ACTA AGROPHYSICA

Jerzy Rejman

WPŁYW EROZJI WODNEJ I UPRAWOWEJ NA PRZEKSZTAŁCENIE GLEB I STOKÓW LESSOWYCH

136

Instytut Agrofizyki
im. Bohdana Dobrzańskiego PAN
w Lublinie

Rozprawy i Monografie
2006 (3)

Komitet Redakcyjny

Redaktor Naczelny
Ryszard T. Walczak, czł. koresp. PAN

Zastępca Redaktora Naczelnego
Józef Horabik

Sekretarz Redakcji
Wanda Woźniak

Rada Redakcyjna
Tomasz Brandyk, czł. koresp. PAN – przewodniczący

Ryszard Dębicki
Bohdan Dobrzański
Danuta Drozd
Franciszek Dubert
Tadeusz Filipek
Józef Fornal
Jan Gliński, czł. rzecz. PAN
Grzegorz Józefaciuk
Eugeniusz Kamiński
Andrzej Kędziora
Tadeusz Kęsik
Krystyna Konstankiewicz
Janusz Laskowski
Jerzy Lipiec
Piotr P. Lewicki
Stanisław Nawrocki, czł. rzecz. PAN
Edward Niedźwiecki
Viliam Novák, Słowacja
Josef Pecen, Czechy
Tadeusz Przybysz
Stanisław Radwan, czł. koresp. PAU
Jan Sielewiesiuk
Witold Stępniewski
Zbigniew Ślipek
Bogusław Szot

Opiniowali do druku
Prof. dr hab. Janusz Nowicki
Prof. dr hab. Stanisław Pałys

Adres redakcji
Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, ul. Doświadczalna 4, P.O. Box 201
20-290 Lublin, tel. (0-81) 744-50-61, e-mail: w.wozniak@demeter.ipan.lublin.pl
http: //www.ipan.lublin.pl

Praca wykonana w ramach projektu badawczego 6P06S 003 21
finansowanego przez Komitet Badań Naukowych w latach 2001-2004

Publikacja indeksowana przez
Polish Scientific Journals Contents – Life Sci. w sieci Internet
pod adresem http://psjc.icm.edu.pl

©Copyright by Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, Lublin 2006

ISSN 1234-4125

Wydanie I. Nakład 200 egz. Ark. 7,6
Skład komputerowy: Jerzy Rejman, Wanda Woźniak
Druk: Drukarnia *ALF-GRAF*, ul. Kościuszki 4, 20-006 Lublin

SPIS TREŚCI

1. WSTĘP I CEL PRACY 5
2. PRZEGLĄD METOD BADAWCZYCH 7
3. METODYKA I ZAKRES BADAŃ WŁASNYCH 12
3.1. Charakterystyka obiektu 12
3.2. Ocena erozji i akumulacji na podstawie rekonstrukcji budowy profilu gleby 17
3.3. Rozbryzg gleby 19
3.4. Spływ powierzchniowy i zmyw gleby 20
3.5. Przemieszczenie gleby pod wpływem zabiegów uprawowych 22
4. WYNIKI I DYSKUSJA 24
4.1. Ocena erozji i akumulacji na podstawie rekonstrukcji budowy profilu glebowego 24
4.2. Rozbryzg gleby 27
4.2.1. Wielkość rozbryzgu i odległość jego przemieszczenia 27
4.2.2. Zróżnicowanie rozbryzgu wzdłuż stoku 32
4.2.3. Odporność gleby na rozbryzg 34
4.2.4. Prognozowanie rozbryzgu na podstawie parametrów opadu 36
4.2.5. Rozbryzg i zmyw gleby 42
4.3. Erozja wodna na poletkach utrzymywanych w czarnym ugorze 43
4.3.1. Spływ powierzchniowy i zmyw gleby 43
4.3.2. Odległość przemieszczenia spływu i zmywu gleby 50
4.3.3. Interpretacja danych pomiarowych w oparciu o maksymalny jednostkowy zmyw gleby 51
4.3.4. Zmyw gleby a parametry opadu 56
4.4. Erozja wodna na poletkach z roślinami uprawnymi 63
4.5. Przemieszczenie gleby pod wpływem zabiegów uprawnych 66
4.5.1. Podorywka 66
4.5.2. Kultywatorowanie i bronowanie 68
4.6. Porównanie wielkości erozji wodnej i uprawowej 70
5. PODSUMOWANIE 73
6. WNIOSKI 77
7. PIŚMIENNICTWO 79
8. STRESZCZENIE 88
9. SUMMARY 89

1. WSTĘP I CEL PRACY

Erozja gleby jest procesem fizycznym polegającym na odrywaniu cząstek gleby od jej powierzchni w wyniku działania wody bądź wiatru i przenoszeniu ich do miejsc sedymentacji. W ostatnich latach definicja ta uległa rozszerzeniu o procesy bezpośrednio związane z rolniczą działalnością człowieka. Zaliczane są do nich erozja uprawowa (przemieszczanie gleby wskutek pracy narzędzi i maszyn rolniczych) oraz erozja związana z wynoszeniem cząstek gleby wraz ze zbiorem roślin okopowych (tzw. „harvest erosion").

Zgodnie z definicją obszar oddziaływania erozji na środowisko dotyczy zarówno miejsca wystąpienia zjawiska (np. pola uprawnego) jak i miejsca dostarczenia sedymentu (lokalne obniżenia terenu, rowy przydrożne i drogi, cieki wodne). Na obszarze pola uprawnego wieloletnia erozja powoduje przekształcenie budowy profilu glebowego [17,22,23,48,55,62,64,72,75,79,82,89,95,152,167], prowadząc do zróżnicowania podstawowych właściwości warstwy ornej gleby związanych ze zmianą składu granulometrycznego, ilości i jakości związków próchnicznych [72,151,152], a w końcowym efekcie do obniżenia produktywności gleby [5,8,11,67,98,99,139, 163]. Najszybciej procesowi degradacji wskutek erozji podlegają gleby płytkie, takie jak rędziny oraz inicjalne gleby górskie [44].

Pierwszą próbę wyznaczenia zasięgów obszarów potencjalnego zagrożenia erozją w Polsce przeprowadziła Reniger [119]. Do chwili obecnej jedyną informacją odnośnie przestrzennej skali zagrożenia dla całego obszaru Polski stanowią mapy prognostyczne opracowane przez Instytut Uprawy i Nawożenia Gleb w Puławach. Podstawę metodyki przyjętej przez Annę i Czesława Józefaciuków [59] stanowi wydzielenie głównych czynników erozyjnych (rzeźba terenu – 5 klas, podatność gleby na erozję – 5 klas, opad – 2 klasy) i przypisanie im pewnych wartości w oparciu o obserwacje oraz zdobyte doświadczenie. Następnie uszeregowane informacje analizuje się w sposób krzyżowy, wyznaczając odpowiednie stopnie zagrożenia. Zgodnie z tą klasyfikacją 29,8% gleb Polski jest zagrożonych przez erozję wodną (w tym 13,2% – w stopniu średnim i silnym). Obszary gór i pogórzy, pas wyżyn środkowopolskich oraz w nieco mniejszym stopniu pojezierza i pobrzeża zaliczane są do najbardziej zagrożonych.

Potencjalnie największą podatnością na procesy erozyjne charakteryzują się gleby wytworzone z lessów. Wynika to z dużego udziału w ich składzie granulometrycznym frakcji pyłu, małej zawartości iłu koloidalnego oraz próchnicy (poza czarnoziemami). Zagrożenie erozyjne obszarów lessowych osłabiają łagodniejsze spadki terenu oraz mniejsze opady w porównaniu do rejonów podgórskich i górskich.

Określenie tempa przemian środowiska glebowego nabiera szczególnego znaczenia wobec kolejnej próby przygotowania Dyrektywy Ochrony Gleby (Soil Protection Act), podjętej przez Unię Europejską. Informacje na temat bieżącego stanu prac nad tym zagadnieniem są dostępne na stronie internetowej (http:/europa.eu.int/comm /environment/soil). Erozja jest zaliczana do głównych czynników odpowiedzialnych za degradację gleb w terenach urzeźbionych, stąd poznanie mechanizmów procesów oraz ilościowe określenie jej natężenia nabiera szczególnego znaczenia. Nadal jednak podstawowym problemem jest niedoskonałość stosowanych polowych metod pomiarowych, które powinny uwzględniać dynamiczny charakter procesów erozji.

Pomimo wielu lat badań nad erozją wodną, nawet początkowa faza tego procesu, rozbryzg (masa gleby oderwana przez krople deszczu od powierzchni gleby), pozostaje rozpoznany jedynie w niewielkim zakresie. Należy nadmienić, że dotychczas nie opracowano modelu, który umożliwiłby określenie wielkości rozbryzgu w warunkach opadów naturalnych. Ustalone dotychczas zależności powstawały w oparciu o badania z symulatorami opadów i nie były weryfikowane w warunkach opadów, charakteryzujących się zmienną intensywnością. Duże trudności stwarza też ocena wielkości masy materiału glebowego przenoszonego wskutek erozji wodnej. Powszechnie przyjęta metodyka oparta o pomiary na poletkach o jednakowej długości nie jest dostosowana do analizy pojedynczych zdarzeń erozyjnych z uwagi na stałą powierzchnię zbiorczą (wielkość poletka). Ogranicza to możliwość wykorzystania wyników pomiarów do weryfikacji modeli uwzględniających elementy opisu fizycznego w procesie erozji. Do analizy pojedynczych zdarzeń erozyjnych, w jednej z wcześniejszych prac, zaproponowano pomiary prowadzone w układzie poletek o zróżnicowanej długości, a także interpretację danych w oparciu o maksymalną wartość jednostkową erozji oraz efektywną odległość przemieszczenia gleby i spływu powierzchniowego [115]. Jednak metoda ta wymaga dalszego doskonalenia pod względem sposobu interpretacji uzyskanych wyników. Rozpoznanie tych elementów (rozbryzgu, spływu i zmywu gleby) w istotny sposób poszerzy stan wiedzy o erozji wodnej, umożliwiając weryfikację założeń teoretycznych modeli prognozujących pojedyncze zdarzenia erozyjne.

W ostatnich latach dużą uwagę w literaturze przedmiotu poświęca się ocenie przemieszczania gleby w wyniku zabiegów uprawowych, głównie wykonywania orki. Badania nad tym zagadnieniem były prowadzone w Polsce w latach pięćdziesiątych ubiegłego wieku. Od tego czasu zaszły znaczne zmiany związane z postępem technologicznym w zakresie stosowanych ciągników i narzędzi rolniczych. Koniecznością staje się ponowne przeprowadzenie oceny omawianych zjawisk we współczesnych warunkach gospodarowania. Niesłychanie istotne jest więc

ustalenie funkcji jaką sprawuje erozja wodna i uprawowa w przekształcaniu przestrzeni rolniczej położonej w terenach urzeźbionych. Poznanie udziału obu wyżej wymienionych form umożliwi bardziej efektywny dobór zabiegów i działań ograniczających erozję gleb.

Głównym celem pracy było określenie wpływu erozji wodnej oraz uprawowej na przekształcenie pokrywy glebowej stoków lessowych z jednoczesną oceną udziału obydwu form w procesie przemieszczania gleby na stokach o zróżnicowanej ekspozycji, spadku i długości. Jako zamierzenie dodatkowe przyjęto uzupełnienie luk w metodyce analizy procesu erozji wodnej, ustalenie czynników wpływających na samo zjawisko oraz jego parametry.

Cel główny realizowano poprzez następujące cele cząstkowe:

- ustalenie wielkości przemieszczanej i akumulowanej masy glebowej na stokach zlewni w trakcie całego okresu ich użytkowania rolniczego (na podstawie oceny stanu zerodowania gleby i rekonstrukcji budowy jej profili);
- określenie wielkości erozji wodnej w aktualnych warunkach gospodarowania z uwzględnieniem rozbryzgu, spływu powierzchniowego oraz zmywu gleby (w tym: opracowanie modelu prognozującego rozbryzg na glebie pozbawionej okrywy roślinnej, opracowanie metody analizy danych pomiarowych spływu i zmywu gleby dla pojedynczych zdarzeń erozyjnych, ustalenie czynników wpływających na erozję i jej parametry oraz wyznaczenie wielkości erozji w okresie wegetacji roślin uprawnych i dla gleby pozbawionej okrywy roślinnej);
- określenie natężenia erozji uprawowej pod wpływem wybranych zabiegów agrotechnicznych (podorywka, kultywatorowanie połączone z bronowaniem);
- porównanie wielkości erozji wodnej i uprawowej oraz określenie ich udziału w przekształceniu gleb badanych stoków podczas ich rolniczego użytkowania.

2. PRZEGLĄD METOD BADAWCZYCH

Pierwszą próbę oceny ilościowej procesów erozji na terenie Polski podjął jeszcze przed II wojną światową Stanisław Bac [7]. Porównał on szczegółowe plany geodezyjne majątku w Dublanach (okolice Lwowa – obecnie Ukraina) pochodzące z lat 1882 i 1925. Obliczone przez Baca obniżenia wierzchowin i zboczy lessowych w ciągu 43 lat dochodziło miejscami do 25 cm, zaś średnia roczna wielkość erozji wyniosła około 5 mm (63 $Mg \cdot ha^{-1}$). Po drugiej wojnie światowej podobne badania kontynuowano na terenach lessowych Wyżyny Lubelskiej, określając średnie roczne obniżenie wierzchowin i zboczy (analizowane na podstawie zmian profilu niwelacyjnego) na 4,7-5,8 mm [83] oraz 2,0-5,2 mm [101]. Na zbli-

żony zakres wartości erozji wskazują badania z wykorzystaniem metod izotopów radioaktywnych (^{137}Cs) przeprowadzone przez Froehlicha [36] w rejonie Beskidu Niskiego (4,0 mm) oraz Zgłobickiego [172] w zachodniej części Wyżyny Lubelskiej (2,0-7,7 mm). Ocena natężenia erozji przeprowadzona metodami przekrojów niwelacyjnych oraz izotopów radioaktywnych obejmuje łączne oddziaływanie wszystkich form erozji (wodnej, wietrznej, uprawowej, związanej ze zbiorem roślin okopowych). W celu opracowania najbardziej skutecznych metod ochrony gleby przed erozją konieczne jest jednak określenie natężenia poszczególnych jej form.

Ocenę wielkości erozji wodnej można prowadzić po wystąpieniu opadów ekstremalnych na podstawie pomiarów powstałych dużych form erozyjnych (żłobiny, kanały, wąwozy) oraz obszarów akumulacji sedymentu [6,65,81,122,136,146,154]. Opady te, choć powodują wyraźne przekształcenia geomorfologiczne, występują sporadycznie i są ograniczone do stosunkowo małych pod względem zajmowanego obszaru powierzchni. Z uwagi na nieliczną sieć posterunków i stacji meteorologicznych, bardzo często przy wystąpieniu tego typu zdarzeń nie można określić tak podstawowej informacji jaką jest suma opadu. Prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzeń ekstremalnych na obiektach z pomiarem ciągłym (oprzyrządowane zlewnie i poletka) jest znacznie mniejsze i w dużej mierze zależy od czasu prowadzenia pomiarów. Zaletą tych badań jest zapis parametrów opadu z jednoczesną oceną wielkości erozji. Metodę pośrednią stanowią systematyczne pomiary form erozyjnych w zlewniach, w których prowadzony jest monitoring opadów [84,85,100].

Podstawową metodą oceny wielkości erozji stanowią badania prowadzone przy pomocy poletek wyposażonych w instalacje zbiorcze spływu powierzchniowego. Na świecie tradycja tych badań jest bardzo długa i sięga roku 1917, przy czym największą liczbę pomiarów przeprowadzono w latach 1930-42 [66]. Obecnie stosowana metodyka w dużej mierze oparta jest o wieloletnie doświadczenia amerykańskie (ponad 10000 rocznych pomiarów poletkowych z różnych stacji), które doprowadziły do opracowania modeli empirycznych: Uniwersalnego Równania Strat Gleby (Universal Soil Loss Equation -USLE) [165] i Poprawionego Uniwersalnego Równania Strat Gleby (Revised Universal Soil Loss Equation – RUSLE) [118]. Podstawowym elementem, na którym oparta jest metodyka tych modeli jest poletko standardowe (o długości 22,1 m i szerokości 1,97 m) wyposażone w instalacje zbierające spływ powierzchniowy, wyodrębnione od pozostałej powierzchni pola oraz zlokalizowane na skłonie o nachyleniu 9%. Jest ono utrzymywane w czarnym ugorze i uprawiane wzdłuż kierunku spadku. Z podsumowania przedstawionego przez Laflena i Moldenhauera [66] nie wynika jednak, że takie poletka istniały w rzeczywistości, a podawana wielkość i nachylenie poletka standardowego są wartością średnią z wielu stacji badawczych. Wieloletnie badania doprowadziły do

opracowania szeregu równań regresji wieloczynnikowej, wiążącej poszczególne elementy procesu erozji (m.in. wielkości masy zmytej gleby z parametrami opadu, właściwościami gleby, długością i nachyleniem zbocza). Zależności te wyznaczono na podstawie danych zebranych w środkowo-wschodniej części USA. W miarę rozpowszechniania technologii USLE na pozostałe rejony USA napotkano trudności z prognozowaniem wielkości erozji, które związane były przede wszystkim z zależnością opisującą zmyw gleby w funkcji długości i nachylenia zbocza. Przeprowadzone eksperymenty doprowadziły do opracowania zmodyfikowanych funkcji, generalnie zmniejszających wielkość prognozowanej erozji wraz ze wzrostem długości stoku [91,118].

Pierwotnie badania amerykańskie realizowano głównie pod kątem praktycznym, poszukując zależności między natężeniem erozji wodnej od różnego sposobu użytkowania gleby, doboru roślin uprawnych i zabiegów przeciwerozyjnych. Tak ukierunkowany cel wpływał na wybór metodyki, która powinna uwzględniać interes końcowego odbiorcy – farmera, być dla niego zrozumiała oraz umożliwiać ekonomiczną ocenę przyjętego systemu gospodarowania z uwzględnieniem skutków zachodzącej erozji wodnej. Ocena natężenia tego procesu musiała zatem dotyczyć co najmniej jednego okresu wegetacyjnego roślin oraz umożliwiać bezpośrednie porównanie wpływu różnych roślin i sposobów uprawy roli. Ten ostatni warunek spełniało prowadzenie badań na poletkach o jednakowej długości. Podstawowym elementem czasu rozważanym w modelu USLE jest okres jednego roku. Jedyny czynnik równania, analizowany w krótszym przedziale czasowym stanowi okrywa roślinna (3 etapy rozwoju). Z uwagi na duże zróżnicowanie parametrów oddziałujących na erozję w ciągu roku, poprawiona wersja USLE, czyli model RUSLE uwzględnia analizę krótszych elementów czasowych (okresy miesięczne oraz 15-dniowe).

Doświadczenia amerykańskie powstałe przy opracowaniu USLE sprawiły, że badania terenowe prowadzono zwykle na poletkach o tej samej długości, a do przeliczania wielkości erozji w relacji do powierzchni całego pola stosowano zależności z wyżej wymienionego modelu. Podstawową wadą tego rozwiązania jest stała powierzchnia zbiorcza (równoważna całkowitej powierzchni obiektu doświadczalnego i niezależna od opadu). Bezpośrednią konsekwencją braku możliwości wyodrębnienia rzeczywistej powierzchni zbiorczej jest zaniżanie wielkości jednostkowych erozji w przypadku gdy rzeczywista powierzchnia zbiorcza różni się od powierzchni poletka. Wprawdzie w modelach USLE i RUSLE do skorygowania zmierzonych wielkości erozji (i zarazem ich dopasowania do „rzeczywistej" powierzchni zbiorczej) jest wykorzystywany wskaźnik długości i nachylenia zbocza LS, to jednak jest to zależność empiryczna opracowana w warunkach opadów występujących w USA. Poletkowe badania erozji wykonywane są w wielu krajach europejskich na obiektach o różnej wielkości, dostosowanej do topografii terenu i kształtu pola [10,18,31,53,69,77,96,

110,126,129,169]. Prowadząc te badania należy jednak pamiętać, że obejmują one jedynie fragment procesów erozyjnych występujących w zlewni [57].

Podczas gdy modele USLE i RUSLE służą do prognozowania wielkości masy zmytej gleby w skali roku lub miesiąca, celem modeli nowej generacji [26,30,33, 49,50,54,60,87,132] jest prognozowanie erozji wodnej podczas pojedynczych zdarzeń erozyjnych. Obecnie główną trudność stanowi opracowanie metodyki doświadczalnej, która pozwoliłaby weryfikować ich podstawowe założenia teoretyczne, często oparte o równania transportu materiału w ciekach wodnych [1]. W tym celu wykorzystywane są głównie badania prowadzone z symulatorami opadów w warunkach laboratoryjnych [1,2,12,19,32,45,51,52]. Ich przydatność do weryfikacji teoretycznych założeń modeli jest ograniczona ze względu na trudności z przeniesieniem uzyskanych wyników z laboratorium do warunków bardziej złożonych, występujących w skali pola (zlewni). Konieczne jest zatem opracowanie polowej metodyki pomiarowej, umożliwiającej analizę pojedynczych zdarzeń erozyjnych. Jedną z takich prób stanowią badania prowadzone z wykorzystaniem różnego typu znaczników [1,36,103,123]. Generalnie uważa się jednak, że wyniki pochodzące z obiektów zamkniętych (a za takie należy uznać poletko, czy zlewnię) mają ograniczoną przydatność w analizie pojedynczych zdarzeń erozyjnych. Pomiary prowadzone są bowiem przy ujściu poletka (zlewni), zatem nieznana jest rzeczywista powierzchnia zbiorcza, z której pochodzi wyerodowany materiał glebowy [134].

Badania na obiektach wyposażonych w instalacje zbiorcze zostały zapoczątkowane w Polsce w latach 60. ubiegłego wieku niemal równocześnie na terenie Pojezierza Mazurskiego w Posortach [133] oraz Beskidu Niskiego w Szymbarku [42,43]. Niestety, prace w Posortach zostały po 20 latach przerwane ze względu na włączenie tego terenu pod zabudowę Olsztyna. W latach 90. rozpoczęto pomiary na terenie Pojezierza Drawskiego w Storkowie [142], Pojezierza Gnieźnieńskiego w Mokronosach [137, 140] oraz na Wyżynie Lubelskiej w Czesławicach [111,114]. Badania prowadzono na poletkach o zróżnicowanej długości (20-60 m) i szerokości (3-10 m), nachyleniu (4-18%), rodzaju i typie gleby oraz z różnymi roślinami uprawnymi lub bez nich. Z uwagi na duże koszty i pracochłonność, prace nad erozją wodną na stokach realizowane są również w systemie uproszczonym (bez fizycznego wyodrębniania powierzchni poletka) z łapaczami Gerlacha [40] i workami Słupika [61,134,135,138,145].

Prowadzenie badań poletkowych na terenie Polski jest konieczne nie tylko w celach poznawczych, opracowywania czy doskonalenia modeli, ale także dla weryfikacji prognoz erozji powstających w ramach programów unijnych, przygotowywanych przez ośrodki naukowe z zagranicy. Ich wyniki mogą wpływać na

politykę Komisji UE i finansowanie regionalnych planów rozwoju. Prognozy erozji wodnej dla Polski zamieszczono m.in. w publikacji Van Rompaey'a i in. [159]. Zgodnie z nimi wielkość erozji wodnej przewidywana na podstawie modelu USLE dochodzi do 5 $t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$ (2-5 dla obszaru gór, pogórzy i wyżyn), francuskiej modyfikacji USLE – do 30 $t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$ (3-30 dla w.w. regionów), a według modelu PESERA (Pan-European Soil Erosion Risk Assessment) – do 20 $t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$ (w pasie wyżyn, pogórzy i gór, na pobrzeżu wschodnio-bałtyckim – 2-5, lokalnie do 10 oraz sporadycznie w obszarach górskich i pobrzeży do 20 $t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$).

Badania przeprowadzone na poletkach o długości 20 m na obszarze Wyżyny Lubelskiej w latach 1992-1995 wykazały, że zmierzona masa wyerodowanej gleby była 6-8-krotnie mniejsza od prognozowanej za pomocą modelu USLE [114]. Małe ilości mierzonego zmywu gleby oraz spływu powierzchniowego w Czesławicach nasunęły przypuszczenie, że gleba zbierana jest nie z całej powierzchni obiektu doświadczalnego, ale z części położonej w pobliżu instalacji zbiorczych. W celu wyjaśnienia przyczyny tak dużej rozbieżności kolejne prace doświadczalne rozpoczęto na położonych obok siebie poletkach o zróżnicowanej długości. Dla powyższego układu zaproponowano nową interpretację danych, opartą nie o wartość średnią, lecz o maksymalne wartości zmywu jednostkowego oraz efektywną odległość przemieszczenia gleby [113,115]. Takie podejście umożliwia analizę pojedynczych zdarzeń erozyjnych, co było nieosiągalne w badaniach na obiektach o stałej długości.

W pierwszej części niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań nad rozbryzgiem gleby, który stanowi pierwszą fazę erozji wodnej. Cząstki gleby oderwane wskutek uderzeń kropli deszczu przemieszczają się w dół stoku wskutek oddziaływania siły grawitacji [107] oraz stanowią główne źródło materiału przenoszonego wraz ze spływem powierzchniowym [33,60]. Badania nad tym zagadnieniem prowadzone są od szeregu lat na świecie w warunkach polowych i laboratoryjnych oraz przy wykorzystaniu różnych metod pomiarowych [3,4,14,16,20,25,27-29,41,46,63,71,78,88,92,97,102,104,107,108,127,130,131,147-149,153,168]. Próby oceny wielkości rozbryzgu podejmowano również i w Polsce [35,37,39,112,141, 142,144]. Proces ten, pomimo licznych opracowań, nadal pozostaje rozpoznany jedynie w stopniu fragmentarycznym. Wynika to przede wszystkim z braku odpowiedniej interpretacji wyników pomiarów polowych, która powinna uwzględniać równocześnie masę rozbryzgu oraz odległość przemieszczenia cząstek gleby. Dopiero w ostatnich latach opracowano prosty w zastosowaniu model, który umożliwia równoczesną ocenę obu tych wielkości [153].

Szereg prac doświadczalnych prowadzonych w ostatnich latach wskazuje na wzrastające zagrożenie erozyjne związane z uprawą roli, głównie orką [23,24,47, 48,7-76,89,110,155-157]. Do oceny przemieszczenia gleby pod wpływem zabie-

gów uprawowych stosuje się dwie metody. Pierwsza z nich polega na ustalaniu zmiany położenia znaczników mechanicznych (umieszczonych na różnej głębokości) po przeprowadzonym zabiegu [48], druga – na zważeniu przemieszczonej masy gleby, uprzednio zabarwionej chlorkiem potasu [75]. W zależności od przyjętego w danym kraju systemu uprawowego, badania prowadzone są nad pojedynczymi zabiegami lub dla zabiegów łączonych [75]. Wyniki tych prac sugerują, że wielkość erozji uprawowej może być zbliżona lub nawet większa od erozji wodnej. Jak dotąd, jedyną próbę porównania wielkości natężenia obu procesów podjęli Van Oost i in. [158]. W tym celu nie wykorzystano jednak wyników pochodzących z najczęściej stosowanych metod pomiarowych, ale interpretację rozkładu izotopu ^{137}Cs w terenie erodowanym.

Badania nad erozją uprawową w Polsce prowadzono w latach 1950-60 [21,56, 80]. Głównym ich celem było, ważne z punktu praktycznego, poszukiwanie odpowiedniego kształtu odkładnicy pługa. Ponownie po niemal 50 latach przerwy, do oceny ilościowej przemieszczenia gleby wskutek orki powrócili Rejman i Paluszek [117].

3. METODYKA I ZAKRES BADAŃ WŁASNYCH

3.1. Charakterystyka obiektu

Opis zlewni

Badania prowadzono na terenie małej zlewni lessowej na gruntach ornych miejscowości Bogucin (o współrzędnych 51°19'56"N i 22°23'18"E). Położona jest ona na Płaskowyżu Nałęczowskim (Wyżyna Lubelska) w odległości 1,3 km od jego północnej krawędzi.

Powierzchnia zlewni wynosi 57125 m^2, zaś różnica wysokości między najwyżej (228 m n.p.m.) i najniżej położonym punktem – 18 m. W zlewni przeważają stoki o nachyleniu do 5% (52%), spadki od 5 do 10% zajmują 35% powierzchni zlewni, od 10 do 18% – 12,4%, zaś powyżej 18% – 0,6%. Kierunek głównej formy dolinnej E-W, przechodzący u jej ujścia w ESE-WNW, warunkuje niemal równomierny udział procentowy stoków o ekspozycji zachodniej, północnej i południowo-zachodniej (stanowiąc w sumie 75%).

Na analizowanym obszarze, średnia roczna temperatura powietrza w latach 1980-1995 wynosiła 7,8°C, zaś suma opadu rocznego 528 mm [114]. Dane te pochodzą ze stacji meteorologicznej w Czesławicach (AR w Lublinie), położonej najbliżej obiektu badań (w odległości około 10 km). W trakcie pomiarów erozji

wodnej rejestrację opadów na terenie zlewni prowadzono przy pomocy pluwiografu o zapisie tygodniowym oraz deszczomierza Helmanna.

Na podstawie zapisów z pluwiografu obliczano jednostkową energię kinetyczną opadu według równania opracowanego przez Browna i Fostera [15]:

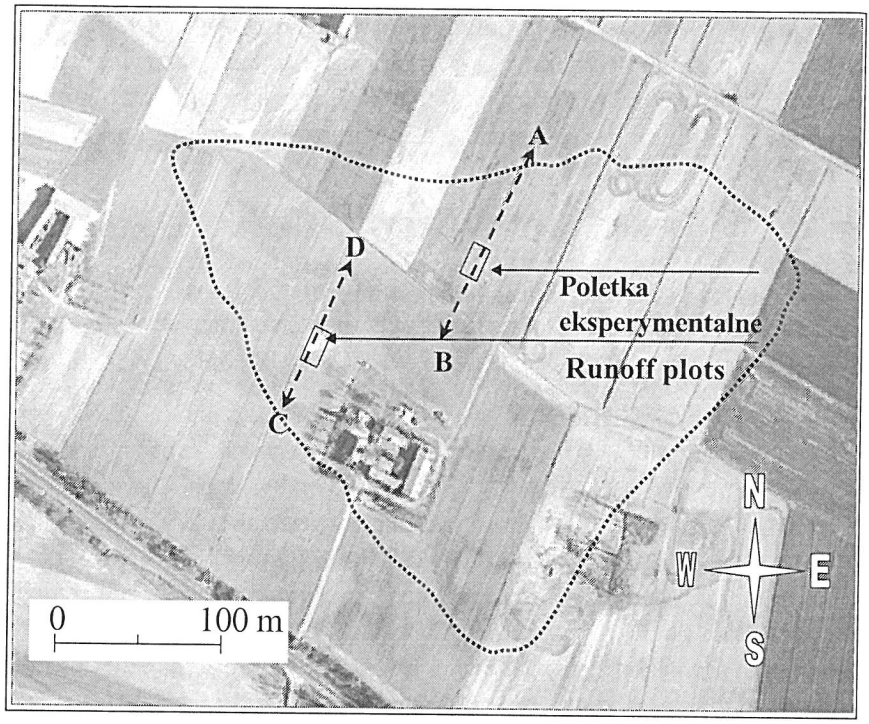
$$E_{kin} = \sum_{i=1}^{n} 0{,}29 \cdot [1 - 0{,}72 \cdot \exp(-0{,}05 I_i)] \cdot \Delta P_i \qquad (1)$$

gdzie: E_{kin} – energia kinetyczna przypadająca na jednostkę powierzchni, MJ·ha^{-1},
I_i – intensywność opadu w okresie o stałej cząstkowej intensywności i, mm·h^{-1},
ΔP_i – suma opadu w okresie o stałej cząstkowej intensywności i, mm.

Za opad pojedynczy, zgodnie z jego definicją podaną w modelu USLE, przyjęto opad nie oddzielony w czasie od następnego przez 6 godzin [165]. Na jeden okres pomiarowy średnio przypadało od 1 do 3 zdarzeń pojedynczych. Dla wszystkich opadów o intensywności cząstkowej z wartościami progowymi 1, 2, 3 i 4 mm·h^{-1} wyznaczono sumę, energię kinetyczną oraz wskaźnik erozyjności deszczu i spływu powierzchniowego EI_{30} (iloczyn energii kinetycznej opadu i jego maksymalnej intensywności w ciągu 30 minut) [165]. W celach porównawczych wielkość i erozyjność opadów w okresie prowadzenia pomiarów erozji przeanalizowano w odniesieniu do danych ze stacji meteorologicznej w Czesławicach, obejmujących okres 15 lat (1980-1994).

W zlewni występują gleby z rzędu brunatnoziemnych typu płowe typowe (Haplic Luvisols) wytworzone z lessu o różnych klasach zerodowania [152]. Badania erozji wodnej i uprawowej prowadzono na glebie, która wg klasyfikacji Turskiego i in. [151] oznaczana jest jako słabo zerodowana. Gleba ta zawierała od 0,3 do 0,9% piasku (1-0,1 mm), 15,1-18,7% pyłu grubego (0,1-0,05 mm), 43-48% pyłu drobnego (0,05-0,02 mm), 24-26% części spławialnych (<0,02 mm), w tym 4% iłu koloidalnego (<0,002 mm) oraz próchnicy – 1,6-1,7%; pH w KCl wynosiło 4,5-6,8.

Układ pól uprawnych przedstawiono na rysunku 1. Na obszarze zlewni znajduje się w całości 1 pole uprawne (0,5 ha) zajmujące dolinę oraz fragmenty 10 innych. W badanym rozłogu dominują działki długości 100-200 m i szerokości 30-60 m. Przy południowej granicy zlewni znajdują się zabudowania gospodarcze, powstałe w 1965 r. i otoczone powierzchnią zadarnioną. Wieloletni użytek trawiasty zajmuje pole w części północno-zachodniej, którego niewielki fragment wchodzi w skład zlewni. Pozostały obszar (94%) zajmują pola uprawne z roślinami jednorocznymi, głównie zbożami jarymi i roślinami okopowymi.



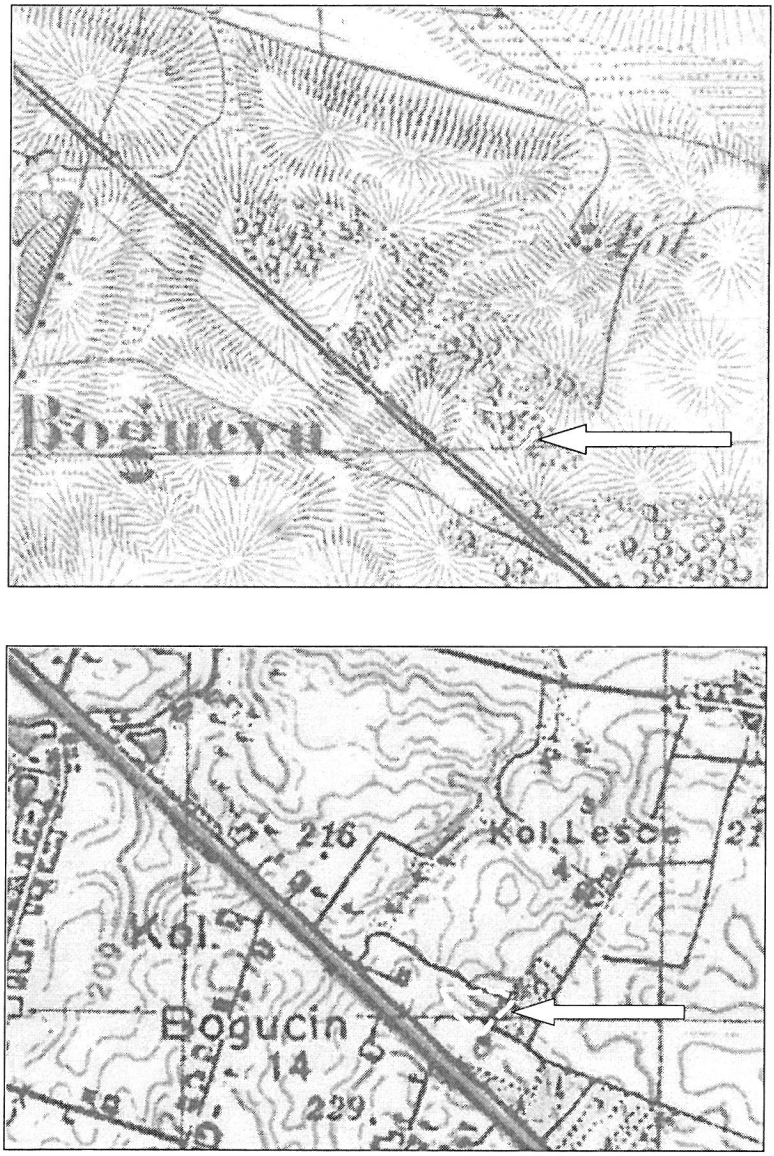
Rys. 1. Zdjęcie lotnicze zlewni w Bogucinie, kwiecień 2004 (linia przerywana – obszar zlewni, przekrój A-B z poletkami na zboczu o nachyleniu 7% (azymut 215°), przekrój C-D z poletkami na zboczu o nachyleniu 12% (azymut 32°))

Fig. 1. Aerial photo of experimental catchment in Bogucin, April 2004 (dotted line – catchment area, transect A-B with runoff plots on 7% slope (azimuth 215°), transect C-D with runoff plots on 12% slope (azimuth 32°))

Historia użytkowania rolniczego

W świetle analizy map historycznych teren zlewni został włączony pod uprawę stosunkowo niedawno. Na mapie de Perthéesa (1: 200 000) przedstawiającej stan środowiska w latach 80. XVIII wieku, obszar ten jest zalesiony w całości, natomiast na tzw. „Mapie Kwatermistrzostwa" (1: 126 000) pochodzącej z 1830 roku, połowa zlewni (część południowo-zachodnia) została już wylesiona (rys. 2A). Podobny obraz użytkowania ziemi na opisywanym obszarze przedstawia „Karte des westlichen Russlands" (1:100 000), niemiecka przeróbka rosyjskiej mapy, tzw. wiorstówki z lat 80. XIX stulecia. Stan ten utrzymuje się do roku 1932, w którym na obszarze zlewni i przyległym przeprowadzone zostają reforma rolna oraz scalenie gruntów. Zmiany te uwzględnione zostały na Mapie Wojskowego Instytutu Geograficznego (1:100 000) z 1933 r. (rys. 2B). Zgodnie z nią jedynie

niewielki obszar w północno-wschodniej część zajmuje las, który podlega wyrębowi tuż po zakończeniu II wojny światowej.



Rys. 2. Zalesienie badanej zlewni według Mapy Kwatermistrzostwa z 1830 r. (A) i mapy WIG z 1932 r. (B)

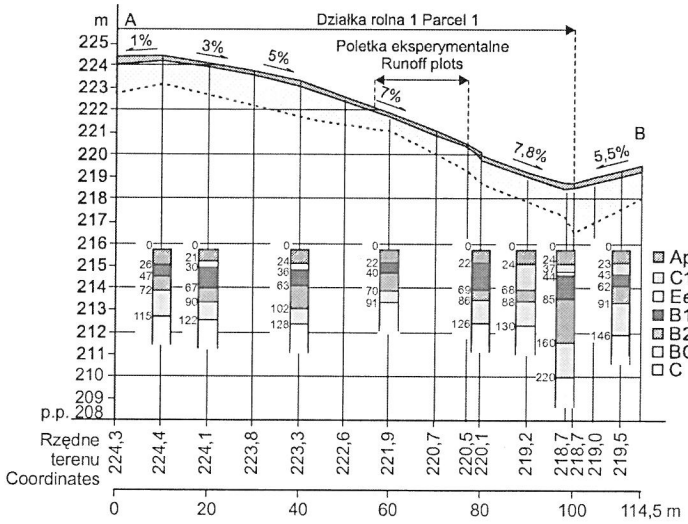
Fig. 2. Afforestation of the studied catchment according to Quatermaster's Map from 1830 (A) and WIG map from 1932 (B)

Można zatem przypuszczać, że południowo-zachodnia połowa zlewni wylesiona została na początku XIX wieku (1815-1830), a czas jej użytkowania rolniczego wynosi około 170-190 lat. Okres użytkowania rolniczego północno-wschodniej części wynosi 70 lat, zaś niewielkiego jej fragmentu (około 0,5 ha) – około 55 lat. Od czasu komasacji gruntów w roku 1932, układ pól pozostaje niezmieniony do chwili obecnej.

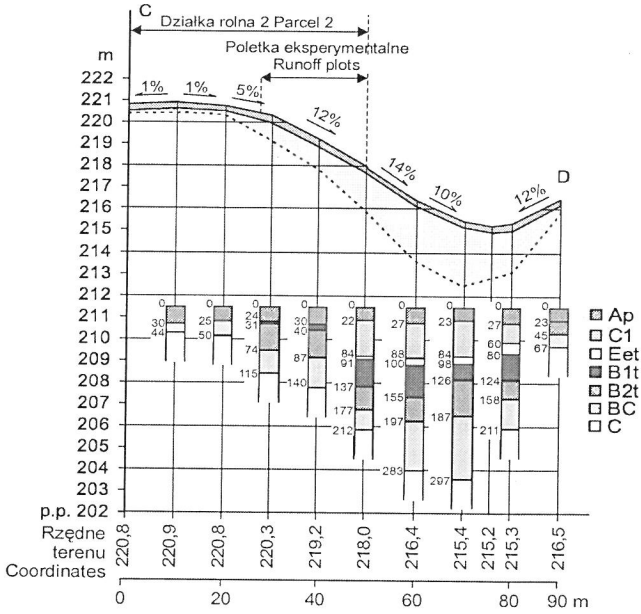
Charakterystyka wybranych zboczy

Do szczegółowych badań erozji wodnej i uprawowej wybrano części działek rolnych wchodzących w skład zlewni i położonych na dwóch zboczach o ekspozycji południowo-zachodniej (azymut 215°) i północno-wschodniej (azymut 32°). W dalszej części niniejszej pracy określane są one jako zbocze o wystawie południowej i północnej (rys. 3, 4).

Działka położona na zboczu o ekspozycji południowej w dolnej swej części dochodzi do osi zlewni, a działka na zboczu o wystawie północnej kończy się w jego obrębie i jest oddalona od osi o 26 m. Należy nadmienić, że dolny fragment tego zbocza zajmuje odrębne pole, uprawiane poprzecznie do kierunku spadku (rys. 3, 4). W przeciwieństwie do niego obie analizowane działki, podobnie jak pozostałe w obrębie zlewni, uprawiane są wzdłuż kierunku spadku.



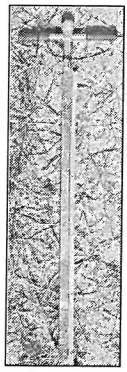
Rys. 3. Przekrój A-B (azymut 215°) z opisem poziomów genetycznych gleb (cm) w danej pozycji topograficznej, zasięgiem działki rolnej oraz lokalizacją poletek eksperymentalnych
Fig. 3. Transect A-B (azimuth 215°) with description of soil profile (cm) in given topographic position, parcel range and location of runoff plots



Rys. 4. Przekrój C-D (azymut 32°) z opisem poziomów genetycznych gleb (cm) w danej pozycji topograficznej, zasięgiem działki rolnej oraz lokalizacją poletek eksperymentalnych
Fig. 4. Transect C-D (azimuth 32°) with description of soil profile (cm) in given topographic position, parcel range and location of runoff plots

3.2. Ocena erozji i akumulacji na podstawie rekonstrukcji budowy profilu gleby

Na działkach rolnych, na których prowadzono pomiary erozji wodnej i uprawowej przeprowadzono badania budowy profili glebowych (działki A i B na rysunku 1). W tym celu pobierano rdzenie glebowe o nienaruszonej strukturze przy pomocy sondy Eijkelkamp o średnicy wewnętrznej 3 cm (rys. 5). Miąższość poszczególnych poziomów i podpoziomów genetycznych mierzono z dokładnością do 1 cm. Poziomy i podpoziomy genetyczne wyznaczano na podstawie oznaczenia barwy gleby, oceny zagęszczenia (zbitości) materiału glebowego, jego smugowatości oraz reakcji z kwasem solnym.



Rys. 5. Sonda z pobranym rdzeniem gleby płowej nieerodowanej
Fig. 5. Gauge auger with soil representing non eroded soil profile

Badania gleb przeprowadzono od kwietnia do listopada 2002 r. Na działce zajmującej górną część zbocza o wystawie północnej, przeanalizo-

wano budowę 15 profili glebowych w układzie 10·10 m, natomiast na działce o wystawie południowej – 32, częściowo w układzie 10·10 m oraz 20·20 m. Obszar objęty badaniami zajmował powierzchnię 1500 m^2 (30·50 m) oraz 3000 m^2 (30·100 m), odpowiednio na zboczach o ekspozycji północnej i południowej.

W zależności od budowy profilu wyróżniono następujące klasy zerodowania gleb [152]:

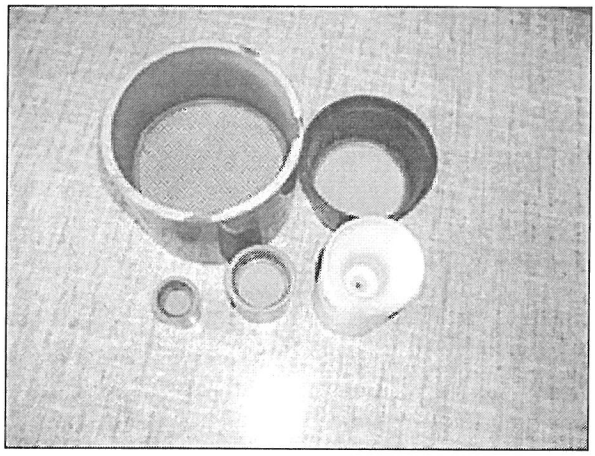
- płowe typowe nieerodowane o następstwie poziomów genetycznych Ap-Eet-B1t-B2t-BC-C-Cca, w których poziom Ap powstał z pierwotnego A i częściowo z poziomu Eet;
- płowe słabo zerodowane o budowie profilu Ap-B1t-B2t-BC-C-Cca, w których poziom Ap wytworzył się z poziomu Eet i częściowo z B1t;
- płowe średnio zerodowane o budowie profilu Ap-B2t-BC-C-Cca, w których poziom Ap wytworzył się z poziomu B2t;
- płowe silnie zerodowane o budowie profilu Ap-BC-C-Cca, w których poziom Ap wytworzył się z poziomu BC;
- gleby bardzo silnie zerodowane (całkowicie zerodowane, pararędziny inicjalne) o profilu Apca-Cca.

W każdym z punktów pomiarowych, poza glebami nieerodowanymi oraz deluwialnymi wytworzonymi na nieerodowanej, dokonano rekonstrukcji pierwotnej budowy profilu. Przyjęto założenie, że przed rolniczym zagospodarowaniem terenu zlewni wszystkie gleby były nieerodowane.

Rekonstrukcję profili przeprowadzono na podstawie porównywania miąższości poziomów i podpoziomów genetycznych z najbliżej położonych sąsiednich punktów pomiarowych. Miąższość utraconej warstwy gleby wyznaczano z różnicy między obliczoną wartością średnią z nienaruszonych poziomów a zachowaną miąższością poziomu genetycznego. W przypadku utraty całego poziomu, jego rekonstrukcji dokonywano w oparciu o miąższość profili wzorcowych, które stanowiły gleby z nienaruszonymi poziomami genetycznymi położone w najbliższym sąsiedztwie. Uwzględniano przy tym stosunek miąższości poszczególnych poziomów. Generalnie rekonstrukcję przeprowadzano na podstawie porównania od 2 do 6 sąsiednich profili. Suma utraconej miąższości poszczególnych poziomów stanowiła miarę wielkości erozji w danym punkcie pomiarowym, suma deluwiów – miarę wielkości akumulacji (depozycji). Następnie na podstawie uśrednionych wartości z punktów pomiarowych zlokalizowanych w tej samej odległości od dolnej krawędzi działki wyznaczono wielkość erozji. Zakładając, że erozja maleje lub wzrasta w sposób liniowy między poszczególnymi punktami pomiarowymi obliczono objętość materiału wyerodowango dla pasa o szerokości 1 m i całej długości zbocza.

3.3. Rozbryzg gleby

Pomiary rozbryzgu (tj. masy gleby oderwanej od jej powierzchni przez krople deszczu) prowadzono przy pomocy kubków (splash cups) o średnicy wewnętrznej 3,2; 5,0; 7,3; 11,7 i 14,5 cm (rys. 6). W przyjętej metodzie, kubek umieszczany jest tak, aby jego krawędź wystawała kilka milimetrów nad powierzchnię gleby, uniemożliwiając zbieranie materiału przenoszonego przez spływ powierzchniowy.



Rys. 6. Kubki do pomiaru rozbrygu gleby
Fig. 6. Splash cups

Kubki umieszczano na poletkach do pomiaru erozji (utrzymywanych stale w czarnym ugorze) w sposób zrandomizowany (1999-2000), natomiast w roku 2004, kubki o jednakowej średnicy – w tej samej odległości od instalacji zbiorczej. Pomiary rozbryzgu prowadzono w 4 powtórzeniach (łącznie 20 kubków). W roku 2004 badania poszerzono o dodatkowe 9 kubków (o średnicy 5 cm) umieszczonych wzdłuż poletka o długości 20 m, w odległości co 2 m. Po opadach wywołujących spływ powierzchniowy, kubki wymieniano, zastępując je nowymi. Częstość pomiarów zwiększono w roku 2004, rozszerzając je o każdy opad, niezależnie czy wywołał on spływ, czy też nie. Zebrany materiał glebowy przenoszono z kubków do zlewek, suszono w temperaturze 105°C i ważono z dokładnością do 0,001 g. Łącznie rozbryzg gleby został oznaczony w 24 okresach pomiarowych. W niektórych z nich spływ powierzchniowy oraz silny wiatr powodowały zamulenie lub wyrwanie i przewrócenie kubków. Łącznie we wszystkich okresach pomiarowych, pomiar rozbryzgu został zakłócony w 51 przypadkach na 480, co stanowi 10,6% ogólnej liczby pomiarów.

W przyjętej metodzie zmierzona wielkość rozbryzgu jest uzależniona od średnicy kubka. Wynika to z rozkładu masy rozbryzgu, zmniejszającej się w sposób wykładniczy w miarę oddalenia od punktu uderzenia kropli oraz związanej z tym relacji między polami powierzchni rozbryzgu oraz kubka. Stąd zmierzona wielkość wzrasta wraz ze średnicą kubka, natomiast w przeliczeniu na jednostkę powierzchni – maleje. W celu wyznaczenia rzeczywistej wielkości rozbryzgu,

dane pomiarowe z kubków o różnej średnicy powinny zostać skalibrowane. Kalibrację wyników można przeprowadzić przy pomocy modelu numerycznego zaproponowanego przez Torriego i Poesena [147] lub korekty geometrycznej opracowanej przez Van Dijka i in. [153]. W prezentowanej pracy wykorzystano ten ostatni:

$$F_R = \frac{m_R}{\mu} = \left[1 - \exp\left(-\frac{\pi}{2}\frac{R}{\Lambda}\right)\right] \cdot \frac{2}{\pi}\frac{\Lambda}{R} \qquad (2)$$

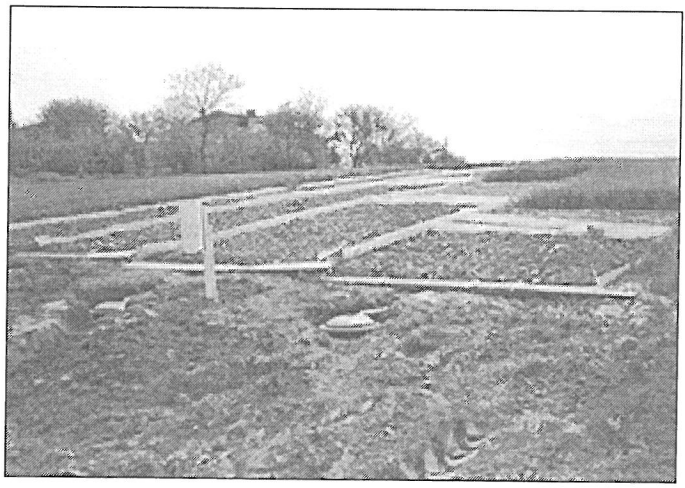
gdzie: F_R – geometryczny czynnik korekty rozbryzgu,
m_R – masa rozbryzgu dla kubka o promieniu R ($g \cdot m^{-2}$),
μ – rozbryzg ($g \cdot m^{-2}$),
R – promień kubka (m),
Λ – średnia ważona odległość rozbryzgu (m).

Według Van Dijka i in. [153] zaproponowana przez nich formuła umożliwiła dokładniejsze oszacowanie rozbryzgu dla zbioru danych Poesena i Torriego [147] w porównaniu do modelu numerycznego. Należy zaznaczyć, że oba modele służą do wyznaczenia rozbryzgu w warunkach terenu płaskiego pozbawionego roslin, a ich dokładność ulega zmniejszeniu wraz ze wzrostem nachylenia terenu. W obu rozwiązaniach niezbędnym elementem do wyznaczenia wielkości jednostkowej rozbryzgu jest określenie średniej odległości na jaką zostaje on przenoszony. Odległość tą wyznacza się na podstawie dopasowania wielkości pomiarowych do opracowanego rozkładu wielkości oczekiwanych. Miarę dopasowania stanowi najmniejsza wartość odchylenia standardowego.

3.4. Spływ powierzchniowy i zmyw gleby

W 1997 roku na dwóch stokach zlewni o ekspozycji północnej (spadek 12%) i południowej (7%), oddalonych od siebie o około 60 m, założono poletka z instalacjami zbierającymi spływ powierzchniowy i zerodowany materiał glebowy (zmyw gleby) (rys. 7). Urządzenia te składały się z półrynien o szerokości 3 m, systemu rur odprowadzających i pojemników magazynujących spływ oraz przenoszony wraz z nim materiał glebowy. Teren przylegający do instalacji oddzielono od pozostałej powierzchni pola przy pomocy folii ogrodniczej z PCV. Pasma PCV wkopywano na głębokość 10 cm i usuwano przed każdym głównym zabiegiem uprawowym (orka i kultywatorowanie), a po jego wykonaniu – zakładano ponownie. Górną granicę poletek zabezpieczano przed spływem pochodzącym z wyżej położonej części zbocza dodatkowymi arkuszami folii.

Okresowo poletka poddawano spulchnianiu w celu zniszczenia skorupy powierzchniowej i usunięcia chwastów. Glebę podczas pierwszego opadu od przeprowadzonego zabiegu określano jako spulchnioną, natomiast po kolejnych opadach – jako zaskorupioną. Główne zabiegi uprawowe były wykonywane przez rolnika w tym samym terminie co na pozostałej części pola (wzdłuż kierunku spadku zbocza), natomiast spulchniające – ręcznie. Pomiary prowadzono na poletkach stale utrzymywanych w czarnym ugorze oraz obsianych roślinami uprawnymi (pszenica jara, jęczmień jary, ziemniak, burak cukrowy) od kwietnia do października, tak więc nie obejmowały one okresu występowania spływów roztopowych.



Rys. 7. Układ poletek eksperymentalnych w Bogucinie na zboczu o skłonie 12% (przekrój C-D)
Fig. 7. Layout of runoff plots at experimental site Bogucin, 12% slope (transect C-D)

Początkowo badania prowadzono na poletkach o szerokości 3 m i długości 5, 10 i 20 m (1997), w latach następnych – również na obiekcie o długości 2,5 m. Maksymalna liczba poletek, na których równocześnie prowadzono pomiary dochodziła do 10 (o długości 2,5; 5; 10 i 20 m na obu stokach oraz dodatkowe 2 o długości 20 m na stoku o wystawie północnej). Zastosowane pojemniki umożliwiały zgromadzenie maksymalnie do 8,7 mm spływu powierzchniowego (1997-2001), a począwszy od roku 2002 – 17,3 mm.

Każdorazowo, po wystąpieniu opadów w wykalibrowanych pojemnikach zbiorczych mierzono poziom wody. Na jego podstawie obliczano objętość spływu powierzchniowego, a po dokładnym wymieszaniu zgromadzonego materiału glebowego pobierano próby objętościowe. Następnie mieszaninę rozdzielano na sączkach, a frakcję stałą suszono w temperaturze 105°C do osiągnięcia stałej wagi. Ustalając jej koncentrację w pobranej próbie o znanej objętości wyznaczano masę materiału glebowego

zgromadzonego w pojemnikach zbiorczych. Należy nadmienić, że ograniczona objętość pojemników nie pozwalała w niektórych okresach pomiarowych na zgromadzenie całego spływu powierzchniowego. Jednak materiał glebowy w nim zawarty w znacznej większości ulegał sedymentacji w pojemnikach, a w przypadku ich wypełnienia osiadał wokół nich. Każdorazowo był on zbierany i ważony oraz uwzględniany w dalszej analizie. Sedymentacji materiału glebowego wokół pojemników sprzyjało ich umieszczenie w obniżeniach zadarnionego pasa terenu.

Wyniki pomiarów spływu powierzchniowego i zmywu gleby analizowano i interpretowano według metody zaproponowanej przez Rejmana i Usowicza [113, 115]. Polega ona na wyznaczeniu wartości jednostkowego zmywu gleby ($kg \cdot m^{-2}$) dla każdego z poletek o różnej długości. Dalszą analizę prowadzi się w oparciu o wartość maksymalną zmywu jednostkowego przy założeniu, że charakteryzuje ona natężenie procesu erozji w danym okresie pomiarowym. Przyjmuje się, że mniejsze wartości jednostkowego zmywu gleby obserwowane na pozostałych poletkach związane są z:

- przeszacowaniem powierzchni zbiorczej na poletkach większych (dłuższych);
- wystąpieniem czynników ograniczających tempo erozji na poletkach mniejszych (krótszych).

Powyższa interpretacja oznacza, że na poletkach dłuższych proces erozji zachodzi w tempie określonym przez wartość maksymalną (wyznaczoną na innym poletku). W związku z tym możliwe jest obliczenie aktywnej (rzeczywistej) powierzchni zbiorczej jako stosunku masy gleby zebranej z poletka większego (dłuższego) do wartości maksymalnego zmywu jednostkowego. Tak wyznaczona powierzchnia zbiorcza przyjmuje różne wartości w poszczególnych okresach pomiarowych. Powierzchnia ta podzielona przez szerokość poletka pozwala na oszacowanie efektywnej odległości przemieszczenia gleby. W podobny sposób interpretowany jest spływ powierzchniowy.

3.5. Przemieszczenie gleby pod wpływem zabiegów uprawowych

Metodykę prowadzenia pomiarów zaczerpnięto z prac prowadzonych nad erozją uprawową w Uniwersytecie w Leuven (Belgia), [47,48,155-157] oraz konsultacji z ich autorami.

Badania nad przemieszczeniem gleby pod wpływem podorywki (14.08.2003) oraz łączonego zabiegu kultywatorowania i bronowania (13.04.2004) przeprowadzono na polu o nachyleniu 7% (obok poletek erozyjnych). Zabiegi te wykonywano wzdłuż kierunku spadku. Należy nadmienić, iż pole to niemal jak wszystkie w badanej zlewni (poza działką zajmującą dolinę) uprawiane są w ten sposób. Jest on wadliwy z punktu widzenia ochrony gleby, tym niemniej stosowany przez rolni-

ków z uwagi na kształt działek i ich lokalizację w zlewni. Z uwagi na to, że jednym z celów pracy stanowi próba określenia udziału obu form erozji w przekształceniu gleb wybranych stoków, badania nad przemieszczeniem gleby przeprowadzono w warunkach praktyki stosowanej przez rolników.

Przemieszczenie gleby oceniano na podstawie zmiany położenia znaczników, które stanowiły ponumerowane i pomalowane na różne kolory kostki aluminiowe o boku 1,5 cm. Umieszczano je w 3 rzędach prostopadłych do spadku i oddalonych od siebie o 3 m, zarówno na kierunku zabiegu prowadzonego w dół, jak i pod górę stoku. Do otworów wywierconych w glebie wprowadzono znaczniki, umieszczając je na głębokości 0, 5, 10, 15 i 24 cm. Wolną przestrzeń między kostkami uzupełniono glebą. W pierwszym rzędzie znaczniki były oddalone od siebie co 10 cm, w drugim co 15 cm i w trzecim co 20 cm. Gęstość gleby przed podorywką wynosiła 1,32, a po niej – 0,92 $Mg \cdot m^{-3}$, przed łączonym kultywatorowaniem i bronowaniem – 1,28, a po nim – 1,11 $Mg \cdot m^{-3}$. Wilgotność gleby przed zabiegami wynosiła odpowiednio 0,12 i 0,28 $g \cdot g^{-1}$, a po ich wykonaniu 0,10 oraz 0,21 $g \cdot g^{-1}$. Podorywkę wykonywano za pomocą pługa 3-skibowego o szerokości roboczej 80-90 cm, zawieszanego do ciągnika C-360. Podczas obu zabiegów mierzono prędkość na odcinku 20 m. Dla podorywki wynosiła ona 9,6 oraz 8,0 $km \cdot h^{-1}$, a dla kultywatorowania i bronowania 9,7 oraz 8,7 $km \cdot h^{-1}$, odpowiednio dla zabiegu prowadzonego w dół oraz pod górę zbocza.

Po wykonaniu zabiegów uprawowych na obszarze potencjalnego przemieszczenia ostrożnie odsłaniano glebę i określano położenie odnalezionych znaczników (głębokość, pozycję wzdłuż i w poprzek kierunku uprawy). Pozycję znacznika wzdłuż kierunku zabiegu wyznaczano w rzucie prostokątnym w stosunku do linii referencyjnej, którą stanowiły znaczniki umieszczone na głębokości 24 cm, natomiast w poprzek kierunku – w rzucie prostokątnym na płaszczyznę prostopadłą do linii referencyjnej. Odległość przemieszczenia gleby wyznaczano z różnicy między pierwotną (przed zabiegiem) i aktualną (po zabiegu) pozycją znaczników z dokładnością do 1 cm. Następnie na podstawie średniej odległości przemieszczenia i głębokości zabiegu wyznaczano pole powierzchni przesuniętej gleby, a po uwzględnieniu pasa gleby, w którym prowadzono pomiar (1 m) – jej objętość.

Wielkość erozji uprawowej ustalano mnożąc objętość przemieszczonej gleby przez jej gęstość, zmierzoną przed zabiegiem. Masę gleby przesuwanej w dół stoku podczas jednorazowego zabiegu obliczano z różnicy jej wielkości wyznaczonej dla zabiegu prowadzonego w dół i pod górę zbocza. W celu pełniejszej oceny wpływu zabiegów uprawowych na przemieszczenie gleby, w rozdziale 4.6 wykorzystano opublikowane wyniki badań nad orką głęboką, przeprowadzone na obiekcie w Bogucinie na stoku o nachyleniu 12% [117].

4. WYNIKI I DYSKUSJA

4.1. Ocena erozji i akumulacji na podstawie rekonstrukcji budowy profilu glebowego

Przeprowadzone badania wykazały, że na analizowanych zboczach występowały gleby o różnych klasach zerodowania (tab. 1), charakteryzujące się znacznym zróżnicowaniem miąższości poszczególnych poziomów i podpoziomów genetycznych (tab. 2). Gleby zbocza o wystawie północnej były nieznacznie głębsze w porównaniu do gleb zbocza o wystawie południowej, na co wskazuje większa o 24 cm miąższość poziomu B (wmywania) oraz różnica w głębokości występowania lessu węglanowego (około 10 cm). Większa miąższość kopalnego poziomu ornego (Ab) na zboczu o wystawie północnej sugeruje z kolei, że poziom ten został stosunkowo niedawno pokryty deluwiami.

Przeprowadzona analiza budowy gleb wykazała, że procesy erozyjne przebiegały z większą intensywnością na działce krótszej, położonej na zboczu o wystawie północnej. Na zboczu tym dominowały gleby deluwialne, silnie oraz słabo zerodowane, natomiast na zboczu o wystawie południowej – słabo zerodowane, deluwialne i nieerodowane (tab. 1). Przy górnej granicy zbocza o ekspozycji północnej występowały głównie gleby silnie zerodowane, natomiast o wystawie południowej – nieerodowane i słabo zerodowane. Dolne części obu działek pokrywały deluwia, przykrywające gleby nieerodowane na zboczu o ekspozycji północnej oraz słabo i średnio zerodowane na zboczu o wystawie południowej (tab. 2). Różnica w budowie gleb stanowiących podstawę dla gromadzenia deluwiów w dużym stopniu wynikała z różnej odległości dolnej krawędzi działek rolnych w stosunku do głównej linii sezonowego cieku wodnego zlewni. Na zboczu o wystawie południowej analizowane pole wchodziło w oś zlewni, a przyległa jego część była narażona na erozję liniową.

Tabela 1. Liczba badanych profili (n) oraz procentowy udział gleb w badanych zboczach zlewni
Table 1. Number of studied profiles (n) and percentage of soils on studied slopes of the catchment

Klasa zerodowania gleby Soil erosion class	Zbocze o ekspozycji S Slope of exposition S		Zbocze o ekspozycji N Slope of exposition N	
	n	(%)	n	(%)
Nieerodowane – Non eroded	7	21,2	1	6,7
Słabo zerodowane – Slightly eroded	15	45,5	4	26,7
Średnio zerodowane – Moderately eroded	2	6,1	1	6,7
Silnie zerodowane – Severely eroded	0	0,0	4	26,7
Bardzo silnie zerodowane – Very severely eroded	0	0,0	0	0,0
Deluwialne – Deluvial	9	27,3	5	33,3

Tabela. 2. Miąższość zachowanych poziomów i podpoziomów genetycznych gleb oraz głębokość występowania lessu węglanowego
Table. 2. Thickness of preserved genetic horizons and subhorizons of the soils and depth of calcacerous loess

Wystawa zbocza Slope exposition	Parametr Parameter	Miąższość poziomów i podpoziomów Thickness of horizons and sub-horizons								Głębokość lessu węglanowego Depth of calcacerous loess
		Ap	Cl	Ab	Eet	Blt	B2t	BC	C	
S	Wartość średnia Average (cm)	24	19	12	15	33	33	36	14	141
	Odch. standardowe Std. Deviation (cm)	2	12	2	8	9	10	13	11	36
	Wsp. zmienn. Variation coefficient (%)	9,7	62,4	17,8	52,2	27,9	29,3	37,2	74,8	25,3
N	Wartość średnia Average (cm)	25	33	20	11	45	45	38	11	132
	Odch.standardowe Std. Deviation (cm)	3,3	19,9	0,5	3,4	5,5	9,2	11,5	3,7	74,4
	Wsp. zmienn. Variation coefficient (%)	13,0	60,1	2,5	30,8	12,4	20,5	30,1	32,3	56,4

W przeciwieństwie do stanu zerodowania gleb całkowita wielkość erozji (przeliczona na pas pola o szerokości 1 m) była większa na zboczu o wystawie południowej (27,6 m^3). Na stoku przeciwległym wynosiła ona 18,3 m^3. Wielkości akumulacji były zbliżone na obu zboczach (7,6 i 6,1 m^3) (tab. 3).

W odniesieniu do czasu rolniczego użytkowania stwierdzono, że średni roczny ubytek gleby (w przeliczeniu na długość zbocza) wyniósł 3,94 mm dla obiektu o ekspozycji południowej (przy 70 latach użytkowania), a dla wystawy północnej – 2,46 mm (187 lat użytkowania). Wielkość erozji pomniejszonej o akumulację wynosiła odpowiednio 2,87 i 1,66 mm. Przy założeniu, że natężenie erozji było zbliżone w ciągu ostatnich 70 lat na obu zboczach (tj. wynosiło 3,94 i 2,87 mm), można w przybliżeniu określić jej tempo w latach wcześniejszych, tj. 1815-1932. Średnie obniżenie zbocza o wystawie północnej dla tego okresu wynosiłoby zatem 0,18 i 0,11 m, co w przeliczeniu na 1 rok odpowiada utracie warstwy gleby 1,57 i 0,93 mm odpowiednio dla samej erozji oraz erozji pomniejszonej o akumulację. Wyniki te wskazują, że od roku 1932, proces erozji na badanym obszarze uległ znacznemu nasileniu. Najprawdopobnie znaczne przyśpieszenie erozji należy wiązać z okresem póź-

niejszym, w którym zapoczątkowano stosowanie ciągników na terenie badanej zlewni (1973 r.). Hipotezę tę potwierdzają różnice w miąższości kopalnego poziomu ornego (12 i 20 cm, odpowiednio na zboczu o wystawie południowej i północnej). Podważa to analizy przeprowadzone przez Klimowicza i Uziaka [62] wskazujące, iż erozja jest najintensywniejsza bezpośrednio po rozpoczęciu rolniczego użytkowania gleb.

Tabela 3. Wielkość erozji i akumulacji wzdłuż zbocza (mierzona od odległości od dolnej granicy działki)
Table 3. Erosion and accumulation along hilslope (measured according to the distance to lower slope border)

Wystawa zbocza Slope exposition	Parametr Parameter	Odległość – Distance (m)										
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
S	Erozja Erosion (m^3)	0,58	0,38	0,15	0,15	0,31	0,41	0,08	0,32	0,20	0,48	0,00
	Akumulacja Accumulation (m^3)	0,43	0,36	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
N	Erozja Erosion (m^3)	0,00	0,26	0,51	0,81	0,74	–	–	–	–	–	–
	Akumulacja Accumulation (m^3)	0,45	0,26	0,12	0,00	0,00	–	–	–	–	–	–

Wielkości erozji obliczone na podstawie rekonstrukcji budowy profili glebowych są zbliżone do wyników uzyskiwanych przy pomocy innych metod – analizy porównawczej przekrojów niwelacyjnych oraz izotopów radioaktywnych. Badania takie, zapoczątkowane w roku 1882 [7] i kontynuowane współcześnie na obszarach lessowych [83,101,172] wskazują, że roczna wielkość erozji w zależności od warunków może zawierać się w przedziale od 2,0 do 7,7 mm. Jak wykazują Pałys i Mazur [101] procesy erozyjne przebiegają z większą intensywnością na zboczach o wystawie południowej.

Należy podkreślić, iż możliwość wykorzystania metody rekonstrukcji budowy profili glebowych do oceny erozji jest ograniczona. Można ją stosować jedynie na obszarach przekształconych stosunkowo w małym stopniu, charakteryzujących się dużym udziałem gleb nieerodowanych oraz deluwialnych (wytworzonych na nieerodowanych), stanowiących punkty odniesienia przy rekonstrukcji profili.

4.2. Rozbryzg gleby

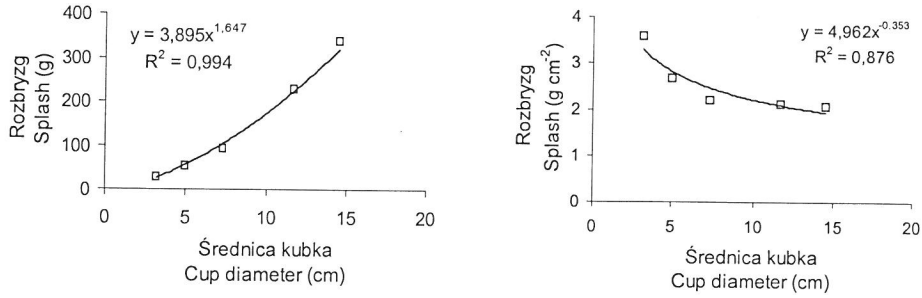
4.2.1. Wielkość rozbryzgu i odległość jego przemieszczenia

Rozbryzg gleby badano łącznie w 24 okresach pomiarowych w ciągu trzech lat (1999 r. – 5; 2000 r. – 9 i 2004 r. – 10). W 15 z nich rozbryzgowi gleby towarzyszył spływ powierzchniowy, a w 9 – wystąpił on bez pojawienia się spływu. W 8 okresach pomiarowych rozbryzg mierzono na glebie o spulchnionej warstwie powierzchniowej (tj. bezpośrednio po wykonaniu zabiegu spulchniającego), a w 16 – na glebie zaskorupionej. W poszczególnych okresach wystąpiły opady, których sumy zawierały się od 4,2 do 83,1 mm, ze średnią przypadająca na jeden okres wynoszącą 28,5 mm.

Wartości współczynników zmienności rozbryzgu dla pomiarów uzyskanych z kubków o określonej średnicy (w poszczególnych okresach pomiarowych) zawierały się w przedziale od 0,6 do 65,4%, ze średnią 22,5%. Współczynniki o wartościach do 40% stanowiły 90%, a poniżej 25% – 76% ogólnej liczby pomiarów. Najmniejszą zmiennością (17,6%) charakteryzowały się pomiary wykonywane przy pomocy kubków o średnicy 7,3 cm (tzn. te w których był on zbierany wraz z wodą opadową), a większymi – z sączkami papierowymi. Dla tej grupy średnie współczynniki zmienności zawierały się w zakresie od 21 do 31%.

Przeprowadzone badania wykazały, że we wszystkich okresach pomiarowych rozbryzg gleby (g) zwiększał się wraz ze wzrostem średnicy kubka, natomiast, w przeliczeniu na jednostkę powierzchni ($g \cdot cm^{-2}$) – malał. Zależność między wielkością rozbryzgu (y) a średnicą kubka (x) najlepiej opisują równania typu potęgowego ($y = ax^b$) z wartościami parametru a w zakresie 0,019-0,734 oraz parametru b (1,380-1,845) i współczynnikami determinacji R^2 w zakresie od 0,95 do 0,99. Dla zależności między wielkością jednostkową rozbryzgu (tj. w przeliczeniu na jednostkę powierzchni) i średnicą kubka, wartości parametru a zawierały się w przedziale 0,025-0,936, a parametru b od –0,620 do –0,187. Jedynie w dwóch okresach pomiarowych współczynniki determinacji R^2 były małe (0,17 i 0,41), natomiast w pozostałych wynosiły od 0,71 do 0,99. Zależności dla sumarycznego rozbryzgu przedstawiono na rysunku 8.

W celu wyznaczenia rzeczywistej wielkości rozbryzgu w poszczególnych okresach pomiarowych, uśrednione dane z kubków o różnych średnicach zostały skalibrowane według modelu zaproponowanego przez Van Dijka i in. [153] (opisanego wcześniej w metodyce). Wyniki przedstawiono w tabeli 4. Rozbryzg we wszystkich okresach wyniósł łącznie 36,428 $kg \cdot m^{-2}$, a skalibrowany na podstawie danych skumulowanych był nieznacznie mniejszy – 35,811 $kg \cdot m^{-2}$.



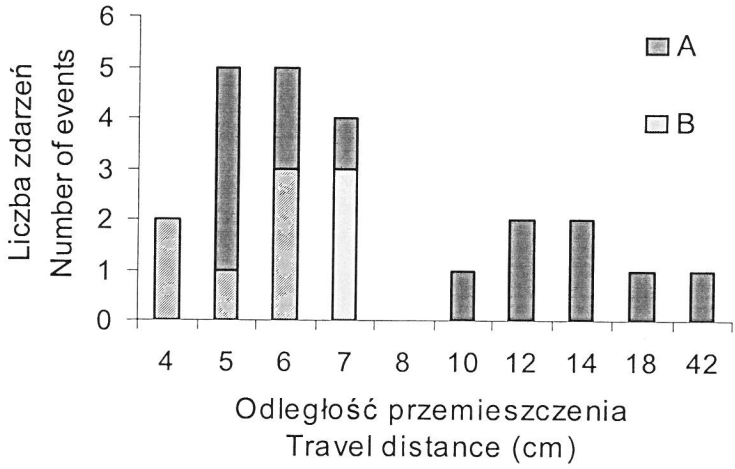
Rys. 8. Zależność między skumulowanymi wartościami rozbryzgu gleby (z 24 okresów pomiarowych) i średnicą kubka
Fig. 8. Relationship between cumulative splash and cup diameter (for 24 measurement periods)

Średnia odległość przemieszczenia cząstek gleby wyniosła 9 cm. W poszczególnych okresach pomiarowych przemieszczenie zawierało się w przedziale od 4 do 42 cm, przy czym najczęściej wynosiło 5-7 cm. Przeprowadzona analiza regresji nie wykazała wyraźnego związku między odległością rozbryzgu i opadem. Jednak analiza warunków towarzyszących rozbryzgowi wskazuje, że na odległość przemieszczenia wpływa obecność spływu (rys. 9) oraz stan powierzchni gleby (rys. 10). Podczas opadu na glebę zaskorupioną średnia odległość przemieszczenia wynosiła 10,8 cm i była 1,8-krotnie większa w porównaniu do gleby spulchnionej. Cząstki gleby były przenoszone na większe odległości również podczas spływu powierzchniowego (11,2 cm) w porównaniu do tych okresów, w których spływ nie wystąpił (5,8 cm).

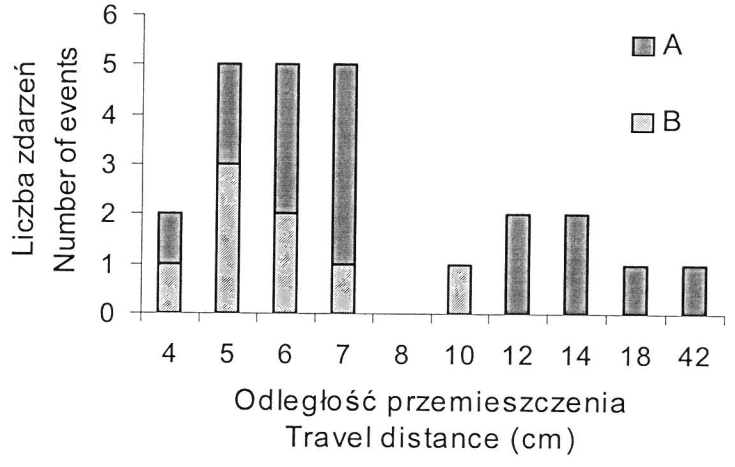
Przeprowadzone badania potwierdzają opinię innych autorów [14,108,147, 153], iż pomiary rozbryzgu powinny być wykonywane z wykorzystaniem kubków o zróżnicowanej średnicy, zaś uzyskane wyniki powinny podlegać korekcie wynikającej z rozkładu wielkości rozbryzgu w zależności od punktu uderzenia kropli. Rozkład ten opisywany jest funkcjami potęgowymi (podobnie jak przedstawiony na rys. 8), w których rozbryzg jednostkowy gleby zmniejsza się wraz ze wzrostem odległości od punktu uderzenia kropli [71,128,149]. Jak podają Van Dijk i in. [153], nachylenie funkcji potęgowej zależy od wielkości frakcji granulometrycznej i jest największe dla cząstek piasku o średnicy 125, 300, 600 μm oraz znacznie mniejsze dla frakcji pyłu o średnicy 30 μm.

Tabela 4. Charakterystyka opadów oraz parametry rozbryzgu gleby, Bogucin (1999-2000 i 2004)
Table 4. Rainfall characteristics and splash parameters, Bogucin (1999-2000 and 2004)

Lp. No	Okres pomiarowy Measurement period	Opad Amount	Energia kinetyczna jednostkowa Kinetic energy per unit area	Rozbryzg Splash	Odchylenie standardowe Standard deviation	Współczynnik zmienności Variation coefficient	Odległość przemieszczenia Travel distance
		(mm)	($J \cdot m^{-2}$)	($kg \cdot m^{-2}$)	($kg \cdot m^{-2}$)	(%)	(cm)
1	14.06-20.06.1999	37,3	766,6	2,593	0,369	14,2	5
2	21.06-24.06.1999	43,6	586,4	0,635	0,072	11,3	12
3	08.07-08.07.1999	24,0	599,3	3,638	0,349	9,6	5
4	13.07-15.07.1999	39,0	829,4	1,987	0,122	6,1	12
5	26.07-28.07.1999	83,1	1880,9	4.594	1,005	21.9	14
6	04.04-06.04.2000	28,2	291,1	0,758	0,134	17,7	10
7	13.04-16.04.2000	10,9	184,8	0,716	0,065	9,1	14
8	20.05-21.05.2000	34,2	368,4	0,490	0,054	11,0	5
9	29.05-15.06.2000	27,7	392,9	0,642	0,137	21,3	6
10	28.06-09.07.2000	18,2	200,2	0,270	0,024	8,9	6
11	11.07-18.07.2000	33,6	447,2	1,567	0,133	8,5	5
12	20.07-22.07.2000	19,5	278,9	1,415	0,129	9,1	6
13	26.07-31.07.2000	64,2	746,4	1,528	0,061	4,0	6
14	04.08-05.08.2000	49,4	939,2	2,986	0,603	20,2	18
15	08.06-12.06.2004	9,9	172,0	0,821	0,177	21,6	6
16	15.06-21.06.2004	37,0	413,8	1,149	0,124	10,8	5
17	21.06-28.06.2004	9,8	80,4	0,229	0,03	13,1	7
18	28.06-05.07.2004	12,0	209,1	0,745	0,086	11,5	4
19	09.07-11.07.2004	14,7	141,5	0,152	0,026	17,1	7
20	12.07-16.07.2004	16,8	275,0	1,002	0,119	11,9	7
21	19.07-19.07.2004	22,2	627,2	6,755	1,858	29,5	42
22	27.07-28.07.2004	23,0	305,1	0,560	0,042	7,5	7
23	13.08-14.08.2004	22,0	279,1	0,972	0,028	2,9	7
24	20.08-22.08.2004	4,2	43,0	0,223	0,046	20,6	4
	Suma – Total	684,5	11057,8	36,428	–	–	–



Rys. 9. Odległość przemieszczenia rozbryzgu dla okresów pomiarowych z (A) i bez (B) wystąpienia spływu powierzchniowego
Fig. 9. Splash travel distance for measurement periods with (A) and without (B) runoff



Rys. 10. Odległość przemieszczenia rozbryzgu dla okresów pomiarowych z glebą zaskorupioną (A) oraz powierzchniowo spulchnioną (B)
Fig. 10. Splash travel distance for measurement periods with sealed (A) and tilled surface (B)

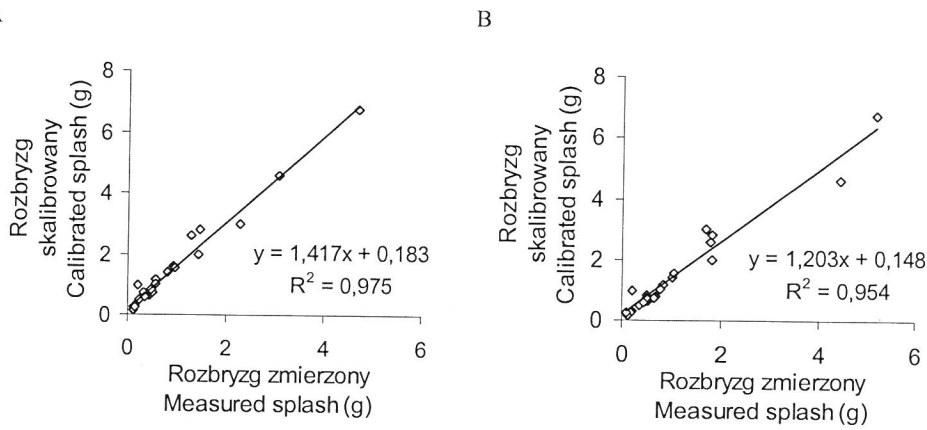
Torri i Poesen [147] analizując wyniki prac z różnych rejonów geograficznych obliczyli, że średnia odległość rozbryzgu w zależności od rodzaju gleby zawiera się w przedziale od 2,1 do 20 cm, przy czym dla belgijskich gleb wytworzonych z lessu wynosiła ona 5,2-6 cm. W cytowanej pracy, autorzy ci podają, że średnia odległość rozbryzgu wyliczona na podstawie danych Froehlicha i Słupika [37] dla gleby wytworzonej z fliszu karpackiego wynosiła 7,5 cm. Według Legout i in. [71] przemieszczanie zależy od stabilności agregatów glebowych i jest ono mniejsza dla gleb charakteryzujących się większą stabilnością. Występowanie wiatru wywiera również wpływ na jej zwiększenie [28,29].

Dla badanej gleby w Bogucinie, odległość przemieszczenia cząstek gleby wskutek rozbryzgu zawierała się w przedziale od 5 do 42 cm. Wydaje się, że ta ostatnia wartość jest przeszacowana, aczkolwiek Mihara [88] podaje odległości dochodzące do 50 cm. Wyznaczona na podstawie przeprowadzonych badań średnia odległość wyniosła 9 cm, będąc wartością zbliżoną do danych literaturowych.

Wielkości rozbryzgu skalibrowane według modelu Van Dijka i in. [153] porównano z masą rozbryzgu zmierzoną przy pomocy kubków o różnej średnicy. Stwierdzono, że zależność między tymi wielkościami najlepiej opisują funkcje liniowe, zaś najbardziej skorelowane z wartościami skalibrowanymi były dane pomiarowe wyznaczone przy pomocy kubków o średnicy 5,0 oraz 7,3 cm (tab. 5, rys. 11), a więc tych, których średnica była zbliżona do najczęściej wyznaczanej odległości przemieszczenia rozbryzgu.

Tabela 5. Parametry równania liniowego ($y = ax+b$) dla zależności między rozbryzgiem skalibrow nym i wielkościami zmierzonymi (n = 24)
Table 5. Parameters of linear function ($y = ax+b$) for relationship between calibrated and measured splash (n = 24)

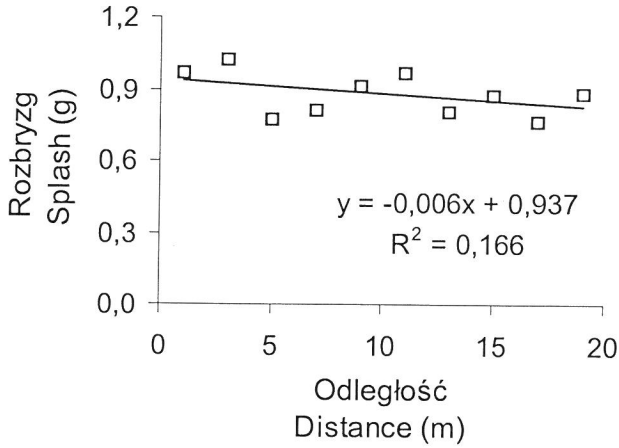
Średnica kubka Splash cup diameter (cm)	Parametr a Parameter a	Parametr b Parameter b	Współczynnik determinacji (R^2) Correlation coefficient
14,5	1,190	0,464	0,90
11,7	1,129	0,485	0,92
7,3	1,417	0,182	0,97
5,0	1,203	0,148	0,95
3,2	0,761	0,376	0,93



Rys. 11. Zależność między danymi skalibrowanymi rozbryzgu i zmierzonymi przy pomocy kubków o średnicy 7,3 cm (A) oraz 5 cm (B)
Fig. 11. Relationships between calibrated and measured splash for cups of 7.3 (A) and 5 (B) cm diameter

4.2.2. Zróżnicowanie rozbryzgu wzdłuż stoku

Rozkład rozbryzgu wzdłuż poletka doświadczalnego analizowano podczas 10-ciu okresów pomiarowych w roku 2004. W jednym z nich (19.07.2004), część kubków położonych w dolnej części poletka została całkowicie (3 – w odległości 1-5 m od instalacji) lub częściowo (3 – w odległości 7-11 m) zamulona materiałem przemieszczonym wraz ze spływem powierzchniowym. Spośród 9 okresów pomiarowych, w czterech – stwierdzono tendencję do niewielkiego zmniejszenia rozbryzgu wraz ze wzrostem odległości od instalacji zbierających i tylko w jednym – trend odwrotny. W pozostałych czterech wielkość rozbryzgu nie wykazywała ukierunkowania w obrębie poletka. Skumulowany rozbryzg nieznacznie malał wraz ze wzrostem odległości od instalacji zbierających spływ (rys. 12). Generalnie wartości współczynników zmienności w poszczególnych okresach mieściły się w przedziale od 9 do 38% (ze średnią 23,7%) (tab. 6). Zawierały się więc one w zakresie zmienności pomiarów rozbryzgu z różnych okresów pomiarowych. Nie zawsze jednak rozkład wielkości rozbryzgu wzdłuż stoku bywa tak zbliżony. Jak wykazują badania Goversa [46], na zróżnicowanie masy oderwanych cząstek w obrębie dłuższego zbocza może wpływać zmiana składu granulometrycznego gleby.



Rys. 12. Zależność między zsumowanym rozbryzgiem i położeniem kubka na poletku erozyjnym (w funkcji wzrastającej odległości od systemu zbierającego spływ powierzchniowy)
Fig. 12. Relationship between cumulative splash and cup location on runoff plot (in the function of increasing distance from runoff instalation – plot outlet)

Tabela 6. Wartość średnia, odchylenie standardowe i współczynnik zmienności rozbryzgu mierzonego na poletku w różnej odległości od systemu zbierającego spływ (n = 10)
Table 6. Average value, standard deviation and coefficient of variation for splash measured at different distance from plot outlet (n = 10)

Lp. No	Okres pomiarowy Measurement period	Wartość średnia Average (g)	Odchylenie standardowe Standard deviation (g)	Współczynnik zmienności Variation coefficient (%)
1	08.06-12.06.2004	1,32	0,25	18,7
2	15.06-21.06.2004	1,93	0,43	22,1
3	21.06-28.06.2004	0,40	0,15	38,0
4	28.06-05.07.2004	0,79	0,29	36,5
5	09.07-11.07.2004	0,24	0,06	27,6
6	12.07-16.07.2004	1,43	0,21	14,4
7	27.07-28.07.2004	1,01	0,09	9,0
8	13.08-14.08.2004	0,43	0,08	17,8
9	20.08-22.08.2004	0,33	0,10	29,3

4.2.3. Odporność gleby na rozbryzg

Większość prac teoretycznych oraz badań laboratoryjnych wiąże rozbryzg z energią kinetyczną kropli [3,16,130]. Z uwagi na to miarę odporności gleby na odrywanie jej cząstek stanowi wielkość energii kinetycznej opadu, zdolna do przemieszczenia 1 kg gleby [108]. Dla zsumowanych wartości rozbryzgu średnia odporność badanej gleby wyniosła 314,7 $J \cdot kg^{-1}$, a w poszczególnych okresach pomiarowych jej wartość wahała się w bardzo szerokim zakresie, od 100 do 931 $J \cdot kg^{-1}$. Analiza warunków towarzyszących rozbryzgowi wskazuje, że decydującym czynnikiem wpływającym na jego zmienność (poza parametrami opadu) jest stan powierzchni gleby (tab. 7). Niemal 2-krotnie więcej energii kinetycznej opadu potrzebne jest do oderwania 1 kg masy z powierzchni zaskorupionej gleby w porównaniu do spulchnionej. Na uwagę zasługuje duże zróżnicowanie odporności w przypadku rozbryzgu na glebie zaskorupionej i to, zarówno w warunkach występowania, jak i braku spływu powierzchniowego. Sugeruje to, że duży wpływ na rozważaną odporność wywierają inne czynniki, którymi najprawdopodobniej są gęstość gleby w warstwie przypowierzchniowej i jej wilgotność przed opadem.

Tabela 7. Parametry statystyczne odporności gleby na rozbryzg w zmiennych warunkach towarzyszących temu procesowi
Table 7. Statistical parameters of soil resistance to splash at various local conditions

Warunki rozbryzgu Splash conditions	Liczba pomiarów Number	Wartość średnia Average	Odchylenie standardowe Standard deviation	Współczynnik zmienności Variation coefficient
	(n)	($J \cdot kg^{-1}$)	($J \cdot kg^{-1}$)	(%)
Gleba spulchniona –Tilled soil	8	253,2	65,0	25,7
Gleba zaskorupiona – Sealed soil	16	479,4	243,6	50,8
Spływ powierzchniowy – Runoff	9	391,0	238,3	60,9
Brak spływu pow. – No runoff	15	390,7	253,8	65,0
Gleba spulchniona/brak spływu Tilled soil/no runoff	2	242,0	46,0	19,0
Gleba spulchniona/spływ pow. Tilled soil/runoff	6	257,0	73,7	28,7
Gleba zaskorupiona/brak spływu Sealed soil/no runoff	6	525,7	203,7	38,7
Gleba zaskorupiona/spływ pow. Sealed soil/runoff	10	451,6	271,3	60,1

Poesen i Torri [108] podają, że odporność gleb na rozbryzg zależy od ich składu granulometrycznego i zawiera się w szerokim zakresie od 96 do 1419 $J \cdot kg^{-1}$ (przy średniej 550 $J \cdot kg^{-1}$). Może ona być nawet większa, bowiem m.in. we wcześniejszej pracy Poesen [107] wyznaczył wartość 1764 $J \cdot kg^{-1}$ dla gleby gliniastej, zaś Szewrański [141] - 1500 $J \cdot kg^{-1}$ dla gleb lessowych. Prezentowane przez cytowanych autorów wartości zostały określone na podstawie dłuższego i ciągłego czasu prowadzenia obserwacji, tak więc stanowią pewną wielkość uśrednioną.

Dla badanej gleby płowej wytworzonej z lessu, średnia wartość odporności wyniosła 303,4 $J \cdot kg^{-1}$, co oznacza że należy ona do grupy bardzo podatnej na rozbryzg. Jednak znaczne zróżnicowanie wartości w poszczególnych okresach pomiarowych (od 100 do 1018 $J \cdot kg^{-1}$) wskazuje na duży wpływ warunków występujących w chwili opadu. Podobne zróżnicowanie odporności gleb (387-1550 $J \cdot kg^{-1}$) uzyskał Govers [46] w badaniach przeprowadzonych na lessowych glebach Belgii.

Do czynników różnicujących wielkość rozbryzgu (poza obecnością lub brakiem szaty roślinnej) zalicza się: nachylenie stoku [35,148,153], wytrzymałość gleby na ścinanie [3,4,20,37], głębokość warstwy wody [97,104,149] oraz prędkość i kierunek wiatru [25,28,29,78]. Reakcja gleby na uderzenia kropli deszczu jest złożona. Generalnie badania wykazują, że w początkowej fazie opadu wzrost wilgotności gleby (do stanu nasycenia) powoduje obniżenie jej wytrzymałości na naprężenie, a zatem i wzrost rozbryzgu [4,41]. Następnie w wyniku uformowania się skorupy powierzchniowej (zagęszczonej kilku milimetrowej warstwy gleby) występuje wzrost wytrzymałości tej warstwy na naprężenia ścinające i zmniejszenie rozbryzgu. Wiąże się to zazwyczaj z powstaniem ustabilizowanego spływu powierzchniowego [2,3,20]. Wraz ze wzrostem warstwy wody na powierzchni gleby następuje obniżenie naprężenia wywieranego przez krople deszczu i dalsze zmniejszenie wielkości rozbryzgu [97]. Badania Torriego i in. [149] wykazują, że już począwszy od warstwy wody rzędu 0,3 mm, następuje gwałtowny spadek wielkości rozbryzgu opisywany funkcją potęgową. Z kolei prace Parsonsa i in. [104] wskazują na bardziej złożoną interakcję, w której wielkość rozbryzgu początkowo wzrasta wraz z powstawaniem spływu powierzchniowego (fazą wypełniania lokalnych mikrodepresji), a następnie maleje. O skomplikowanej relacji między początkowym stanem gleby a masą oderwanych cząstek świadczą badania Watunga i in. [161] oraz Trumana i Bradforda [150]. W pierwszym przypadku nie stwierdzono wpływu wilgotności gleby przed opadem na wielkość rozbryzgu, natomiast w drugim – obniżenie rozbryzgu na glebie wilgotnej w porównaniu do suchej. Wpływ na zróżnicowanie rozbryzgu wywiera również siła i kierunek wiatru poprzez dodatkowe zwiększenie prędkości kropli, zmianę kształtu i kąta uderzenia [25,28,29]. Z reguły powoduje to wzrost masy oderwanych cząstek gleby [25,78,168].

Wyniki uzyskane w niniejszej pracy wskazują, że decydujący wpływ na wielkość rozbryzgu wywierał stan gleby przed opadem, zaś jej odporność na rozbryzg była niemal dwukrotnie większa w warunkach spulchnienia powierzchniowej warstwy w porównaniu do zaskorupionej, niezależnie od wystąpienia lub braku spływu powierzchniowego. Obecność spływu jedynie w nieznaczny sposób obniżała odporność gleby na rozbryzg.

4.2.4. Prognozowanie rozbryzgu na podstawie parametrów opadu

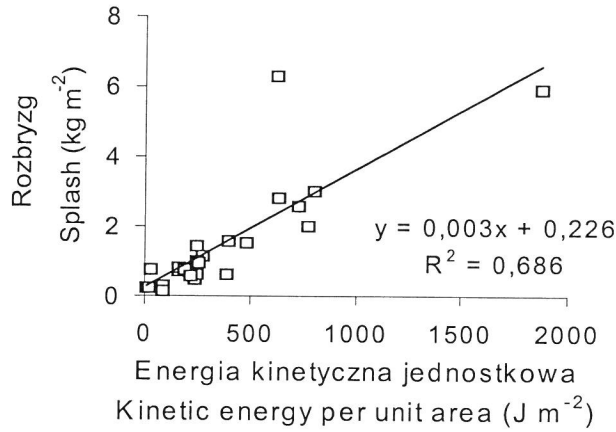
Analiza opadów w poszczególnych okresach pomiarowych wykazała, że najmniejsza intensywność cząstkowa, przy której zarejestrowano rozbryzg wynosiła 3,9 $mm \cdot h^{-1}$ (20.04-21.05.2000). W dwóch kolejnych okresach (04-06.04.2000 oraz 21.06-28.06.2004), rozbryzg zebrano po opadach z intensywnością cząstkową nie przekraczającą 5 $mm \cdot h^{-1}$.

Zależność między rozbryzgiem i opadem analizowano z zastosowaniem różnych wartości progowych opadu. Zależności te opisują równania liniowe (tab. 8).

Tabela 8. Równania i współczynniki determinacji (R^2) dla zależności między rozbryzgiem i parametrami opadów
Tabela 8. Equations and correlation coefficients (R^2) for relationships between splash and rainfall characteristics

Parametr Parameter	Wartość progowa Threshold value	Wszystkie opady All rainfalls		Bez opadu 19.07.2004 Without rainfall of 19.07.2004	
		Równanie Equation	Współczynnik determinacji (R^2) Correlation coefficient	Równanie Equation	Współczynnik determinacji (R^2) Correlation coefficient
Suma	0	0,048x + 0,152	0,29	0,052x – 0,195	0,57
Amount	1	0,062x – 0,045	0,41	0,068x – 0,319	0,72
(mm)	2	0,069x – 0,030	0,50	0,069x – 0,245	0,82
	3	0,071x + 0,109	0,55	0,069x – 0,058	0,86
Energia kinetyczna jednostowa	0	0,003x + 0,019	0,61	0,003x – 0,070	0,87
	1	0,003x + 0,058	0,65	0,003x – 0,015	0,91
Kinetic energy per	2	0,003x + 0,130	0,67	0,003x + 0,060	0,93
unit area ($J \cdot m^{-2}$)	3	0,003x + 0,226	0,69	0,003x + 0,158	0,93

Zastosowanie wartości progowych w niewielkim stopniu wpłynęło na poprawę prognozowania rozbryzgu. Jego wielkość najsilniej była skorelowana z jednostkową energią kinetyczną. Jednak dopasowanie krzywej regresji w dużym stopniu zakłóca rozbryzg w dniu 19.07.2004 (z opadem 22,2 mm w ciągu 20 min) (rys. 13). Tak znaczne zwiększenie wielkości masy oderwanej gleby zaobserwowane podczas krótkotrwałego opadu o wysokiej intensywności stawia pod znakiem zapytania zdolność prognozowania rozbryzgu na podstawie sumarycznych wielkości energii kinetycznej. Nasuwa się pytanie czy rozbryzgu nie można oszacować w inny i dokładniejszy sposób, np. w oparciu o elementy cząstkowe opadu (intensywność cząstkową). W tym miejscu należy przypomnieć, że energia kinetyczna opadu jest funkcją jego intensywności [15].



Rys. 13. Zależność między rozbryzgiem i jednostkową energią kinetyczną opadu z wartością progową 3 mm·h^{-1}
Fig. 13. Relatioship between splash and rainfall kinetic energy per unit area (with threshold value of 3 mm h^{-1})

Analiza opadów o zbliżonej intensywności

W utworzonej bazie danych wyodrębniono okresy pomiarowe, w których wystąpiły opady pojedyncze lub składające się z niewielkiej ich liczby. Następnie w obrębie wybranej grupy wydzielono okresy z opadem, w trakcie którego dominowała jedna maksymalna intensywność cząstkowa, zaś pozostałe były niewielkie (od 0,1 do 1,9 mm·h^{-1}) i teoretycznie miały znikomy wpływ na powstanie rozbryzgu lub jego wielkość. Ogółem spośród 24 przeprowadzonych pomiarów do dalszej analizy wyodrębniono 4, w których określonej intensywności można było przypisać zmierzony rozbryzg gleby (tab. 9).

Tabela 9. Charakterystyka opadu oraz rozbryzg w okresach z jednakową intensywnością opadu
Table 9. Rainfall characteristics and splash in measurement periods of uniform rainfall intensity

Lp. No	Okres pomiarowy Measurement period	Charakterystyka opadu Rainfall characteristics				Rozbryzg Splash	
		Suma Amount	Czas Time	Intensywność Intensity	Energia kinetyczna jednostkowa Kinetic energy per unit area	Ogółem Total	Cząstkowy (10 minut) Partial
		(mm)	(min)	($mm \cdot h^{-1}$)	($J \cdot m^{-2}$)	($kg \cdot m^{-2}$)	
1	28.06-28.06.04	3,0	40	4,5	37,0	0,229	0,057
2	11.07-11.07.04	5,4	50	6,5	75,1	0,152	0,030
3	19.07-19.07.04	22,2	20	66,6	627,2	6,755	3,378
4	20.08-20.08.04	2,4	20	7,2	34,3	0,223	0,112

Z uwagi na zróżnicowany czas trwania opadów, całkowitą wielkość rozbryzgu podzielono na elementy 10 minutowe, co umożliwiło wyznaczenie zależności między rozbryzgiem i intensywnością cząstkową (w ciągu 10 minut). Decydujący wpływ na tę zależność wywarł opad o największej intensywności, co sprawiło, że najlepiej dopasowanymi były funkcje potęgowe i wykładnicza. Wstępną ocenę prognozowania rozbryzgu przy pomocy tych funkcji przeprowadzono dla okresu pomiarowego 26-28.07.1999 (tab. 10). Charakteryzował się on dużą zmiennością intensywności cząstkowych i stąd najlepiej nadawał się do wstępnej oceny modelu. Przeprowadzona analiza wykazała, że wielkość rozbryzgu gleby w miarę dokładnie można oszacować na podstawie funkcji postaci: $y = 0{,}0385e^{0{,}0673I}$, opisującej rozbryzg w 10 minutowych okresach opadu o intensywności I. Inne testowane funkcje niemal 2-krotnie zawyżały prognozowany rozbryzg w stosunku do wielkości zmierzonej (tab. 10).

Na podstawie przeprowadzonej analizy danych pomiarowych zaproponowano następujący model rozbryzgu S ($kg \cdot m^{-2}$):

$$S = \sum_{i=1}^{N} 0{,}0385e^{0{,}0673I} \tag{3}$$

gdzie:

I – intensywność opadu ($mm \cdot h^{-1}$) przy $I \geq 2$ $mm \cdot h^{-1}$,

i – okres 10 minutowy o intensywności I,

N – liczba okresów 10 minutowych o intensywności I.

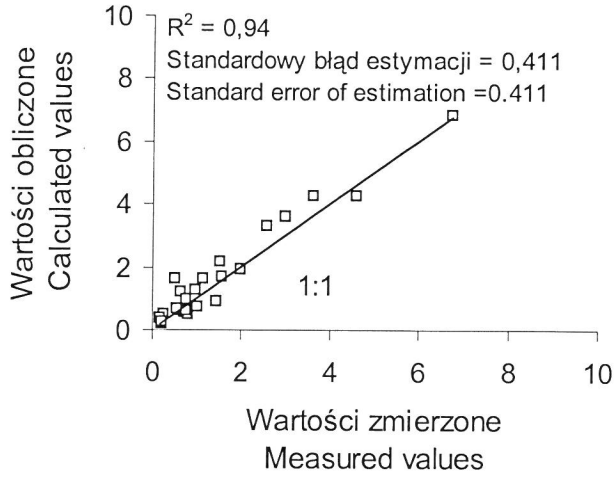
Tabela 10. Parametry opadu oraz wartości rozbryzgu obliczone na podstawie wybranych modeli na bazie 10-minutowego przedziału czasowego dla okresu pomiarowego o intensywności (x). Wartość zmierzona rozbryzgu – 4,59 kg·m^{-2}; odchylenie standardowe – 1,00 kg·m^{-2}

Table 10. Rainfall parameters splash calculated with different models on the basis of 10-minute periods (x –intensity). Measured value for the measurement period – 4,59 kg·m^{-2}; standard deviation – 1,00 kg·m^{-2}

Data Date	Czas Time	Opad Amount	Intensywność opadu Intensity	Rozbryzg – Splash		
				$0{,}0031x^{1{,}654}$ ($R^2 = 0{,}93$)	$0{,}0007x^2+0{,}0067x$ ($R^2 = 0{,}99$)	$0{,}0385e^{0{,}067x}$ ($R^2 = 0{,}94$)
	(min)	(mm)	(mm·h^{-1})	(kg·m^{-2})		
26.07.99	20	8,7	26,1	1,364	1,303	0,446
27.07.99	20	0,1	0,3	–	–	–
	20	8,5	25,5	1,313	1,252	0,428
	40	9,7	14,6	1,038	0,983	0,410
	50	21,4	25,7	3,321	3,168	1,084
	10	4,0	24,0	0,594	0,564	0,194
	10	3,0	18,0	0,369	0,347	0,129
	50	8,9	10,7	0,778	0,757	0,395
	40	0,2	0,3	–	–	–
28.07.99	10	3,7	22,2	0,522	0,494	0,172
	10	1,0	6,0	0,060	0,065	0,058
	40	2,0	3,0	0,076	0,106	0,188
	20	5,9	17,7	0,718	0,676	0,253
	90	7,5	5,0	0,399	0,459	0,485
Suma Total	430	84,6	–	10,553	10,175	4,242

Weryfikacja modelu

Stosując zaproponowany model (3) obliczono wielkość rozbryzgu w poszczególnych okresach pomiarowych. Krzywą dopasowania wartości pomiarowych i obliczonych z modelu przedstawiono na rysunku 14. W modelu zastosowano wartość progową intensywności cząstkowej równą 3 mm·h^{-1}. Przy wartości progowej 2 mm·h^{-1}, rozrzut wartości obliczonych w stosunku do pomiarowych był większy, a wskaźnik determinacji R^2 wyniósł 0,86.



Rys. 14. Zmierzone i obliczone z modelu (3) wartości rozbryzgu (kg·m^{-2})
Fig. 14. Measured versus calculated (3) splash (kg m^{-2})

Na podstawie zaproponowanego modelu w miarę dokładnie można prognozować wartości rozbryzgu. Jedynie w dwóch okresach pomiarowych stwierdzono znaczne różnice między wartościami obliczonymi i pomiarowymi: dotyczy to okresów 21.05-21.05.2000 oraz 9.07-11.07.2004, w których wyniosły one odpowiednio 232 i 132%. W porównaniu do pozostałych, w pierwszym z nich opady wystąpiły po 35 dniach przerwy (był to jedyny przypadek, bowiem w innych odstęp między opadami nie przekraczał 14 dni), a w drugim – zmierzone wartości rozbryzgu były najmniejszymi. W pozostałych okresach pomiarowych różnice między wartościami prognozowanymi a obserwowanymi dochodziły maksymalnie do 76%.

Przeprowadzone dotychczas badania wykazywały, że zależność między rozbryzgiem S i energią kinetyczną kropli (opadu) E_{kin} najlepiej opisywały równania potęgowe $S = a\ E_{kin}^{\ b}$, w których współczynnik b przyjmował wartość zależnie od rodzaju gleby. Sharma i in. [130] podają zakres współczynnika b od 0,77 do 2,10, a Bubenzer i Jones [16] – od 1,34 do 1,77, przy czym mniejsze wartości odnoszą się do gleb piaszczystych, a większe do ilastych. Najczęściej współczynnik b jest bliski jedności, co sprawia, że zależność ma charakter liniowy. Taką też wartość posiada on w modelu EUROSEM (European Soil Erosion Model) [93]. W modelu WEPP (Water Erosion Prediction Project) [30] energia kinetyczna została zastąpiona intensywnością z wartością współczynnika b równą 2. Nieco inne rozwiąza-

nie proponują Salles i Poesen [127], wykorzystując iloczyn momentu pędu i masy kropli do prognozowania rozbryzgu z piasku nasyconego wodą. W praktyce wykorzystanie tego modelu wymagałoby bezpośredniego pomiaru wielkości kropli oraz ich prędkości końcowej. Powyższe równania i ich współczynniki zostały opracowane na podstawie badań prowadzonych z symulatorami opadów, które nie w pełni zapewniają rozkład kropli zbliżony do występującego w opadzie naturalnym, nie zawsze też wytwarzane krople osiągają stałą prędkość opadania.

Badania prowadzone na obiekcie w Bogucinie wykazywały początkowo, że zależność między rozbryzgiem gleby a energią kinetyczną ma charakter liniowy [112]. Jednakże wielkość rozbryzgu podczas krótkotrwałego i intensywnego opadu, który wystąpił w jednym z okresów pomiarowych w roku 2004 wyraźnie różniła się od uprzednio zebranych danych, wskazując na nieliniowy charakter powyższej zależności. W związku z tym, po wyselekcjonowaniu danych zaproponowano prosty model empiryczny, w którym wielkość rozbryzgu jest szacowana na podstawie równania z intensywnością opadu jako elementem wykładnika potęgi. Z uwagi na większą czytelność obliczeń, zastosowano w nim intensywność opadu zamiast energii kinetycznej. Przy pomocy zaproponowanego modelu z dużą dokładnością można prognozować rozbryzg mimo, że został on opracowany na podstawie 10-minutowego, a nie krótszego przedziału czasowego. W porównaniu do innych istniejących równań, zastosowana w modelu funkcja wskazuje na znacznie większe uzależnienie wielkości rozbryzgu od dużych intensywności.

Prezentowany model został opracowany dla opadów z wartością progową intensywności cząstkowej 3 $mm \cdot h^{-1}$. Jednymi z pierwszych autorów rozważających możliwość wprowadzenia wielkości granicznej w procesie rozbrygu byli Park i in. [102]. W swoich rozważaniach teoretycznych podkreślają oni, że aby doszło do oderwania cząstek gleby od jej powierzchni powinna istnieć pewna wartość progowa prędkości kropli i odpowiadająca jej energia kinetyczna zdolna do pokonania inercji tychże cząstek. Jednak na podstawie ówczesnych badań nie było możliwe choćby szacunkowe podanie jej wartości. Według cytowanych autorów jest ona związana z wytrzymałością gleby na naprężenie ścinające. Pierwsze wartości graniczne podają Sharma i in. [130 131]. Oszacowany przez nich na podstawie badań z symulatorem opadów progowy strumień energii zawiera się w przedziale od 0,10 do 0,62 $J \cdot m^{-2} \cdot min^{-1}$, przy czym mniejsze wartości odnoszą się do gleb piaszczystych, a większe do gliniastych o dużej zawartości iłu koloidalnego. Podany przez Sharmę i in. [131] zakres wartości odpowiada energii kinetycznej kropli o średnicy od 1,1 do 3,1 mm oraz intensywności opadu od 0,7 do 3,3 $mm \cdot h^{-1}$ (obliczony na podstawie równania Browna i Fostera [15]). Z kolei Kneale [63] podaje, że mierzalne wielkości roz-

bryzgu w warunkach klimatyczno-glebowych środkowej Anglii zaobserwował on przy intensywności opadu większej od 5 $mm \cdot h^{-1}$, natomiast Szpikowski [143] za taką wartość uważa intensywność 0,1 $mm \cdot h^{-1}$ (dla piasków gliniastych).

Dla gleby najbardziej zbliżonej pod względem składu granulometrycznego (spośród analizowanych przez Sharmę i in. [131]) do występującej w Bogucinie, wartość progowa strumienia energii wynosi 0,19 $J \cdot m^{-2} \cdot min^{-1}$, co odpowiada intensywności opadu 1,2 $mm \cdot h^{-1}$. Wartość ta jest mniejsza od przyjętej w zaproponowanym modelu. Należy w tym miejscu zwrócić uwagę, że badania stanowiące przedmiot rozprawy prowadzono w warunkach polowych metodą pomiarową, w której zachodzi konieczność umieszczania krawędzi kubka kilka milimetrów ponad powierzchnią gleby. Oznacza to, że część rozbryzgu, odrywana pod niewielkim kątem od powierzchni gleby i przenoszona na małe odległości, pozostaje nie zmierzona. Dotyczy to przede wszystkim cząstek gleby przenoszonych przez drobne krople charakterystyczne dla opadów o małej intensywności.

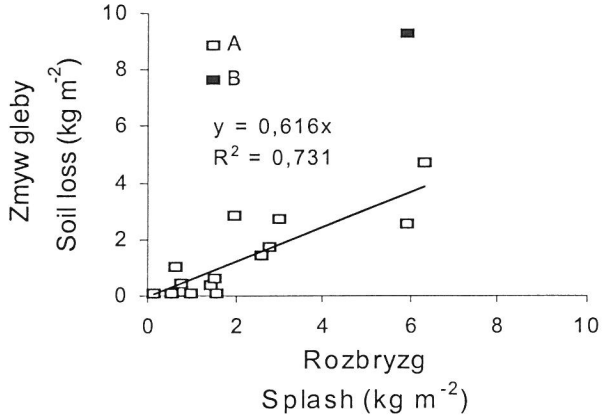
4.2.5. Rozbryzg i zmyw gleby

W literaturze opisującej zagadnienia rozbrygu nie ma zgodności, w jakim stopniu jego wielkość jest skorelowana ze zmywem gleby. Niektóre badania wskazują na silną korelację [168], inne na słabą [90]. Parsons i in. [104] uważają, że nie ma bezpośredniego związku między rozbryzgiem i zmywem gleby. W opinii cytowanych autorów, związek ten występuje gdy rozbryzgowi towarzyszy spływ powierzchniowy, zwłaszcza wówczas gdy osiągnie on pewną głębokość. Wzrost warstwy spływającej wody oznacza zwiększenie pojemności transportowej spływu i umożliwia przenoszenie całej masy gleby oderwanej przez krople deszczu. Rozbryzg może też samodzielnie przemieszczać materiał glebowy [41,107], przy czym jak wykazują badania Poesena [107] oraz Kneale [63] czynnikiem decydującym o bilansie przenoszenia (w dół lub górę zbocza) jest kierunek i prędkość wiatru.

Zależność między wielkością masy erodowanej gleby i rozbryzgiem przedstawiono na rysunku 15. W ciągu 15 okresów pomiarowych rozbryzg sumarycznie wyniósł 30,88 $kg \cdot m^{-2}$, podczas gdy łączny zmyw gleby 18,51, a wliczając erozję żłobinową 27,72 $kg \cdot m^{-2}$.

W poszczególnych okresach wielkość rozbryzgu przewyższała zmyw, średnio 4,5-krotnie, a w ekstremalnym przypadku nawet 23-krotnie. Jedynie podczas opadu, w którym na powierzchni poletek wystąpiły żłobiny (26.07-28.07.1999),

wielkość rozbryzgu była 2-krotnie mniejsza od łącznej masy zmywu (erozji żłobinowej i międzyżłobinowej).



Rys. 15. Zależność między zmywem gleby i rozbryzgiem (A – erozja miedzyżłobinowa; B – erozja żłobinowa) (n = 15)
Fig. 15. Relationship between soil loss and splash (A – interrill erosion; B – rill erosion) (n = 15)

4.3. Erozja wodna na poletkach utrzymywanych w czarnym ugorze

4.3.1. Spływ powierzchniowy i zmyw gleby

Pomiary spływu powierzchniowego i zmywu gleby prowadzono łącznie w 40 okresach (13 – 1997 r., 12 – 1998 r., 5 – 1999 r., 6 – 2000 r., 4 – 2004 r.) oraz 16 (11 – 1998 r., 5 – 1999 r.) odpowiednio na stoku o spadku 12% (wystawa północna) i 7% (południowa). Ich wyniki przedstawiono w tabelach 11-12.

Od roku 1998 maksymalne jednostkowe wartości zmywu na stoku o nachyleniu 12% obserwowano najczęściej na poletku o długości 2,5 m (14-krotnie), rzadziej 5 m (9-krotnie) i 10 m (3-krotnie). Wartości te zawierały się w przedziałach od 0,007 do 1,725 (dla obiektu o długości 2,5 m), 0,065-9,211 (5 m) i 0,335-2,702 $kg \cdot m^{-2}$ (10 m). Również na stoku o nachyleniu 7% najczęściej maksymalne wartości jednostkowe stwierdzano na poletku o długości 2,5 m (13-krotnie). Aż w 13 na 15 okresów, w których jednocześnie prowadzono pomiary na obu stokach maksymalne wartości obserwowano na obiektach doświadczalnych o tej samej długości. Objętość pojemników zbierających okazała się zbyt mała do zebrania całości spływu powierzchniowego w 10-ciu i 6-ciu okresach pomiarowych, odpowiednio dla stoków o spadku 12 i 7%. W pozostałych zdarzeniach erozyjnych wartości współczynnika spływu (stosunku spływu do wielkości opadu) zawierały się w przedziale od 2,1 do 44,5% i od 1,9 do 24,4%, odpowiednio dla spadku 12 i 7%.

Tabela 11. Parametry opadów, maksymalny zmyw gleby i spływ powierzchniowy, współczynnik spływu oraz efektywne odległości przemieszczenia gleby (A) i spływu (B), zbocze o skłonie 7%
Table 11. Rainfall parameters, maximum soil loss and runoff per unit area, runoff coefficient and effective transport distance of soil (A) and runoff (B) on 7% slope

Lp. No	Okres Pomiarowy Measurement period	Opad Amount	Wskaźnik EI_{30} EI_{30} index	Zmyw gleby Soil loss	Spływ pow. Runoff	Współ. spływu Runoff coefficient	Przemieszczenie Transport distance	
							A	B
		(mm)	(MJ·mm·ha^{-1}·h^{-1})	(kg·m^{-2})	(mm)	(%)	(m)	(m)
1	04.05-11.05.98	28,3	11,62	0,039	0,53	1,9	1,93	4,17
2	12.05-18.05.98	8,8	5,74	0,009	0,27	3,1	3,10	5,00
3	19.05-25.05.98	21,7	13,73	0,015	0,67	3,1	2,27	3,33
4	08.06-08.06.98	16,2	82,60	0,112	1,60	3,7	2,64	5,28
5	09.06-15.06.98	37,2	690,90	5,294	9,07	24,4	7,41	2,87
6	22.06-29.06.98	13,5	17,19	0,033	0,27	2,0	3,17	4,17
7	06.07-13.07.98	26,4	24,21	0,023	1,07	4,1	3,87	3,85
8	03.08-04.08.98	29,2	151,95	0,167	6,40	21,9	7,08	4,03
9	10.08-17.08.98	25,0	58,66	0,071	3,40	13,6	5,60	6,70
10	17.08-31.08.98	54,5	287,65	2,317	9,07	16,7	9,80	2,87
11	28.09-06.10.98	52,9	23,91	0,097	3,87	7,3	5,02	5,89
12	14.06-20.06.99	38,9	111,31	0,529	3,20	8,2	2,82	3,02
13	21.06-27.06.99	42,7	58,48	0,453	>10,4	>24,3	4,85	n.o
14	05.07-11.07.99	24,3	266,73	0,596	>10,4	>42,8	5,43	n.o
15	12.07-18.07.99	40,7	382,41	1,307	>10,4	>25,6	7,35	n.o
16	26.07-02.08.99	84,7	384,02	8,416	>10,4	>12,3	11,14	n.o

Objaśnienia: n.o.- nie oznaczono not determined.

Tabela 12. Parametry opadów, maksymalny zmyw gleby i spływ powierzchniowy, współczynnik spływu oraz efektywne odległości przemieszczenia gleby (A) i spływu (B), zbocze o skłonie 12%
Table 12. Rainfall parameters, maximum soil loss and runoff per unit area, runoff coefficient and effective transport distance of soil (A) and runoff (B) on 12% slope

Lp. No	Okres Pomiarowy Measurement period	Opad Amount	Wskaźnik EI_{30} EI_{30} index	Zmyw gleby Soil loss	Spływ pow. Runoff	Współ. spływu Runoff coefficient	Odległość przemieszczenia Transport distance	
							A	B
		(mm)	(MJ·mm·ha^{-1}·h^{-1})	(kg·m^{-2})	(mm)	(%)	(m)	(m)
1	19.05-23.05.97	18,8	23,05	0,005	0,8	4,2	4,53	3,78
2	26.05-02.06.97	31,6	n.o.	0,034	1,9	6,2	4,83	3,24
3	23.06-25.06.97	19,5	56,21	0,070	2,3	11,6	9,13	8,49
4	02.07-06.07.97	34,3	88,58	0,076	2,4	7,0	6,78	5,54
5	07.07-13.07.97	24,1	24,47	0,059	2,1	8,8	8,85	6,61
6	14.07-21.07.97	52,0	102,40	0,145	>4,4	>8,4	15,17	n.o.
7	22.07-28.07.97	20,0	18,45	0,013	0,9	4,6	6,18	4,20
8	04.08-07.08.97	11,6	8,37	0,006	0,4	3,6	7,11	5,50
9	30.08-31.08.97	24,3	123,39	0,057	1,9	8,0	5,44	4,91
10	01.09-07.09.97	33,2	506,48	4,249	>4,4	>13,1	8,96	n.o.
11	08.09-12.09.97	14,8	27,17	0,194	>3,8	>25,7	8,75	n.o.
12	29.09-06.10.97	31,3	64,60	0,024	1,3	4,2	5,14	4,17
13	07.10-13.10.97	10,2	6,67	0,005	0,6	6,1	4,38	2,46
14	04.05-11.05.98	28,3	11,62	0,042	2,8	9,8	2,03	1,81
15	12.05-18.05.98	8,8	5,74	0,007	0,2	2,1	4,11	5,37
16	19.05-25.05.98	21,7	13,73	0,016	1,3	6,0	2,85	2,19
17	08.06-08.06.98	16,2	82,60	0,074	1,7	10,3	2,95	2,41
18	09.06-15.06.98	37,2	690,90	3,700	>8,7	>23,1	9,43	n.o.
19	16.06-16.06.98	13,2	9,88	0,065	4,0	30,5	5,01	6,67
20	22.06-29.06.98	13,5	17,19	0,030	0,7	5,5	3,71	4,19
21	06.07-13.07.98	26,4	24,21	0,019	2,2	8,4	3,98	1,67
22	03.08-04.08.98	29,2	151,95	0,120	>8,7	>29,8	5,20	n.o.

Tabela 12. c.d.
Table 12. cont.

Lp No	Okres Pomiarowy Measurement period	Opad Amount	Wskaźnik EI_{30} EI_{30} index	Zmyw gleby Soil loss	Spływ pow. Runoff	Współ. spływu Runoff coefficient	Odległość przemieszczenia Transport distance	
							A	B
		(mm)	($MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1}$)	($kg \cdot m^{-2}$)	(mm)	(%)	(m)	(m)
23	10.08-17.08.98	25,0	58,66	0,029	4,5	18,2	3,98	2,10
24	17.08-31.08.98	54,5	287,65	2,679	>8,7	>16,0	9,09	n.o.
25	28.09-06.10.98	52,9	23,91	0,060	5,0	9,5	2,39	1,80
26	14.06-20.06.99	38,9	111,31	1,383	>8,7	>22,4	3,24	3,00
27	21.06-27.06.99	42,7	58,48	1,001	>8,7	>20,4	5,75	4,18
28	05.07-11.07.99	24,3	266,73	1,725	>8,7	>35,8	2,95	3,46
29	12.07-18.07.99	40,7	382,41	2,779	>8,7	>21,4	9,05	n.o.
30	26.07-02.08.99	84,7	384,02	9,211	>8,7	>10,3	8,84	n.o.
31	03.04-11.04.00	26,7	13,63	0,347	6,3	23,6	6,89	6,40
32	11.04-20.04.00	10,8	10,42	0,144	1,2	11,1	3,37	3,76
33	11.07-18.07.00	33,1	35,51	0,067	0,9	2,8	5,54	3,95
34	18.07-26.07.00	19,5	30,10	0,335	3,0	16,3	10,05	11,08
35	26.07-01.08.00	64,9	70,70	0,588	4,2	6,4	10,36	9,87
36	01.08-08.08.00	49,4	241,02	2,702	7,6	15,6	13,01	12,74
37	20.06-21.06.04	30,2	21,45	0	0,8	2,6	0,00	14,09
38	11.07-16.07.04	16,8	9,65	0,053	1,3	7,8	5,52	6,22
39	19.07-19.07.04	22,2	278,48	4,853	9,9	44,5	14,89	15,00
40	27.07-28.07.04	24,7	48,26	0,087	1,7	6,7	5,70	5,71

Objaśnienia: n.o.– nie oznaczono not determined.

Pomiary erozji prowadzono w szerokim zakresie opadów (8,8-84,7 mm) oraz wartości wskaźnika erozyjności opadu i spływu powierzchniowego EI_{30} (5,7-690,9 $MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1}$). Maksymalne zmywy gleby stwierdzono w tym samym okresie pomiarowym na obu stokach (26.07-02.08.99) i wynosiły one 9,21 i 8,42 $kg \cdot m^{-2}$, odpowiednio dla spadku 12 i 7%. Podczas tego opadu powierzchnia poletek została pokryta równomierną siecią drobnych żłobin.

Zależności między maksymalną wielkością jednostkową zmywu gleby i wartościami zmierzonymi na obiektach o zróżnicowanej długości opisywały równania

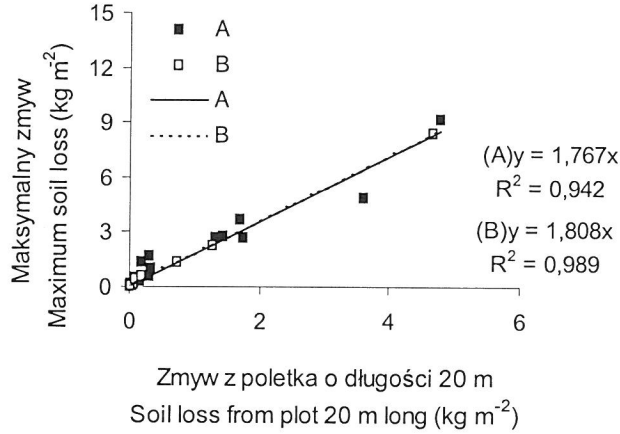
liniowe z parametrami podanymi w tabeli 13. Na rysunku 16 przedstawiono zależność wyznaczoną dla danych z poletek o długości 20 m.

Tabela 13. Parametry równań regresji liniowej ($y = ax$) między zmywem gleby z poletka o określonej powierzchni (długości) i maksymalnym zmywem jednostkowym gleby
Table 13. Parameters of linear dependence ($y = ax$) between soil loss from plots of different length and maximum soil loss per unit area

Długość poletka Plot length	Parametr a Parameter a	Współczynnik determinacji (R^2) Correlation coefficient
(m)	Zbocze Slope 12%	
20	1,767	0,94
10	1,224	0,96
5	1,041	0,98
2,5	1,222	0,98
	Zbocze Slope 7%	
20	1,808	0,99
10	1,015	0,99
5	1,398	0,98
2,5	1,983	0,95

Analizę łącznych wartości zmywu gleby (według sposobu interpretacji opisanego w rozdziale 3.4) dla okresów, w których prowadzono pomiary równocześnie na obu stokach przedstawiono w tabeli 14. Pomiary wykazały istnienie niewielkich lecz istotnych różnic w przebiegu erozji. Maksymalna wartość jednostkowa zmywu gleby na stoku o nachyleniu 12% stwierdzono na poletku o długości 5 m, a na stoku 7% - 10 m. Różnicę zaobserwowano również w wielkości maksymalnego zmywu jednostkowego, który był większy o 4,9 $kg \cdot m^{-2}$ na stoku o skłonie 12% w porównaniu do stoku 7% (przy stosunku 1,4:1).

W przypadku zastosowanego układu doświadczalnego największe wartości erozji obserwowano na poletkach o długości 20 m. Analizując dane z tych obiektów, zmyw gleby na stoku o spadku 12% był większy w porównaniu do zmywu na stoku 7%, a ich stosunek wynosił jak 1,17:1. Nie była to jednak wartość stała i ulegała zmianie wraz z długością obiektu doświadczalnego. Największa różnica wystąpiła na poletkach najkrótszych, na których zmyw gleby był niemal 2-krotnie większy na stoku 12%. Zależności między maksymalnym zmywem jednostkowym gleby oraz wielkością masy przenoszoną przez pas pola o szerokości 1 m (obliczoną dla obiektów o długości 20 m) została przedstawiona na rysunku 17.

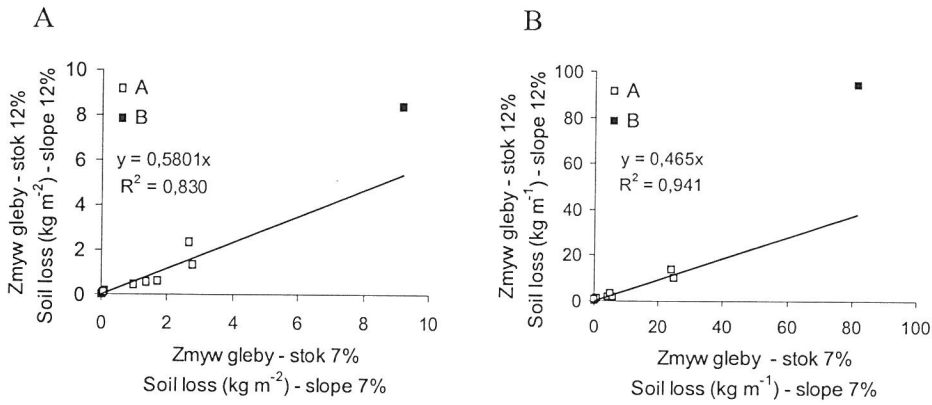


Rys. 16. Zależność między maksymalnymi wartościami zmywu jednostkowego gleby i zmywem jednostkowym z poletek o długości 20 m (A – skłon 12%; B – skłon 7%)
Fig. 16. Relationships between maximum soil per unit area and soil loss per unit area determined for plot 20 m long (A – 12% slope; B – 7% slope)

Tabela 14. Zmyw gleby, powierzchnia zbiorcza oraz efektywne odległości przemieszczenia gleby w tych samych okresach pomiarowych dla obu zboczy (1998-1999) (n = 15)
Table 14. Soil loss, contributing area and effective distance for soil transport analysis for the same measurement periods for both slopes (1998-1999) (n = 15)

Parametr – Parameter	Powierzchnia (m^2) i długość poletka L (m) Plot area (m^2) and length – L (m)			
	60 (L = 20)	30 (L = 10)	15 (L = 5)	7,5 (L = 2,5)
	Zbocze Slope 7%			
Zmyw gleby – Soil loss (kg)	434,04	370,34	155,34	63,22
Zmyw gleby – Soil loss ($kg \cdot m^{-2}$)	7,23	12,34	10,36	8,43
Powierzchnia zbiorcza – Contributing area (m^2)	35,2	–	–	–
Efektywna odległość przemieszczenia Effective distance of transport (m)	11,5	–	–	–
	Zbocze Slope 12%			
Zmyw gleby – Soil loss (kg)	506,14	391,68	259,15	124,01
Zmyw gleby – Soil loss ($kg \cdot m^{-2}$)	8,44	13,06	17,28	16,53
Powierzchnia zbiorcza – Contributing area (m^2)	29,3	23,7	–	–
Efektywna odległość przemieszczenia Effective distance of transport (m)	9,8	7,9	–	–

Uzyskane wyniki wskazują, że maksymalna wielkość jednostkowa erozji występowała na poletkach o różnej długości w poszczególnych okresach pomiarowych. Stanowi to podstawową różnicę w porównaniu do wieloletnich badań prowadzonych w USA, które posłużyły do opracowania modeli USLE [165] i RUSLE [118]. Prace amerykańskie wskazują bowiem, że wielkość jednostkowa erozji wzrasta wraz z długością poletka (zbocza). Tym niemniej w ostatnich latach pojawiają się prace badawcze prowadzone na obiektach o różnej długości, wskazujące, że większe wartości jednostkowe występują na poletkach mniejszych (krótszych). Pochodzą one z Chile [58], Francji [68], Hiszpanii [18] i Izraela [166], a więc krajów o generalnie zbliżonych do Polski sumach opadów (pojedynczych i rocznych) oraz podobnie – bardzo zróżnicowanych warunkach wilgotnościowych gleby [68,70,124].



Rys. 17. Zależność między maksymalnym jednostkowym zmywem gleby (a) oraz zmywem gleby przenoszonym przez pas pola o szerokości 1 m (b) na stoku 12 i 7% (A – erozja międzyżłobinowa, B – erozja międzyżłobinowa i żłobinowa)

Fig. 17. Relationships between maximum soil loss per unit area (a) and soil loss per plot width (b) at 12 and 7% slopes (A – interill erosion, B – interrill and rill erosion)

W przeciwieństwie do wymienionych krajów opady na terenie środkowowschodniej części USA charakteryzują bardzo wysokimi rocznymi wartościami wskaźnika erozyjności EI_{30}, od 1200 do 7000 $MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1}$ [34], a niekiedy dochodzącymi do 8000 $MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1}$ [86]. Dla porównania, roczna suma wskaźnika EI_{30}, wyznaczona na podstawie bezpośrednich obliczeń dla 8 stacji pomiarowych na terenie Polski zawiera się w przedziale od 426 do 968 $MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1}$ z maksymalnymi wartościami w rejonach pogórzy [9,73,114]. Podobne wartości uzyskała Lorenz (za Józefaciuk i Józefaciuk [59]), wyznaczając wskaźnik EI_{30} metodą Fourniera (tj. na podstawie miesięcznych sum opadów). Tak więc, potencjalna erozyjność opadów na terenie dla którego opracowano założenia modelu USLE jest kilkukrotnie

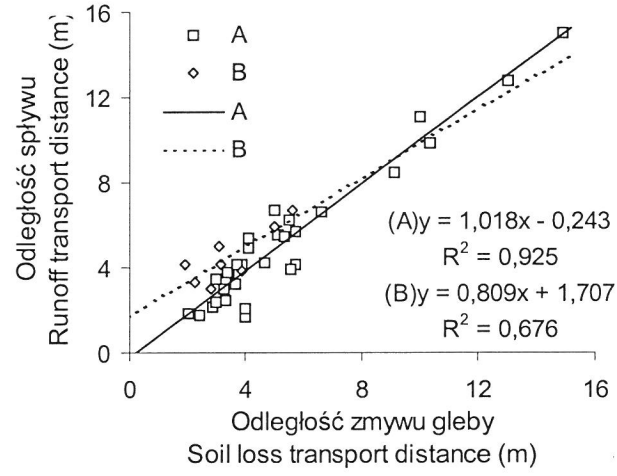
większa aniżeli w Polsce i wielu regionach Europy, na co wskazuje opracowanie Gabrielsa i in. [38].

Przeprowadzone badania wykazały, że maksymalny zmyw jednostkowy na stoku 7% stanowił 71% wartości zmywu pochodzącego ze stoku 12% (był zgodny z wartością prognozowaną z USLE). Różnice w wielkości masy erodowanej gleby były już znacznie mniejsze przy porównaniu zmywu z poletek o długości 20 m.

4.3.2. Odległość przemieszczenia spływu i zmywu gleby

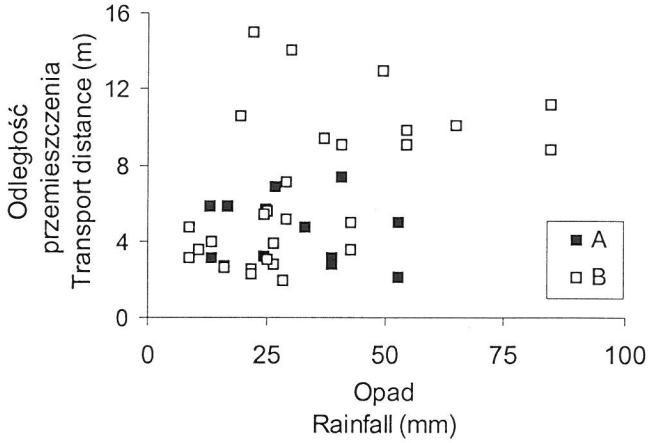
Efektywne odległości przemieszczenia gleby i spływu powierzchniowego przedstawiono w tabelach 11 i 12. Maksymalne wartości dochodziły do 14,9 oraz 11,1 m, odpowiednio dla stoków o spadku 12 i 7%. Porównując tylko te okresy pomiarowe, w których badania były prowadzone w tym samym czasie na obu skłonach stwierdzono, że średnia efektywna odległość przemieszczenia materiału glebowego była większa o 2,7 m na stoku o nachyleniu 7% (tab. 14).

Analiza efektywnych odległości przemieszczenia spływu powierzchniowego i zmywu gleby wskazuje, że są one ze sobą silnie skorelowane. O ile jednak, stosunek obydwu odległości na stoku o nachyleniu 12% kształtuje się jak 1:1, to na skłonie 7% przemieszczenie spływu jest o około 20% większe aniżeli gleby (rys. 18). Spostrzeżenie to należy traktować z pewną ostrożnością, gdyż odległość przemieszczenia spływu na stoku 7% mogła być wyznaczona jedynie na podstawie ograniczonej liczby pomiarów.



Rys. 18. Zależność między efektywną odległością przemieszczenia gleby i spływu powierzchniowego (A – stok o nachyleniu 12%, B – stok o nachyleniu 7%)
Fig. 18. Relationship between effective distance for soil loss and runofff (A – 12% slope, B – 7% slope)

Wyniki badań z lat 1998-2000 wskazywały na występowanie zależności między efektywną odległością przemieszczenia i opadem (sumą oraz jednostkową energią kinetyczną) [112,113]. Analiza regresji przeprowadzona w ramach niniejszych pracy w oparciu o poszerzoną bazę danych, obejmującą lata 1997 i 2004 oraz wyniki uzyskane ze stoku o spadku 7%, jednak tego nie potwierdziło. Efektywne odległości przemieszczenia oraz odpowiadające im sumy opadów przedstawiono na rysunku 19. Dla danych z obu stoków badane odległości były większe podczas opadów na glebę zaskorupioną i zawierały się w przedziale od 1,9 do 15 m (przy średniej 6,6 m) w porównaniu do opadów na glebę spulchnioną (1,9-7,4 m; z wartością średnią 4,2 m).



Rys. 19. Efektywna odległość przemieszczenia (wartości średnie dla przemieszczenia gleby i spływu powierzchniowego) oraz sumy opadów w poszczególnych okresach pomiarowych (A – gleba spulchniona; B – gleba zaskorupiona)
Fig. 19. Effective transport distance (average values for soil and runoff) and rainfall amounts (A – tilled soil; B – sealed soil)

4.3.3. Interpretacja danych pomiarowych w oparciu o maksymalny jednostkowy zmyw gleby

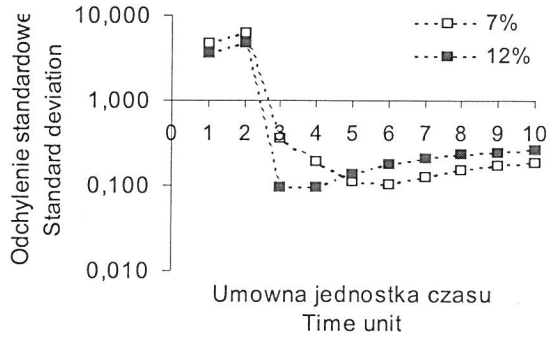
Analiza okresu 26.07-02.08.1999, podczas którego powierzchnia poletek została równomiernie pokryta żłobinami, uzupełniona szczegółowymi pomiarami wielkości żłobin pozwoliła na rozdzielenie wyerodowanej masy glebowej na dwie części, tj. na materiał pochodzący ze żłobin oraz powierzchni międzyżłobinowych [116]. Analizując rozdzielony materiał stwierdzono, że jednostkowa wielkość erozji międzyżłobinowej, w przeciwieństwie do żłobinowej była niezależna od wielkości (długości poletka). Wynosiła ona 2,49; 2,95; 2,49 i 2,48 $kg \cdot m^{-2}$, odpowiednio dla poletek o długości 2,5, 5,

10 i 20 m. Wyniki te sugerują, że również w innych okresach pomiarowych, w których nie stwierdzono wystąpienia erozji żłobinowej, jednostkowa wielkość erozji może być jednakowa i zbliżona do maksymalnej wielkości jednostkowej. Oznacza to, że obserwowane zróżnicowanie masy materiału przeniesionego do instalacji zbierających może wynikać z czasu trwania spływu powierzchniowego, warunkującego czy materiał glebowy zostanie dostarczony z bardziej odległych miejsc poletka do pojemników.

Należy oczekiwać, że zbliżona masa materiału glebowego zostanie przeniesiona z tej samej powierzchni każdego poletka w pierwszej jednostce czasu. Z uwagi na brak możliwości dokładnego wyznaczenia tej wielkości, czas rzędu kilku minut przyjęto za jednostkę umowną. W następnych okresach, erozja będzie różnicowana w zależności od możliwości dostarczenia materiału z powierzchni bardziej oddalonych od instalacji zbiorczych, a więc tym samym będzie zależała od długości obiektu. Stosunek zmierzonego zmywu gleby z poletek o różnej długości odzwierciedlałby zatem czas trwania spływu powierzchniowego i byłby od niego uzależniony tj. zmieniałby się wraz z czasem spływu. Symulację wielkości zmywu gleby dostarczonego do instalacji zbiorczych w poszczególnych jednostkach czasu przy maksymalnych wartościach jednostkowego zmywu na poletku o długości 2,5 m oraz oczekiwany stosunek masy zebranej gleby przedstawiono w tabeli 15.

Na podstawie porównania zmierzonej wielkości erozji z poletek o różnej długości z oczekiwanym ich rozkładem (stosunek zmywu w tabeli 15) można określić liczbę jednostek czasu, przy których będą one do siebie najbardziej dopasowane. Miarę dopasowania stanowi najmniejsza wartość odchylenia standardowego. Na rysunku 20 przedstawiono zakres zmian jego wartości w zależności od czasu dla jednego z okresów pomiarowych. W prezentowanym przykładzie rozkład zmierzonych wielkości zmywu gleby był najbardziej dopasowany do oczekiwanego przy 4 i 6 jednostkach czasu, odpowiednio dla stoku o nachyleniu 12 i 7%.

W 13-tu okresach pomiarowych, w których maksymalny zmyw jednostkowy stwierdzono na poletkach o długości 2,5 m na obu zboczach, najbardziej dopasowane rozkłady wielkości zmierzonych do oczekiwanych stwierdzono dla jednostek czasu w przedziale od 1 do 5 (ze średnią 2,2) i od 3 do 11 (4,3), odpowiednio dla stoku o spadku 12 i 7%. Oznaczać to może, że czas trwania spływu na zboczu o większym nachyleniu jest średnio 2-krotnie krótszy aniżeli na łagodniejszym (7%). Wyznaczona w ten sposób liczba jednostek czasu dla każdego okresu pomiarowego jest silnie skorelowana z efektywnymi odległościami przemieszczenia gleby (rys. 21). Zależność między obiema badanymi zmiennymi jest silniejsza dla stoku o nachyleniu 12%.



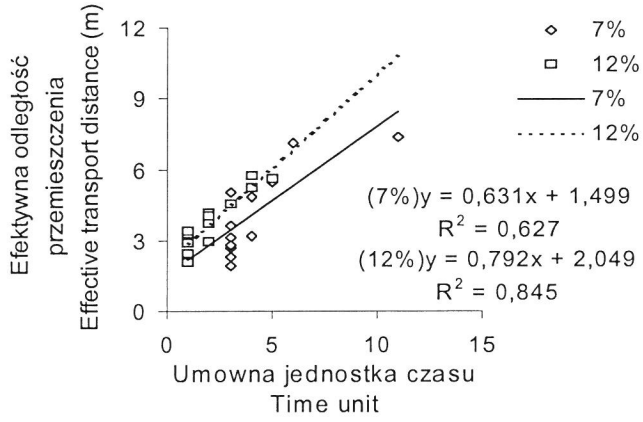
Rys. 20. Odchylenie standardowe dla rozkładu wartości zmywu gleby dopasowywanego do rozkładów oczekiwanych przy różnej liczbie jednostek czasu (okres od 03.08 do 04.08.98)
Fig. 20. Standard deviation of soil loss distributions fitted to expected values distribution at various time units (measurement period 03.08-04.08.98)

Tabela 15. Wielkość jednostkowa erozji przy różnym czasie spływu oraz oczekiwany stosunek zmywu (dla maksymalnego zmywu gleby stwierdzonego na poletku o długości 2,5 m)
Table 15. Soil loss per unit area at various time of runoff and expected relation of soil loss (for periods with maximum soil per unit area found on plot 2.5 m long)

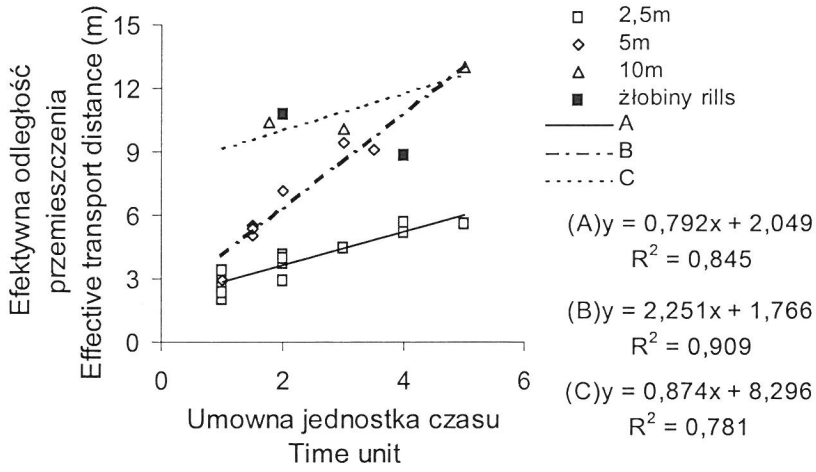
Umowna jednostka czasu Time unit	Wielkość erozji dla poletek o długości Unit of soil loss for plots of length (m)				Stosunek zmywu dla poletek o długości Ratio of soil loss for plots of length (m)			
	2,5	5	10	20	2,5	5	10	20
1	1	1	1	1	1,00	1,00	1,00	1,00
2	2	3	3	3	1,00	1,50	1,50	1,50
3	3	5	6	6	1,00	1,67	2,00	2,00
4	4	7	10	10	1,00	1,75	2,50	2,50
5	5	9	14	15	1,00	1,80	2,80	3,00
6	6	11	18	21	1,00	1,83	3,00	3,50
7	7	13	22	28	1,00	1,86	3,14	4,00
8	8	15	26	36	1,00	1,88	3,25	4,50
9	9	17	30	44	1,00	1,89	3,33	4,89
10	10	19	34	52	1,00	1,90	3,40	5,20

W podobny sposób jak dla obiektu 2,5 m wyznaczono oczekiwany stosunek zmywu w różnych jednostkach czasu dla okresów, w których maksymalny zmyw jednostkowy zobserwowano na poletkach dłuższych (5 i 10 m). Z uwagi na pojedyncze występowanie tych wartości na stoku o nachyleniu 7%, obliczenia przeprowadzono jedynie dla danych pochodzących ze stoku 12%. Wśród analizowa-

nych okresów pomiarowych rozkłady wartości obserwowanych i oczekiwanych były najbardziej zbliżone do siebie w zakresie od 1 do 4 oraz od 1 do 5 jednostek czasu, odpowiednio dla maksymalnego zmywu jednostkowego stwierdzonego na poletkach o długości 5 i 10 m. Efektywna odległość przemieszczenia gleby była silnie skorelowana z liczbą jednostek czasu również i dla tego zbioru danych (rys. 22).

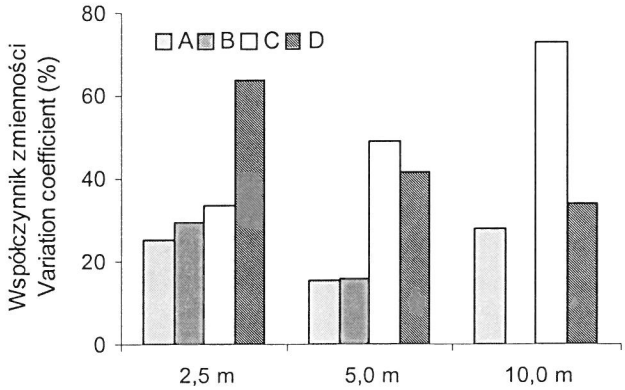


Rys. 21. Efektywna odległość przemieszczenia w funkcji czasu trwania spływu (w oparciu o maksymalny zmyw jednostkowy na poletku o długości 2,5 m)
Fig. 21. Effective transport distance in dependence on time units (based on maximum soil loss per unit area found on plot 2.5 m long)



Rys. 22. Efektywna odległość przemieszczenia w funkcji czasu trwania spływu dla stoku o nachyleniu 12%
Fig. 22. Effective transport distance in dependence on time units for 12% slope

Wartości średnie współczynników zmienności dla zmywu gleby analizowanego na podstawie maksymalnej wielkości jednostkowej zawierały się w przedziale od 15 do 28%. Ich wartości, w przeciwieństwie do współczynnków wyznaczonych dla całkowitej masy zmywu oraz zmywu jednostkowego, nie wykazywały trendu do wzrostu lub spadku w zależności od długości poletka (rys. 23). Należy podkreślić, że zakres wartości od 15 do 30% był zbliżony do najczęściej uzyskiwanego w innych badaniach poletkowych [120,162].



Rys. 23. Średnie współczynniki zmienności dla danych pomiarowych analizowanych na podstawie interpretacji maksymalnych wartości jednostkowych (A), efektywnej odległości przemieszczenia (B), wielkości zmywu (C) oraz jednostkowej wielkości zmywu (D)
Fig. 23. Average values of variation coefficients for data analysed on the basis of the interpretation of maximum soil loss per unit area (A), effective distance of transport (B), soil loss (C) and soil loss per unit area (D)

Proponowana interpretacja wiąże stosunek wielkości masy wyerodowanej gleby z obiektów o zróżnicowanej długości z bliżej nieokreśloną jednostką czasu trwania spływu powierzchniowego (może to być zarówno 2, 5 jak i 10 minut). O ile możemy przyjąć, że jednostka podstawowa jest identyczna w przypadku pomiarów prowadzonych w tym samym okresie na obu stokach, to prawdopodobnie nie można tego stwierdzenia odnieść do pomiarów prowadzonych na tym samym zboczu w różnych okresach pomiarowych. Trudno również określić, czy w każdym zdarzeniu erozyjnym, ta sama masa materiału glebowego jest zbierana (przemieszczana) z jednakowej, aczkolwiek ograniczonej powierzchni poletka. Wydaje się, że jest to uzasadnione w przypadku gdy maksymalne wielkości jednostkowe erozji rejestruje się poletku o długości 2,5 m, a zatem przy wystąpieniu mniejszych zdarzeń erozyjnych. Zebrane dane wskazują, że podobna sytuacja może zaistnieć również przy maksymalnym zmywie jednostkowym na większych obiektach

(o długości 5 i 10 m), jednak liczba wykonanych pomiarów jest zbyt mała by pozytywnie zweryfikować powyższe stwierdzenie. Przeprowadzona analiza regresji wykazała, że wyznaczona w ten sposób liczba jednostek czasu jest silnie skorelowana z efektywną odległością przemieszczenia gleby.

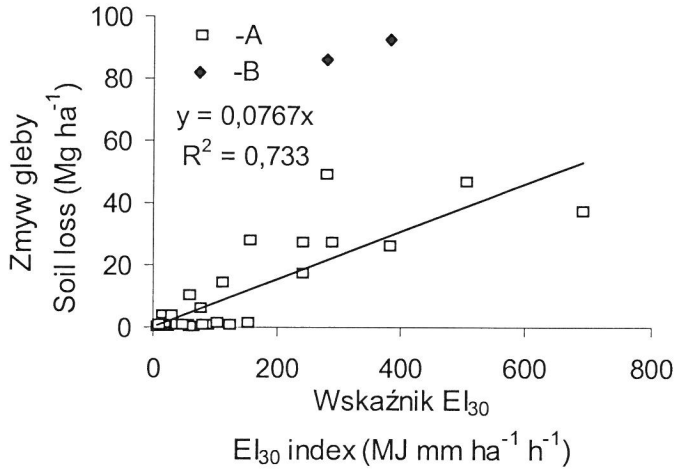
W związku z wprowadzaniem modeli prognostycznych nowej generacji, których jednym z głównych elementów jest równanie transportu cząstek (przez spływ powierzchniowy), szczególnego znaczenia nabierają badania nad mechanizmem przenoszenia zerodowanej gleby [1,37,51,52,103,105,160]. Określenie odległości przemieszczenia cząstek wymaga stosowania różnego rodzaju znaczników, uzyskiwanych m.in. przez prażenie cząstek gleby zawierających związki żelaza [103, 160], sztuczne barwienie [37], czy dodawanie ziaren oszlifowanego kwarcu [105]. Badania te prowadzone zarówno w warunkach laboratoryjnych jak i polowych wskazują na ograniczoną odległość przemieszczania cząstek, uzależnioną od ich wielkości, prędkości oraz głębokości warstwy spływu i kąta nachylenia zbocza. Powoduje to lokalną sedymentację cząstek, nawet wówczas kiedy teoretycznie pojemność transportowa spływu jest wystarczająca [105], zwłaszcza przy niższej intensywności opadu [52].

Analiza danych sugeruje, że w warunkach opadów występujących na obiekcie w Bogucinie, odległość przemieszczenia cząstek jest zbliżona do długości poletek, na których wyznaczona została maksymalna wartość jednostkowa zmywu gleby. Prowadząc dalsze badania należałoby zmodyfikować istniejący układ pomiarowy o poletko dodatkowe, które zbierałoby cały materiał glebowy przenoszony wzdłuż stoku. Dane te umożliwiłyby bardziej poprawną interpretację zdarzeń erozyjnych, podczas których maksymalny zmyw jednostkowy występuje na poletkach dłuższych.

4.3.4. Zmyw gleby a parametry opadu

W oparciu o bazę danych zebranych do roku 2000, zależność między maksymalnym jednostkowym zmywem gleby i energią kinetyczną lub sumą opadów (przy wartościach progowych ≥ 1 mm·h^{-1}) najlepiej opisywały funkcje kwadratowe. Nieco gorzej dopasowana była zależność między zmywem gleby a wskaźnikiem erozyjności opadu i spływu powierzchniowego EI_{30} [112]. Do istniejącej bazy dołączono dane pomiarowe z roku 2004 oraz te z roku 1997, dla których można było w sposób jednoznaczny wyznaczyć wartości maksymalnego zmywu jednostkowego (łącznie 7 okresów pomiarowych). Ponowna analiza wykazała, że najściślej skorelowany ze zmywem gleby (wyłączając erozję żłobinową – [165]) był wskaźnik erozyjności EI_{30} (rys. 24). Energia kinetyczna opadów (przy różnych wartościach progowych) była skorelowana nieznacznie słabiej ze wskaźnikami determinacji R^2 od 0,77 do 0,81, natomiast sumy opadów – wyraźnie słabiej (R^2 =

0,11-0,36). Wydaje się, że zmienne uwilgotnienie gleby stanowiło główny czynnik obniżający dokładność prognozowania zmywu. Wischmeier [164] podsumowując wyniki wieloletnich badań, które stanowiły podstawę do opracowania USLE, stwierdził, że zmyw był najlepiej skorelowany ze wskaźnikiem EI_{30} dla opadów oddziałujących na glebę wilgotną, natomiast znacznie słabiej przy małej wilgotności. Znaczenie wilgotności początkowej gleby na zróżnicowanie wielkości erozji podkreślają również inni autorzy [68,69,121,124,125].



Rys. 24. Zależność między maksymalnym zmywem jednostkowym gleby i wskaźnikiem erozyjności EI_{30} (A – erozja międzyżłobinowa; B – erozja międzyżłobinowa i żłobinowa), skłon 12%, 1997-2004
Fig. 24. Relationships between maximum soil loss per unit area and erosivity index EI_{30} (A – interrill erosion; B – interrill and rill erosion), 12% slope, 1997-2004

Wartość współczynnika kierunkowego (0,077) równania przedstawionego na rysunku 24 jest przybliżoną miarą wskaźnika podatności gleby na erozję K modelu USLE [165]. Zgodnie z jego definicją, podatność gleby na erozję jest równa ilorazowi wielkości zmywu gleby z poletka standardowego i wskaźnika erozyjności opadu oraz spływu powierzchniowego EI_{30}. Wyznaczona w ten sposób wartość wskaźnika K dla badanej gleby wynosi 0,084 $Mg \cdot ha \cdot h \cdot ha^{-1} \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$ (dla maksymalnych wartości jednostkowych zmywu gleby przy skłonie 12%). Wprowadzając współczynnik korekcyjny (0,87 – [112]) związany z różnicą nachylenia zbocza, otrzymujemy wartość równą 0,073 $Mg \cdot ha \cdot h \cdot ha^{-1} \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$, która jest zbliżona do wyznaczonej na podstawie nomografu USLE (0,080) [165]. Podatność gleby na erozję obliczona na podstawie danych z poletka o długości 20 m (zbliżonej do standardowego poletka) jest około 2-krotnie mniejsza od wyznaczonej na pod-

stawie maksymalnego zmywu jednostkowego. W badaniach prowadzonych na poletkach o tej samej długości (tj. 20 m) na płaskowyżu lessowym w Chinach, Zhang i in. [170] stwierdzili 3-5-krotnie mniejsze wartości wskaźnika K w porównaniu do danych obliczonych z modelu USLE.

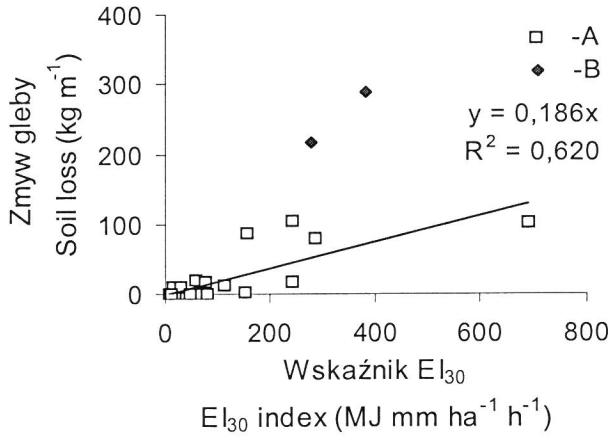
Podczas, gdy w USLE podatność gleby na erozję traktowana jest jako wartość stała, bardziej szczegółowe badania wykazały jej zróżnicowanie w ciągu roku [94,169]. W nowszym modelu RUSLE uwzględniono tę zmienność, a do prognozowania podatności wykorzystano odwrotność rocznego rozkładu temperatury powietrza, tj. wysokiej temperaturze miesięcznej odpowiadają mniejsze jej wartości [118].

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów na obiekcie w Bogucinie wyznaczono podatność gleby na erozję dla poszczególnych okresów pomiarowych oraz miesięcy (tab. 16.) Największa podatność występowała w kwietniu i była niemal 3-krotnie większa w porównaniu do pozostałych. Jednak duże zróżnicowanie jej wartości świadczy, że prognozowanie zmywu gleby na bazie danych miesięcznych jest ograniczone. Oznacza to równocześnie znacznie mniejszą przydatność modelu RUSLE do przewidywania erozji w warunkach klimatycznych Wyżyny Lubelskiej. Należy podkreślić, iż jej wartości maksymalne wyznaczone na podstawie pomiarów są nawet kilkukrotnie większe aniżeli prognozowane z modelu USLE. Przeprowadzone badania potwierdzają zatem wynik analizy porównawczej warunków potencjalnego natężenia erozji w Polsce i USA, przeprowadzonej przez Piesta i Ziemnickiego [106], że jedynie niektóre obszary lessowe w USA charakteryzują się podobnie wysoką podatnością na erozję jak lessowe gleby Wyżyny Lubelskiej.

Tabela 16. Miesięczne wartości wskaźnika podatności gleby na erozję K (n- liczba zdarzeń erozyjnych), zbocze 12%
Table 16. Monthly values of soil erodibility factor K (n- number of events), 12% slope

Miesiąc Month	Number of events	Wartość Value			Odchylenie standardowe Standard deviation	Współczynnik zmienności Variation coefficient
		Minimalna Minimum	Maksymalna Maximum	Średnia Average		
		($Mg \cdot ha \cdot h \cdot ha^{-1} \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$)				(%)
Kwiecień – April	2	0,138	0,255	0,197	0,083	42,05
Maj – May	5	0,002	0,036	0,016	0,014	92,17
Czerwiec – June	7	0,009	0,171	0,065	0,062	95,50
Lipiec – July	14	0,007	0,174	0,064	0,070	108,41
Sierpień – August	6	0,005	0,112	0,039	0,050	130,20
Wrzesień – September	2	0,071	0,091	0,081	0,014	17,41
Październik – October	3	0,009	0,025	0,012	0,012	105,44

Wielkość erozji można opisać nie tylko poprzez maksymalną wartość jednostkową zmywu gleby, ale również poprzez jej masę przemieszczaną przez pas pola o szerokości 1 m (pod warunkiem odpowiedniej długości działki pomiarowej), [134]. Dla prowadzonych badań na obiekcie w Bogucinie wielkość ta będzie równa masie gleby zebranej z poletka o długości 20 m podzielonej przez jego szerokość. Spośród analizowanych parametrów opadów jedynie wskaźnik EI_{30} wykazywał ściślejszy związek z wyrażoną w powyższy sposób erozją, pod warunkiem wyłączenia z analizy okresów pomiarowych, w których zaobserwowano powstanie żłobin (rys. 25).



Rys. 25. Zależność między ilością gleby przemieszczaną przez pas pola o szerokości 1 m oraz wskaźnikiem erozyjności EI_{30} (A – erozja międzyżłobinowa; B – erozja międzyżłobinowa i żłobinowa)
Fig. 25. Relationship between soil loss per plot width and erosivity index EI_{30} (A – interrill erosion; B – interrill and rill erosion)

Analizując dane pomiarowe obejmujące lata 1997-2004 (poletka utrzymywane w czarnym ugorze), należy stwierdzić, że reakcja gleby na potencjalną erozyjność opadu (wyrażoną wartością wskaźnika EI_{30}) jest bardzo zróżnicowana (tab. 17). Ustalono, że zmyw gleby mogły wywoływać opady, których wskaźnik EI_{30} był większy od 5 $MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1}$. W zakresie jego wartości od 5 do 20 jednostek, występowały zarówno opady powodujące, jak i nie wywołujące zdarzeń erozyjnych w postaci spływu powierzchniowego i zmywu gleby, a znaczną erozję (3,1 $kg \cdot m^{-1}$) obserwowano przy wartościach tego wskaźnika wynoszących 13-15 $MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1}$. Analiza zebranych danych pozwala przyjąć, że już powyżej 20 $MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1}$, każdy opad jest w stanie wywołać pewien spływ powierzchniowy i erozję na glebie utrzymywanej w czarnym ugorze. Ze stratami gleby prze-

kraczającymi 20 $kg \cdot m^{-1}$ należy się liczyć przy wskaźniku EI_{30}, wynoszącym 150 $MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1}$ (pod warunkiem, że gleba jest wilgotna – 12.07-18.07.1999). Jednak największy zmyw towarzyszył opadom powodującym erozję żłobinową (o wartościach EI_{30} – 278 i 384 $MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1}$).

Tabela 17. Liczba opadów bez zmywu gleby (n_0) i ze zmywem gleby (n_s) oraz wartości zmywu gleby ($kg \cdot m^{-1}$) w poszczególnych przedziałach wartości wskaźnika EI_{30} (dane zmywu z poletek o skłonie 12%)
Tabela 17. Number of rainfall events without runoff (n_0) and with runoff (n_z) and corresponding soil losses ($kg\ m^{-1}$) at various ranges of erosivity index EI_{30} (12% slope)

Parametr Parameter	Wskaźnik EI_{30} – Index EI_{30} ($MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1}$)						
	5-10	10-20	20-50	50-100	100-200	200-300	300-700
n_0	5	4	0	0	0	0	0
n_s	6	9	5	8	4	3	3
Wartość średnia Average	0,135	0,800	1,680	1,803	12,61	37,50	52,60
Wartość minimalna Minimum	0,024	0,025	0,077	0,114	0,32	5,09	34,89
Wartość maksymalna Maximum	0,328	3,367	5,758	6,095	25,15	72,27*	81,42*

Objaśnienia: * erozja żłobinowa i międzyżłobinowa – Abbreviation: *rill and interill erosion.

Rozkład miesięczny opadów erozyjnych

Średnią liczbę występowania opadów w wybranych zakresach wartości w ciągu roku oraz wskaźnika erozyjności EI_{30} przedstawiono w tabelach 18 i 19. W celach porównawczych uwzględniono w nich dane ze stacji meteorologicznej AR Lublin w Czesławicach (z lat 1981-1995), miejscowości, w której prowadzono wcześniejsze pomiary [114]. Stacja ta położona jest w odległości około 10 km w linii prostej od obiektu doświadczalnego w Bogucinie. W ciągu 7 lat prowadzenia badań 3-krotnie występowały opady o sumie powyżej 40 mm (48, 52,5 i 61,9 mm), 5-krotnie od 30 do 40 mm oraz 35-krotnie opady o sumie od 10-20 mm. Opady przekraczające 20 mm najczęściej występowały w lipcu (10-krotnie), rzadziej w sierpniu (5 razy) oraz czerwcu i wrześniu (4). Generalnie częstotliwość występowania opadów o analizowanych zakresach sum na obu stacjach w ciągu roku była zbliżona. W Bogucinie, w porównaniu do lat 1981-1995 (Czesławice), zmniejszeniu uległa średnia roczna liczba opadów mniejszych od 5 mm, zaś nieznacznemu wzrostowi – w zakresie od 20 do 40 mm. Opady o sumach powyżej 40 mm występowały sporadycznie.

Tabela 18. Częstotliwość występowania opadów w ciągu roku, A – Bogucin (1997-2004), B – Czesławice (1981-1995)
Table 18. Frequency of rainfalls during a year, A – Bogucin (1997-2004), B – Czesławice (1981-1995)

Miesiąc	Obiekt	Opad – Amount (mm)							
Month	Site	0-5	5-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70
Kwiecień	A	8,00	1,00	0,50	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00
April	B	5,80	1,47	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Maj	A	11,67	3,00	1,33	0,33	0,33	0,00	0,00	0,00
May	B	9,73	1,80	1,40	0,20	0,07	0,00	0,00	0,00
Czerwiec	A	7,57	1,71	1,00	0,43	0,14	0,00	0,00	0,00
June	B	10,00	2,40	1,47	0,27	0,07	0,07	0,00	0,00
Lipiec	A	7,00	2,71	2,00	1,14	0,00	0,00	0,14	0,14
July	B	8,33	2,20	1,13	0,67	0,13	0,00	0,13	0,00
Sierpień	A	4,29	1,29	0,71	0,57	0,00	0,14	0,00	0,00
August	B	8,13	2,20	1,13	0,20	0,07	0,00	0,00	0,00
Wrzesień	A	3,14	0,71	0,29	0,14	0,43	0,00	0,00	0,00
September	B	9,67	2,27	1,47	0,07	0,13	0,07	0,07	0,00
Październik	A	3,83	1,17	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
October	B	8,40	1,47	0,40	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00
Suma	A	45,50	11,60	6,17	3,12	0,90	0,14	0,14	0,14
Total	B	60,07	13,80	7,60	1,40	0,47	0,13	0,27	0,00

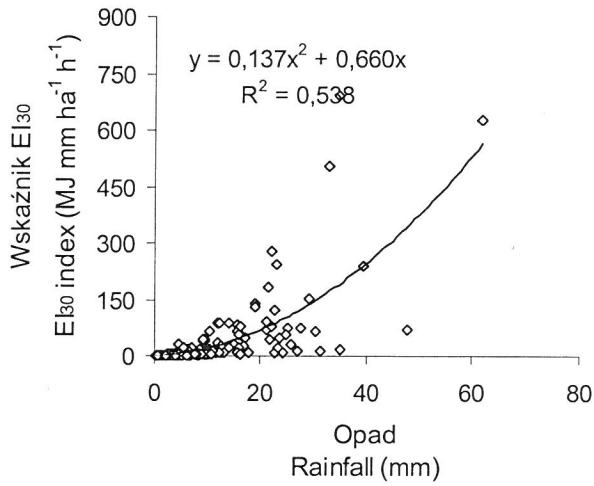
Tabela 19. Częstotliwość występowania opadów o wybranych zakresach wskaźnika erozyjności EI_{30} w ciągu roku, A – Bogucin (1997-2004), B – Czesławice (1981-1995)
Table 19. Frequency of rainfalls with selected value range of erosivity index EI_{30} during a year, A – Bogucin (1997-2004), B – Czesławice (1981-1995)

Miesiąc	Obiekt	Wskaźnik EI_{30} – Index EI_{30} ($MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1}$)						
Month	Site	5-10	10-20	20-50	50-100	100-200	200-300	300-700
Kwiecień	A	0,50	1,00	0,00	0,50	0,00	0,00	0,00
April	B	0,53	0,13	0,47	0,00	0,00	0,00	0,00
Maj	A	2,00	1,67	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00
May	B	0,60	0,47	0,53	0,33	0,22	0,07	0,00
Czerwiec	A	1,29	1,00	1,29	1,00	0,29	0,29	0,14
June	B	1,20	0,67	0,67	0,40	0,33	0,07	0,07
Lipiec	A	0,29	0,43	0,29	0,43	0,43	0,14	0,00
July	B	1,07	0,67	0,80	0,40	0,20	0,13	0,33
Sierpień	A	0,43	0,43	0,14	0,29	0,00	0,00	0,14
August	B	1,47	0,67	0,60	0,33	0,13	0,00	0,13
Wrzesień	A	0,14	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
September	B	1,60	0,53	0,40	0,13	0,00	0,07	0,07
Październik	A	0,17	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
October	B	0,47	0,47	0,07	0,00	0,00	0,00	0,07
Suma	A	4,81	4,83	2,05	2,21	0,71	0,43	0,29
Total	B	6,93	3,60	3,53	1,60	0,87	0,33	0,67

W ciągu 7 lat badań prowadzonych na obiekcie w Bogucinie jedynie 3-krotnie wystąpiły opady, których wskaźnik EI_{30} przewyższał 300 MJ·mm·ha^{-1}·h^{-1}. Największą wartością (690 jednostek) charakteryzował się opad o sumie 34,9 mm (09.06.1998), który nie spowodował jednak aż takiego zmywu gleby, jak opady o wielkościach mniejszych (278 i 384 MJ·mm·ha^{-1}·h^{-1}). Najczęściej opady o dużej erozyjności (>100 jednostek) występowały w lipcu (5) i sierpniu (4), sporadycznie w czerwcu i wrześniu (po 1 razie). W porównaniu do lat 1981-1995 (obiekt Czesławice), w okresie badań prowadzonych w Bogucinie więcej opadów z wartościami EI_{30} powyżej 100 jednostek w skali roku zaobserwowano w sierpniu (2-krotnie) oraz lipcu (1,3-krotnie), znaczny ich spadek w czerwcu (1,9-krotny) oraz zupełny brak w maju.

Zależność między wartościami wskaźnika erozyjności opadu i spływu powierzchniowego EI_{30} a jego wielkością (sumą) przedstawiono na rysunku 26. Wynika z niej, że opady o dużej sumie niekoniecznie muszą się charakteryzować wysokim potencjałem erozyjnym, wyrażonym poprzez wskaźnik EI_{30}.

Omawiając opady na terenie prowadzonych badań nie sposób nie pokusić się o porównanie ich z warunkami panującymi w rejonie opracowania wielu modeli erozyjnych (m.in. USLE). I tak, obliczona dla 3 zlewni zlokalizowanych w środkowo-wschodniej części USA, średnia roczna liczba opadów (w ciągu kolejnych 11 lat) o sumie 25-50, 50-75 oraz >75 mm wynosiła odpowiednio 12,3; 2,7 oraz 2,4 [13]. Była ona zatem znacznie większa w porównaniu do opadów rejestrowanych na badanych obiektach w obrębie Wyżyny Lubelskiej.



Rys. 26. Wskaźnik erozyjności opadu EI_{30} w funkcji sumy opadu (n = 350)
Fig. 26. Rainfall erosivity index EI_{30} in dependence on rainfall amount (n = 350)

4.4. Erozja wodna na poletkach z roślinami uprawnymi

Badania na poletkach z roślinami (w układzie poletek o zróżnicowanej długości 2,5; 5; 10 i 20 m) prowadzono na stokach o spadku 7 i 12% w latach 2000-2004; najdłużej z burakiem cukrowym (3 lata), a w pojedynczych latach z jęczmieniem jarym, pszenicą jarą i ziemniakiem (tab. 20 i 21). Przedstawione dane dotyczą jedynie okresu wegetacyjnego roślin. Obserwowana wielkość erozji była wypadkową trzech czynników oddziałujących na siebie wzajemnie: długości okresu wegetacyjnego, erozyjności opadu oraz etapu rozwoju okrywy roślinnej. Zdarzenia erozyjne występowały w różnym czasie okresu wegetacyjnego roślin, nierzadko pod jego koniec.

Tabela 20. Parametry opadów, zmyw gleby i spływ powierzchniowy w okresach pomiarowych na poletkach z roślinami, skłon 12%
Table 20. Rainfall characteristics, soil loss and runoff on plots with various crops, 12% slope

Lp. No	Okres pomiarowy Measurement period	Opad Amount	Wskaźnik EI_{30} Index EI_{30}	Okrywa roślinna Canopy cover	Zmyw gleby Soil loss	Spływ pow. Runoff	Współ. spływu Runoff coeff.	Odległość przemieszczenia Transport distance	
								Zmywu gleby Soil loss	Spływu pow. Runoff
		(mm)	(MJ·mm·ha^{-1}·h^{-1})	(%)	(kg·m^{-2})	(mm)	(%)	(m)	(m)
				Jęczmień jary – Spring barley					
1	11.06-18.06.02	25,6	69,80	75	0,003	0,75	2,9	5,63	5,74
2	16.07-23.07.02	27,1	102,00	68	0,012	1,01	3,7	7,36	5,33
				Burak cukrowy – Sugar beet					
1	29.04-13.05.03	23,0	56,10	1	0,122	1,19	5,2	4,95	6,99
2	13.05-16.05.03	20,6	85,10	2	0,905	8,61	41,8	7,33	6,42
3	20.05-22.05.03	19,2	21,70	5	0,231	5,47	28,5	5,76	4,47
4	30.06-07.07.03	43,7	310,79	38	2,248	8,71	19,9	6,59	8,15
5	12.07-14.07.03	24,4	87,60	66	1,438	8,71	35,7	4,78	7,64
6	15.07-19.07.03	14,1	79,75	80	1,039	8,71	61,8	7,93	7,64
7	22.07-29.07.03	22,4	130,60	80	0,357	10,56	47,1	5,34	4,59
8	30.07-31.07.03	15,0	90,60	86	0,642	6,53	43,5	10,25	13,10
9	14.08-23.08.03	19,1	42,00	89	0,127	4,72	24,7	2,52	2,02

Tabela 21. Parametry opadów, zmyw gleby i spływ powierzchniowy w okresach pomiarowych na poletkach z roślinami, skłon 7%
Table 21. Rainfall characteristics, soil loss and runoff on plots with various crops, 7% slope

Lp. No	Okres pomiarowy Measurement period	Opad Amount	Wskaźnik EI_{30} Index EI_{30}	Okrywa roślinna Canopy cover	Zmyw gleby Soil loss	Spływ pow. Runoff	Współ. spływu Runoff coeff.	Odległość przemieszczenia Transport distance	
								Zmywu gleby Soil loss	Spływu pow. Runoff
		(mm)	(MJ·mm·ha^{-1}·h^{-1})	(%)	(kg·m^{-2})	(mm)	(%)	(m)	(m)
				Burak cukrowy – Sugar beet					
1	11.07-18.07.00	33,1	35,51	82	0,251	5,60	16,9	3,93	4,52
2	18.07-26.07.00	19,5	30,10	87	0,156	8,13	41,7	8,91	n.o
3	26.07-01.08.00	64,9	70,70	86	0,614	>10,40	>16,0	3,85	n.o
4	01.08-08.08.00	49,4	241,02	88	0,988	>10,40	>21,1	5,38	n.o
				Ziemniak – Potato					
1	11.06-18.06.02	25,6	69,80	46	0,004	0,67	2,6	6,04	5,50
2	16.07-23.07.02	27,1	102,00	78	0,112	3,73	13,8	8,10	5,13
				Pszenica jara – Spring wheat					
1	13.05-16.05.03	20,6	85,10	36	n.o	0,93	4,5	n.o	1,61
				Burak cukrowy – Sugar beet					
1	20.06-21.06.04	30,2	21,45	24	0,320	>10,40	>34,4	2,43	n.o
2	11.07-16.07.04	16,8	9,65	83	0,126	3,87	23,0	4,49	4,53
3	19.07-19.07.04	22,2	278,48	86	2,064	>10,40	>46,8	2,77	n.o
4	27.07-28.07.04	24,7	48,26	86	0,112	5,20	21,1	6,39	5,00

Objaśnienia: n.o – nie oznaczono – not determined.

Najwięcej zdarzeń erozyjnych oraz największe ilości zmywu obserwowano na poletkach z burakiem cukrowym, a następnie z ziemniakiem oraz zbożami jarymi. Dokładną informację o efektywności okrywy roślinnej dostarczają badania prowadzone jednocześnie na poletkach z różnymi roślinami, zaś wskaźnikiem, który umożliwia porównanie natężenie erozji jest masa gleby przemieszczana w jednostce szerokości pola. Badania takie, aczkolwiek na zboczach o odmiennej wystawie i spadku przeprowadzono w latach 2002-2003 (tab. 22). Uzyskane wyniki wskazują, że łączny zmyw gleby na poletkach z jęczmieniem jarym był 8-krotnie mniejszy w porównaniu do ziemniaka (2002). W roku następnym w okresie wegetacji

do 10.08.2003, pszenica całkowicie chroniła glebę, podczas gdy na poletkach z burakiem zmyw gleby wyniósł aż 57,36 kg·m^{-1}).

Tabela 22. Łączny zmyw gleby podczas okresu wegetacyjnego roślin uprawnych
Table 22. Cumulative soil loss during crop vegetation

Stok Slope	Roślina Crop	Rok Year	Parametry opadu Rainfall characteristics		Zmyw gleby Soil loss	
			Suma Amount	Wskaźnik EI_{30} Index EI_{30}		
			(mm)	(MJ·mm·ha^{-1}·h^{-1})	(kg·m^{-2})	(kg·m^{-1})
12%	Jęczmień jary – Spring barley	2002	52.7	171,8	0,015	0,14
	Burak cukrowy – Sugar beet	2003	201,5	904,2	7,109	57,36
7%	Burak cukrowy – Sugar beet	2000	166,9	377,3	2,009	18,78
	Ziemniak – Potato	2002	52,7	171,8	0,116	1,16
	Burak cukrowy – Sugar beet	2004	93,9	357,8	2,622	8,72

Maksymalne wartości jednostkowe zmywu gleby obserwowano przede wszystkim na poletkach o długości 2,5 m, a jedynie w przypadku buraka – na poletkach o długości 5 m (3-krotnie w roku 2003 r.) oraz 10 m (3-krotnie w roku 2000). Należy podkreślić, iż raczej nieoczekiwanie efektywne odległości przemieszczenia gleby dochodziły w niektórych okresach pomiarowych nawet do 10, 8 czy 7 m, odpowiednio dla buraka cukrowego, ziemniaka i jęczmienia.

Wyniki badań polowych przeprowadzonych na obiekcie w Bogucinie trudno jest porównać z innymi uzyskanymi na terenie kraju. Wynika to nie tylko z różnej wielkości poletek, nachylenia skłonów, czy typu i rodzaju gleb, ale przede wszystkim jest to związane z różnicami w erozyjności opadów. Przykładem mogą być długoletnie badania prowadzone przez stację IGiPZ PAN w Szymbarku, wskazujące, że nawet średnie dziesięcioletnie wielkości zmywu gleby mogą różnić się w uprawie roślin zbożowych aż o 140%, a ziemniaka o 50% [42,43]. Z uwagi na różną wielkość poletek, na których prowadzone są badania erozyjne na terenie Polski, najbardziej miarodajnym sposobem porównywania intensywności erozji jest ustalenie masy materiału glebowego przemieszczanego przez pas pola o szerokości 1 m. Analizując tak wyrażoną wielkość zmywu gleby należy stwierdzić, że wyniki uzyskane na obiekcie w Bogucinie mieszczą się w przedziale wartości z innych obiektów doświadczalnych. Najdłużej badania prowadzono z roślinami zbożowymi, zaś wartości zmywu gleby zawierały się w przedziale od 0,5 kg·m^{-1} w Mokronosach [137] do 6,4 kg·m^{-1} w Czesławicach [111]. O wiele większą erozję stwierdzano w uprawie ziemniaka z zakresem średnich wartości rocznych od 21,8 kg·m^{-1} w Szymbarku [42] do 48,0 kg·m^{-1} w Storkowie [142].

Opisane w niniejszej pracy, badania nad erozją wodną w uprawie ziemniaka były prowadzone w okresie 1 roku i stąd trudno uznać uzyskane wyniki za reprezentatywne zwłaszcza, że pole eksperymentalne obsadzono wczesną odmianą. Średnia wartość roczna erozji dla uprawy buraka cukrowego, wyznaczona na podstawie 3 lat, była nieznacznie mniejsza od wielkości zmywu gleby przy uprawie ziemniaka [42,43,142] i wynosiła 28,3 $kg \cdot m^{-1}$.

4.5. Przemieszczenie gleby pod wpływem zabiegów uprawnych

4.5.1. Podorywka

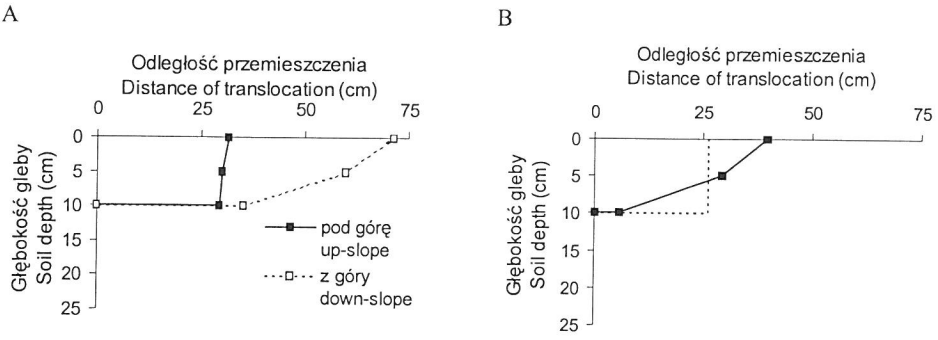
Podczas podorywki przemieszczeniu podlegały znaczniki ulokowane pierwotnie na głębokości 0 cm (w warstwie przypowierzchniowej gleby), 5 cm oraz większość wprowadzonych na głębokość 10 cm. Z 60-ciu znaczników umieszczonych na głębokościach od 0 do 10 cm, odnaleziono 59 i 58 sztuk, odpowiednio dla kierunku uprawy pod górę oraz w dół zbocza. Odległości przemieszczenia oceniane w kierunku orki przy zabiegu wykonywanym z góry na dół były większe w porównaniu do orki wykonywanej z dołu ku górze zbocza. Średnie przesunięcie znaczników podczas przejścia pługa z góry na dół wynosiło od 21 do 87 cm, a pod górę – od 9 do 34 cm (tab. 23). Maksymalne przemieszczenia dochodziły do 218 cm przy uprawie z góry na dół i do 105 cm z dołu pod górę. Generalnie odległość przemieszczenia znaczników charakteryzowała się dużym rozrzutem, co wyrażają współczynniki zmienności wynoszące od 34 do 174%.

Tabela 23. Parametry statystyczne przemieszczenia znaczników podczas podorywki
Table 23. Statistic parameters of tracers translocation during shallow plow

Głębokość Depth (cm)	Liczba Znaczników No of tracers		Wartość maks. Maximum	Wartość min. Minimum	Wartość średnia Average	Odchyl. Stand. Std. Deviation	Współ. zmienności Variation coefficient
	A	B	(cm)				(%)
	Kierunek podorywki z góry na dół – Up-slope tillage direction						
0	20	20	212	10	71,4	63,4	88,7
5	20	19	218	5	59,7	57,3	95,9
10	20	19	207	0	35,4	55,3	156,3
	Kierunek podorywki z dołu pod górę – Down-slope tillage direction						
0	20	19	95	3	31,0	23,2	74,7
5	20	20	91	1	30,2	24,0	79,4
10	20	20	105	0	29,6	29,7	100,3

Objaśnienia: A – liczba wprowadzonych znaczników; B – liczba odnalezionych znaczników.
Abbreviation: A – total number of tracers; B – number of recovered tracers.

Średnie odległości przemieszczenia gleby przedstawiono w tabeli 24. Dla podorywki prowadzonej z góry na dół wielkość ta wyniosła 55,5 cm, a z dołu pod górę 29,6 cm. Obliczona masa przesuniętej gleby na pasie podorywki o szerokości 1 m wyniosła 73,2 oraz 39,1 kg odpowiednio dla zabiegu prowadzonego w dół i górę zbocza (przy gęstości 1,32 $Mg \cdot m^{-3}$). Z porównania tych wielkości wynika, że przemieszczeniu netto w dół zbocza uległo 34,1 kg gleby na średnią odległość 25,9 cm (tab. 24). Uśredniony profil przemieszczenia gleby przedstawiono na rysunku 27.



Rys. 27. Profile przemieszczenia gleby w kierunku podorywki (A) oraz w dół zbocza (B)
Fig. 27. Profiles of soil translocation in direction of shallow plow (A) and net translocation down-slope (B)

Tabela 24. Średnia odległość przemieszczenia, objętość i masa przemieszczonej gleby na pasie o szerokości 1 m podczas podorywki
Table 24. Average soil translocation, volume and soil mass per 1m during shallow plow

Powtórzenia Replications	Kierunek podorywki z góry na dół Down-slope tillage direction			Kierunek podorywki z dołu pod górę Up-slope tillage direction		
	Średnia odległość Average Distance	Objętość gleby Soil volume	Masa gleby* Soil mass	Średnia odległość Average Distance	Objętość gleby Soil volume	Masa gleby* Soil mass
	(cm)	(cm^3)	($kg \cdot m^{-1}$)	(cm)	(cm^3)	($kg \cdot m^{-1}$)
1	59,0	58956	77,82	16,2	16194	21,38
2	41,2	41167	54,34	45,0	44962	59,35
3	66,2	66190	87,37	27,6	27624	36,46
Wartość średnia Average	55,5	55438	73,2	29,6	29593	39,1
Odchylenie stand. Standard deviation			17,0			19,1
Współ. zmienn., % Variation coefficient			23,2			48,9

Objaśnienia – Abbreviation: * masa gleby obliczona przy gęstości – mass of soil calculated at bulk density of 1.32 $Mg \cdot m^{-3}$.

4.5.2. Kultywatorowanie i bronowanie

Podczas kultywatorowania połączonego z bronowaniem przemieszczeniu podlegały znaczniki umieszczone pierwotnie na powierzchni roli (0 cm) oraz na głębokości 5 cm. Większość znaczników umiejscowionych na głębokości 10 cm została obrócona bez przesunięcia w kierunku prowadzenia zabiegu. Odległości przemieszczenia były większe przy zabiegu prowadzonym z góry na dół w porównaniu do wykonywanego z dołu pod górę zbocza (tab. 25). Maksymalnie dochodziły one do 184 cm przy uprawie z góry na dół i do 149 cm przy uprawie z dołu pod górę. Podobnie jak w badaniach nad podorywką odległości na jakie przemieszczone zostały znaczniki podczas kultywatorowania łączonego z bronowaniem charakteryzowały się dużym rozrzutem, ze współczynnikami zmienności w przedziale od 80 do 162%.

Tabela 25. Parametry statystyczne przemieszczenia znaczników podczas kultywatorowania i bronowania
Table 25. Statistical parameters of tracers translocation during cultivatoring and harrowing

Głębokość Depth (cm)	Liczba Znaczników No of tracers		Wartość maks. Maximum	Wartość min. Minimum	Wartość średnia Average	Odchyl. stand. Std. deviation	Współ. Zmienności Variation coefficient
	A	B	(cm)				(%)
	Kierunek uprawy z góry na dół – Up-slope tillage direction						
0	20	20	184,0	1	61,0	49,1	80,4
5	20	20	144,5	0	31,0	44,6	143,5
	Kierunek uprawy z dołu pod górę – Down-slope tillage direction						
0	20	20	149,0	0	49,7	54,4	109,4
5	20	20	132,0	0	22,5	36,5	162,4

Objaśnienia – Abbreviation: A – liczba wprowadzonych znaczników – total number of tracers; B – liczba odnalezionych znaczników – number of recovered trawers.

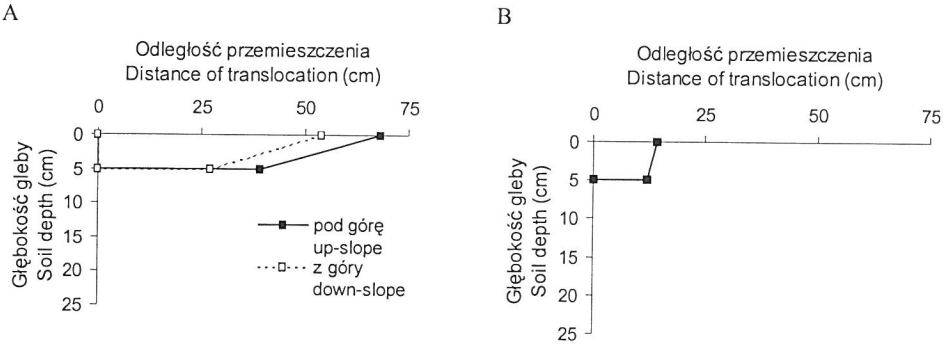
Średnie odległości przemieszczenia podczas kultywatorowania połączonego z bronowaniem przedstawiono w tabeli 26. Dla zabiegu prowadzonego z góry na dół, jego wartość wyniosła 53,7 cm, a dla uprawy z dołu pod górę 40,7 cm.

Obliczona masa przesuniętej gleby na pasie uprawy o szerokości 1 m wynio-
4,4 oraz 26 kg odpowiednio dla zabiegu prowadzonego w dół i pod górę zbo-
gęstości gleby 1,28 $Mg \cdot m^{-3}$). Z porównania tych wielkości wynika, że
enie netto (w dół zbocza) osiągnęło wartość 8,3 $kg \cdot m^{-1}$. Uśredniony
czenia gleby przedstawiono na rysunku 28.

Tabela 26. Średnia odległość przemieszczenia gleby, objętość i masa przemieszczonej gleby na pasie o szerokości 1 m podczas kultywatorowania i bronowania
Table 26. Average soil translocation, volume and soil mass per 1 m during cultivator and harrow operations

Powtórzenia Replications	Kierunek uprawy z góry na dół Down-slope tillage direction			Kierunek uprawy z dołu pod górę Up-slope tillage direction		
	Średnia odległość Average Distance	Objętość gleby Soil volume	Masa gleby* Soil mass	Średnia odległość Average distance	Objętość gleby Soil volume	Masa gleby* Soil mass
	(cm)	(cm^3)	($kg \cdot m^{-1}$)	(cm)	(cm^3)	($kg \cdot m^{-1}$)
1	51,2	25575	32,74	37,4	18700	23,94
2	58,4	29175	37,34	48,1	24025	30,75
3	51,6	25800	33,02	36,6	18300	23,42
Wartość średnia Average	53,7	26850	34,37	40,7	20342	26,04
Odchylenie standardowe Standard deviation			2,58			4,09
Współ. Zmienności (%) Variation coefficient			7,51			15,71

Objaśnienia – Abbreviation: * masa przemieszczonej gleby obliczona przy gęstości – mass of translocated soil calculated at bulk density of 1,28 $Mg \cdot m^{-3}$.



Rys. 28. Profile przemieszczenia gleby w kierunku zabiegu (A) oraz w dół zbocza (B)
Fig. 28. Profiles of soil translocation in direction of cultivator and harrow operations (A) and net translocation down-slope (B)

Zdecydowana większość dotychczasowych badań prowadzona jest w celu określenia masy gleby przemieszczanej w następstwie podstawowego zabiegu uprawowego jakim jest orka, najczęściej prowadzona na głębokość 20-30 cm [74,75,89, 157], a w niektórych regionach nawet do 50 cm [24].

Stosunkowo nieliczne prace określają wpływ innych zabiegów, m.in. kultywatorowania (kultywatory o sztywnych łapach) i talerzowania [48,75]. Do czynników wywierających wpływ na odległość i masę przemieszczenia gleby zaliczane są energia dostarczana przez sprzęt uprawowy, siły tarcia występujące wewnątrz gleby i na styku gleba-narzędzie robocze oraz siła grawitacji [74]. Główny czynnik, energia, zależy od prędkości uprawy (mocy ciągnika i rodzaju narzędzia uprawowego). Jak wykazują badania prędkość prowadzenia zabiegu (mniejsza przy pracy prowadzonej pod górę) wywiera wpływ również na jego głębokość [75]. Badania nad przemieszczeniem gleby wskutek typowych zabiegów agrotechnicznych w warunkach Polski (podorywka i kultywatorowanie połączone z bronowaniem) nie mają swojego odpowiednika w badaniach prowadzonych w innych krajach.

4.6. Porównanie wielkości erozji wodnej i uprawowej

Bezpośrednie porównanie wielkości masy gleby przemieszczanej w wyniku obydwu procesów erozyjnych utrudniają różnice zarówno w ich przebiegu, jak i metodyce prowadzenia pomiarów. Jedynym sposobem porównania natężenia obu procesów jest odniesienie wielkości przemieszczanej gleby do długości stoków. Należy przy tym rozróżnić 2 aspekty geomorfologiczne, a mianowicie, przekształcenie dolnej części zbocza oraz obniżenie jego powierzchni (utratą warstwy gleby). O pierwszym decyduje wielkość erozji w odniesieniu do pasa pola (zbocza) o szerokości 1 m ($kg \cdot m^{-1}$), a o drugim – masa przemieszczonej gleby w odniesieniu do jego długości (kg lub po uwzględnieniu gęstości gleby – mm).

W tabeli 27 zestawiono dane z pomiarów erozji zachodzącej na stokach o spadkach 7 i 12% uzupełnione o wyniki z lat wcześniejszych [111,113]. W celu porównawczym przedstawiono również dane dla przemieszczenia gleby pod wpływem orki głębokiej [117]. Wielkości erozji wodnej zostały skorygowane poprzez odpowiedni przelicznik obliczony dla zmywu gleby z poletek utrzymywanych w czarnym ugorze 1,17:1, odpowiednio dla stoków o nachyleniu 12% i 7% (rozdział 4.3.1). Nie wprowadzono natomiast korekty uwzgledniającej różnicę nachylenia stoków dla erozji uprawowej. Zgodnie z badaniami Montgomeriego i in. [89] oczekiwana różnica w przemieszczeniu gleby między skłonem 7 i 12% zawierałaby się w przedziale 1-3% wielkości, a więc mieściłaby się w zakresie wartości współczynników zmienności przeprowadzonych badań. Z prac innych autorów analizujących wpływ nachylenia na erozję uprawową wynika, że masa przesuniętej gleby na skłonie o nachyleniu 12% może być zarówno większa (o 30%) [156] lub nawet mniejsza (o 10-20%) [75] w porównaniu do stoku o spadku 7%. Niewątpliwie zagadnienie wpływu nachylenia zbocza na wielkość tej formy erozji wymaga dalszych badań.

Tabela 27. Wielkość erozji wodnej i uprawowej na stoku o spadku 7 i 12%
Table 27. Water and tillage erosion on 7 and 12% slope

Forma erozji Erosion	Roślina uprawna Crop	Rok Year	Wielkość erozji - Erosion amount			
			7%	12%	7%	12%
			($kg \cdot m^{-1}$)		(mm)	
Wodna	Okopowe: Roots:					
Water	Ziemniak – Potato	2002a	1,2	1,4*	0,01	0,03*
	Burak cukrowy – Sugar beet	1997a[1]	1,2	1,4*	0,01	0,03*
		2000a	18,8	22,0*	0,14	0,42*
		2003b	49,4*	57,4	0,38*	1,10
		2004a	8,7	10,2*	0,07	0,20*
	Wartość średnia – Average		15,8	18,5	0,12	0,36
	Zbożowe – Cereals:					
	Pszenica jara – Spring wheat	1994c	3,7	4,4	0,03	0,09
	Jęczmień jary – Spring barley	1995c	0,8	0,9	0,01	0,02
	Jęczmień+owies – Barley+oats	1997b	0,3	0,4	0,00	0,01
	Pszenica jara – Spring wheat	2003a	0,00	0,00	0,00	0,00
	Jęczmień jary – Spring barley	2002b	0,9*	0,1	0,55*	0,01
	Wartość średnia – Average		1,0	1,2	0,01	0,02
Uprawowa	Kultywator+brona					
Tillage	Cultivator+harrow		8,3		0,06	0,16
	Podorywka – Shallow plow		34,1		0,26	0,64
	Orka przedzimowa					
	Deep Plow**		45,8		0,32	0,81

Objaśnienia – Abbreviation: (a) – skłon – slope 7%; (b) – skłon – slope 12%; * – dane skorygowane corrected data; – ; a^1,b^1 – [113]; c – [111], ** – [117].

Wielkości uzyskane z pomiarów erozji zostały przeliczone na mm, przy czym dla erozji wodnej przyjęto gęstość gleby równą 1,3 $Mg \cdot m^{-3}$, a dla uprawowej gęstość przed zabiegiem (dla kultywatorowania i bronowania – 1,28; podorywki – 1,32 $Mg \cdot m^{-3}$) i odniesione do długości stoku, które wynosi 40 m (odpowiada poletkom na stoku o spadku 12%) oraz 100 m (7%).

Przyjmując, że pod zboża jare wykonuje się 3 zabiegi uprawowe (podorywkę, orkę przedzimową, kultywatorowanie połączone z bronowaniem), to w wyniku samej tylko erozji uprawowej obniżenie zbocza wyniesie około 0,64 i 1,61 mm, odpowiednio dla stoku długości 100 m (7%) i 40 m (12%). Wielkość erozji wodnej podczas okresu wegetacji roślin zbożowych jest znacznie mniejsza stanowiąc odpowiednio około 0,01 i 0,02 mm (1-2% wielkości erozji uprawowej) (tab. 27).

Udział erozji wodnej zwiększy się, gdy uwzględnimy erozję z powierzchni czarnego ugoru (w tym rozbryzg gleby) oraz erozję wodną pochodzącą z roztopów, poprzedzających siew roślin jarych. Jak duże mogą to być wartości świadczą wcześniejsze badania, w których wielkość zmywu gleby zmierzona na ściernisku wyniosła 5,4 $t \cdot ha^{-1}$ (poletko o długości 20 m, stok 12%), co w przeliczeniu daje obniżenie powierzchni stoku o 0,07 i 1,12 mm, odpowiednio dla spadku 7 i 12% [113]. Należy podkreślić, że tylko w jednym roku na 7-letni okres badań, rolnik zastosował na polach zlewni międzyplon ścierniskowy (gorczyca biała) po zbiorze roślin zbożowych. Wynikało to zarówno z małej wilgotności gleby po żniwach, jak i kosztów zakupu nasion.

Przyjmując, że uprawie roślin okopowych towarzyszą 2 główne zabiegi uprawowe w ciągu roku (kultywatorowanie łączone z bronowaniem i głęboka orka), przemieszczenie gleby w wyniku przeprowadzonych zabiegów może powodować obniżenie zbocza wynoszące około 0,38 oraz 0,97 mm, odpowiednio dla stoku o długości 100 m (7%) i 40 m (12%). W przypadku roślin okopowych wielkość erozji wodnej w okresie wegetacji jest znacznie większa w porównaniu do zbóż jarych i wynosi 0,12 oraz 0,36 mm, odpowiednio dla nachylenia 7 i 12% (32-37% wielkości erozji uprawowej) (tab. 27). Do zsumowanego obniżenia powierzchni zboczy należy dodać glebę wynoszoną wraz ze zbiorem roślin okopowych, którą Poesen i in. [109] oceniają dla buraka cukrowego na 0,91 $kg \cdot m^{-2}$ (0,70 mm) oraz erozję wodną związaną z roztopami.

Dla 3-letniego płodozmianu stosowanego obecnie przez rolnika na terenie obiektu badawczego w Bogucinie, składającego się z dwóch roślin zbożowych (pszenica jara i jęczmień jary) oraz jednej rośliny okopowej (burak cukrowy lub ziemniak), średnie roczne obniżenie powierzchni wskutek erozji uprawowej oraz wodnej w okresie wegetacji roślin wynosi około 0,60 oraz 1,53 mm, odpowiednio na stoku 7 i 12%. Przemieszczeniu gleby wskutek podstawowych zabiegów uprawowych podlega odpowiednio 0,55 i 1,40 mm gleby.

Wartości sumaryczne stanowią 15% i 62% rocznej wielkości erozji obliczonej na podstawie rekonstrukcji profili glebowych, odpowiednio dla zbocza o wystawie południowej (skłon 7%) i północnej (12%) (oszacowanej na 3,94 i 2,46 mm – rozdział 4.1). Tak duże zróżnicowanie udziału mierzonych form erozji w stosunku do całkowitej jej wielkości na poszczególnych stokach może być związane z południową wystawą zbocza o skłonie 7%, które jest w większym stopniu zagrożone spływami roztopowymi.

Z powyższej analizy wynika, że erozja uprawowa może stanowić około 14% (stok o nachyleniu 7%) oraz 56,9% (12%) ogólnej wielkości erozji na badanych zboczach. Udział formy uprawowej na zboczu o skłonie 12% jest zbliżony do

wartości uzyskanych na terenie pasa lessowego w Belgii [158]. Według cytowanej publikacji głównym elementem kształtującym współcześnie topografię stoków są zabiegi uprawowe (z wielkością przemieszczanej masy gleby stanowiącej około 63% erozji ogólnej). Należy jednak podkreślić, że rozdziału na poszczególne formy erozji dokonano w tych badaniach nie na podstawie porównania bezpośrednich pomiarów, lecz w oparciu o interpretację rozkładu ^{137}Cs na terenie zlewni.

Nie ulega wątpliwości, że erozja uprawowa stanowi główny czynnik modyfikujący dolną część zbocza, o czym świadczy jej wielkość w przeliczeniu na pas pola o szerokości 1 m (tab. 27). Bezpośrednim efektem erozji uprawowej jest powstawanie wysokich miedz oraz tarasów w dolnej części stoku [171]. Jedynie w warunkach intensywnych opadów wielkość erozji wodnej towarzyszącej uprawie roślin okopowych jest zbliżona do erozji uprawowej.

5. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania gleboznawcze w eksperymentalnej zlewni umożliwiły określenie stanu zerodowania gleb oraz ustalenie ich udziału w obrębie analizowanych zboczy. Stwierdzono, że gleby na zboczu o wystawie północnej były głębsze z bardziej rozwiniętym poziomem wmywania B oraz zostały w większym stopniu zerodowane w porównaniu do gleb na zboczu o wystawie południowej. Na podstawie analizy profili glebowych przeprowadzono rekonstrukcję pierwotnej ich budowy (przy założeniu, że przed rozpoczęciem rolniczego użytkowania wszystkie gleby były nieerodowane) oraz dokonano oceny wielkości erozji zachodzącej na analizowanych stokach zlewni. Korzystając z materiałów archiwalnych (mapy, przekazy ustne) określono czas użytkowania poszczególnych fragmentów zlewni, który dla zbocza o wystawie południowej wynosi 70 lat, a północnej – około 170-190 lat. Analiza ta pozwoliła również na ustalenie średniego rocznego tempa erozji z wartościami 3,94 mm dla erozji całkowitej oraz 2,87 mm dla erozji pomniejszonej o akumulację dla zbocza użytkowanego przez 70 lat oraz 2,46 i 1,66 dla zbocza użytkowanego przez 170-190 lat. Najprawdopodobniej znaczne przyśpieszenia erozji nastąpiło w okresie późniejszym wraz z wprowadzeniem ciągników do prac uprawowych na terenie badanej zlewni (1973 r.). O nasileniu erozji w latach bardziej współczesnych na zboczu o ekspozycji północnej, może świadczyć większa miąższość poziomu kopalnego Ab (20 cm), podczas gdy na przeciwstawnym wynosi on około 12 cm. Może to sugerować, że dawna głębsza warstwa orna została wytworzona wskutek orki pługiem ciągnikowym, natomiast płytsza – orki konnej.

W obrębie analizowanych zboczy o wystawie północnej (skłon 12%) i południowej (7%) przeprowadzono badania nad przemieszczeniem gleby pod wpływem erozji wodnej (1997-2004) oraz uprawowej na skłonie 7%, obejmującej podorywkę oraz łączony zabieg kultywatorowania i bronowania.

Wyniki badań wskazują, że procesy erozji wodnej na stokach przebiegają w sposób niezwykle dynamiczny i zróżnicowany. Ta dynamika wynika z chwilowych zmian wielkości energii dostarczanej do powierzchni gleby przez krople deszczu (związanej z intensywnością opadu), zróżnicowanych warunków występujących w jej powierzchniowej warstwie (mikrorzeźba, wilgotność) oraz rozwoju rośliny. Czynniki te powodują, że w każdej fazie zdarzenia erozyjnego, cząstki gleby są odrywane i przenoszone na pewną odległość. W celu poznania mechanizmu procesu, metodyka badawcza powinna umożliwiać pomiar wielkości erozji oraz odległości przemieszczenia cząstek. Stosunkowo wcześnie problem ten rozpoznano analizując rozbryzg (masę cząstek oderwanych od powierzchni gleby przez krople deszczu), zalecając prowadzenie pomiarów przy pomocy kubków (splash cups) o zróżnicowanej średnicy oraz zastosowanie modeli korekcyjnych do wyznaczenia rzeczywistej wielkości rozbryzgu. W niniejszej pracy rozbryzg mierzono w warunkach polowych za pomocą kubków o różnych średnicach (od 3,2 do 14,5 cm), wyznaczając jego wielkość i odległość przemieszczenia oraz określając wpływ różnych czynników, które je warunkują. Efektem tej analizy jest opracowanie modelu prognozującego wielkość rozbryzgu na podstawie intensywności opadu. W porównaniu do innych, zaproponowany model: (1) oszacowuje rozbryzg na podstawie 10-minutowych okresów intensywności, a nie całego opadu; (2) zaproponowana funkcja przypisuje większą rolę wyższej intensywności cząstkowej opadu w odrywaniu cząstek gleby; (3) powstał on na podstawie pomiarów prowadzonych w warunkach polowych. Model ten został pozytywnie zweryfikowany dla 20 okresów pomiarowych z opadami o zróżnicowanej intensywności cząstkowej.

W wyniku badań ustalono i ujęto w postaci ilościowej zależności między opadem oraz wielkością i odległością rozbryzgu. Wykazano, że dwukrotnie więcej energii kinetycznej potrzeba do oderwania masy 1 kg z zaskorupionej powierzchni gleby w porównaniu do spulchnionej (odpowiednio 479 i 258 J). Ustalono, że odległość przemieszczenia cząstek wskutek rozbryzgu głównie zależała od stanu powierzchni gleby i obecności spływu. Opad na powierzchnię zaskorupioną powodował 1,8-krotne jej zwiększenie w porównaniu do opadu na glebę spulchnioną. W warunkach wystąpienia spływu, odległość przemieszczenia była 1,9-krotnie większa w odniesieniu do rozbryzgu, któremu spływ nie towarzyszył.

O ile w badaniach rozbryzgu dość wcześnie spostrzeżono zależności między mierzoną wielkością i odległością, to w badaniach erozji wodnej prowadzonych

na poletkach, problem ten był pomijany lub uważany za niemożliwy do rozwiązania, a zależności empiryczne przyjmowano z modelu USLE. Dopiero próba ustalenia przyczyn rozbieżności między danymi eksperymentalnymi oraz prognozowanymi z modelu USLE doprowadziła do wypracowania podstaw interpretacji danych z poletek o zróżnicowanej długości oraz wyznaczenia tzw. efektywnej odległości przemieszczenia [113, 115]. W przedłożonym opracowaniu przedstawiono nowy, odmienny sposób analizy danych pomiarowych. Oparty jest on na założeniu, że stosunek masy gleby zebranej z poletek o różnej długości jest funkcją trwania spływu powierzchniowego (i możliwości jej dotarcia z miejsc dalej położonych do instalacji zbierających). Tak postawioną hipotezę zweryfikowano pozytywnie dla mniej erozyjnych zdarzeń (z maksymalnymi wartościami jednostkowymi na poletku o długości 2,5 m) i częściowo, z uwagi na ograniczoną bazę danych – dla zdarzeń z maksymalnymi wartościami jednostkowymi na obiektach dłuższych. Ustalono, że czas trwania spływu (liczba jednostek) jest dłuższy na skłonie o spadku 7% (średnio 2-krotnie) w porównaniu do nachylenia 12%. Oznacza to, że w przypadku opadu wywołującego wystąpienie spływu skoncentrowanego w zlewni, materiał pochodzący ze zboczy dociera do cieku głównego w różnym czasie w zależności od spadku skłonu i oddalenia zbocza od głównej linii cieku.

Badania w układzie poletek o zróżnicowanej długości stwarzają możliwość analizy procesu erozyjnego zachodzącego podczas pojedynczego zdarzenia erozyjnego. Jest to o tyle istotne, że w ostatnim okresie powstało szereg teorii i modeli prognozujących pojedyncze zdarzenia erozyjne, których założeń nie można zweryfikować w warunkach polowych wykorzystując tradycyjną metodykę pomiarową (poletka o jednakowej długości).

Przedstawione wyniki badań pozwoliły odnieść się do wcześniej opublikowanych zależności między wielkością erozji i parametrami opadów. W oparciu o poszerzoną bazę danych stwierdzono, że najlepszym parametrem jest jednak wskaźnik erozyjności opadu i spływu powierzchniowego EI_{30}, a nie suma opadów i energia kinetyczna, jak to sugerowały wcześniejsze analizy [112]. Na podstawie maksymalnego zmywu jednostkowego gleby określono podatność gleby na erozję w poszczególnych miesiącach. Wyniki te sugerują, że również model RUSLE nie zapewnia prawidłowego prognozowania wielkości zmywu gleby w Polsce, zaś głównych przyczyn należy upatrywać w znacznie mniejszej erozyjności opadów oraz i ich liczbie w porównaniu do warunków występujących w USA.

W prezentowanej pracy przedstawiono wyniki badań nad przemieszczeniem gleby pod wpływem wybranych zabiegów uprawowych – podorywki i kultywatorowania połączonego z bronowaniem. Tego rodzaju prace prowadzone były w Polsce w latach 1950-60 w warunkach zupełnie odmiennych (tj. przy użyciu

pługów jednoskibowych konnych i ciągnikowych), aniżeli dzisiaj (przy użyciu pługów wieloskibowych). Wielkość oraz odległość przemieszczenia gleby wyznaczono na podstawie metodyki stosowanej w Uniwersytecie w Leuven (Belgia), który należy do wiodących ośrodków w badaniach nad erozja uprawową. Prezentowane wyniki wskazują, że masa gleby przemieszczonej podczas podorywki jest nieznacznie mniejsza od masy gleby przemieszczanej podczas orki głębokiej (przedzimowej). Zbliżone wielkości erozji towarzyszącej obu zabiegom wynikają z większej odległości, na którą przemieszczana jest gleba podczas podorywki. W porównaniu do orki masa gleby przemieszczana w wyniku łączonego zabiegu kultywatorowania i bronowania jest znacznie mniejsza.

Wielkość erozji uprawowej wyznaczano dla zabiegów wykonywanych zgodnie z kierunkiem spadku zbocza. Jest to sposób wadliwy z punktu widzenia ochrony gleby. Jednak kształt działek rolnych, ich lokalizacja w zlewni oraz struktura własnościowa praktycznie uniemożliwia rolnikom prowadzenie uprawy zgodnie z zaleceniami agrotechniki przeciwerozyjnej tj. w poprzek do kierunku spadku. Podobne zastrzeżenia może budzić aktualnie stosowany płodozmian (2-krotnie zboża i raz okopowe w ciągu 3 lat), podczas gdy opracowane zostały specjalne płodozmiany dla terenów zagrożonych erozją. Jednak i w tym przypadku za odejściem od zaleceń przemawiają względy ekonomiczne (brak zwierząt hodowlanych wymusił rezygnację z uprawy roślin motylkowatych). Należy przy tym nadmienić, iż celem podjętych badań było ilościowe określenie wielkości erozji uprawowej w warunkach praktyki stosowanej przez rolników. Odejście od niej utrudniłoby próbę oceny udziału erozji wodnej i uprawowej w przemieszczeniu gleby w trakcie użytkowania rolniczego zlewni.

Przeprowadzenie badań erozji wodnej i uprawowej na tych samych stokach umożliwiło skonfrontowanie wielkości przemieszczenia gleby wskutek obu procesów. Prezentowana w niniejszej pracy ocena porównawcza jest pierwszą, która oparta jest o bezpośrednie pomiary ilościowe. Przyczyną dotychczasowego braku tego typu porównania były trudności interpretacyjne wynikające z różnic w metodyce badań obu procesów. Zaproponowane rozwiązanie polega na odniesieniu masy przemieszczonej gleby do długości stoku (przy równomiernym nachyleniu).

Z porównania natężenia obu procesów wynika, że na obniżenie zbocza – utratę warstwy gleby (wyrażaną w mm) w dużym stopniu wpływa erozja uprawowa, towarzysząca zabiegom agrotechnicznym. Jednak jej udział w odniesieniu do innych form erozji oraz wielkości całkowitej oszacowanej na podstawie rekonstrukcji profili glebowych różni się w zależności od długości i wystawy zbocza. W większym stopniu wpływa ona na przekształcenie stoku krótszego o wystawie północnej w porównaniu do dłuższego o ekspozycji południowej. Znacznie mniej-

szy udział erozji uprawowej w odniesieniu do całkowitej na zboczu o wystawie południowej może być związany z większym nasileniem erozji wywołanej spływami roztopowymi. Pomiarów w okresie roztopów jednak nie prowadzono.

Obniżenie zbocza stanowi jeden z dwóch aspektów geomorfologicznych, wywoływanych działalnością człowieka, drugim jest przekształcenie jego dolnej części i tutaj głównym czynnikiem kształtującym ten element topografii stanowią zabiegi uprawowe. Wskazuje na to wielokrotnie większa masa gleby przemieszczana przez pas pola o szerokości 1 m (w porównaniu do erozji wodnej podczas wegetacji roślin). Jedynie ekstremalne opady towarzyszące uprawie roślin okopowych lub pozostawieniu pola bez okrywy roślinnej po zbiorze zbóż mogą wywoływać efekt erozyjny zbliżony lub większy od erozji uprawowej. Należy podkreślić, że w okresie badań 1997-2004 nie wystąpiły opady ekstremalne, które mogłyby zmienić proporcje między zmierzoną erozją wodną i uprawową. Opady takie występują sporadycznie i wielokrotnie przewyższają przeciętną wielkość erozji.

6. WNIOSKI

Na podstawie badań przeprowadzonych na stokach zlewni lessowej, zróżnicowanych pod względem ekspozycji, nachylenia i długości oraz wykonanych analiz sformułowano następujące wnioski:

1. Podjęte prace pozwoliły na uzupełnienie luk metodycznych w analizie erozji, ustalenie czynników kształtujących ten proces oraz jego parametrów, a pomiary przeprowadzone na wybranych stokach zlewni umożliwiły ilościowe ujęcie erozji wodnej i uprawowej oraz określenie udziału obydwu procesów w przekształcaniu gleby i stoków lessowych.
2. W zakresie doskonalenia metodyki zaproponowano:
   - model prognozujący rozbryzg gleby na podstawie 10-minutowych okresów intensywności opadów. Opracowany model umożliwia znacznie dokładniejsze oszacowanie masy gleby oderwanej od jej powierzchni pod wpływem deszczu w porównaniu do innych, prognozujących rozbryzg na podstawie całkowitej energii kinetycznej opadu;
   - metodę analizy pojedynczych zdarzeń erozyjnych w oparciu o wielkość spływu powierzchniowego i zmywu gleby wyznaczoną z poletek o zróżnicowanej długości. Maksymalna wartość jednostkowa erozji stanowi wielkość charakteryzującą natężenie procesu, a stosunek masy zebranego materiału odzwierciedla czas trwania zdarzenia.
3. Na podstawie analizy czynników wpływających na erozję wodną i parametrów erozji wykazano, że:

- wielkość rozbryzgu jest uzależniona od energii kinetycznej opadu oraz stanu powierzchni, a odległość przemieszczenia – od stanu powierzchni gleby oraz obecności spływu powierzchniowego;
- maksymalna wielkość jednostkowej erozji wodnej w największym stopniu jest skorelowana z wartością wskaźnika erozyjności opadu i spływu powierzchniowego EI_{30}, a odległość przemieszczenia cząstek gleby – zbliżona do długości poletka, na którym stwierdzono maksymalny zmyw jednostkowy;
- stosunek masy zebranego materiału glebowego z poletek o różnej długości jest funkcją czasu trwania spływu, a efektywna odległość przemieszczenia gleby zależy głównie od czasu trwania spływu i w znacznie mniejszym stopniu - od mikroreliefu powierzchni gleby oraz opadu.

4. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów wykazano, że:
   - gleby stoku o wystawie północnej zostały zerodowane w większym stopniu w porównaniu do południowej. Jednak z uwagi na różnice stosunku gleb zerodowanych do deluwialnych, większą erozję stwierdzono na dłuższym stoku o ekspozycji południowej;
   - średnia roczna wielkość erozji na badanych stokach zlewni wynosi 2,87 i 3,94 mm, odpowiednio dla stoku pozostającego pod uprawą przez 170-190 (o spadku 7%) i 70 lat (12%), a erozji pomniejszonej o akumulację 1,66 i 2,46 mm.
   - średnia roczna wielkość zmierzonej erozji wodnej w okresie wegetacji roślin i uprawowej przy obecnie stosowanym płodozmianie wynosi 0,60 i 1,53 mm, co stanowi 15 i 62% średniej rocznej erozji całkowitej, odpowiednio dla zbocza o nachyleniu 7 i 12%.
   - wielkość rozbryzgu przewyższa maksymalną wielkość jednostkową zmywu gleby (średnio 4,5-krotnie). Oznacza to, że jedynie część oderwanego materiału glebowego wskutek uderzeń kropli jest przenoszona wraz ze spływem powierzchniowym.
   - występują istotne różnice w przebiegu erozji wodnej w zależności od nachylenia zbocza. Erozja przebiega intensywniej na stoku o większym spadku, jednak z uwagi na dłuższy czas trwania spływu przy mniejszym spadku, stosunek masy przenoszonej gleby między nimi ulega zmniejszeniu.

7. PIŚMIENNICTWO

1. **Abrahams A.D., Gary L., Krishnan C., Atkinson J.F.:** Predicting sediment transport by interrill overland flow on rough surfaces. Earth Surface Processes and Landforms, 23, 1087-1099, 1998.
2. **Agassi M., Bradford J.M.:** Methodologies for interrill soil erosion studies. Soil and Tillage Research, 49, 277-287, 1999.
3. **Al Durrah M.M., Bradford J.M.:** Parameters for describing soil detachment due to single waterdrop impact. Soil Sci. Soc. Am. J., 46, 836-840, 1982.
4. **Al Durrah M.M., Bradford J.M.:** The mechanism of raindrop splash on soil surfaces. Soil Sci. Soc. Am. J., 46, 1086-1090, 1982.
5. **Arriaga F.J., Lowery B.:** Corn production on an eroded soil: effects of total rainfall and soil water storage. Soil and Tillage Research, 71, 87-93, 2003.
6. **Auzet A., Boiffin J., Ludwig B.:** Concentrated flow erosion in cultivated catchments: influence of soil surface state. Earth Surface Processes and Landforms, 20, 759-767, 1995.
7. **Bac S.:** Przyczynek do badań nad zmianą położenia powierzchni ornych gruntów lessowych. Roczniki Nauk Rolniczych i Leśnych, 19(3), 463-490, 1928.
8. **Bakker M.M., Govers G., Rounsevell M.D.A.:** The crop productivity-erosion relationship: an analysis based on experimental work. Catena, 57, 55-76, 2004.
9. **Banasik K., Górski D.:** Evaluation of rainfall erosivity for east Poland. In: Runoff and sediment yield modelling (Eds K. Banasik, A. Żbikowski). Warsaw Agricultural University Press, 129-134, 1993.
10. **Basic F., Kisic I., Mesic M., Nestroy O., Butorac A.:** Tillage and crop management effects on soil erosion in central Croatia. Soil and Tillage Research, 78, 197-206, 2004.
11. **Becher H.H., Schwertmann U., Sturmer H.:** Crop yield reduction due to reduced plant available water caused by water erosion. In: Soil Erosion and Conservation (Eds S.A. El-Swaify, W.C. Moldenhauer, A. Lo), Soil Conservation Society of America, Ankeny, Iowa, 365-373, 1985.
12. **Beuselinck L., Govers G., Hairsine P.B., Sander G.C., Breynaert M.:** The influence of rainfall on sediment transport by overland flow over areas of net deposition. Journal of Hydrology, 257, 145-163, 2002.
13. **Bingner R.L., Mutchler C.K., Murphree C.E.:** Predictive capabilities of erosion models for different storm sizes. Transactions of the ASAE, 35(2), 505-513, 1992.
14. **Bollinne A.:** Splash measurements in the field. In: Assessment of erosion (Eds De Boodt M., D. Gabriels), Wiley and Sons, Chichester, UK, 441-453, 1980.
15. **Brown L.C., Foster G.R.:** Storm erosivity using idealized intensity distributions. Transactions of the ASAE, 30, 379-386, 1987.
16. **Bubenzer G.D., Jones B.A.:** Drop size and impact velocity effects on the detachment of soils under simulated rainfall. Transactions of the ASAE, 14, 625-628, 1971.
17. **Catt J.:** Soil erosion on the Lower Greensand at Woburn Experimental Farm, Bedfordshire – evidence, history and causes. In: Past and present soil erosion. Archeological and geographical perspectives (Eds M. Bell, J. Boardman), Oxbow, Oxford, UK, 67-76, 1992.
18. **Cerda A.:** The El Tenlaret-Sierra de Enguera soil erosion experiomental station, eastern Spain. Geophysical Research Abstracts, vol.7, 000176, EGU Vienna, 2005.
19. **Ciampalini R., Torri D.:** Detachment of soil particle by shallow flow: sampling methodology and observations. Catena, 32, 37-53, 1998.

20. **Cruse R.M., Larson W.E.:** Effect of shear strength on soil detachment due to raindrop impact. Soil Sci. Soc. Am. J., 41, 777-781, 1977.
21. **Czyżyk W.:** Przemieszczenie gleby na zboczu pod działaniem orki. Rocz. Nauk Roln., 71-F-1, 73-88, 1955.
22. **Daniels R.B., Gilliam J.W., Cassel D.K., Nelson L.A.:** Soil erosion class and landscape position in the North Carolina Piedmont. Soil Sci. Soc. Am. J., 493, 991-995, 1985.
23. **De Alba S., Lindstrom M., Schumacher T.E., Malo D.D.:** Soil landscape evolution due to soil redistribution by tillage: a new conceptual model of soil catena evolution in agricultural landscapes. Catena, 58, 77-100, 2004.
24. **De Alba S., Borselli L., Torri D., Pellegrini S., Bazoffi P.:** Assessment of tillage erosion by mouldboard plough in Tuscany (Italy). Soil and Tillage Research, 85, 123-142, 2006.
25. **De Lima J.L.M.P., Van Dijk P.M., Spaan W.P.:** Splash saltation transport under wind-driven rain. Soil Technology, 5, 151-166, 1992.
26. **De Roo A.P.J., Wesseling C.G., Ritsema C.J.:** LISEM: a single event physically-based hydrologic and soil erosion model for drainage basins: I. Theory, input and ouput. Hydrological Processes, 10(8), 1107-1117, 1996.
27. **Ellison W.C.:** Studies of raindrop erosion. Agricultural Engineering, 25, 131-136, 1944.
28. **Erpul G., Norton L.D., Gabriels D.:** Raindrop-induced and wind driven soil particle transport. Catena, 47, 227-243, 2002.
29. **Erpul G., Gabriels D., Norton L.D.:** Sand detachment by wind driven raindrops. Earth Surface Processes and Landforms, 30(2), 241-250, 2005.
30. **Flanagal D.C., Nearing M.A.(Eds):** USDA – Water Erosion Prediction Project. Hillslope profile and watershed model documentation. NSERL Report No.10, USDA-ARS NSERL, West Lafayette, Indiana, 1995.
31. **Fleige H., Horn R.:** Field experiments on the effect of soil compaction on soil properties, runoff interflow and erosion. Advances in GeoEcology, 32, 258-268, 2000.
32. **Fohrer N., Berkenhagen J., Hecker J.M., Rudolph A.:** Changing soil and surface conditions during rainfall single rainstorm/subsequent rainstorms. Catena, 37, 355-375, 1999.
33. **Foster G.R., Lane L.J., Nowlin J.D., Laflen J.M., Young R.A.:** A model to estimate sediment yield from field-sized areas: development of model. In: CREAMS – a field scale model for Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems (Ed. W.G. Knisel). USDA Cons. Res. Report No. 26, USDA-SEA, 36-64, 1980.
34. **Foster G.R., McCool D.K., Renard K.G., Moldenhauer W.C.:** Conversion of the Universal Soil Loss Equation to SI metric units. Journal of Soil and Water Conservation, 36(6), 355-359, 1981.
35. **Froehlich W.:** Influence of slope gradient and supply area on splash. Z. Geomorph. N.F., Suppl. Bd 60, 105-114, 1986.
36. **Froehlich W.:** Natężenie erozji gleb na stokach beskidzkich w świetle badań metodami klasycznymi i radioizoitopowymi. Zeszyty Naukowe AR w Krakowie, 315, 35-46, 1997.
37. **Froehlich W., Słupik J.:** Importance of splash in erosion process within a small flysh catchment basin. Sudia Geomorphologica Carpatho-Balcanica, 14, 77-112, 1980.
38. **Gabriels D., Cadron W., De Mey P.:** Provisional rain erosivity maps of some EC countries. In: Erosion assessment and modeling (Ed.: R.P.C Morgan, R.J. Ricksen), Silsoe College, Silsoe, UK, 93-117, 1988.
39. **Gerlach T.;** Bombardująca działalność kropel deszczu i jej znaczenie w przemieszczaniu gleby na stokach. Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica, 10, 125-137, 1976.

40. **Gerlach T.:** Współczesny rozwój stoków w polskich Karpatach fliszowych. Prace geograficzne, IGiPZ PAN, 122, 1976.
41. **Ghadiri H., Payne D.:** The formation and characteristics of splash following raindrop impact on soil. J. Soil Sci., 39, 563-575, 1988.
42. **Gil E.:** Rola użytkowania ziemi w przebiegu spływu powierzchniowego i spłukiwania na stokach fliszowych. Przegląd Geograficzny, 58, (1/2), 51-65, 1986.
43. **Gil E.:** Obieg wody i spłukiwanie na fliszowych stokach użytkowanych rolniczo w latach 1980-1990. Zeszyty IGiPZ PAN, 60, 1-77, 1999.
44. **Gliński J. Turski R.:** Rozwój procesów erozji gleb w zależności od sposobów zagospodarowania oraz uprawy mechanicznej i ich wpływ na kształtowanie pokrywy glebowej. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Roln., 177, 47-71, 1976.
45. **Goff B.F., Bent G.C., Hart G.E.:** Influence of rainfall intensity on the interrill erodibility of two rangeland soils. Transactions of the ASAE, 37(5), 1445-1448, 1994.
46. **Govers G.:** Spatial and temporal variations in splash detachment: a field study. In: Loess. Geomorphological Hazards and Process (Eds S.Okuda, A.Rapp, Z.Linyuan), Catena Suppl., 20, 15-24, 1991.
47. **Govers, G.:** Tillage and translocation: emergence of a new paradigm in soil erosion research. Soil and Tillage Research, 51, 167-174, 1999.
48. **Govers G., Vandaele K., Desmet P., Poesen J., Bunte K.:** The role of tillage in soil redistribution on hillslopes. European Journal of Soil Sciences, 45, 469-478, 1994.
49. **Haisine P.B., Rose W.C.:** Modelling water erosion due to overland flow using physical principles. 1. Sheet flow. Water Resources Research, 28, 234-243, 1992.
50. **Haisine P.B., Rose W.C.:** Modelling water erosion due to overland flow using physical principles. 2. Rill flow. Water Resources Research, 28, 245-250, 1992.
51. **Huang C.:** Empirical analysis of slope and runoff for sediment delivery from interrill areas. Soil Sci. Soc. Am. J., 59, 982-990, 1995.
52. **Huang C., Wells L.K., Norton L.D.:** Sediment transport capacity and erosion processes: model concepts and reality. Earth Surface Processes and Landforms, 24, 503-516, 1999.
53. **Ionita I., Nistor D.:** Soil erosion control in the Moldavian Plateau of Eastern Romania, ZALF Bericht Nr. 47, Muencheberg, 65-70, 2001.
54. **Jain M.K., Singh V.P.:** DEM-based modelling of surface runoff using diffusion wave equation. Journal of Hydrology, 302, 107-126, 2005.
55. **Jankauskas B., Fullen M.A.:** A pedological investigation of soil erosion severity on undulating land in Lithuania. Canadian Journal of Soil Sci., 82, 311-321, 2002.
56. **Jankowski A.:** Orka na zboczach z punktu widzenia walki z erozją gleb. Rocz. Nauk Roln., 73-F-4, 679-714, 1959.
57. **Jetten V., De Roo, A., Favis-Mortlock D.:** Evaluation of field-scale and catchment scale soil erosion models. Catena, 37, 521-541, 1999.
58. **Joel A., Messing I., Seguel O., Casanova M.:** Measurement of surface water runoff from plots of two different sizes. Hydrological Processes, 16, 1467-1478, 2002.
59. **Józefaciuk A., Józefaciuk C.:** Erozja agroekosystemów. Biblioteka Monitoringu Środowiska. Warszawa, 1-168, 1995.
60. **Kinnel P.I.A.:** The effect of flow depth on sediment transport induced by raindrops impacting shallow flows. Transactions of the ASAE, 34, 161-168, 1991.

61. **Klima K.:** Assessment of anti-erosion efficiency for three crop rotations applied to mountain soil. Electronic Journal of Polish Agricultural Universities, Environmental Development, 5(2), 2002.
62. **Klimowicz Z., Uziak S.:** The influence of long-term cultivation on soil properties and patterns in an undulating terrain in Poland. Catena, 43, 177-189, 2001.
63. **Kneale W.R.:** Field measurements of rainfall drop-size distribution, and the relationships between rainfall parameters and soil movement by rainsplash. Earth Surface Processes and Landforms, 7, 499-502, 1982.
64. **Koćmit A.:** Charakterystyka zmian w morfologii i właściwościach gleb uprawnych spowodowanych erozją wodną w obszarach młodoglacjalnych Pomorza. Zeszyty Problemowe Postępu Nauk Rolniczych, 460, 531-557, 1988.
65. **Kostrzewski A., Klimczak R., Stach A., Zwoliński Z.:** Morphologic effects of heavy rainfall (24 May, 1983) over relief features of the scarpland in the middle Parsęta valley, West Pomerania, Poland. Quaestiones Geographicae, Sp. Issue 2, 101-110, 1989.
66. **Laflen J.M., Moldehauer W.C.:** Pioneering soil erosion prediction. The USLE story. World Association of Soil and Water Conservation. Special Publication 1, Bejing, China, 1-43, 2003.
67. **Langdale G.W., Box J.E., Leonard R.A., Barnett A.P., Fleming W.G.:** Corn yield reduction on eroded Southern Piedmont soils. Journal of Soil and Water Conservation, 34, 226-228, 1979.
68. **Le Bissonnais Y., Renaux B., Delouche H.:** Interactions between soil properties and moisture content in crust formation, runoff and interrill erosion from tilled soils. Catena, 25, 33-46, 1995.
69. **Le Bissonais Y., Benkhadra H., Chaplot V., Fox D., King D., Daroussin J.:** Crusting, runoff and sheet erosion on silty loamy soils at various scales and upscaling from m^2 to small catchment. Soil and Tillage Research, 46, 69-80, 1998.
70. **Le Bissonnais Y., Cerdan O., Lecomte V., Benkhadra H., Souchere V., Martin P.:** Variability of soil surface characteristics influencing runoff and interrill erosion. Catena, 62, 111-124, 2005.
71. **Legout C., Leguédois S., Le Bissonnais Y., Malam Issa O.:** Splash distance and size distributions for various soils. Geoderma, 124, 279-292, 2005.
72. **Licznar M., Licznar S.E., Zawerbny T.:** Wpływ erozji na niektóre właściwości fizykochemiczne gleb lessowych Dolnego Śląska. Bibliotheca Fragmenta Agronomica, 4A/98, 29-39, 1998.
73. **Licznar P., Rojek, M.:** Erozyjność deszczy Polski południowo-zachodniej na przykładzie stacji Wrocław-Swojec. Przegląd Naukowy SGGW, Inżynieria i Kształtowanie Środowiska, 11, 2, 5-14, 2002.
74. **Lobb D.A., Kachanoski R.G.:** Modelling tillage translocation using step. Linear-plateau and exponential functions. Soil and Tillage Research, 51, 317-330, 1999.
75. **Lobb D.A., Kachanoski R.G., Miller M.H.:** Tillage translocation and tillage erosion in the complex upland landscapes of southwestern Ontario, Canada. Soil nad Tillage Research, 51, 189-209, 1999.
76. **Lindstrom M.J., Nelson W.W., Schumacher T.E., Lemme G.D.:** Soil movement by tillage as affected by slope. Soil and Tillage Research, 17, 255-264, 1990.
77. **Lundekvam H., Skoien S.:** Soil erosion in Norway. A review of measurements from soil loss plots. Soil Use and Management, 14, 84-89, 1998.

78. **Lyles L.:** Soil detachment and aggregate disintegration by wind driven rain. Proc. of a National Conference on Soil Erosion, May 24-26, 1976, Purdue univ., West Lafayette, Indiana, 152-159, 1977.
79. **Marcinek J.:** Rozmiary erozji wodnej gleb w Wielkopolsce. Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu, 266, 63-73, 1994.
80. **Martini Z.:** Rozważania dotyczące teorii pracy narzędzi rolniczych. Rocz. Nauk Roln., 71-F-1, 57-72, 1955.
81. **Maruszczak H.:** Tendencje sekularne i zjawiska ekstremalne w rozwoju rzeźby małopolskich wyżyn lessowych w czasach historycznych. Czasopisma Geograficzne, 57(2), 271-282, 1986.
82. **Maruszczak H., Uziak S.:** Wpływ mikrorzeźby obszarów lessowych na zróżnicowanie procesów glebotwórczych, Roczniki gleboznawcze, 29(3), 159-173, 1978.
83. **Mazur Z.:** Zmiana rzeźby uprawnych zboczy lessowych w Elizówce. Annales UMCS, 27(10), Sectio E, 169-19-80, 1972.
84. **Mazur Z., Pałys S.:** Natężenie erozji wodnej w małych zlewniach lessowych Wyżyny Lubelskiej w latach 1986-1990. Wyd. AR Lublin, 63-78, 1991.
85. **Mazur Z., Pałys S.:** Erozja wodna w zlewni lessowej na Lubelszczyźnie w latach 1956-1991. Annales UMCS, 47, Sectio E, 25, 219-229, 1992.
86. **McGregor K.C., Binger R.L., Bowie A.J., Foster G.R.:** Erosivity index values for Northern Mississppi. Transactions of the ASAE, 38(4), 1039-1047, 1995.
87. **McIssac G.F., Mitchell J.K., Hummel J.W., Elliot W.J.:** An evaluation of unit stream power theory for estimating soil detachment and sediment discharge from tilled soils. Transactions of the ASAE, 35(2), 535-544, 1992.
88. **Mihara Y.:** Raindrops and soil erosion. Bulletin of the National Institute of agricultural Sciences, A1, 1-51, 1951.
89. **Montgomery J.A., McCool D.K., Busacca A.J., Frazier B.E.:** Quantyfying tillage translocation and deposition rates due to moldboard plowing in the Palouse region of the Pacific Nortwest, USA. Soil and tillage Research, 51, 175-187, 1999.
90. **Moore D.C., Singer M.J.:** Crust formation effects on soil erosion processes. Soil Sci. Soc. Am. J., 54, 1117-1123, 1990.
91. **Moore I.A., Wilson J.P.:** Length-slope factors for the Revised Universal Soil Loss Equation: simplified method of estimation, Journal of Soil and Water Conservation, 47(5), 423-428, 1992.
92. **Morgan R.P.C.:** Field studies of sediment transport by overland flow. Earth Surface Processes, 5, 307-316, 1980.
93. **Morgan R.P.C., Quinton J., Smith R.E., Govers G., Poesen J., Auerswald K., Chisci G., Torri D., Styczeń M.E., Folly A.J.V.:** The European Soil Erosion Model (EUROSEM): Documentation and User Guide. Cranfirld University, 1998.
94. **Mutchler C.K., Carter C.E.:** Soil erodobility variation during the year. Transactions of the ASAE, 26, 1102-1104, 1108, 1983.
95. **Norton L.D.:** The relationship of present topography to pre-loess deposition topography in Eastcentral Ohio. Soil Sci. Soc. Am. J., 48, 147-151, 1983.
96. **Ollesch G., Vacca A.:** Influence of time on measurement results of erosion plot studies. Soil and Tillage Research, 67, 23-39, 2002.
97. **Palmer R.S.:** Waterdrop impact forces. Transactions of the ASAE, 8(1), 69-70, 1965.
98. **Paluszek J.:** Plonowanie roślin na obszarze erodowanych gleb płowych wytworzonych z lessu. Prace naukowe IUNG, R11/1, 123-131, 1996.

99. **Paluszek J., Słowińska-Jurkiewicz A.:** Problematyka jakości gleb wytworzonych z lessu podlegających erozji wodnej. Acta Agrophysica – Rozprawy i Monografie, 5, 89-100, 2004.
100. **Pałys S.:** Erozja wodna w zlewniach z okresowym odpływem wody na Wyżynie Lubelskiej w latach 1987-1999. Folia Univ. Agric. Stetin, 217, Agricultura 87, 179-182, 2001.
101. **Pałys S., Mazur A.:** Zmiany rzeźby na erodowanych lessach na terenie zabezpieczonym i kontrolnym. Bibliotheca Fragmenta Agronomica, 4B, 295-305, 1998.
102. **Park S.W., Mitchell J.K., Bubenzer G.D.:** Splash erosion modeling: physical analyses. Transactions of the ASAE, 357-361, 1982.
103. **Parsons A.J., Wainwrigth J., Abrahams A.D.:** Tracing sediment movement in interrill overland flow on a semi-arid grassland hillslope using magnetics susceptibility. Earth Surface Processes and Landforms, 18, 721-732, 1993
104. **Parsons A.J., Abrahams A.D., Wainwrigth J.:** Rainsplash and erosion rates in an interrill area on semi-arid grassland, Southern Arizona. Catena, 22, 215-226, 1994.
105. **Parsons A.J., Stromberg S.G.L., Greener M.:** Sediment-transport competence of rain-impacted interrill overland flow. Earth Surface Processes and Landforms, 23, 365-375, 1998.
106. **Piest R.F., Ziemnicki S.:** Comparative erosion rates of loess soils in Poland and Iowa. Transactions of the ASAE, 822-827, 833, 1979.
107. **Poesen J.:** Field measurements of splash erosion to validate a splash transport model. Z. Geomorph. N.F., Suppl. Bd., 58, 81-91, 1986.
108. **Poesen J., Torri D.:** The effect of cup size on splash detachment and transport measurements. Part I: Field mesurements. In: Geomorphic Processes in Environments with Strong Seasonal Contrasts, I. Hillslope Processes (Eds A.C. Imeson, M. Sala), Catena Suppl., 12, 113-126, 1988.
109. **Poesen J.W.A., Verstraeten G., Soenens R., Seynaeve L.:** Soil losses due to harvesting of chicory roots and sugar beet: an underrated geomorphic process? Catena, 43, 35-47, 2001.
110. **Quinton J.N., Catt J.A.**: The effects of minimal tillage and contour cultivation on surface runoff, soil loss and crop yields in the long-term Woburn Erosion Reference Experiment on sandy soil at Woburn, England. Soil Use and Management, 20, 343-349, 2004.
111. **Rejman J.:** Runoff and soil loss under conventional tillage for cereal production in Poland. Biliotheca Fragmenta Agronomica, 2B, 559-562, 1997.
112. **Rejman J.:** Zastosowanie wartości progowych opadów w prognozowaniu erozji wodnej na stoku lessowym. Zeszyty Problemowe Postępu Nauk Rolniczych, 487, 305-314, 2002.
113. **Rejman J., Usowicz B.:** Zastosowanie modelu USLE do prognozowania natężenia erozji wodnej gleb płowych Wyżyny Lubelskiej: teoria i praktyka. Bibliotheca Fragmenta Agronomica, 4B, 231-244, 1998.
114. **Rejman, J., Turski, R., Paluszek J.:** Spatial and temporal variations in erodibility of loess soil. Soil and Tillage Research, 46: 61-68, 1998.
115. **Rejman J., Usowicz B.:** Evaluation of soil-loss contribution areas on loess soils in southeast Poland. Earth Surface Processes and Landforms, 27(13), 1415-1423, 2002.
116. **Rejman J., Brodowski R.:** Rill characteristics and sediment transport as a function of slope length during a storm event on loess soil. Earth Surface Processes and Landforms, 30(2), 231-239, 2005.
117. **Rejman J., Paluszek J.:** Ocena przemieszczenia gleby pod wpływem orki głębokiej. Acta Agrophysica, 5(1), 129-136, 2005.

118. **Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A, McCool D.K., Yoder D.C.:** Predicting soil erosion by water - a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), Agricultural Handbook No. 703. U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC, 1-404, 1997.
119. **Reniger A.:** Próba oceny nasilenia i zasięgów potencjalnej erozji gleb w Polsce. Roczniki Nauk Rolniczych, 54(1), 1-59, 1950.
120. **Risse L.M., Nearing M.A., Nicks A.D., Laflen J.M.:** Error assessment in the Universal Soil Loss Equation. Soil Sci. Soc. Am. J., 57, 825-833, 1993.
121. **Risse L.M., Nearing M.A., Zhang X.C.:** Variability in Green-Ampt effective hydraulic conductivity under fallow conditions. Journal of Hydrology, 169, 1-24, 1995.
122. **Rodzik J., Janicki G.:** Local downpours and their erosional effects. Global Change, 10, 49-66, 2003.
123. **Royall D.:** Use of magnetic maesurements to investigate soil erosion and sediment delivery in a small agricultural catchment in limestone terrain. Catena, 46, 15-34, 2001.
124. **Römkens M.J.M., Luk S.H., Poesen J.W.A., Mermut A.R.:** Rain infiltration into loess soils from different geographic regions. Catena, 25, 21-32, 1995.
125. **Römkens M.J.M., Helming K., Prasad S.N.:** Soil erosion under different rainfall intensities, surface roughness, and soil water regimes. Catena, 46, 103-123, 2001.
126. **Rüttimann M., Schaub D., Prasuhn V., Ruegg W.:** Measurement of runoff and soil erosion on regularly cultivated fields in Switzerland – some critical considerations. Catena, 25, 127-139, 1995.
127. **Salles C., Poesen J.:** Rain properties controlling soil splash detachment. Hydrological Processes, 14, 271-278, 2000.
128. **Savat J., Poesen J.:** Detachment nad transportation of loose sediments by raindrop splash. Part I. The calculation of absolute data on detachability and transportabilty. Catena, 8, 1-17, 1981.
129. **Schwertmann U.:** Soil erosion: extent, prediction and protection in Bavaria. In: Soil erosion in the European Community. Impact of Changing Agriculture (Eds G.Chisci, R.P.C. Morgan). Balkema, Amsterdam, 185-200, 1986.
130. **Sharma P.P., Gupta S.C., Rawls W.J.:** Soil detachment by single raindrops at varying kinetic energy. Soil Sci. Soc. Am. J., 55, 301-307, 1991.
131. **Sharma P.P., Gupta S.C., Foster G.R.:** Raindrop induced soil detachment and sediment transport from interrill areas. Soil Sci. Soc. Am. J., 59, 727-734, 1995.
132. **Singh V.P.:** Kinematic wave modelling in water resources: a historical perspective. Hydrological Processes, 15, 671-706, 2001.
133. **Skrodzki M.:** Present-day water and wind erosion of soils in NE Poland. Geographia Polonica 23, 77-92, 1972.
134. **Słupik J.:** Ocena metod badań roli użytkowania ziemi w przebiegu spływu wody i erozji gleb w Karpatach. Przegląd Geograficzny, 58(1/2), 41-48, 1986.
135. **Smolska E.:** Erozja powierzchniowa na Pojezierzu Suwalskim na tle klimatyczno-topograficznych warunków redystrybucji gleb. Materiały konferencji "Erozja gleb i transport rzeczny", Zakopane 10-12.10.2002, 15-21, 2002.
136. **Starkel L. (Ed):** Geomorfologiczny i sedymentologiczny zapis lokalnych ulew. Dokumentacja Geograficzna, 11, IGiPZ PAN, 1-109, 1998.
137. **Stasik R., Szafrański C.:** Próba zastosowania modelu USLE do prognozowania intensywności erozji wodnej gleb Pojezierza Gnieźnieńskiego. Folia Universitatis Agriculturae Stetinensis, 217, 213-216, 2001.

138. **Stępniewski K.:** Wpływ litografii na wielkość spłukiwania na zboczach uprawianych rolniczo w Guciowie (Roztocze). In: Transformacja systemów fluwialnych i stokowych w późnym Vistulianie i Holocenie (Eds K. Turkowska, D. Dzieduszyńska), PTG Łódź, 22-24, 2002.
139. **Stone J.R., Gilliam J.W., Casswel D.K., Daniels R.B., Nelson L.A., Kleiss H.J.:** Effect of erosion and landscape position on the productivity of Piedmont soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 49, 987-991, 1985.
140. **Szafrański Cz.:** Rola zabiegów agromelioracyjnych w gospodarce wodnej i w ochronie przeciwerozyjnej terenów bogato urzeźbionych. In: Agromelioracje w kształtowaniu środowiska rolniczego (Ed. Z. Cieśliński), Wydawnictwo AR w Poznaniu, Poznań, 160-207, 1997.
141. **Szewrański S.:** Wstępna ocena natężenia erozji rozbryzgowej na glebie lessowej. Acta Agrophysica, 5(1), 167-178, 2005.
142. **Szpikowski J.:** Wielkość i mechanizm erozji wodnej gleb na stokach użytkowanych rolniczo w zlewni młodoglacjalnej (Górna Parsęta, Chwalimski Potok). Bibliotheca Fragmenta Agronomica, 4B, 113-124, 1998.
143. **Szpikowski J.:** Uwarunkowania mechanizmu procesu rozbryzgu w młodoglacjalnej zlewni Chwalimskiego potoku (górna Parsęta, Pojezierze Drawskie). In: Funkcjonowanie geoekosystemów w zróżnicowanych warunkach morfoklimatycznych. Monitoring, ochrona, edukacja. (Eds A. Kostrzewski, Z. Zwoliński) SGP Poznań, 511-524, 2001.
144. **Śmietana M.:** Zróżnicowanie rozbryzgu gleby na użytkowanych rolniczo stokach fliszowych. Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica, 21, 161-182, 1987.
145. **Święchowicz J.:** The influence of plant cover and land use on slope-channel decoupling in a foothill catchment: a case study from the Carpathian Foothills, Southern Poland. Earth Surface Processes and Landforms, 27, 463-480, 2002.
146. **Teisseyre A.K.:** Episodic channels and the development of dry valleys in cropland. Quaestiones Geographicae, 17/18, 65-78, 1995.
147. **Torri D., Poesen J.:** The effect of splash cup size on splash detachment and transport measurements. Part II: Theoretical approach. In: Geomorphic Processes in Environments with Strong Seasonal Contrasts, I. Hillslope Processes (Eds: A.C. Imeson i M. Sala). Catena Suppl., 12, 127-137, 1988.
148. **Torri D., Poesen J.:** The effect of soil surface slope on raindrop detachment. Catena, 19, 561-578, 1992.
149. **Torri D., Sfalanga M., Del Sette M.:** Splash detachment: runoff depth and soil cohesion. Catena, 14, 149-155, 1987.
150. **Truman C.C., Bradford J.M.:** Effect of antecedent soil moisture on splash detachment under simulated rainfall. Soil Sci. Soc. Am. J., 150, 787-798, 1990.
151. **Turski R.:** Substancja organiczna gleb terenów erodowanych. Roczniki Gleboznawcze, 22(1), 19-57, 1971.
152. **Turski R., Słowińska-Jurkiewicz A., Paluszek J.:** Wpływ erozji na fizyczne właściwości gleby wytworzonych z lessu. Roczniki Gleboznawcze, 38(1), 37-49, 1987.
153. **Van Dijk A.I.J.M, Meesters A.G.C.A., Bruijnzeel L.A.:** Exponential distribution theory and the interpretation of splash detachment and transport experiments. Soil Sci. Soc. Am. J., 66, 1466-1474, 2002.
154. **Van Dijk P.M., Auzet A.V., Lemmel M.:** Rapid assessment of field erosion and sediment pathways in cultivated catchments after heavy rainfall events. Earth Surface Processes and Landforms, 30(2), 169-182, 2005.

155. **Van Muysen W., Govers G.:** Soil displacement and tillage erosion during secondary tillage operations: the case of rotary harrow and seeding equipment. Soil and Tillage Research, 65, 185-191, 2002.
156. **Van Muysen W., Govers G., Bergkamp G., Roxo M., Poesen J.:** Measurement and modelling of the effects of initial soil conditions and slope gradient on soil translocation by tillage. Soil and Tillage Research, 51, 303-316, 1999.
157. **Van Muysen W., Govers G., Van Oost K.:** Identification of important factors in the process of tillage erosion: the case of moulboard tillage. Soil and Tillage Research, 65, 77-93, 2002.
158. **Van Oost K., Van Muysen W., Govers G., Deckers J., Quine T.A.:** From water to tillage erosion dominated landform evolution. Geomorphology, 72, 193-203, 2005.
159. **Van Rompaey A.J.J., Vieillefont V., Jones R.J.A., Montarella L., Verstraeten G., P. Bazzoffi, Dostal T., Krasa J., de Vente J., Poesen J.:** Validation of soil erosion estimates at European scale. European Soil Bureau Research Report No. 13, Office for official Publications of the European Communities, Luxembourg, 1-26, 2003.
160. **Ventura E., Nearing M.A., Amore A., Norton L.D.:** The study of detachment and deposition on a hillslope using a magnetic tracer. Catena, 48, 149-161, 2002.
161. **Watung R.L., Sutherland R.A., El-Swaify S.A.:** Influence of rainfall energy flux density and antecedent soil moisture content on splash transport and aggregate enrichment ratios for a Hawaiian Oxisol. Soil Technology, 9, 251-272, 1996.
162. **Wendt R.C., Alberts E.E., Hjelmfelt A.T.Jr.:** Variability of runoff and soil loss from fallow experimental plots. Soil Sci. Soc. Am. J., 50, 730-736, 1986.
163. **Williams J.R.:** Soil erosion effects on soil productivity: a research perspective. Journal of soil and conservation, 36(2), 82-90, 1981.
164. **Wischmeier W.H.:** Use and misuse of the Universal Soil loss equation. In: Soil erosion: prediction and control. Soil Conservation Society of America, Ankeny, Iowa, 371-375, 1977.
165. **Wischmeier W.H., Smith D.D.:** Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning. Agricultural Handbook No. 537, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C., 1-58, 1978.
166. **Yair A., Raz-Yassif N.:** Hydrological processes in a small arid catchment: scale effects of rainfall and slope length, Geomorphology, 61, 155-169, 2004.
167. **Young F.J., Hammer R.D.:** Soil-landform relationships on a loess-mantled landscape in Missouri. Soil Sci. Soc. Am. J., 61-4, 1443-1454, 2000.
168. **Young R.A., Wiersma J.L.:** The role of rainfall impact in soil detachment and transport. Water Resources Research, 9, 1629-1636, 1973.
169. **Zanchi C.:** Influenza dell'azzione battente della pioggia e del ruscellamento nel processo erosivo e variazoni dell'erodibilita del suolo nei diversi periodi stagionali. Ins. Sperimentale Studio Difesa Suolo Annali, 14, 347-358, 1983.
170. **Zhang K., Li S., Peng W., Yu B.:** Erodibility of agricultural soils on the loess Plateau of China. Soil and Tillage Research, 76, 157-165, 2004.
171. **Ziemnicki S., Orzechowski J., Orlik T., Rzedzicki Z.:** Przemieszczanie gleby przez pług i jakość orki na zboczu. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych, 170, 115-12, 1975.
172. **Zgłobicki W.:** Dynamika współczesnych procesów denudacyjnych w północno-zachodniej części Wyżyny Lubelskiej. Wydawnictwo UMCS, Lublin, 1-159, 2002.

8. STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono wyniki analiz budowy gleb oraz pomiarów erozji wodnej i uprawowej przeprowadzonych na dwóch zboczach małej zlewni lessowej na Wyżynie Lubelskiej. Na podstawie opisu profili określono klasę zerodowania gleb, a po przeprowadzeniu rekonstrukcji ich pierwotnej budowy obliczono wielkość erozji i akumulacji dla okresu użytkowania rolniczego zboczy. Średnie roczne natężenie erozji wyniosło 3,94 mm (przy 70 latach użytkowania rolniczego) i 2,87 mm (170-190 lat), a dla erozji pomniejszonej o akumulację 2,46 i 1,66 mm, odpowiednio dla zboczy o wystawie północnej i południowej.

Badania erozji wodnej obejmujące rozbryzg, spływ powierzchniowy oraz zmyw gleby prowadzono na poletkach o zróżnicowanej długości (2,5; 5, 10 i 20 m) zlokalizowanych w obrębie analizowanych zboczy. Do pomiaru rozbryzgu zastosowano kubki o średnicy 3,2; 5; 7,3; 11,7 i 14,5 cm, a do skalibrowania wyników model Van Dijka i in. [153]. W badaniach erozji uprawowej określono przemieszczenia gleby podczas podorywki oraz kultywatorowania połączonego z bronowaniem.

Stwierdzono, że wielkość rozbyzgu zależy głównie od opadu, a odległość przemieszczenia od stanu powierzchni gleby oraz obecności spływu. Do prognozowania rozbryzgu zaproponowano model oparty o zależność między masą oderwanej gleby i 10 minutową intensywnością opadu, który zweryfikowano pozytywnie. Wyniki pomiarów wykazały, że wielkość rozbryzgu jest wielokrotnie większa w porównaniu do masy gleby przemieszczanej ze spływem powierzchniowym. Jedynie w przypadku wystąpienia żłobin, jego wielkość była mniejsza od zmywu gleby.

Do analizy zdarzeń erozyjnych zaproponowano nowy sposób interpretacji danych z poletek o zróżnicowanej długości. Jest on oparty o maksymalną wartość jednostkową i stosunek zmywu gleby z poletek. Ustalono, że stosunek zmywu jest zależny od czasu, w którym erodowany materiał może zostać przemieszczony do instalacji zbiorczych. Wykazano, że czas, w którym gleba została przeniesiona do pojemników był średnio 1,8-krotnie dłuższy dla stoku 7% w porównaniu do 12%. Sugeruje to, że materiał glebowy może dotrzeć do cieku głównego zlewni w różnym czasie w zależności nie tylko od odległości od linii cieku, ale i od nachylenia stoku.

Zmyw gleby był w największym stopniu skorelowany z wskaźnikiem erozyjności opadu EI_{30} modelu USLE. Badania potwierdziły, że główne założenia tego modelu sprawdzają się jedynie w obrębie efektywnej odległości przemieszczenia, która zależy od czasu trwania opadu i spływu powierzchniowego.

Pomiary erozji uprawowej umożliwiły porównanie masy przemieszczonej gleby wskutek zabiegów uprawowych oraz erozji wodnej w okresie wegetacji roślin. Porównywano dwa aspekty geomorfologiczne – obniżenie zbocza oraz przekształ-

cenie dolnej jego części. Badania wykazały, że masa przemieszczonej gleby była znacznie większa podczas zabiegów uprawowych w porównaniu do erozji wodnej (w trakcie wegetacji roślin). Obie badane formy stanowiły 15 i 62% średniej rocznej wielkości erozji wyznaczonej na podstawie rekonstrukcji profili glebowych dla zboczy zlewni. Mały udział analizowanych form erozji na zboczu o wystawie południowej (15%) jest najprawdopodobnie związany ze spływami roztopowymi. Erozja uprawowa wydaje się być głównym czynnikiem odpowiedzialnym za przekształcenie dolnej części zbocza i jedynie opady ekstremalne w okresie wegetacji roślin okopowych oraz na glebie pozbawionej okrywy roślinnej mogą wywoływać zbliżony lub większy efekt erozyjny.

9. SUMMARY

EFFECT OF WATER AND TILLAGE EROSION ON TRANSFORMATION OF SOILS AND LOESS SLOPES

Results of soil survey, water and tillage erosion studies carried out on two slopes in small loess agricultural catchment of the Lublin Uplands are presented in the paper. Detailed soil survey carried out on two slopes of the catchment enabled to localize soils of various classes of erosion. Using soil profile reconstruction method, total erosion and accumulation volume was calculated for slopes during the whole period of their agricultural use. Annual erosion rate was 3.94 mm for 7% slope (at 70 years of agricultural use) and 2.87 mm for 12% slope (at 170-190 years), whilst erosion diminished by accumulation, 2.46 and 1.66 mm, respectively.

Studies of water erosion contained measurements of splash, and runoff and soil loss from a system of plots of variuos length (2.5, 5, 10 and 20 m), and tillage erosion – measurements of soil translocation due to shallow plow (10 cm) and cultivator (5 cm). Splash measurements were carried out with splash cup of various diameters (3.2, 5.0, 7.3, 11.7 and 14.5 cm). To calibrate splash amounts, the exponential theory of splash distribution of Van Dijk et al. (2002) was applied.

Results of splash studies showed that splash amount depended on rainfall parameters, and splash distance on micro-relief of the soil surface and presence of running water. To evaluate splash amounts, a simple model was developed on the basis of relation between splash and 10-minute rainfall intensity and tested. Results of measurements showed that splash amounts were many times larger in comparison to measured soil loss. Only in the case of rill erosion, splash amounts were lower than soil loss.

To describe the process of water erosion, a new interpretation method was proposed to analyze soil loss from plots of various length. The interpretation is based on maximum soil loss per unit area, as the value characteristic of the erosion event, and the final ratio of soil loss from plots, as the reflection of time during which eroded soil material can reach the plot outlet. The time was well correlated with the effective distance of soil transport. Analysis of results showed that time to reach plot outlet was on average 1.8-times longer for 7% slope in comparison to 12% slope. It implies that soil loss can reach the main water course of the catchment in different time, not only being dependent on the distance but also on slope. Water erosion rates were best related to rainfall and runoff erosivity index EI_{30} of the USLE. However, the relation was of general character. The studies confirmed that the USLE principles are valid only inside the effective distance for soil transport, which is most probably connected with time of rainfall and runoff.

Studies of soil displacement due to tillage implements enable to compare soil loss due to tillage and water erosion during plant vegetation. Two various geomorphic aspects were compared - lowering of slope and restructuring of lower slope border. Comparison showed that tillage erosion rates were much higher than water erosion rates during vegetation. Both studied processes were 15% and 62% of total annual erosion rates that were assessed from soil profile reconstruction. Low percentage of erosion share of studied processes on slope of southern exposure (15%) was most probably connected with erosion from snowmelt (not measured in the studies). Tillage erosion was found to be more important for restructuring of lower slope border, and only extreme events during sugar beet vegetation or leaving the field without canopy cover after cereals harvest can be close to the effect of tillage.

Keywords: water erosion, tillage erosion, splash, loess soils, soil truncation

Adres autora:

Jerzy Rejman
Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN
ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin
tel. (81)7445061, fax (81)7445067
e-mail:rejman@demeter.ipan.lublin.pl