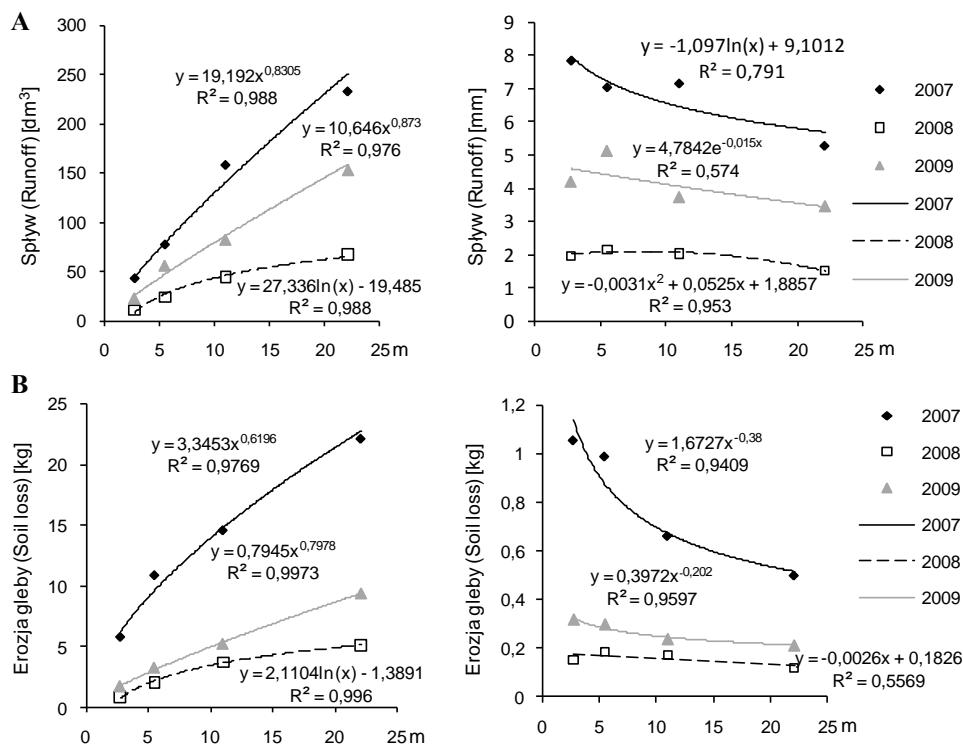
czystej analizowano na poletkach o różnej długości, wydzielonych z powierzchni stoku o prostym profilu i jednakowym nachyleniu 8° , utrzymywanych bez roślin.

Dla poszczególnych poletek obliczono całkowity i jednostkowy spływ powierzchniowy wód roztopowych i opadowych oraz erozję gleby w latach 2007-2009. Uwzględniając poletka o zróżnicowanej długości, należy zaznaczyć, że generalnie na krótszych poletkach notowano mniejszy powierzchniowy spływ wody (rys. 3A). Objętość spływu na krótszych poletkach w porównaniu do standardowego wg USLE była 1,6, 3 i prawie 6 razy mniejsza odpowiednio dla poletek o długości 11, 5,5 i 2,75 m. Spływ jednostkowy był najmniejszy na najdłuższym poletku (3,4 mm średnio rocznie), na pozostałych otrzymano podobne wartości (3,7-4,2 mm). Uwzględniając wszystkie cykle pomiarowe w każdym przypadku spływ jednostkowy był najmniejszy na poletku o długości 22,1 m. Największy spływ jednostkowy występował na poletkach o długości 2,75 m lub 5,5 m odpowiednio 16 i 15 razy oraz tylko 3-krotnie na poletku o długości 11 m. Największy spływ jednostkowy na poletku o długości 11 m wystąpił podczas opadu o największej erozyjności w całym 3-letnim okresie badań, tj. 5 lipca 2007 roku. Opad 5 lipca cechował się znaczą wydajnością wynoszącą 27,9 mm, czynnik erozyjności wyniósł $EI_{30}=211,4 \text{ MJ mm ha}^{-1}\text{h}^{-1}$, największe 15 minutowe natężenie opadu wyniosło $0,9 \text{ mm min}^{-1}$. W dwóch pozostałych przypadkach występowały typowe dla sezonu letniego opady od 5,2 do 15,8 mm, trwające od 30 do 80 minut. Ich 10-15 minutowe natężenie kształtowało się w zakresie $0,4\text{-}0,6 \text{ mm min}^{-1}$. We wszystkich tych 3 sytuacjach wystąpiło duże chwilowe natężenie opadu: 2,4 i 3,2 mm w ciągu 2 i 3 minut, a nawet 4,2 mm w ciągu 1 minuty (większego chwilowego natężenia opadu nie zarejestrowano w okresie badań).

Zróżnicowanie całkowitej erozji gleby jak i przeliczonej na jednostkę powierzchni z poszczególnych poletek kształtowało się podobnie jak w przypadku spływu. Wraz z długością poletka notowano większe straty gleby. Porównanie rocznej masy materiału odprowadzonego z poszczególnych poletek w latach 2007-2009 wskazuje na znaczenie długości stoku. Przy niewielkich natężeniach opadu jakimi cechowały się lata 2008 i 2009 całkowita erozja była wyraźnie większa na poletkach krótszych, do 11 m długości, dalszy wzrost długości poletka nie wpłynął znacząco na całkowitą erozję (rys. 3B). W 2007 roku, w którym wystąpiły deszcze o większym natężeniu, również większymi stratami gleby cechowały się wszystkie poletka: w stosunku do najkrótszego z kolejnych dłuższych (5,5 m, 11 m, 22,1 m) zostało zmyte odpowiednio 1,9, 2,5 i 3,8 razy więcej materiału glebowego. Jednostkowa erozja gleby była największa na mniejszych poletkach, przy czym 7-krotnie spośród wszystkich 39 pomiarów na poletku o długości 5,5 m. Tak było zarówno podczas spływu roztopowego (1 raz), opadów jesiennych (2 razy), jak i letnich opadów o różnej erozyjności (4 razy). Wydaje się, że decydujące znaczenie mogła mieć duża wilgotność gruntu.

Relację między objętością i całkowitą erozją gleby z długością poletka opisu-

ją funkcje potęgowe lub logarytmiczne o wysokim współczynniku korelacji ($0,98 < R^2 < 0,99$). Dla jednostkowego spływu i erozji gleby relacje z długością poletek są wyrażone różnymi funkcjami, współczynniki korelacji są słabsze i znacznie bardziej zróżnicowane od 0,56 do 0,96 (rys. 3).



Rys. 3. Zależności między całkowitym i jednostkowym spływem (A) oraz erozją całkowitą i na jednostkę powierzchni (B) a długością poletek w latach 2007-2009

Fig. 3. Relationships between total and unit runoff (A) and soil erosion (B) and length of plots in years 2007-2009

DYSKUSJA

Metoda pomiaru niewątpliwie ma istotne znaczenie w badaniach erozji gleby. Zarówno różne urządzenia pomiarowe jak i sposób ich instalacji na stoku oraz długość poletek testowych mają wpływ na wyniki pomiarów (Froehlich 1986, 1992, Loughran 1989, Klimczak 1992, Gil 1998, Bagarello, Ferro 2004). Ten wpływ jest trudny do określenia, ponieważ przebieg procesu w warunkach naturalnych jest zróżnicowany zarówno w skali niewielkich zlewni (Vandaele, Poesen 1995, Beuselinck i in. 1999, Steegen i in. 1998), jak również w skali pojedynczego stoku czy poletka (Froehlich 1992, Nearing i in. 1999, Bagarello, Fer-

ro 2004, Rejman, Usowicz 2002). Badania Froehlich (1992) z zastosowaniem znacznika (luminoforu) ukazują, jak zróżnicowana jest intensywność spłukiwania rozproszonego i długość drogi transportu w odniesieniu do zadarnionego pasa stoku o szerokości 42 m. Zainstalowane 20 worków Słupika wskazało na zróżnicowanie procesu w zakresie od 4 do ponad 16 g m⁻¹ erozji gleby i 12-84 l m⁻¹ spływu powierzchniowego. Długość drogi transportu wynosiła od 2 do ponad 8 m, wskazując na istnienie uprzywilejowanych stref, wzdłuż których następuje wzmożona dostawa wody i zwierzelin (Froehlich 1992, str. 176). Przeprowadzony w Udziejku eksperyment z 10 łapaczami umieszczonymi na stoku zajęтым pod uprawę zboża również ukazuje podobne zróżnicowanie w przebiegu erozji rozproszonej (tab. 2).

Pomiary przeprowadzone przez W. Froehlich (1992) czy J. Rejmana i B. Usowicza (2002) i J. Rejmana (2006) ukazują problem relacji między wielkością poletka testowego a jednostkową erozją gleby. Odwrotnie proporcjonalna zależność wskazuje, że obszar zasilania podczas rejestrowanych zdarzeń nie obejmował całej powierzchni poletka, a przeważnie tylko jego część. Długość drogi spływu i spłukiwania zmienia się dynamicznie z opadu na opad (Kirbky 1978, Knapp 1986, Allen 2000). Według W. Froehlich (1982, 1992) utrudnia to określenie natężenia procesu w odniesieniu do powierzchni powyżej przekroju pomiarowego a materiał glebowy zgromadzony w chwytaczach rozmieszczonych na stoku, czy u wylotu poletka informuje głównie o jego ilości odprowadzanej poza stanowisko pomiarowe. Nie odzwierciedla to zwykle wielkości erozji jednostkowej, gdyż nie jest znana rzeczywista powierzchnia zbiorcza, podlegająca zmianie w zależności od intensywności opadu, nachylenia stoku, rodzaju użytkowania oraz podłoża i jego wilgotności.

Pomiary na poletkach testowych o różnej długości pokazują, że zazwyczaj jednostkowe wartości zarówno spływu jak i erozji gleby są największe na poletkach najmniejszych. Wraz ze zwiększeniem powierzchni poletek następuje redukcja spływu, również część erodowanego materiału glebowego na dłuższych poletkach ulega depozycji szczególnie w wyniku spłukiwania rozproszonego (Rejman, Usowicz 2002). W niektórych przypadkach może natomiast następować koncentracja spływu i rozwój żłobin (Kirbky 1978, Nearing 1998, Knappen i in. 2007). Na brak takiej prostej zależności wskazują również przeprowadzone pomiary (rys. 3). E. Gil (1998) na podstawie badań na poletkach o długości 2, 4, 8, 16 i 32 m, wykazał, że wielkość spływu i spłukiwania nie jest wprost proporcjonalna do długości stoku. Według niego relację dla spływu najlepiej opisuje funkcja logarytmiczna, natomiast dla erozji gleby funkcja wykładnicza, co odzwierciedla różnice pomiędzy przebiegiem obu procesów. Wraz z długością stoku spłukiwanie maleje w mniejszym zakresie niż spływ powierzchniowy. Wartości jednostkowe spływu i spłukiwania w relacji do długości stoku maleją i najlepiej wyrażone są funkcją logarytmiczną. Wszystkie zależności cechują wysokie współczynniki korelacji (0,98-0,99).

Pomiary na wielu mikropoletkach (0,16 m² i 0,04 m²) wskazały, że straty gleby były znacznie bardziej zróżnicowane, od 5 do 10 razy w porównaniu do spływu (Bagarello, Ferro 2004). Dwukrotne zwiększenie długości mikropoletka (z 0,2 m do 0,4 m) powodowało nieco mniejszą redukcję spływu niż splukiwania, odpowiednio o 2,6 i 2,8. Przyczyną tej różnicy wg autorów może być tendencja do tworzenia się mikroźłobinek na mikropoletkach, udział erozji międzyżłobinowej w całkowitej erozji z tych poletek był niewielki i wynosił 0,1-7,1%. Badania przeprowadzone na glebie piaszczystej w Udziejku na poletkach o długości 2,75, 5,5, 11 i 22 m również wskazują na mniejszą redukcję spływu jednostkowego (o 1,4 na 8-krotnie dłuższym poletku) niż splukiwania (o 2,9). W przypadku spływu na 2 i 4-krotnie dłuższych poletkach następował nieznaczny jego wzrost w stosunku do najkrótszego poletka (rys. 3A). Badania E. Gila (1998) na poletkach o wymiarach od 2 do 32 m wskazują natomiast, że wraz z długością stoku większej redukcji ulega spływ powierzchniowy niż splukiwanie. Przy zwiększeniu długości poletek do 32 m różnice w redukcji spływu powierzchniowego i splukiwania są znaczne i wynoszą 5,3 i 1,9.

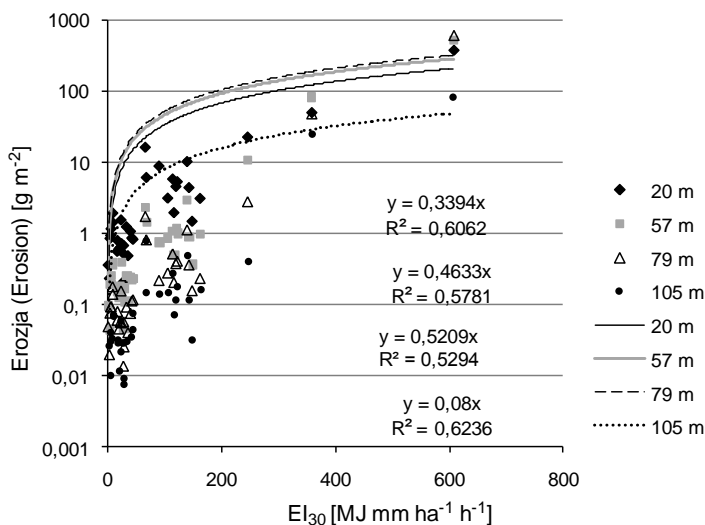
Analiza danych z pomiarów w Bogucinie na Płaskowyżu Nałęczowskim prowadzonych na poletkach o zróżnicowanej długości pozwoliła na stwierdzenie, że odległość przemieszczania cząstek jest zbliżona do długości poletka, na którym wyznaczona została maksymalna wartość erozji na jednostkę powierzchni (Rejman, Usowicz 2002, Rejman 2006). Właśnie ta wielkość erozji jest wg autorów erozją rzeczywistą, większą od wyznaczonej na podstawie standardowego poletka USLE.

W obszarze młodoglacjalnym przeważają stoki krótkie, o zróżnicowanym nachyleniu, najczęściej wypukło-wklęsłe. Formowanie się spływu wody oraz przebieg transportu materiału po stoku jest modyfikowany jego kształtem, dlatego odniesienie wyników z pomiarów erozji gleby na wydzielonych poletkach na stoki o zróżnicowanej morfologii nie jest możliwe w sposób bezpośredni. Dobrze to ukazują dane dla piaszczystego stoku w Udziejku. W okresie 2007-2009, w którym występowały opady o niewielkiej erozyjności zdecydowanie przeważał krótki transport materiału glebowego, głównie do górnej części odcinka wklęsłego, zaznaczyła się też tendencja do depozycji na całym wklęsłym segmencie stoku (rys. 1B).

Podczas zdarzeń o dużym natężeniu erozją objęty był prawie cały stok. Taką sytuację dobrze ilustruje rysunek 4, na którym zaznaczono wartości erozji gleby w relacji do czynnika EI₃₀ dla poszczególnych stanowisk pomiarowych wzdłuż stoku w Udziejku. Uwzględniono pomiary z okresu 1998-1999 (Smolska 2005) oraz 2007-2010 wraz z dwoma zdarzeniami ekstremalnymi (22.06.1999 i 17.05.2010). Wówczas erozja zwiększała się wraz z długością stoku i część materiału gromadzonego przez kilka lat na wklęsłym segmencie stoku uległo przemieszczeniu ku jego podstawie lub dalej na dno doliny. Środkowa część stoku (stanowisko 2 i 3), gdzie notowano najbardziej zróżnicowane wartości

spłukiwania, cechuje się znacznym potencjałem erozyjnym (najwyżej położone krzywe regresji na rys. 4).

Pomiary na stoku w Udziejku, pokazały zarówno zróżnicowanie procesu w zależności od natężenia opadów jak i jego przybliżony rozkład przestrzenny (rys. 2BC). Zestawione dane dla okresu, kiedy stok i poletko testowe były tak samo użytkowane (mieszanka zbóż - 2007 i owies - 2009) wskazują na podobną zmienność intensywności erozji (tab. 1). Mimo niewątpliwie mniejszej dokładności pomiaru, wyniki badań prowadzone niewielkimi łapaczami bez wydzielonej fizycznie powierzchni zbiorczej pozwalają na uzyskanie informacji o kierunku i tempie współczesnego kształtowania stoków (Gerlach 1976). Mogą one być przydatne w modelowaniu erozji gleby, przede wszystkim wskazywać strefy stoku pełniące funkcje transportowe czy depozycyjne.



Rys. 4. Zależność pomiędzy erozją gleby a erozywnością opadów deszczu (EI_{30}) dla stoku w Udziejku Górnym z uwzględnieniem długości i kształtu stoku: stok wypukły (20 m), stok wypukło-wklęsły (57 m, 79 m, 105 m)

Fig. 4. Relationship between unit soil erosion and rainfall erosivity (EI_{30}) for Udziejek Górny slope with respectively length and morphology of slope: convex (20 m) convex-concave (57 m, 79 m, 105 m)

WNIOSKI

Przeprowadzone pomiary strat gleby na poletku testowym oraz w bezpośrednim sąsiedztwie poletka z zastosowaniem łapaczy typu zmodyfikowanych worków Słupika oraz na stoku eksperymentalnym z rozmieszczeniem łapaczy wg metody Gerlacha pozwoliły na porównanie uzyskanych wyników. Pomiary

prowadzono na piaszczystym stoku w tym samym okresie oraz przy takim samym użytkowaniu. Całkowite roczne wartości erozji gleby były nieco niższe w przypadku pomiarów prowadzonych łapaczami w porównaniu do otrzymanych metodą poletkową. W przypadku zboża różnica była niewielka, natomiast w uprawie ziemniaków niższa o 25%.

Uzyskane wyniki pomiaru erozji gleby wzdłuż stoku wskazują, że jego morfologia miała istotne znaczenie w przebiegu spłukiwania. W stosunku do pomiarów poletkowych, wartości erozji w górnej wypukłej części stoku były wyższe w każdych warunkach opadowych, natomiast w środkowej, nieco wklęsłej notowano zazwyczaj mniejsze wartości erozji niż na wydzielonym poletku, przy czym w okresie badań była to strefa z przewagą depozycji. Należy podkreślić, że zarówno na wydzielonym poletku jak i na stoku obserwowano podobną zmienność procesu w okresie badań.

Analiza błędu pomiaru wynikającego ze sprawności stosowanego łapacza jak i lokalnego zróżnicowania w przebiegu spływu i spłukiwania na stoku wskazała, że jest to istotne zagadnienie i nie powinno być pomijane w badaniach erozji gleby. W porównaniu do całkowitej erozji gleby, obliczonej jako wartość średnia z 10 łapaczy o szerokości wlotu 0,5 m, przy zastosowaniu 2 lub 3 łapaczy na 1 stanowisku pomiarowym zróżnicowanie wyników wyniosło odpowiednio ± 26 i $\pm 15\%$ dla opadów o małej erozyjności ($EI_{30} < 20 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$), dla opadów o większej erozyjności było znacznie mniejsze i wyniosło $\pm 6\%$ i $\pm 4\%$.

Literatura

- Allan P.A., 2000 (polska edycja), *Procesy kształtujące powierzchnię Ziemi*, Wyd. PWN.
- Bagarello V., Ferro V., 2004, Plot-scale measurements of soil erosion at the experimental area of Sparacia (Southern Italy), *Hydrol. Process.* 18, 141–157.
- Ber A., 1967, *Szczegółowa mapa geologiczna Polski 1:50 000*, ark. Jeleniewo. Inst. Geol., Warszawa.
- Beuselinck L., Govers G., Steegen A., Hairisime P.B., Poesen J., 1999, Evaluation of the simple settling theory for predicting sediment deposition by overland flow, *Earth Surf. Process. Landforms* 24, 41–49.
- Froehlich W., 1986, Ekstrapolacja wskaźników denudacji w świetle mechanizmów erozji i transportu fluwialnego w zlewniach fliszowych Karpat, *Przegl. Geogr.* 58, 1–2, 89–98.
- Froehlich W., 1992, Mechanizm erozji i transportu fluwialnego w zlewniach beskidzkich, [w:] A. Kotarba (red.) System denudacyjny Polski, *Prace Geogr. PAN IGiPZ* 155, 171–189.
- Gerlach T., 1966, *Współczesny rozwój stoków w dorzeczu górnego Grajcarka (Beskid Wysoki – Karpaty Zachodnie)*, Prace Geogr. IG PAN, 52, 124 s.
- Gerlach T., 1976, *Współczesny rozwój stoków w polskich Karpatach fliszowych*, Prace Geogr. IG PAN, 122, 116 s.
- Gil E., 1998, Wpływ długości stoku na rozmiary spływu powierzchniowego i spłukiwania (badania eksperymentalne), *Zintegrowany Monitoring Środowiska*, 105–112.

- Kirby M. J. (red), 1978, *Hillslope hydrology*, Willey & Sons, Chichester.
- Knappen A., Poesen J., Govers G., Gyssels G., Nachtergaele J., 2007, Resistance of soils to concentrated flow erosion: a review, *Earth Sci. Rev.* 80, 75–109.
- Klimczak R., 1992, Pomiaru spłukiwania i spływu powierzchniowego na obszarach nizinnych – uwagi metodyczne, *Bad. Fizjogr. nad Polską Zach.* 43, 23–45.
- Klimczak R., 1993, Spłukiwanie na obszarach o zróżnicowanym użytkowaniu – przebieg i rola we współczesnym środowisku morfogenetycznym (zlewnia Młyńskiego Potoku, Pomorze Zachodnie, [w:] A. Kostrzewski (red.) *Geoekosystem obszarów nizinnych*, Kom. Nauk. PAN „Człowiek i środowisko” Zesz. Nauk. 6, 61–77.
- Loughran R. J., 1989, The measurement of soil erosion, *Progress in Physical Geogr.* 13, 217–233.
- Nearing M.A., 1998, Why soil erosion models over-predict small soil losses under-predict large soil loss, *Catena* 32, 15–22.
- Nearing M.A., Govers G., Norton L.D., 1999, Variability in soil erosion data from relocated plots, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63, 1829–1835.
- Rejman J., 2006, *Wpływ erozji wodnej i uprawowej na przekształcenie gleb i stoków lessowych*, Acta Agrophisica 136, 90 s.
- Rejman J., Usowicz B., 2002, Evaluation of soil-loss contribution areas on loess soils in southeast Poland, *Earth Surf. Process. Landforms* 27, 1415–1423.
- Smolska E., 1992, Rola spłukiwania w dostawie materiału do transportu fluwialnego w obszarze młodoglacjalnym (na przykładzie górnej Szeszupy). Wstępne wyniki badań, [w:] A. Kostrzewski (red.) *Geoekosystem obszarów nizinnych*, Kom. Nauk. PAN „Człowiek i środowisko” Zesz. Nauk. 6, Wrocław-Warszawa-Kraków, 159–165.
- Smolska E., 2005, *Znaczenie spłukiwania w modelowaniu stoków młodoglacjalnych (na przykładzie Pojezierza Suwalskiego)*, Wyd. WGRS UW Warszawa, 146 s.
- Smolska E., 2002, The intensity of soil erosion in agricultural areas in North-Eastern Poland, *Landform Analysis* 3, 25–33.
- Słupik J., 1973, *Zróżnicowanie spływu powierzchniowego na fliszowych stokach górskich*, Dokum. Geogr. IGiPZ PAN, 2, 118 s.
- Słupik J., 1981, *Rola stoku w kształtowaniu odpływu w Karpatach fliszowych*, Prace Geogr. IG PAN 142, 98 s.
- Stopa-Boryczka, M., Martyn D., 1985, *Klimat*, [w:] *Województwo Suwalskie – studia i materiały 1*, OBN Białystok i IGiPZ PAN, Warszawa.
- Steege A., Govers G., Beuselinck L., Nachtergaele J., Takken I., Poesen J., 1998, Variations in sediment yield from an agricultural drainage basin in central Belgium, Modelling Soil erosion, [w:] *Sediment Transport and Closely Related Hydrological Processes (Proceeding of Symposium held at Vienna, July 1998)*, *IAHS Publ.* 249, 177–185.
- Rodzic J., Stępniewski K., 2005, Spłukiwanie na zróżnicowanych litologicznie użytkowanych rolniczo stokach Roztocza Środkowego, [w:] A. Kotarba, K. Krzemień, J. Święchowicz (red.), *Współczesna ewolucja rzeźby Polski, VII Zjazd Geomorfologów Polskich*, Kraków, 388–401.
- Święchowicz J., 2002, *Współdziałanie procesów stokowych i fluwialnych w odprowadzaniu materiału rozpuszczonego i zawieszony ze zlewni pogórskiej*, Instytut Geografii UJ, Kraków, 150 s.
- Vandaele K., Poesen J., 1985, Spatial and temporal patterns of soil erosion rates in an agricultural catchment, Central Belgium, *Catena* 25, 213–226.