

Marek BRZOZOWSKI

Katedra Kształtowania Środowiska i Melioracji

Department of Environmental Development and Land Improvement

Kształtowanie się spływu powierzchniowego w świetle badań modelowych

Model study of surface runoff

Wstęp

Jedną z głównych przyczyn erozji wodnej gleby jest spływ wody po jej powierzchni. Jego natężenie uzależnione jest od spadku terenu wielkości i intensywności opadu oraz możliwości retencyjnych gleby. W większości równań opisujących straty gleby powstałe w wyniku erozji wodnej jednym z istotniejszych parametrów jest współczynnik podatności gleb na erozję. Jednym z najczęściej stosowanych równań jest uniwersalne równanie strat glebowych USLE (Wischmeier 1978) w którym parametr K opisany jest za pomocą równania.

$$K = 2,77 \cdot 10^{-6} M^{1,14} (12 - OS) + 0,0325 (A-2) + 0,025 (D-3)$$

gdzie:

K – podatność gleb na erozję
[Mg · ha⁻¹ · Je⁻¹],

[Je = MJ · ha⁻¹ cm · h⁻¹],

M – iloczyn procentowej zawartości ziaren 0,002–0,1 i ziaren 0,1–2,0,

OS – procent zawartości substancji organicznej,

A – klasa struktury gleby,

D – klasa przepuszczalności gleby.

Równanie to nie uwzględnia wszystkich parametrów gleby, mogących mieć wpływ na spływ powierzchniowy. Należą do nich: wilgotność aktualna gleby i jej szorstkość. Znaczenie tych czynników potwierdzają badania dotyczące procesów zaskorupiania się powierzchni gleby i powstawania spływów powierzchniowych.

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań modelowych nad procesem formowania się spływu powierzchniowego, ze szczególnym uwzględnieniem wilgotności początkowej profilu glebowego.

Formowanie się spływu powierzchniowego

Proces powstawania spływu powierzchniowego zależy m.in. od stopnia pokrycia gleby. Praktyka wykazała, że jest on bardziej intensywny na glebach odkrytych. Deszcz padający na nieosłoniętą powierzchnię gleby w pierwszej fazie powoduje rozbitcie, a następnie zniszczenie struktury gleby w wierzchniej warstwie. Proces ten wywołany jest energią uderzeniową kropeł wody, które powodują pękanie agregatów glebowych. Oprócz tego następuje również zatykanie się drobnych porów glebowych, a w konsekwencji obniżenie zdolności chłonnych profilu glebowego czyli infiltracji i zapoczątkowanie spływu powierzchniowego. Zagęszczenie powierzchniowej warstewki gleby jest nie tyle efektem oddziaływania energii kinetycznej kropeł deszczu, ile rozpadu agregatów i ich innego ułożenia. Stwierdzono natomiast, że gęstość gleby rośnie wraz z intensywnością opadu.

W zagęszczonej wierzchniej warstwie gleby przy współdziałaniu dużych gruzełków glebowych tworzą się niewielkie mikrodepresje, w których czasowo może stagnować woda na skutek zablokowania porów kapilarnych. W trakcie postępującego deszczu w tych samych mikrodepresjach gromadzą się również zawiesiny będące wynikiem dyspersji chemicznej wywołanej uwalnianiem się koloidów, wymywania jonów dwuwartościowych oraz rozbryzgu gleby. Gromadzenie się wody i zawiesiny trwa do momentu rozmycia lub rozbitcia przez krople deszczu większych agregatów. Dalszy opad powoduje wypełnienie

większości depresji na powierzchni gleby, która pokryta jest cienką skorupą, powstałą na skutek wmycia cząstek ilastych pod cienką warstwę powierzchniową, tworząc tzw. poziom wmycia. Zbudowana jest ona z dwóch warstw. Pierwsza zagęszczona może osiągać grubość 0,1–0,3 mm oraz druga (warstwa wmycia) 1–3 mm, w niektórych okolicznościach grubość skorupy może osiągać nawet ponad 2 cm.

Po przekroczeniu pewnego poziomu krytycznego woda oraz zawarta w niej zawiesina wykorzystując ukształtowanie terenu, rozpoczyna ruch w dół zbocza. W początkowej fazie powstawania spływu powierzchniowego przybiera on formy ruchu laminarnego, przechodząc kolejno w drobne strumienie tworzące zarazem żłobiny. Cały proces należy rozpatrywać z punktu widzenia modułu dwuczęściowego, na który składa się erozja żłobinowa i międzyżłobinowa. Ilość erodowanej gleby na skutek wystąpienia spływu powierzchniowego zależy od wielu czynników, takich jak:

- energia i intensywności opadu,
- energia spływu powierzchniowego,
- rodzaj gleby (właściwości fizyczne i chemiczne),
- warunki powierzchniowe (ukształtowanie terenu, stopień pokrycia, rodzaj zabiegów).

Matematyczny opis wody płynącej po stoku jako pierwszy przedstawił Kostia-kow w 1919 roku. Został on zmodyfikowany przez Skotnickiego (1925) i Ostromęckiego (1962). Według tych autorów w warunkach ruchu ustalonego, gdy dopływ q na jednostkę powierzchni równoważy straty na wsiąkanie na długości l ($g = wl$) można

zmianę przepływu na odcinku dx pomiędzy dwoma przekrojami przedstawić w postaci równania:

$$dq = -w dx \quad (2)$$

gdzie w jest stałą prędkości wsiąkania. Według wzoru Chezy prędkość strugi o określonej głębokości y na odcinku x można zapisać następująco:

$$v = C \sqrt{yJ} \quad (3)$$

Wobec małego napełnienia y , współczynnik prędkości C może być wyznaczony w przybliżeniu ze wzoru:

$$C = c\sqrt{y} \quad (4)$$

Zatem przepływ na odległości x

$$q = cy^2\sqrt{J} \quad (5)$$

Według Meyera (1976) prędkość sływu powierzchniowego może dochodzić do 0,5 m/s (w naturalnych warunkach polowych), natomiast gęstość niesionej zawiesiny do 2 g/cm³. Uwzględniając zależność (3), przepływ w odległości x można zapisać, że zmiana przepływu względem y

$$dq = c\sqrt{J} 2ydy \quad (6)$$

Ten ubytek przepływu między przekrojami jest zużyty na wsiąkanie, więc

$$2c \sqrt{J} ydy = -w dx \quad (7)$$

Po scałkowaniu (uwzględniając, że przy $x = 0, y = h$, przy $x = l, y = 0$ oraz, że $q = c h^2 \cdot J^{0,5}$) otrzymamy równanie krzywej zwierciadła wody na stoku w formie paraboli drugiego stopnia, czyli

$$y^2 = h^2 (1 - w/q x) \quad (8)$$

Zasadniczy wpływ na kształtowanie się sływu powierzchniowego wywiera prędkość wsiąkania wody, w literaturze ujmowana jako wartość stała ($w = \text{const.}$) i zmienna w czasie oraz współczynnik szorstkości. W naturze wsiąkanie zawsze jest zmienne i może być wyrażone w postaci

$$w = K (1 + h/L) \quad (9)$$

Do aproksymacji funkcji wsiąkania w czasie wykorzystywana jest najczęściej zależność Kostiakowa

$$w_{ot} = w_{01} t^\alpha \quad (10)$$

gdzie:

w_{ot} – średnia prędkość wsiąkania w okresie od 0 do t ,

w_{01} – średnia prędkość wsiąkania wody w pierwszej jednostce czasu,

t – czas,

α – współczynnik potęgowy.

Współczynnik szorstkości dosyć dobrze został opisany przez Darcy'ego-Weisbacha, a następnie zmodyfikowane przez innych badaczy (Engman 1986, Gilley 1990).

$$f = 8g R_s/V^2$$

gdzie:

g – przyspieszenie grawitacyjne,
 s – średni spadek,
 V – prędkość przepływu,
 R – promień hydrauliczny.

Jego wartość uzależniona jest od wielu czynników, np. liczby Reynoldsa, rodzaju zabiegów uprawnych, pokrycia roślinnością. Różne badania dowodzą, że intensywność spływu powierzchniowego największą wartość uzyskuje w początkowej fazie jego powstania, po czym ustala się dynamiczny stan równowagi między intensywnością opadu i jego energią kinetyczną a wielkością i energią spływu. Podobny przebieg ma również relacja pomiędzy stężeniem materiału erodowanego w stosunku do czasu powstania spływu. Jest to w głównej mierze wynikiem kumulacji znacznej ilości materiału glebowego powstałego w trakcie rozpadu.

Zmiana wielkości spływu powierzchniowego oraz zawartość w nim cząsteczek glebowych ma istotny wpływ na kształtowanie się rozkładu wielkości cząsteczek erodowanych. W początkowej fazie powstania spływu dominującą rolę odgrywają drobne cząsteczki ilaste, by w dalszej fazie przybliżyć się do składu cząstek gleby naturalnej. Według Mazurka i Moshera (1969) spływowi ulegają cząsteczki gleby gęstości od $1,7\text{--}2,7\text{ g/cm}^3$ i średnicy mniejszej niż 2 mm. Jednakże Wischmeier i Smitth w równaniu USLE uwzględniają także cząsteczki drobnego piasku.

Rozpatrywanie rozkładu wielkości cząsteczek pierwotnych i agregatów oraz ich budowa mają istotne znaczenie przy rozpatrywaniu zagadnień powstawania spływów powierzchniowych w kontekście ich zagrożeń ekologicznych. Zwią-

zane jest to w głównej mierze z pomiarem wielkości strat składników mineralnych oraz środków chemicznych, stosowanych przy uprawach rolniczych. Jest to o tyle istotne zagadnienie, gdyż większość tych składników jest absorbowana przez cząsteczki ilaste oraz materię organiczną gleby, będących główną materią spływu powierzchniowego. Zawartość składników mineralnych w spływie powierzchniowym wykorzystywana jest do określania stopnia nasilenia erozji wodnej w glebie.

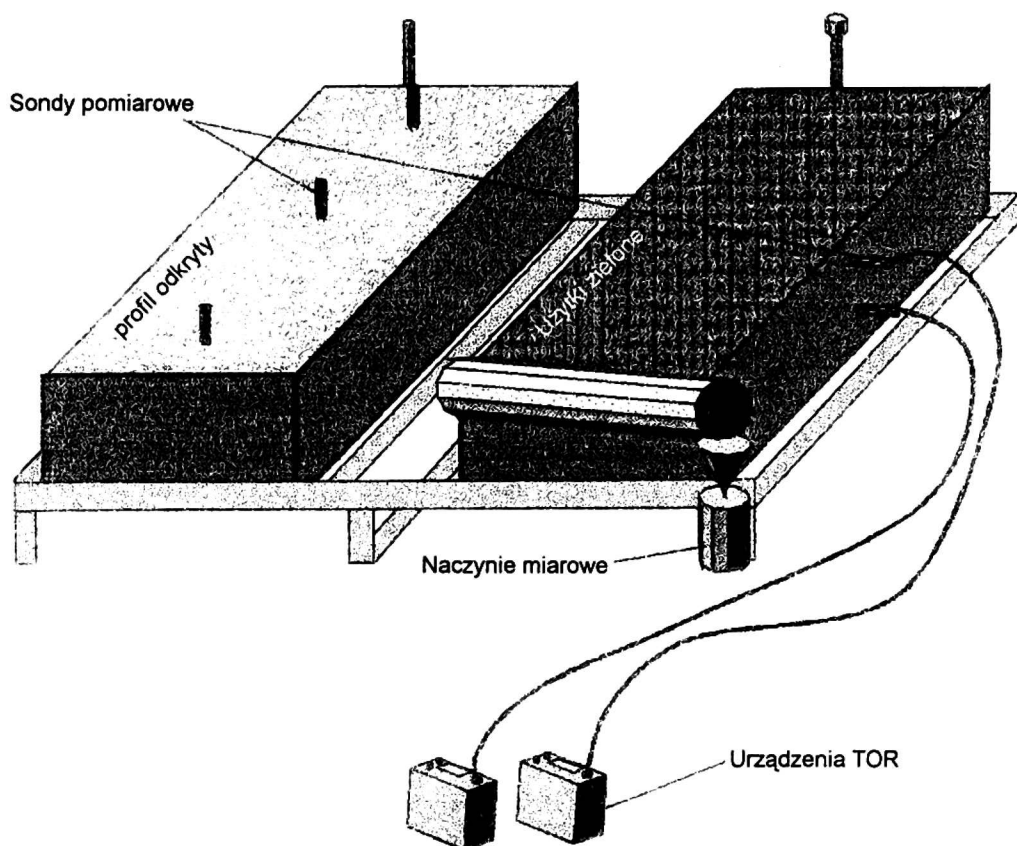
Cel i metodyka badań

Celem badań było określenie zależności kształtowania się spływu powierzchniowego od pokrycia gleby, spadku oraz intensywności opadu. Badania wykonano na modelach gruntowych (rys.1) o wymiarach (1,0 m \times 0,4 m \times 0,3 m).

Model został wypełniony glebą pobraną w zlewni rzeki Burzanki. Podstawową charakterystykę gleby przedstawiono w tabeli 1 i rysunku 2.

Zakres pracy obejmował:

- glebę zadarnioną i glebę bez pokrycia;
- trzy typy spadków; grunty orne 2,5%, 9%, 15% i użytków zielonych 9%, 15%, 25%; dobór spadków przyjęto na podstawie analizy map topograficznych zlewni rzeki Burzanki;
- trzy różne deszcze o intensywności 27 mm/h, 43 mm/h, 54 mm/h; intensywność opadu określono na podstawie obserwacji opadów występujących w rejonie poboru prób 1970–1995 (wg stacji meteorologicznej w Elblągu).



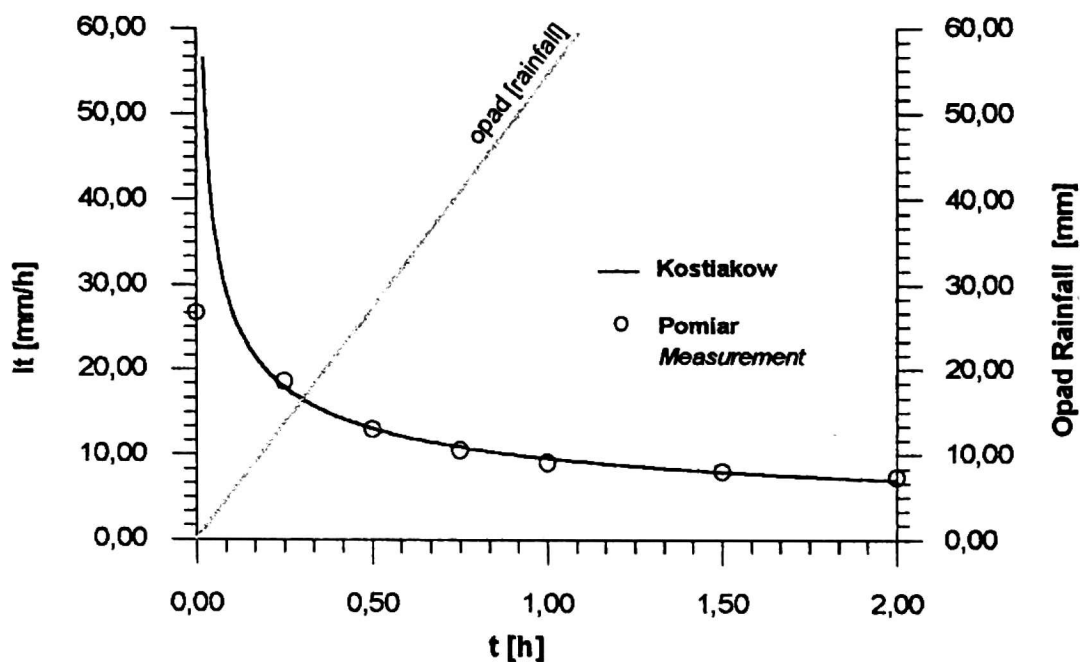
Rys. 1. Schemat modelu gruntowego do badań spływu powierzchniowego
 Fig. 1. Scheme of soil model for runoff surface investigation

TABELA 1. Właściwości badanej gleby
 TABLE 1. Properties of soil

Typ gleby Soil type	Skład granulometryczny Properties size [%]			Część organiczna Organic matter	Współczynnik filtracji Infiltr. coeff. [cm/dobę]
	[0,1–2,0 mm]	[0,1–0,02mm]	[> 0,02 mm]		
Piasek gliniasty mocny [Pgm]	74,5	12,0	12	1,5	263,3

Przed rozpoczęciem każdej serii badań określono charakterystykę symulowanych deszczy, tj. wielkość, średnią intensywność i stopień pokrycia (w czasie) modelu. Pomiar wstępny wykonano w trzech powtórzeniach. Jako symulatora deszczu użyto zraszaczy sektorowych o zmiennej wydajności z regulatorem ciśnienia typu 533-PC. Ich charakterystykę przedstawiono w tabeli 2. Badania pro-

wadzono przy wilgotności początkowej gleby od 6% do 10%. Czas pomiaru wynosił 60 min. Pomiar wilgotności gleby w trakcie eksperymentu wykonano przy użyciu urządzenia TDR opracowanego przez Malickiego i Skieruchę w Instytucie Agrofizyki PAN (Malicki 1993) Sondy pomiarowe umieszczono na głębokości 5 i 25 cm. Badania przeprowadzono dla trzech wariantów (tab. 3):



Rys. 2. Relacja między wielkością opadu a prędkością wsiąkania
 Fig. 2. Relationship between rainfall and infiltration velocity

TABELA 2. Parametry zraszacza
 TABLE 2. Parameter of sprinklers

Średnica dyszy Nozzle diameter [mm]	Ciśnienie Pressure [bar]	Wydatek Flow rate [m ³ /h]	Promień zasięgu Radius diameter [m]
3,4	2,0–4,0	0,64–0,92	26,0–28,0
4,4	2,0–4,0	0,96–1,36	27,0–30,0
4,9	2,0–4,0	1,32–1,85	28,0–32,0

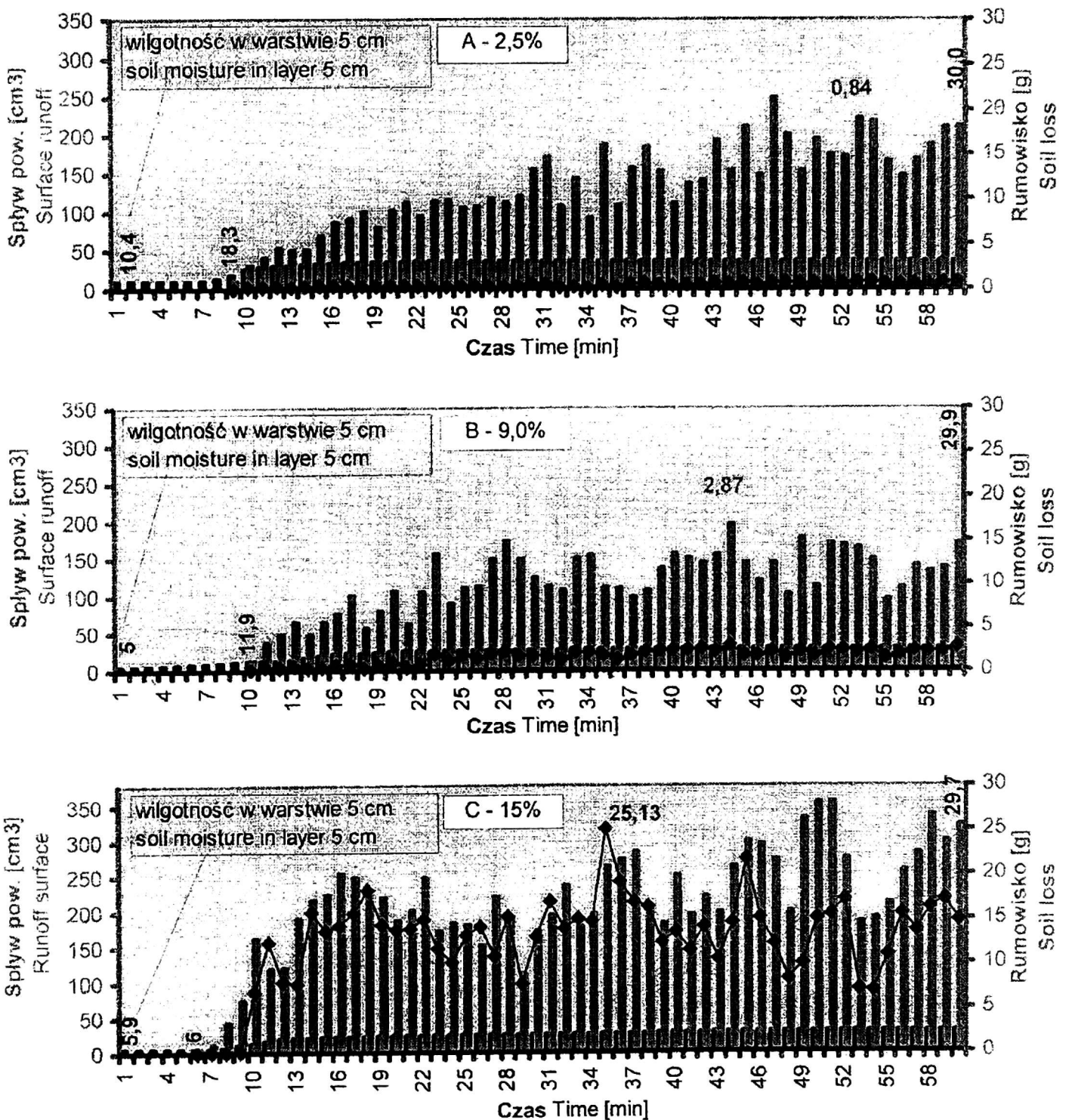
TABELA 3. Zakres badań modelowych
 TABLE 3. Type of model study

Opad Rain [27 mm/h]		Opad Rain [43 mm/h]		Opad Rain [54 mm/h]	
Gleba bez pokrycia Bare soil	Gleba zadarniona Grass	Gleba bez pokrycia Bare soil	Gleba zadarniona Grass	Gleba bez pokrycia Bare soil	Gleba zadarniona Grass
2,5	9,0	2,5	9,0	2,5	9,0
9,0	15,0	9,0	15,0	9,0	15,0
15,0	25,0	15,0	25,0	15,0	25,0

Wyniki badań

Ze względu na obszerność materiału badawczego przedstawiono wyniki dla największego opadu i przy różnych spad-

kach. Na rysunku 3 przedstawiono dynamikę spływu powierzchniowego oraz maksymalną zawartość rumowiska w odpływie. W przypadku badań na modelu z darnią spływ powierzchniowy nie

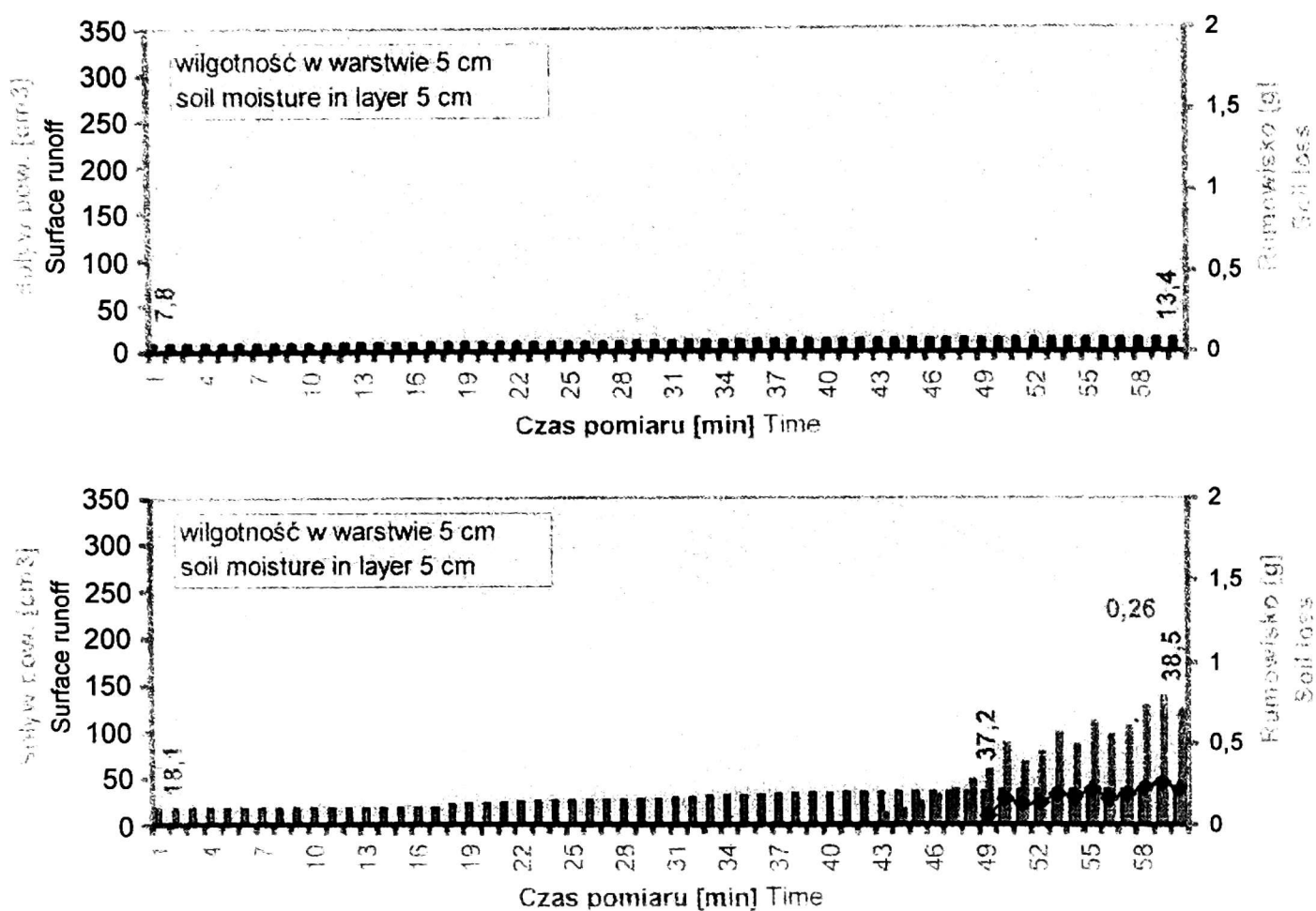


Rys. 3. Dynamika splywu powierzchniowego dla gleby bez pokrycia przy stałym opadzie i różnych spadkach (2,5%, 9,0%, 15,0%)

Fig. 3. Dynamics of runoff surface for the bare soil with rain constant rain intensity and different slope (2.5%, 9.0%, 15.0%)

wystąpił w żadnym z pomiarów, w których wilgotność początkowa wierzchniej warstwy była niższa od 14% (bez względu na spadek). Dlatego też przeprowa-

dzono dwukrotne badania na tym samym modelu o różnej wilgotności początkowej. Otrzymane wyniki przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Dynamika spływu powierzchniowego na glebie pokrytej darnią (spadek 25% i intensywności opadu 55 mm/h)

Fig. 4. Dynamics of runoff surface for the soil covering by grass slope (25% and rain intensity 55 mm/h)

Analiza wyników

Otrzymane wyniki pomiarów gleby bez pokrycia porównano z wynikami obliczeń przeprowadzonymi wg równania USLE (tab. 4). Wyniki wskazują na pewną zgodność dla opadów o mniejszej intensywności. Inaczej kształtuje się sytuacja dla deszczy o maksymalnej intensywności, dla których pomierzone wartości są znacznie wyższe od obliczonych. Przyczyny rozbieżności można doszukiwać się w uogólnieniach dotyczących parametrów równania USLE. Na rysunku 5 przedstawiono zależność wielkości spływu powierzchniowego od wilgotności

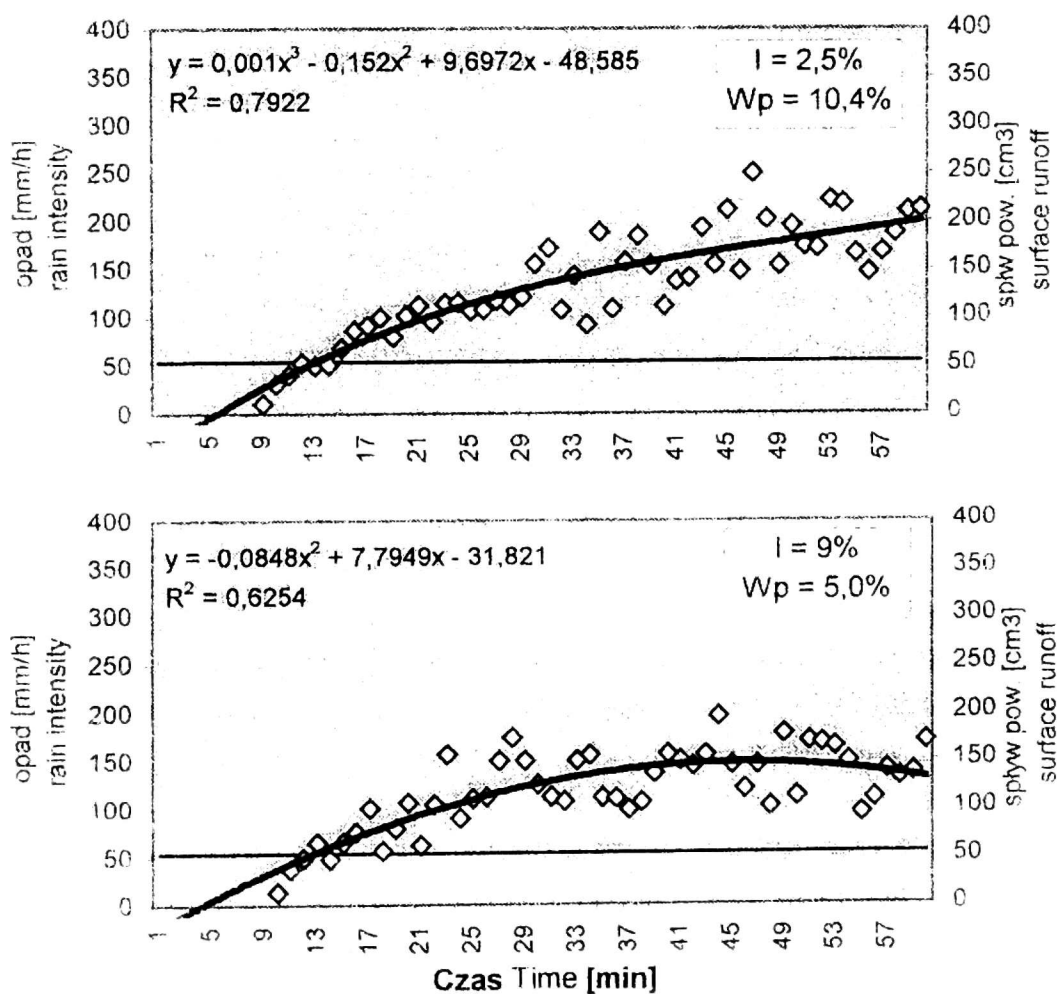
początkowej, przy założeniu różnych spadków i stałego opadu. Obie zależności wyrównano metodą wielomianu stopnia trzeciego, dla którego określono współczynnik korelacji.

Inaczej kształtuje się przebieg krzywej stężenia rumowiska w odpływie (rys. 6), z której wynika, iż jego koncentracja wzrasta proporcjonalnie do intensywności opadu oraz wielkości spadku.

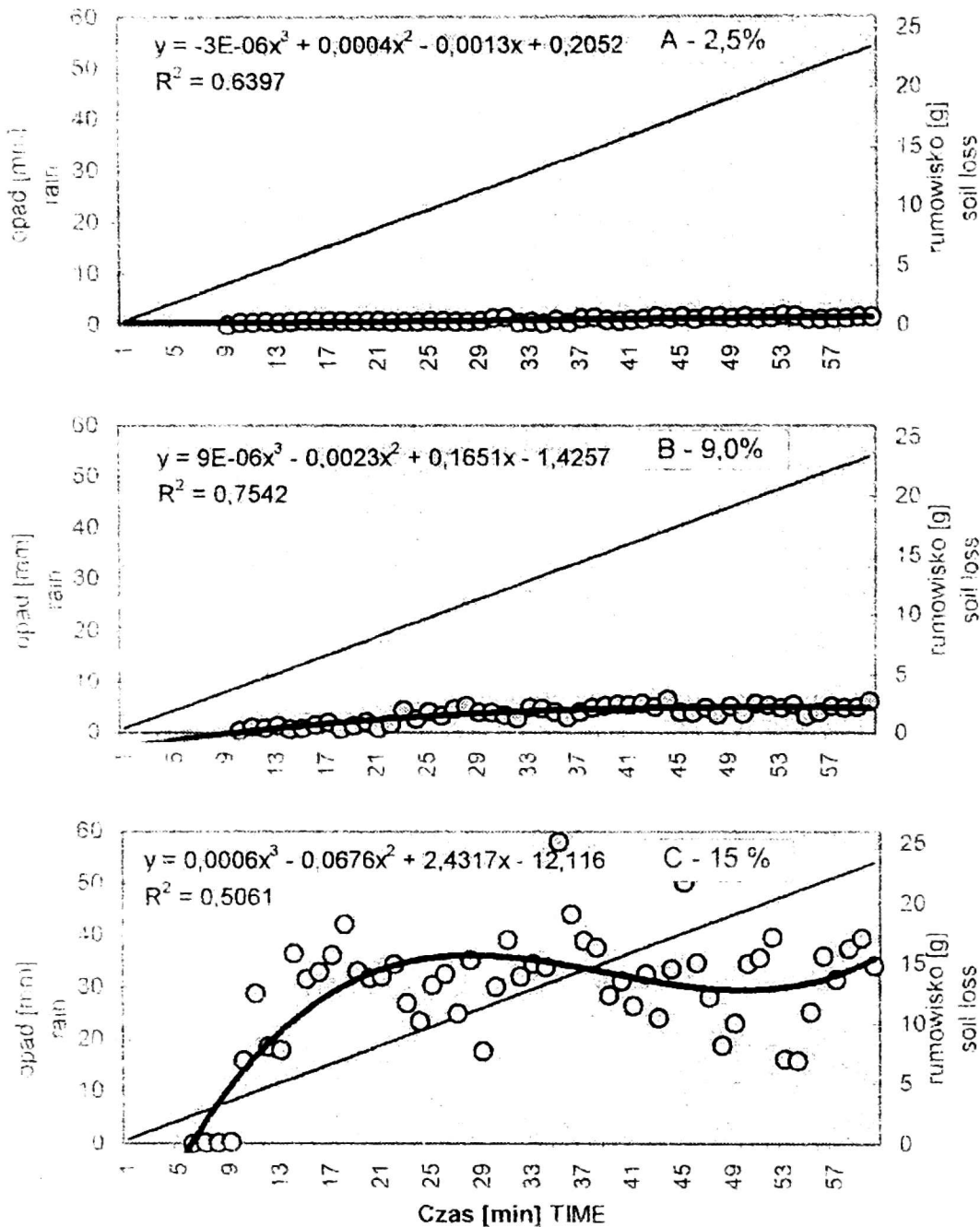
Można stwierdzić, iż moment rozpoczęcia spływu powierzchniowego oraz jego dynamika zależą od wielkości opadu i wilgotności początkowej przy mniejszym udziale spadku (rys. 5). Koncentracja rumowiska w odpływie jest z kolei

TABELA 4. Wydatek rumowiska [t /ha] dla różnych wariantów pomiarowych
 TABLE 4. Soil loss in [t /ha] for different variants of measurement

Założone spadki Slope [%]	Wydatek rumowiska Soil loss [t/ha]	
	Pomierzone (measurement)	Obliczone (calculation)
OPAD – 27 mm/h (rain intensity)		
2,5	0,211	0,222
9,0	0,632	0,660
15,0	2,548	1,457
OPAD – 43 mm/h (rain intensity)		
2,5	0,421	0,604
9,0	0,916	1,795
15,0	5,924	4,622
OPAD – 54 mm/h (rain intensity)		
2,5	0,701	1,18
9,0	2,166	2,925
15,0	17,554	7,858



Rys. 5. Zależność sptywu powierzchniowego od intensywności opadu
 Fig. 5. Relationship between surface runoff and rain intensity



Rys. 6. Zależność ilości odprowadzanego rumowiska od wielkości opadu
 Fig. 6. Relationship between soil loss value and rainfall

uzależniona od wielkości i intensywności opadu oraz wielkości spadku, w mniejszym przypadku zaś od wilgotności profilu glebowego (rys. 6).

Również z analizy bilansu badań modelowych wynika, iż relacja pomiędzy odpływem pionowym i poziomym zmienia się proporcjonalnie do wielkości spadku (przy stałym opadzie) oraz zależy od wilgotności początkowej, która wpły-

wa w sposób istotny na proces kształtowania spływu powierzchniowego.

Wnioski

- Badania wykazały, że istnieje zależność między natężeniem spływu powierzchniowego a użytkowaniem terenu, spadkiem i wilgotnością początkową górnej warstwy gleby.

- Udział rumowiska w odpływie jest w większym stopniu uzależniony od parametrów opadu (wielkość i intensywność) i spadku zbocza, niż od wilgotności gleby.
- Na glebach bez pokrycia otrzymano straty glebowe w przedziale od 0,211 do 17,55 t/ha w zależności od wariantu doświadczenia. Natomiast straty gleby z zadarnionej powierzchni wystąpiły jedynie przy największej badanej intensywności opadu oraz 25% spadku i wyniosły 0,053 t/ha.

Literatura

- GILLEY i in. 1992: *Darcy-Weisbach roughness coefficients for gravel and cabbie surfaces*. Journal of irrigation and Drainage Engineering, s. 104–112 USA.
- LUK S.H., HAMILTON 1986: *Experimental effects of antecedentmoisture and soil strenghton raindrop erosion of two luvisols Ontario*. Geoderma 37, 29–43.
- MEYER i in. 1976: Soil erosion concepts and misconceptions. Sedimentation Conf., Denver 1976.

PTACH W. 1997: *Badania modelowe nawodnień w głębszych z wykorzystaniem miernika TDR*. Przegląd Naukowy z. 13, Warszawa, 117–128.

Summary

Model study of surface runoff. Presently very intensive of agricultural production more and more importance take the evoke negative process like water erosion. Incidentally of this process is degradation of environment and soil productivity. One of very important reason evoke of degradation is runoff surface which formation influend effective rainfall, soil erodibility factor, land slope, cropping factor, fertilizer level, soil moisture, etc. In this article take up trial determined dependence between runoff surface and soil moisture in model condition. Measured values can help to correct soil erodibility factor (K) in Universal Soil Loss Equation (USLE).

Author's address:

M. Brzozowski
Warsaw Agricultural University – SGGW
02–787 Warszawa ul. Nowoursynowska 161
Poland