

**WPLYW ALGORYTMU OKREŚLANIA DRÓG
SPŁYWU POWIERZCHNIOWEGO NA WYNIKI OCENY
ZAGROŻENIA GLEB EROZJĄ WODNĄ W SKALI
ZLEWNI Z ZASTOSOWANIEM MODELU RUSLE***

**THE INFLUENCE OF FLOW ROUTING ALGORITHM
ON THE RESULTS OF RUSLE-BASED
CATCHMENT-WIDE EROSION RISK ASSESSMENT**

Wojciech Drzewiecki, Sebastian Ziętara

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska

Słowa kluczowe: erozja wodna gleb, RUSLE, modelowanie spływu powierzchniowego, ocena wrażliwości

Keywords: water erosion, RUSLE, flow routing, sensitivity assessment

Wprowadzenie

Dla oceny zagrożenia gleb erozją wodną zaproponowano wiele zróżnicowanych metod – od prostych podejść wskaźnikowych po skomplikowane modele fizyczne. Do najbardziej znanych i najpowszechniej stosowanych należą niewątpliwie model RUSLE (*Revised Universal Soil Loss Equation*, Renard i in., 1997) wraz ze swoim poprzednikiem USLE (*Universal Soil Loss Equation*, Wischmeier i Smith, 1978). Zostały one opracowane w celu szacowania strat gleby w skali pojedynczego pola, jednak po pewnych modyfikacjach stosowane są również w skali zlewni lub regionu (Drzewiecki i in., 2013).

Model (R)USLE jest empirycznym równaniem matematycznym, w którym średni roczny ubytek gleby szacowany jest na podstawie równania:

$$EA = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (1)$$

gdzie:

E_A – masa gleby erodowanej z jednostki powierzchni w określonym czasie [$Mg \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$];

R – czynnik erozyjności opadu [$MJ \cdot ha^{-1} \cdot mm \cdot h^{-1} \cdot rok^{-1}$];

K – czynnik podatności gleby na erozję wodną [$Mg \cdot h \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$];

* Praca zrealizowana w ramach badań statutowych AGH 11.11.150.949

LS – czynnik topograficzny – iloczyn czynników długości (L) i nachylenia stoku (S) (bezwymiarowy);

C – czynnik pokrycia i zarządzania gruntami (bezwymiarowy);

P – czynnik zabiegów przeciwoerozyjnych (bezwymiarowy).

Pomimo powszechności stosowania, modele USLE i RUSLE w niewielkim stopniu przebadano w aspekcie ich wrażliwości i propagacji niepewności (Beven i Brazier, 2011). Dotyczy to zwłaszcza ich implementacji dla większych obszarów, realizowanych w środowisku systemów informacji geograficznej (GIS). Badania wrażliwości modelu USLE w skali pola prowadzili np. Risse i in. (1993), wykazując iż największy wpływ na otrzymywane wyniki wywierały czynnik topografii (LS) oraz czynnik pokrycia i zarządzania gruntami (C). Tetzlaff i in. (2013) analizując wpływ propagacji niepewności danych wejściowych na wyniki modelowania przeprowadzonego w środowisku GIS dla obszaru całej Hesji (Niemcy) stwierdzili, iż niepewność danych wejściowych wywiera największy wpływ na określenie wartości czynnika (LS), a w dalszej kolejności czynnika podatności erozyjnej gleb (K). Również Biesemans i in. (2000) stwierdzili w swoich badaniach, iż na niepewność końcowego rezultatu modelowania przy użyciu modelu RUSLE w sposób decydujący wpływa niepewność określenia czynnika topograficznego. Należy podkreślić, iż w przypadku niektórych zastosowań, zmiany wartości wskaźników wchodzących w skład modelu, ograniczone nawet do stosunkowo niewielkich fragmentów modelowanego obszaru, mogą w znaczący sposób wpływać na podejmowane w oparciu o wyniki modelowania decyzje (Drzewiecki i in., 2013).

Niepewność określenia wartości czynnika topograficznego nie jest wyłącznie rezultatem propagacji niepewności danych wejściowych, czyli niepewności określenia wysokości na numerycznym modelu terenu (NMT). W przypadku analiz prowadzonych przy użyciu GIS uzyskiwane wartości czynnika topograficznego zależą również od algorytmu zastosowanego na etapie określania dróg spływu powierzchniowego (Mendicino, 1999; Drzewiecki i Mularz, 2001). Drzewiecki i Mularz (2008) oraz Drzewiecki i in. (2008) stwierdzili, że algorytmy zastosowane na etapie generowania ścieżek spływu oraz sposób obliczania wartości czynnika topografii wpływają na możliwość skalibrowania modelu opartego na równaniu RUSLE w oparciu o obserwowane w ciekach ładunki zawiesiny. Wpływ wzorów przyjętych do obliczania wartości czynnika topograficznego był w tym przypadku dominujący, jednak wpływ algorytmów generowania spływu również był zauważalny.

Celem badań, prezentowanych w niniejszym artykule, było określenie wpływu wyboru algorytmu generowania dróg spływu powierzchniowego na wyniki oszacowania zagrożenia gleb erozją aktualną, przeprowadzonego w skali zlewni przy użyciu modelu RUSLE. Zagadnienie to zostało zbadane zarówno w odniesieniu do wielkości, jak i rozkładu przestrzennego szacowanych strat gleby.

Metodyka

Obszar badań

Badania przeprowadzono na obszarze położonych na północ od Krakowa zlewni Prądnika i Dłubni. Obszar ten w części zachodniej stanowi fragment Wyżyny Olkuskiej należącej do Wyżyny Krakowsko-Częstochowskiej, w części wschodniej jest fragmentem Wyżyny Miechowskiej, część południowo-wschodnia natomiast należy do Płaskowyżu Proszowickiego

– obie te jednostki wchodzą w skład Wyżyny Małopolskiej (Kondracki, 1988). Zarówno ze względu na występującą w tym rejonie wykształconą na lessach pokrywę glebową, jak i ukształtowanie powierzchni terenu, teren ten uważany jest za potencjalnie zagrożony występowaniem erozji wodnej gleb.

Obszar zlewni Prądnika i Dłubni obejmuje tereny o charakterze wiejskim, podmiejskim i typowo miejskim (rys. 1). W części południowej znajdują się silnie zurbanizowane tereny miasta Krakowa. W środkowej części obszaru badań znajduje się miasto Skała, największa poza Krakowem miejscowość na analizowanym terenie. Na północ od Skały mamy do czynienia z terenami typowo wiejskimi. Na obszarze pomiędzy Krakowem a Skałą krajobraz stopniowo ulegał przekształceniom, nabierając obecnie charakteru typowo podmiejskiego.

Dane

Modelowanie erozji wodnej gleb w środowisku systemów informacji geograficznej wymaga zgromadzenia danych przestrzennych, umożliwiających realizację wybranego modelu. W prezentowanych badaniach wykorzystano następujące dane źródłowe:

- Mapę czynnika erozyjności opadu (Drzewiecki i in., 2013);
- Mapę gatunków gleb opracowaną na podstawie pozyskanej z IUNG cyfrowej wersji mapy glebowo-rolniczej w skali 1:25 000 (Kulas, 2011);
- Mapę użytkowania terenu zlewni rzeki Prądnik i Dłubnia o szczegółowości tematycznej odpowiadającej czwartemu poziomowi szczegółowości programu CORINE Land Cover, opracowaną na drodze fotointerpretacji ortofotomap lotniczych i satelitarnych (Drzewiecki, 2010);
- Numeryczny model terenu (NMT) opracowany poprzez rasteryzację modelu TIN, pochodzącego z Państwowego Zasobu Geodezyjno-Kartograficznego (Drzewiecki i in., 2013). Wykorzystano najlepszy dostępny dla całości obszaru badań model wysokościowy (dokładność wysokościowa w granicach 20-30 cm).

Wszystkie dane przetworzono, przekształcając je do postaci map rastrowych o rozdzielczości 30×30 m (1184×1241 komórek).

Sposób obliczania składowych modelu USLE

W przeprowadzonych obliczeniach wykorzystano rozkład przestrzenny czynnika erozyjności opadu opracowany dla obszaru Małopolski w oparciu o dane z lat 1981-2009 (Drzewiecki i in., 2013). Wartości czynnika erozyjności opadu oszacowane zostały w tym przypadku dla punktów pomiarowych, na podstawie miesięcznych sum opadów z lat 1981-2009, według wzoru zaproponowanego dla warunków polskich przez Licznara (2004).

Rozkład przestrzenny wartości czynnika podatności gleb na erozję wodną uzyskano przypisując poszczególnym gatunkom gleb wartości czynnika zaproponowane dla gleb polskich, w oparciu o badania przeprowadzone w IUNG w Puławach (Wawer i in., 2005; Stuczyński i in., 2010). W przypadku lessów i rędzin zastosowano wartości zaproponowane przez Drzewieckiego i in. (2013).

Na potrzeby określenia wartości czynnika pokrycia i zarządzania gruntami, wejściową mapę użytkowania terenu zreklasyfikowano zgodnie z tabelą 1. Wartość czynnika zabiegów przeciwoerozyjnych przyjęto jako równą 1, co jest tożsame z założeniem, że zabiegi takie nie są stosowane.

Tabela 1. Wartości czynnika pokrycia i zarządzania gruntami (C) przyjęte dla poszczególnych klas użytkowania

Wartość C	Klasa użytkowania
0	zabudowa zwarta wielkomiejska, zabudowa zwarta miejska, zabudowa luźna wielorodzinna typu blokowego, zabudowa luźna wielorodzinna typu miejskiego, tereny przemysłowe, tereny urządzeń przemysłowych i usługowych rolnictwa, tereny specjalistycznej infrastruktury technicznej, tereny handlowe, tereny użyteczności publicznej, tereny specjalne (np. wojskowe), miejsca kultu, bazy transportowe, drogi i tereny związane z komunikacją drogową, koleje i tereny kolejowe, złożona sieć komunikacyjna i tereny towarzyszące, zespoły garaży, lotniska o sztucznej nawierzchni dróg startowych, wyrobiska surowców okruszowych i ilastych, kamieniołomy, wyrobiska rekultywowane i zarastające roślinnością, zwałowiska przemysłowe odpadów stałych, zwałowiska odpadów płynnych – osadniki, wysypiska komunalne, zwałowiska i wysypiska rekultywowane i zarastające, zespoły basenów, uprawy szklarniowe, odsonięte skały, rzeki, kanały, naturalne zbiorniki wodne – jeziora, zbiorniki retencyjne – zaporowe, stawy rybne, wyrobiska i zapadliska wypełnione wodą
0,001	cmentarze, lasy
0,002	zalesienia i samosiewy, bagna śródlądowe
0,005	zabudowa luźna na jednorodzinna typu miejskiego, parki miejskie i wiejskie, ogrody dydaktyczne, wrzosowiska i zakrzaczenia, szkółki leśne, wylesienia i zręby
0,01	zabudowa jednorodzinna typu wiejskiego, zabudowa letniskowa, tereny sportowe, łąki z udziałem drzew i krzewów, murawy i pastwiska naturalne
0,02	zieleńce, skwery, trawniki, tereny nie użytkowane gospodarczo, tereny wypoczynkowo-kempingowe, łąki bez udziału drzew i krzewów
0,05	ogrody działkowe, sady, plantacje krzewów owocowych, odłogi, tereny rolnicze z przewagą łąk i pastwisk, tereny rolnicze z przewagą zadrzewień i zakrzewień, tereny rolnicze z przewagą odłogów, roślinność rozproszona na podłożu piaszczystym, roślinność rozproszona na podłożu skalistym
0,1	złożone systemy upraw i działek z działkami małymi, tereny rolnicze ze znacznym udziałem łąk, zadrzewień i zakrzewień, tereny rolnicze ze znacznym udziałem odłogów
0,15	złożone systemy upraw i działek z działkami dużymi i średnimi
0,2	grunty orne
0,5	place budów
1	piaski poza strefą brzegową morza

Wartość czynnika topograficznego dla poszczególnych komórek rastra obliczono stosując podejście zaproponowane przez Desmeta i Goversa (1996b). W metodzie tej długość stoku zastępowana jest wielkością jednostkowej powierzchni zasilania, co pozwala na lepsze modelowanie wpływu ukształtowania terenu na zachowanie się wody spływającej po jego powierzchni. Jeżeli elementy zbocza reprezentowane są poprzez komórki rastra, to jednostkową powierzchnią obszaru zasilania dla danej komórki otrzymamy dzieląc pole powierzchni jej obszaru zasilania przez odległość, jaką przepływająca woda przebywa przemieszczając się wewnątrz tej komórki (odległość ta jest tożsama z rozmiarem komórki tylko jeżeli spływ następuje dokładnie w kierunku północ-południe lub wschód-zachód).

Algorytmy obliczania powierzchni zasilania

W ramach przeprowadzonych badań przetestowano wpływ siedmiu algorytmów określania dróg spływu powierzchniowego.

Deterministic 8 (D8) (O'Callaghan i Mark, 1984)

Jest to jeden z najprostszych algorytmów służących do wyznaczania kierunku spływu wody na numerycznym modelu terenu. Kierunek spływu jest wybierany w wyniku wyliczenia różnicy wysokości między rozpatrywaną komórką oraz tymi, którymi jest otoczona. Spływ kieruje się do komórki, dla której otrzymano największą wartość gradientu. Zasadniczą wadą algorytmu jest jego tendencja do generowania wielu równoległych ścieżek spływu na zboczach o jednostajnym nachyleniu.

Random eight-neighbor (Rho8) (Fairfield i Leymarie, 1991)

Rho8 stanowi modyfikację algorytmu D8 polegającą na wprowadzeniu funkcji stochastycznej na etapie określania gradientu. Rozwiązanie to pozwala na przezwycięzenie problemu równoległych ścieżek spływu. Element stochastyczny powoduje jednak, iż każda realizacja algorytmu daje dla tych samych danych wejściowych nieco odmienny rozkład przestrzenny kierunków spływu, co stanowi jego poważną wadę. Dodatkowo w pewnych obszarach wprowadzając on może zafałszowanie (Jones, 2002). Podobnie jak w przypadku algorytmu D8 nie ma również możliwości modelowania dyspersji strumienia spływu.

Kinematic Routing Algorithm (KRA) (Lea, 1992)

Spływ kierowany jest w dół stoku, wzdłuż ścieżki składającej się z prostoliniowych segmentów o kierunku zgodnym z kierunkiem ekspozycji poszczególnych komórek rastra. Każda komórka jest reprezentowana jako płaszczyzna, która została wpasowana w punkty stanowiące narożniki komórki. Ich wysokości są szacowane poprzez interpolację wysokości środków sąsiednich komórek w siatce. Zaletą tej procedury jest określanie kierunków spływu jako kątów od 0 do 2π . Podobnie jak w przypadku poprzednich algorytmów nie ma jednak możliwości modelowania dyspersji.

Ponieważ do określenia płaszczyzny są potrzebne tylko trzy punkty, Tarboton (1997) zauważa, że założenie płaszczyzny dopasowanej lokalnie do każdej komórki rastra wymaga przybliżenia. Najlepiej dopasowana płaszczyzna nie może na ogół przejść przez cztery punkty narożnikowe, co prowadzi do nieciągłej reprezentacji powierzchni na krawędziach komórek. Płaszczyzny dopasowane lokalnie do niektórych kombinacji punktów narożnikowych mogą prowadzić do niespójności lub przeciwnych do intuicyjnych kierunków przepływu, które są problemem zarówno tej metody, jak i opisanego w dalszej części algorytmu DEMON.

Deterministic Infinity (D ∞) (Tarboton, 1997)

Spływ z jednej komórki dzielony jest na dwie z ośmiu ją otaczających. Wybór komórek odbywa się poprzez formowanie ośmiu trójkątów, które tworzy się przez połączenie środka rozpatrywanej komórki ze środkami komórek ją otaczających. Po utworzeniu trójkątów wybrane zostają dwie komórki z największym gradientem spadku. Spływ rozdzielany jest według wzorów:

$$P_1 = \frac{a_1}{a_1 + a_2} \quad (2)$$

$$P_2 = \frac{a_2}{a_1 + a_2} \quad (3)$$

gdzie:

P_1, P_2 – udział komórki w podziale spływu;

a_1, a_2 – kąt pomiędzy odcinkiem łączącym środki komórek i wyznaczonym kierunkiem spływu.

Multiple Flow Direction (MFD) (Quinn i in., 1991)

Algorytmy FD8 oraz FRho8 często opisywane są pod wspólną nazwą Multiple Flow Direction (MFD) i są modyfikacjami algorytmów D8 oraz Rho8. W metodzie tej w przeciwieństwie do poprzednich, woda może być kierowana do wielu komórek. Część spływu powierzchniowego przekazywana komórkom znajdującym się niżej jest obliczana z wzoru:

$$P_i = \frac{\max(0, s_i^a)}{\sum_{i=1}^8 (\max(0, s_i^a))} \quad (4)$$

gdzie:

s_i – wielkość nachylenia pomiędzy węzłami centralnej komórki a sąsiadującymi komórkami;

a – stała dodatnia (wartość zalecana $a=1,1$).

Wadą tego algorytmu jest duże rozproszenie spływu powierzchniowego.

Triangular Multiple Flow Direction (MD ∞) (Seibert i McGlynn, 2007)

Algorytm ten łączy w sobie zalety algorytmów MFD i D ∞ . Podobnie jak w podejściu Tarbotona (1997), do obliczenia lokalnych kierunków nachylenia oraz gradientów wokół badanej komórki, wykorzystuje się osiem trójkątnych powierzchni, tworzonych przez połączenie środka rozpatrywanej komórki ze środkami dwóch sąsiednich. Dla każdej z utworzonych w ten sposób płaszczyzn oblicza się kierunek przepływu przy największym gradiencie. Po określeniu kierunków spływu dla badanej komórki, następuje rozdzielenie na niej jej obszaru zasilania. Powierzchnia obszaru zasilania komórki (czyli obszaru, z którego spływa do niej woda po powierzchni terenu) dzielona jest pomiędzy położone niżej komórki, według procedury zaproponowanej przez Quinna (1991) (wzór 4).

W wielu przypadkach algorytmy MD ∞ i D ∞ dają takie same wyniki (na przykład na płaskich lub zbieżnych stokach), ale rezultaty różnią się, gdy występuje więcej niż jeden kierunek najwyższego lokalnego spadku z badanej komórki (na przykład na rozbieżnych stokach lub wzdłuż grzbietów).

DEMON (digital elevation model networks) (Costa-Cabral i Burges, 1994)

W przypadku tego algorytmu spływ jest inicjowany oddzielnie w każdej komórce rastra, a następnie kierowany jest wzdłuż spadku terenu do zagłębienia terenu lub do krawędzi NMT. Kierunek spływu określany jest według koncepcji przedstawionej przez Lea (1992), jednak modelowanie ma charakter dwuwymiarowy. Spływ kierowany jest w całości do pojedynczej położonej niżej komórki tylko wtedy, jeśli określony kierunek spływu jest wielo-

krotnością 90 stopni. W innym przypadku następuje podział strumienia spływu pomiędzy dwie komórki oraz określenie proporcji tego podziału. W efekcie działania algorytmu dla każdej komórki rastra obliczana jest wartość informująca, jaka część spływu pochodzącego z komórki startowej do niej dociera. Obliczenia takie powtarzane są dla ścieżek spływu inicjowanych po kolei we wszystkich komórkach rastra. Wielkość akumulacji spływu dla pojedynczej komórki jest sumą wartości wykonanych dla wszystkich realizacji algorytmu. Ze względu na wyszukane kodowanie algorytm ten jest rzadko realizowany w oprogramowaniu GIS.

Przebieg analizy

Pierwszym etapem przeprowadzonych badań było wygenerowanie, w oparciu o NMT, map spadków i powierzchni obszarów zasilania, przy użyciu każdego z wybranych do analizy algorytmów generowania spływu powierzchniowego. Na ich podstawie wygenerowano mapy czynnika topografii (LS). Obliczenia w tym zakresie zrealizowano wykorzystując oprogramowanie SAGA GIS.

Uzyskane mapy zaimportowano do programu Idrisi, gdzie przeprowadzono dalsze analizy. Każdą z map czynnika topograficznego przemnożono przez mapy pozostałych czynników modelu RUSLE, uzyskując oszacowanie wielkości strat gleby w wyniku erozji aktualnej. Wynikowe mapy przekształcono na mapy klas zagrożenia erozyjnego według kryteriów przyjętych w pracy Drzewieckiego i in. (2013).

Wyniki

W tabeli 2 przedstawiono wartości współczynników korelacji (R^2) pomiędzy wartościami czynnika topograficznego (LS) określonymi z wykorzystaniem poszczególnych algorytmów. Analiza uzyskanych wyników pokazuje, iż największym podobieństwem cechują się mapy czynnika LS utworzone przy użyciu algorytmów D_∞ , MD oraz MFD_∞ . Znaczne podobieństwo wartości czynnika topografii wykazują również mapy powstałe z wykorzystaniem algorytmów KRA i DEMON. Wartość R^2 powyżej 0,9 uzyskano również dla wyników otrzymanych w oparciu o algorytmy D8 i MD_∞ . Najniższy poziom korelacji wartości czynnika topograficznego otrzymano dla map opracowanych z wykorzystaniem algorytmów D8 i DEMON lub KRA oraz Rho8 i DEMON lub KRA.

Analiza procentowego udziału klas zagrożenia erozyjnego uzyskanych z wykorzystaniem poszczególnych map czynnika topograficznego (tab. 3) pokazuje, iż najwyższe zagrożenie

Tabela 2. Wartości współczynników korelacji (R^2) pomiędzy wartościami czynnika topografii wyznaczonymi z wykorzystaniem poszczególnych algorytmów

	D_∞	DEMON	KRA	MFD	MD_∞	Rho8
D8	0,86	0,77	0,79	0,86	0,91	0,87
D_∞		0,82	0,85	0,97	0,96	0,83
DEMON			0,95	0,81	0,83	0,75
KRA				0,84	0,85	0,77
MFD					0,96	0,83
MD_∞						0,87

erozyjne na badanym obszarze przewidywane było przy wykorzystaniu algorytmów Rho8, DEMON oraz D8. W pozostałych przypadkach było ono wyraźnie mniejsze. Podkreślić należy, iż w każdym z analizowanych przypadków prognozowany poziom zagrożenia erozyjnego uznac należy za niski.

Porównując wpływ stosowanych algorytmów na wyniki oszacowania erozji aktualnej, poszczególne mapy zagrożenia erozyjnego zdecydowano się poddać reklasyfikacji, tak aby dla każdego wariantu zidentyfikować obszary zagrożone w stopniu co najmniej średnim lub wyższym (rys. 2). Taki poziom zagrożenia oznacza, iż w terenach tych nastąpić może trwała degradacja profilu glebowego (Józefaciuk i Józefaciuk, 1996). W celu porównania zgodności ocen przeprowadzonych z wykorzystaniem poszczególnych algorytmów, dla uzyskanych map obszarów zagrożonych, obliczono wartości współczynnika Kappa (Cohen, 1960). Najbardziej podobne do siebie oceny uzyskano stosując algorytmy: D_{∞} , MD_{∞} oraz MFD (wsp. Kappa > 0,8). Najniższa zgodność występuje dla par: MFD–DEMON, MFD–Rho8, oraz KRA–Rho8 (wsp. Kappa < 0,6).

Tabela 3. Zagrożenie erozją wodną powierzchniową na terenie zlewni rzek Dłubnia i Prądnik

Użyty algorytm	D8		D_{∞}		DEMON		Rho8	
	[ha]	[%]	[ha]	[%]	[ha]	[%]	[ha]	[%]
Zagrożenie erozyjne								
brak erozji	36141,26	76,06	36437,76	76,69	35172,77	74,02	35693,57	75,12
erozja słaba	10697,83	22,51	10529,62	22,16	11622,22	24,46	11068,74	23,30
erozja umiarkowana	593,03	1,25	493,07	1,04	626,06	1,32	655,81	1,38
erozja średnia	67,50	0,14	47,05	0,10	74,32	0,16	76,77	0,16
erozja silna	14,87	0,03	7,83	0,02	19,40	0,04	19,13	0,04
erozja bardzo silna	0,92	0,002	0,09	0,0002	0,65	0,001	1,40	0,003
Użyty algorytm	KRA		MFD		MD_{∞}			
Zagrożenie erozyjne								
brak erozji	37084,79	78,05	36392,45	76,59	36524,90	76,87		
erozja słaba	9953,78	20,95	10599,66	22,31	10438,29	21,97		
erozja umiarkowana	424,24	0,89	476,28	1,00	496,42	1,04		
erozja średnia	43,43	0,09	40,75	0,09	47,45	0,10		
erozja silna	8,82	0,02	6,26	0,01	8,21	0,02		
erozja bardzo silna	0,36	0,0008	0,02	0,00005	0,14	0,0003		

Dokładniejsza analiza map terenów zagrożonych erozją pozwoliła również na stwierdzenie, iż obszary zagrożenia prognozowane z wykorzystaniem algorytmu KRA prawie w całości (w 98,6 % w zlewni Prądnika i 97,6% w zlewni Dłubni) znalazły się również w prognozie powstałej z użyciem algorytmu DEMON. Jednakże w przypadku zastosowania algorytmu DEMON powierzchnia terenów zagrożonych erozją była prawie dwukrotnie większa.

Dyskusja wyników i wnioski

W przeprowadzonych badaniach porównano mapy czynnika topograficznego oraz mapy klas zagrożenia gleb aktualną erozją wodną wygenerowane z wykorzystaniem siedmiu algorytmów generowania spływu powierzchniowego (D8, Rho8, KRA, D_{∞} , MFD, MD_{∞} oraz DEMON). Celem badań było poszukiwanie odpowiedzi na pytanie czy dobór algorytmu użytego na etapie określania dróg spływu powierzchniowego wpływa na wyniki modelowania zagrożenia erozyjnego. Uzyskane wyniki pozwoliły na stwierdzenie, iż wpływ taki istnieje.

Analizując wartości czynnika topograficznego uzyskane w poszczególnych realizacjach stwierdzono ich podobieństwo dla algorytmów D_{∞} , MD_{∞} oraz MFD. Zostało ono potwierdzone również w wynikach oceny zagrożenia erozyjnego poprzez bardzo wysokie wartości współczynnika Kappa, obliczone dla par map przedstawiających tereny o zagrożeniu co najmniej średnim. Wysokie podobieństwo uzyskanych rezultatów wynika niewątpliwie z podobnej zasady działania tych algorytmów.

W wysokim stopniu skorelowane były również wartości czynnika topograficznego uzyskane z wykorzystaniem algorytmów DEMON i KRA. W tym przypadku wytłumaczeniem jest zapewne fakt, iż w algorytmie DEMON do określenia kierunku spływu stosuje się podejście z algorytmu KRA. Jednak w przypadku tego pierwszego, w odróżnieniu od KRA i pozostałych algorytmów, przebieg drogi spływu modelowany jest w dwóch wymiarach. Szerokość ścieżki spływu pozostaje stała na terenach płaskich, zwiększa się w obszarach dywergencji i zmniejsza na obszarach konwergencji. W efekcie, w wyniku działania tego algorytmu uzyskiwano, dla takiego samego jak w przypadku KRA przebiegu ścieżki spływu, większe wartości jednostkowej powierzchni zasilania. Znalazło to swoje odzwierciedlenie w wynikach oceny zagrożenia erozyjnego. Obszary wskazane jako zagrożone przy zastosowaniu algorytmu KRA prawie w całości zostały wskazane również w przypadku zastosowania algorytmu DEMON. Jednak w tym drugim wypadku zagrożenie prognozowane było również dla dodatkowych fragmentów modelowanych zlewni.

Wyniki otrzymane przy użyciu algorytmów D8 i Rho8 odbiegały od pozostałych. Zauważalne jest to zwłaszcza w przypadku zlewni Dłubni i widoczne w niskich wartościach współczynnika Kappa uzyskanych dla map obszarów zagrożenia erozyjnego. Prowadzi to do wniosku, iż różnice w działaniu tych algorytmów w stosunku do pozostałych, ulegają wzmocnieniu na obszarach o mniejszym nachyleniu, gdzie w przypadku algorytmów umożliwiających rozplątanie się wody strumień rzadziej kierowany jest do pojedynczej położonej niżej komórki.

Jeśli wyniki przeprowadzonego modelowania rozpatrywać z punktu widzenia zagrożenia erozyjnego określanego dla całości zlewni, to obserwowane różnice nie mają istotnego znaczenia. Znaczenie to rośnie jednak wraz ze zwiększaniem skali opracowania. Coraz częściej modelowanie erozji przeprowadza się z rozdzielczością przestrzenną kilkunastu (np. Drzewiecki i in., 2013) lub nawet kilku (Prasuhn i in., 2013) metrów. Wpływ doboru algorytmu na wyniki oceny zagrożenia erozyjnego będzie w takich przypadkach większy z dwóch powodów. Z jednej strony, jak wynika z badań Erskine'a i in. (2006), rośnie on wraz ze wzrostem rozdzielczości. Zdaniem cytowanych autorów wynika to z dwóch przyczyn. Większa rozdzielczość pozwala na dokładniejsze modelowanie spływu powierzchniowego, stwarzając zarówno możliwość określenia większej liczby ścieżek spływu przed osiągnięciem jego koncentracji, jak i zwiększając determinowaną przez powierzchnie pojedynczej komórki dokładność oszacowania powierzchni zasilania. (Erskin i in., 2006). Jednocześnie obszary odniesienia (jednostki przestrzenne), dla których (jako całości) dokonywane jest oszacowanie

zagrożenia erozyjnego zmniejszają swoją powierzchnię, nawet do pojedynczych pól (Prasuhn i in., 2013).

Podsumowując należy stwierdzić, iż przeprowadzone badania potwierdzają wnioski sformułowane w publikacjach Erskine i in. (2006) oraz Mendicino (1999), którzy uznają algorytmy umożliwiające rozptył strumienia wody do wielu komórek za bardziej odpowiednie dla określania powierzchni zasilania. Na niekorzyść algorytmów kierujących spływ do pojedynczej komórki przemawia dodatkowo ich większa czułość na błędy numerycznego modelu terenu (Desmet i Govers, 1996a). Biorąc pod uwagę fakt, iż algorytmy umożliwiające rozptył strumienia spływu do wielu (więcej niż dwóch) komórek mogą zawodzić w przypadku znacznej wklęsłości form terenowych oraz linii drenażowych (Quinn i in., 1991; Freeman 1991), za bardzo interesujący z punktu widzenia modelowania procesów erozji wodnej gleb uznać należy algorytm DEMON. Niestety, ze względu na swoją złożoność, jest on rzadko implementowany w systemach GIS i stosowany w praktyce modelowania erozji.

Literatura

- Biesemans J., Van Meirvenne M., Gabriels D., 2000: Extending the RUSLE with the Monte Carlo error propagation technique to predict long-term average off-site sediment accumulation. *Journal of Soil and Water Conservation* 55 (1): 35-42.
- Beven K.J., Brazier R.E., 2011: Dealing with Uncertainty in Erosion Model Predictions. [w:] Morgan R.P.C., Nearing M.A. (red.) *Handbook of Erosion Modelling*, Wiley-Blackwell: 52-79.
- Cohen J., 1960: A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement* 20 (1): 37-46.
- Costa-Cabral M., Burges S.J., 1994: Digital elevation model networks (DEMON): A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas. *Water Resources Research* 30: 1681-1692.
- Desmet P.J., Govers G., 1996a: Comparison of routing algorithms for digital elevation models and their implications for predicting ephemeral gullies. *International Journal of Geographical Information Systems* 10: 311-331.
- Desmet P.J., Govers G., 1996b: A GIS Procedure for Automatically Calculating the USLE LS Factor on Topographically Complex Landscape Units. *Journal of Soil and Water Conservation* 51: 427-433.
- Drzewiecki W., 2010: Badanie zmian przestrzennych struktury użytkowania i funkcji krajobrazu w oparciu o wieloczasowe obrazy teledetekcyjne jako wsparcie dla planowania krajobrazu. Sprawozdanie merytoryczne z projektu badawczego MNiSW nr N526 029 32/2621. Katedra Geoinformacji, Fotogrametrii i Teledetekcji Środowiska, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, AGH w Krakowie. Maszynopis.
- Drzewiecki W., Mularz S., 2001: Modelowanie erozji wodnej gleb z wykorzystaniem GIS. [w:] Nowoczesne technologie w geodezji i inżynierii środowiska: konferencja naukowa z okazji jubileuszu 50-lecia Wydziału Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, AGH, Kraków, 169-186.
- Drzewiecki W., Mularz S., 2008: Simulation of water soil erosion effects on sediment delivery to Dobczyce Reservoir. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XXXVII B8: 787-794.
- Drzewiecki W., Mularz S., Twardy S., Kopacz M., 2008: Próba kalibracji modelu RUSLE/SDR dla oceny ładunku zawiesiny wprowadzanego do zbiornika Dobczyckiego ze zlewni bezpośredniej. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji* 18: 83-98.
- Drzewiecki W., Wężyk P., Pierzchalski M., Szafrńska B., 2013: Quantitative and Qualitative Assessment of Soil Erosion Risk in Małopolska (Poland), Supported by an Object-Based Analysis of High-Resolution Satellite Images. *Pure and Applied Geophysics*, DOI:10.1007/s00024-013-0669-7.
- Erskine R.H., Green T.R., Ramirez J.A., MacDonald L.H., 2006: Comparison of grid-based algorithms for computing upslope contributing area. *Water Resources Research* 42, DOI:10.1029/2005WR004648.

- Fairfield J., Leymarie P., 1991: Drainage networks from grid digital elevation model. *Water Resources Research* 27(5): 709-717.
- Freeman G.T., 1991: Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid. *Computers and Geosciences* 17: 413-422.
- Józefaciuk A., Józefaciuk C., 1996: Mechanizm i wskazówki metodyczne badania procesów erozji. Biblioteka Monitoringu Środowiska, PIOŚ, Warszawa.
- Kondracki J., 1988: Geografia fizyczna Polski. PWN, Warszawa.
- Kulas G., 2011: Wpływ zmian pokrycia i użytkowania terenu w zlewniach Prądnika i Dłubni na zagrożenie gleb erozją wodną. Praca magisterska. Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, AGH w Krakowie.
- Lea N.L., 1992: An aspect driven kinematic routing algorithm. [w:] A.J. Parsons i A.D. Abrahams (red.) *Overland Flow: Hydraulics and Erosion Mechanics*, Chapman and Hall, New York: 147-175.
- Licznar P., 2004: Prognozowanie erozyjności deszczu w Polsce na podstawie miesięcznych sum opadów. *Archiwum Ochrony Środowiska* 30 (4): 29 -39.
- Mendicino G., 1999: Sensitivity Analysis on GIS Procedures for the Estimate of Soil Erosion Risk. *Natural Hazards* 20: 231-253.
- O'Callaghan J.F., Mark D.M., 1984: The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics and Image Processing* 28: 323-344.
- Quinn P.F., Beven K.J., Chevallier P., Planchon O., 1991: The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain model. *Hydrological Processes* 5: 59-79.
- Prasuhn V., Liniger H., Gisler S., Herweg K., Candinas A., Clément J.P., 2013: A highresolution soil erosion risk map of Switzerland as strategic policy support system. *Land Use Policy* 32: 281-291.
- Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., McCool D.K., Yoder D.C. 1997: Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). U.S. Department of Agriculture. Agriculture Handbook No. 703.
- Risse L.M., Nearing M.A., Nicks A.D., Laflen J.M., 1993: Error assessment in the Universal Soil Loss Equation. *Soil Science Society of America Journal* 57: 825-833.
- Seibert J., McGlynn B.L., 2007: A new triangular multiple flow direction algorithm for computing upslope areas from gridded digital elevation models. *Water Resources Research* 43, DOI:10.1029/2006WR005128.
- Stuczyński T., Koza P., Łopatka A., Duer I., Jadczyzyn J., 2010: Raport z analizy wskaźników produktu, rezultatu i oddziaływania określonych dla osi 2 PROW 2007-2013 oraz wybranych pytań oceniających zawartych w podręczniku wspólnych ram monitorowania i oceny. Wytyczne (CMEF) wraz z określeniem źródeł i dostępności danych. IUNG-PIB, Puławy.
www.minrol.gov.pl/pol/content/download/28450/158380/file/Rap_z_analzy_wskaznikow.pdf
- Tarboton D.G., 1997: A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research* 33 (2): 309-319.
- Tetzlaff B., Friedrich K., Vorderbrügge T., Vereecken H., Wendland F., 2013: Distributed modelling of mean annual soil erosion and sediment delivery rates to surface waters. *Catena* 102: 13-20.
- Wawer R., Nowocień E., Podolski B., 2005: Real and Calculated K USLE Erodibility Factor for Selected Polish Soils. *Polish Journal of Environmental Studies* 14 (5): 655-658.
- Wischmeier W.H., Smith D.D., 1978: Predicting Rainfall Erosion Losses – A Guide to Conservation Planning. USDA Handbook 537, Washington, D.C.

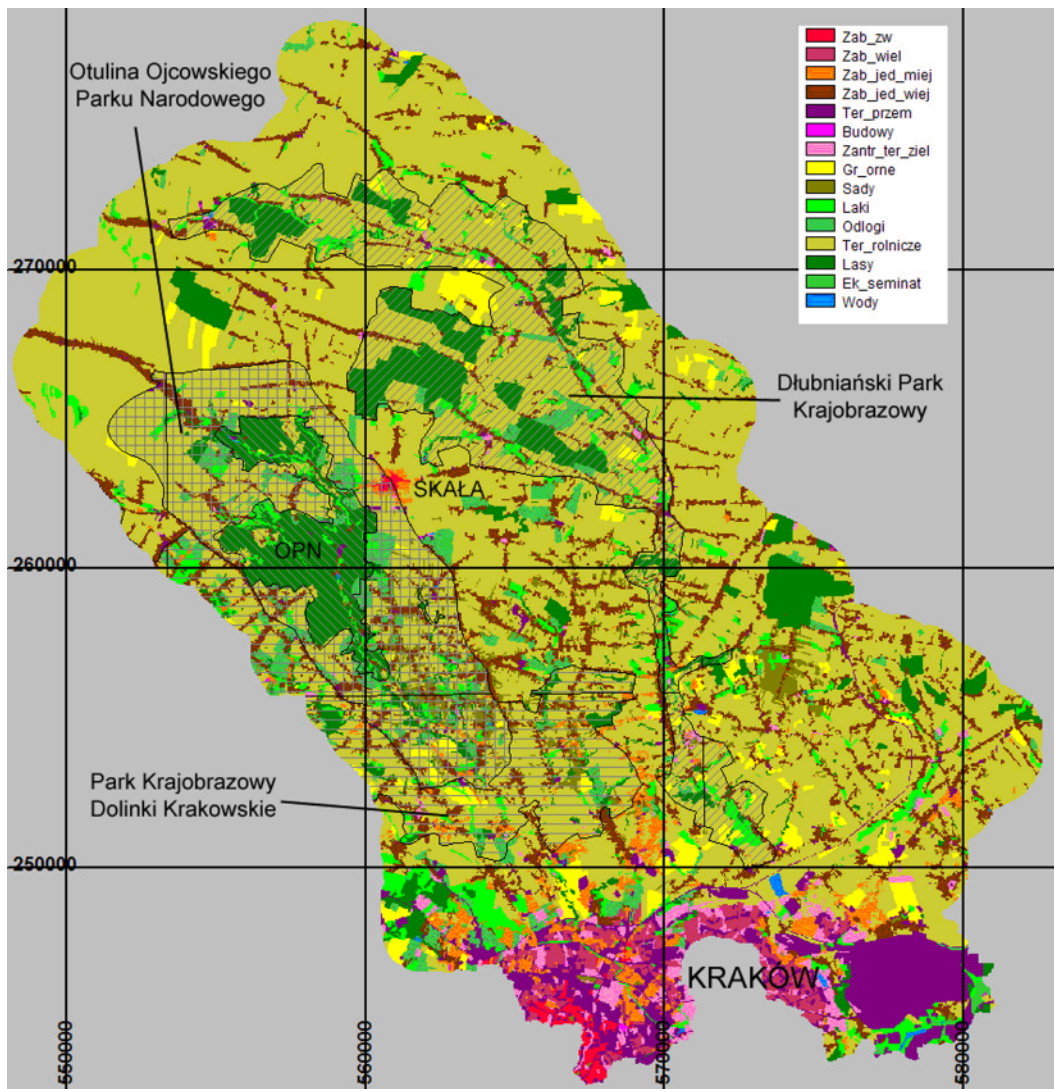
Abstract

The objective of the presented research was to evaluate the influence of flow routing algorithm on RUSLE-based soil erosion assessment on catchment scale. Both the amount of soil loss and the pattern of erosion risk classes were compared. Seven flow routing algorithms were tested: D8, Rho8, Kinematic Routing, DEMON, DA, Multiply Flow Direction (MFD) and Triangular Multiply Flow Direction (MD_{∞}).

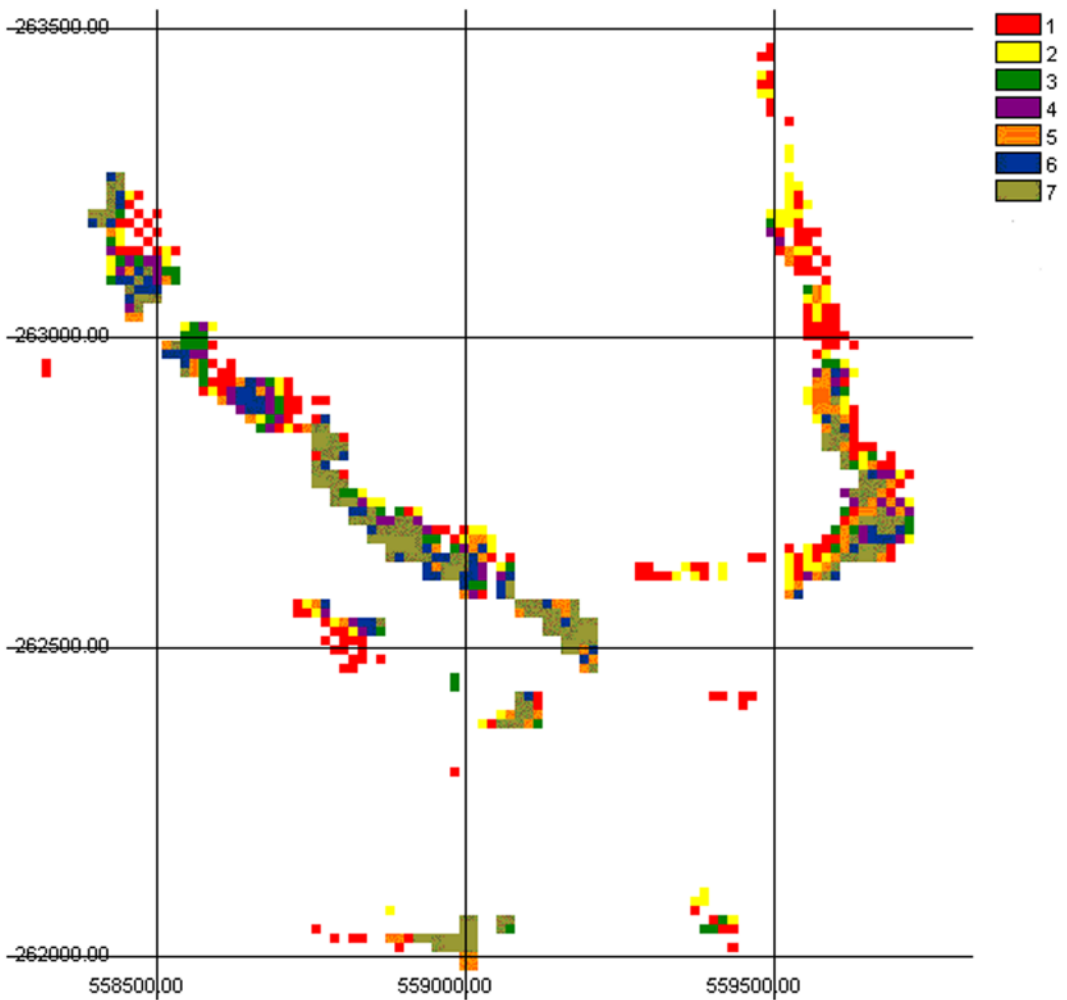
Based on the results achieved, we can conclude that the choice of flow routing algorithm influences the soil erosion risk assessment. Particular approaches gave similar results when total area of endangered soils in the catchment was considered. However, the patterns of erosion differ. Multiple-direction algorithms (especially DEMON) seem to be better suited for water erosion studies.

dr inż. Wojciech Drzewiecki
drzewiec@agh.edu.pl
tel. +48 12 617 2288

mgr inż. Sebastian Ziętara
sebastian.zietara@gmail.com



Rys. 1. Mapa użytkowania i pokrycia terenu obszaru badań (źródło: Drzewiecki, 2010)



Rys. 2. Tereny zagrożone erozją w stopniu co najmniej średnim (fragment zlewni Prądnika); wartość w legendzie oznacza liczbę realizacji modelu (algorytmów określania spływu powierzchniowego), dla których prognozowano takie zagrożenie