

# 1. Wprowadzenie

Wojciech Drzewiecki<sup>1</sup>, Stanisław Twardy<sup>2</sup>

Erozja wodna gleb stanowi główny proces niszczący pokrywę glebową. Na ogół zjawisko to badane jest głównie w kontekście ograniczania żyzności i produktywności gleb, trudności ich właściwej uprawy, a w dalszej konsekwencji – przydatności rolniczej. Jednak poza aspektami rolniczo-produkcyjnymi występuje jeszcze cała gama niekorzystnych oddziaływań na środowisko, nie tylko w miejscu występowania erozji, ale również w bliższej i dalszej okolicy. Dokumentują to obserwacje i prace badawcze prowadzone w zlewniach rzek górskich występujących w dorzeczu górnej Wisły oraz Odry. Intensywne procesy erozyjne wyraźnie wpływają na jakość wód powierzchniowych występujących w ciekach drenujących daną zlewnię. Wraz ze spływem powierzchniowym wprowadzane są do nich znaczne ilości wyerodowanego materiału glebowego, czego efektem finalnym jest zwiększenie ilości zawiesin. Problem ten ma nie tylko wymiar ekologiczny, ale również ekonomiczny, gdyż zwiększona ilość materiału wlezonego oraz zawiesiny zwiększa koszty uzdatniania wody ujmowanej do celów gospodarczych, w tym zwłaszcza zaopatrzenia ludności. Wraz z takim materiałem trafiają również do wód powierzchniowych znaczące ilości substancji biogenych. Wszystko to powodować może zmniejszanie zdolności dyspozycyjnej zbiorników retencyjnych oraz ich eutrofizację.

W tak zarysowanych warunkach szczególnego znaczenia nabierają związki zachodzące między erozją wodną gleb danej zlewni a funkcjami zbiorników przepływowych, gdyż zbiorniki takie działają jak swego rodzaju osadniki, zatrzymując transportowany przez zasilające je wody materiał. Osady te, sedymentując w rezerwarze, powodują zmniejszanie się jego objętości dyspozycyjnej, co z czasem stwarza konieczność przeprowadzenia procesu renowacji zbiornika. Prace takie wiążą się zawsze z dużymi kosztami i czasowym pogorszeniem jakości wód. Szacuje się, iż w skali światowej rocznie sedymentacja osadu powoduje utratę jednego procenta objętości dyspozycyjnej zbiorników retencyjnych. W związku z tym podejmowane są działania mające na celu ograniczenie ilości zawiesiny transportowanej przez wody powierzchniowe zasilające zbiornik. Działania takie przyjmować mogą różnorodną postać (Verstraeten *et al.* 2003). Niejednokrotnie przybierają one formę zintegrowanych programów zarządzania zlewnią. Zawsze jednak priorytetem jest zachowanie pojemności zbiorników retencyjnych oraz utrzymanie w nich odpowiedniej jakości wód.

Podjęcie odpowiednich działań i dobór metod ograniczania ilości osadów transportowanych przez wody powierzchniowe wymaga przede wszystkim oceny ładunku sedymentów

---

<sup>1</sup> AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Katedra Geoinformacji, Fotogrametrii i Teledetekcji Środowiska

<sup>2</sup> Instytut Technologiczno-Przyrodniczy w Falentach, Małopolski Ośrodek Badawczy w Krakowie

docierających do wód w efekcie zachodzących w zlewni procesów erozyjnych. Ogromne znaczenie ma w tym przypadku rozpoznanie przestrzennej zmienności nasilenia procesów erozji wodnej gleb, a także określenie głównych dróg zasilania wód wyerodowanym materiałem glebowym. Dopiero bowiem łączne określenie obszarów erozji i akumulacji materiału glebowego pozwala na delimitację terenów w największym stopniu przyczyniających się do zanieczyszczania wód powierzchniowych zawiesiną, a co za tym idzie racjonalizację podejmowanych działań zapobiegawczych. Uzyskanie prognozy ładunku zawiesiny wprowadzanego do zbiornika jedynie na podstawie pomiarów „in situ” jest praktycznie niemożliwe. Jest to jedno z tych zagadnień, odnośnie do których niezbędne staje się wykorzystanie modelowania przestrzennego, w tym przypadku modelowania zachodzących w zlewni procesów erozji wodnej gleb wraz z ich efektami w postaci dostawy wyerodowanego materiału do cieków wodnych.

Prezentowana praca jest podsumowaniem badań przeprowadzonych w ramach sfinansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego projektu badawczego (N520 021 31/2970) zatytułowanego: *Modelowanie wpływu zmian użytkowania na wielkość ładunku osadów potencjalnie akumulowanych w zbiornikach retencyjnych z wykorzystaniem wieločasowych wielospektralnych obrazów teledetekcyjnych i systemów informacji geograficznej na przykładzie Zbiornika Dobczyckiego*. Projekt realizowano w latach 2006–2010 w Katedrze Geoinformacji, Fotogrametrii i Teledetekcji Środowiska AGH, przy współpracy z Małopolskim Ośrodkiem Badawczym Instytutu Technologiczno-Przemysłowego (ITP) w Falentach.

Inicjatorem badań był śp. dr hab. inż. Stanisław Mularz, prof. AGH. Będąc z wykształcenia geologiem i w swojej pracy badawczej interesując się zjawiskami i procesami geodynamicznymi, bardzo wcześnie potrafił on dostrzec możliwości ich modelowania z wykorzystaniem systemów informacji geograficznej. Prace prof. Mularza z lat 90. XX wieku (Mularz 1993; Mularz 1994a; Mularz 1994b; Mularz 1995) stanowiły pionierskie w skali Polski próby wykorzystania narzędzi GIS do modelowania i oceny zagrożenia gleb erozją wodną. Tematyka ta interesowała go żywo również w latach późniejszych, co owocowało kolejnymi publikacjami (Drzewiecki i Mularz 2001; Drzewiecki i Mularz 2005; Mularz i Drzewiecki 2007; Drzewiecki *et al.* 2008; Drzewiecki i Mularz 2008). Udział w prowadzonych pod kierownictwem prof. Janusza Gołasia badaniach dotyczących problematyki osadów dennych w Zbiorniku Dobczyckim (Mularz *et al.* 2006; Hejmanowska *et al.* 2006) zainspirował profesora do zainicjowania projektu badawczego, którym kierował do swej przedwczesnej śmierci w roku 2009, a którego efektem jest przedstawiana publikacja.

Celem projektu było określenie możliwości wykorzystania przestrzennych modeli erozyjnych realizowanych w środowisku systemów informacji geograficznej (GIS) do szacowania wpływu użytkowania terenu zlewni karpackich na wielkość ładunku zawiesiny w wodach powierzchniowych zasilających zbiornik retencyjny.

Problem określenia ilości materiału unoszonego, będącego efektem procesów erozji wodnej gleb, ma w przypadku zbiorników karpackich szczególne znaczenie. Zbiorniki te zasilane są przez zlewnie górskie o znacznych nachyleniach, znaczącym udziale gruntów ornych i intensywnych opadach. Znaczenie zbiorników retencyjnych w aspekcie gospodarowania zasobami wodnymi w Karpatach przedstawiono w rozdziale 2. Zwrócono w nim m.in. uwagę na zamulanie zbiorników w wyniku napływania i osadzania się materiału mineralnego pochodzącego z procesów erozyjnych. Jako obszar badań wybrano zlewnię Raby ze szczególnym uwzględnieniem otoczenia Zbiornika Dobczyckiego, co opisano w rozdziale 3.

W latach 80. XX w. Instytut Melioracji i Użytków Zielonych (dzisiejszy ITP w Falentach) realizował prace badawcze, w efekcie których określono – zarówno w zlewni górnej Raby (tj. powyżej zbiornika), jak i w bezpośredniej zlewni zbiornika – ładunki zanieczyszczeń w wodach powierzchniowych, w tym ładunki zawiesiny ogólnej. Badania te pozwoliły m.in. na określenie ilości osadów wprowadzanych do zbiornika wraz z zasilającymi go wodami (Pawlik-Dobrowolski *et al.* 1992, Pawlik-Dobrowolski 1993). Uzyskane wówczas wyniki wykorzystane zostały do skalibrowania modeli erozyjnych. Ich weryfikację przeprowadzono z wykorzystaniem danych uzyskanych z pomiarów zrealizowanych w ramach przedstawianego projektu w latach 2007–2008. Badania (zarówno te historyczne, jak i zrealizowane w ramach projektu) oraz uzyskane w ich trakcie wyniki przedstawiono w rozdziale 4. Na ich podstawie stwierdzić można, iż w zasilającej Zbiornik Dobczycki rzece Rabe nastąpiło znaczące ograniczenie ładunku zawiesiny. Jednakże w przypadku bezpośrednich dopływów Zbiornika zaobserwowano sytuację zgoła odmienną – nie tylko nie nastąpił spadek ładunku zawiesiny, ale wręcz odwrotnie, istotny jego wzrost. Interpretując wyniki, należy z jednej strony wziąć pod uwagę fakt, iż uzyskane one zostały na podstawie krótkich (trzyletni i kilkunastomiesięczny) okresów pomiarowych. Z drugiej jednak strony porównanie sum opadów w badanych okresach w zlewni Zbiornika Dobczyckiego (rozdział 5) pokazuje, iż zarówno w zlewni Raby, jak i w zlewni bezpośredniej roczne sumy opadów były w latach 2007–2008 wyższe niż w okresie 1982–1984 (choć w przypadku zlewni bezpośredniej wzrost opadów był większy). Do przeprowadzenia ewentualnej oceny zmian ilości materiału dostarczanego do Zbiornika konieczne było przeprowadzenie dalszych badań wiążących wielkość ładunku zawiesiny ze strukturą użytkowania badanych zlewni.

W rozdziale 5 przedstawiono modele erozyjne, których przydatność zdecydowano się przetestować w ramach projektu, przy czym, dokonując ich wyboru, założono, że:

- powinny być to modele o parametrach rozłożonych, stosowane już z sukcesem przez innych badaczy do celów szacowania ilości sedymentów docierających do zbiorników retencyjnych;
- powinny one mieć, ze względu na wielkość modelowanego obszaru, stosunkowo niewielkie wymagania dotyczące niezbędnych danych wejściowych;
- powinny umożliwiać oszacowanie rocznych i średniorocznych ładunków zawiesin w ciekach drenujących modelowane zlewnie.

Ostatecznie, w wyniku przeprowadzonej analizy, zdecydowano się na wykorzystanie trzech modeli bazujących na idei USLE tj. Uniwersalnego Równania Strat Gleby (Wishmeier i Smith 1978): RUSLE/SDR (Renard *et al.* 1997; Ferro i Minacapilli 1995), USPED (Mitasova *et al.* 1998; Mitasova i Mitas 2001) oraz WaTEM/SEDEM (Van Oost *et al.* 2000; Van Rompaey *et al.* 2001; Verstraeten *et al.* 2002).

Etapem badań poprzedzającym modelowanie zachodzących w zlewni procesów erozji wodnej gleb i depozycji wyerodowanego materiału mineralnego było utworzenie dla obszaru zlewni Zbiornika Dobczyckiego bazy danych GIS. Musiała ona zawierać niezbędne do modelowania warstwy tematyczne opisujące rzeźbę terenu, przestrzenny rozkład opadów, gleby oraz informacje o pokryciu terenu w okresach objętych modelowaniem.

W rozdziale 6 opisano wykorzystane do budowy bazy danych przestrzennych dane źródłowe oraz przedstawiono metodykę ich przetwarzania. Szczególną uwagę poświęcono procesowi tworzenia map pokrycia i użytkowania terenu w wyniku klasyfikacji obiektowej

obrazów satelitarnych systemu Landsat TM. Zamieszczono w nim również analizę zmian użytkowania terenu, które zaszły na badanym obszarze pomiędzy rokiem 1985 a 2007. Wskazuje ona na zachodzące w zlewni Zbiornika Dobczyckiego procesy urbanizacji (udział obszaru sklasyfikowanego jako „tereny zabudowy” uległ podwojeniu) oraz znaczące zmniejszanie się areалу gruntów ornych i wzrost terenów trwale zadarnionych (użytków zielonych i odłogów). Wyniki klasyfikacji wskazują również na wzrost powierzchni lasów. Wymienione procesy nie zachodzą jednak w zlewni Zbiornika w sposób jednolity. Na obszarze zlewni Raby powyżej Zbiornika widoczny jest duży spadek powierzchni gruntów ornych, przy jednoczesnym wzroście powierzchni terenów zadarnionych. Na obszarze zlewni bezpośrednich spadek udziału powierzchni gruntów ornych nie jest tak silny, jednocześnie jednak występuje tu spadek udziału powierzchni użytków zielonych. Zmniejszaniu się areалу terenów rolnych towarzyszy tu znaczny wzrost powierzchni obszarów zabudowy. Należy również zauważyć, iż zlewnie bezpośrednie charakteryzują się w porównaniu ze zlewnią Raby znacznie większym udziałem powierzchni zabudowanych oraz mniejszym zalesieniem.

W rozdziale 7 zaprezentowano metodykę opracowania, na podstawie zawartych w przygotowanej bazie danych wejściowych map czynników erozyjnych używanych w testowanych modelach. Przedstawiono również przebieg i wyniki procesu kalibracji każdego z modeli na podstawie danych pomiarowych pochodzących z lat 80. XX w. oraz weryfikacji skalibrowanych modeli z wykorzystaniem pomiarów przeprowadzonych w latach 2007–2008.

Przeprowadzone w trakcie zrealizowanych badań próby kalibracji i weryfikacji jednolitego modelu dla całej zlewni Zbiornika Dobczyckiego nie zakończyły się powodzeniem – skalibrowane na podstawie wyników z lat 80. modele nie zostały pomyślnie zweryfikowane. Do realizacji celu badań konieczne okazało się dokonanie podziału zlewni poszczególnych badanych przekrojów pomiarowych według kryterium jednostkowego ładunku zawiesiny. W przypadku zlewni o wysokich wartościach jednostkowych ładunków zawiesiny (powyżej  $2000 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$  rocznie) udało się z powodzeniem skalibrować i zweryfikować model RUSLE/SDR, a w przypadku zlewni o niskich wartościach jednostkowych ładunków zawiesiny model WaTEM/SEDEM. W obu przypadkach kalibrowane parametry modelu uzyskiwane były na podstawie pomiarów przeprowadzonych w latach 1982–1984.

W rozdziale 8 pokazano, w jaki sposób skalibrowany i pozytywnie zweryfikowany na obszarze rozpatrywanej zlewni model przestrzenny, wiążący zachodzące na jej obszarze procesy erozyjne z obserwowanymi w ciekach i wprowadzanymi do zbiornika retencyjnego ładunkami zawiesiny ogólnej, stanowić może narzędzie wspomagające zarządzanie jej obszarem. Pokazano również, jak model skalibrowany i zweryfikowany w trakcie realizacji prezentowanego projektu badawczego dla zlewni Zbiornika Dobczyckiego może zostać wykorzystany do oceny wpływu, który na obserwowane w ciekach ładunki zawiesin wywarły zmiany pokrycia i użytkowania terenu zachodzące na jej terenie. Zaprezentowano także możliwości wykorzystania opracowanego modelu do symulacji efektów podejmowanych na obszarze zlewni działań ochronnych, których celem byłoby zmniejszenie ładunku zawiesiny wprowadzanej do zbiornika retencyjnego.

Analizując wyniki modelowania, stwierdzono, iż obserwowane w latach 2007–2008 wyższe (w porównaniu z okresem 1982–1984) sumy opadów oraz wyższe wartości wskaźnika erozyjności deszczu i spływu powierzchniowego spowodowały znaczny wzrost zagrożenia erozyjnego w zlewni i, w efekcie, potencjalnego zanieczyszczenia wód Zbiornika Dobczyckiego zawiesiną. W zlewni bezpośredniej Zbiornika wzrost zagrożenia erozyjnego

jest silniejszy niż w zlewni Raby. Jednocześnie zmiany pokrycia i sposobu użytkowania terenu, które nastąpiły w omawianym czasie przyczyniają się do ograniczenia ilości docierających do zbiornika osadów, powstających w wyniku zachodzących w zlewni procesów erozji wodnej gleb. Wpływ zmian użytkowania widoczny jest zwłaszcza w zlewni Raby, co znajduje swoje odzwierciedlenie w fakcie, iż pomimo wzrostu zagrożenia erozyjnego wskutek zwiększonej erozyjności opadów i spływów powierzchniowych ładunki zawiesiny mierzone w przekrojach pomiarowych uległy zmniejszeniu. Natomiast w przypadku zlewni bezpośredniej zbiornika zmiany użytkowania nie kompensują w pełni wpływu zwiększonej erozyjności opadu. W efekcie obserwuje się wzrost ładunku osadów docierających do zbiornika z jego bezpośrednich dopływów. Wyniki modelowania pokazują, że zmiany użytkowania, które zaszyły w analizowanym przedziale czasowym skutkują ograniczeniem ładunku zawiesiny w ciekach, a przyczyny rejestrowanego wzrostu poszukiwać należy w zmienności charakteru, a zwłaszcza intensywności, opadów atmosferycznych.

Przedstawione w niniejszej monografii wyniki badań pozwalają na stwierdzenie, iż sformułowana hipoteza badawcza, dotycząca możliwości wykorzystania przestrzennych modeli erozyjnych realizowanych w środowisku systemów informacji geograficznej (GIS) do szacowania wpływu użytkowania terenu zlewni karpackich na wielkość ładunku zawiesiny w wodach powierzchniowych zasilających zbiornik retencyjny, została zweryfikowana pozytywnie.

## Literatura

1. 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, Kraków, 169–186.
2. Drzewiecki W., Mularz S., 2005: *Model USPED jako narzędzie prognozowania efektów erozji i depozycji materiału glabowego*, Roczniki Geomatyki, Tom III, Zeszyt 2, 45–54.
3. 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.
4. 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, vol. 18, 83–98.
5. Ferro V., Minacapilli M., 1995. *Sediment delivery process at basin scale*, Hydrological Science Journal, 40 (6), 703–717.
6. Hejmanowska B., Drzewiecki W., Głowienka E., Mularz S., Zagajewski B., Sanecki J., 2006: *Próba integracji satelitarnych obrazów hiperspektralnych z nieobrazowymi naziemnymi danymi spektrometrycznymi na przykładzie Zbiornika Dobczyckiego*, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, vol. 16, 207–216.
7. Mitsova H., Mitsova L. 2001: *Multiscale soil erosion simulations for land use management*, w: Harmon R., Doe W. (Eds.), *Landscape Erosion and Landscape Evolution Modeling*, Kluwer Academic/Plenum Publishers, 321–347.
8. Mitsova H., Mitsova L., Brown W.M., Johnston D.M., 1998: *Multidimensional soil erosion/deposition modeling and visualization using GIS*, Final report for USA CERL, University of Illinois, Urbana-Champaign, IL.

9. Mularz S., 1993: *A GIS for Assessing the Soils Erosion Susceptibility*, w: W. Widacki (red.), *GIS for Environment*, Conference on Geographical Information Systems in Environmental Studies, Kraków, Poland 25–27 November 1993, 163–170.
10. Mularz S., 1994a: *Automatyczne kartowanie zagrożenia gleb erozją z wykorzystaniem GIS*, *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, vol. 2, s. 73–84.
11. Mularz S., 1994b: *Mapping Soil Erosion by GIS*, w: *GIS in Ecological Studies & Environmental Management*, Conference Organised by Global Resource Information Database – Warsaw, 137–148.
12. Mularz S., 1995: *Zastosowanie GIS do oceny zagrożenia erozyjnego pokrywy glebowej*, *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Kraków, vol. 3, 33–42.
13. Mularz S., Drzewiecki W., 2007: *Ocena zagrożenia gleb erozją wodną w rejonie Zbiornika Dobczyckiego w oparciu o wyniki numerycznego modelowania*, *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, vol. 17b, 535–548.
14. Mularz S., Drzewiecki W., Hejmanowska B., Pirowski T., 2006: *Wykorzystanie teledetekcji satelitarnej do badania procesu akumulacji zanieczyszczeń w rejonie Zbiornika Dobczyckiego*, *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, vol. 16, 425–435.
15. Pawlik-Dobrowolski J., 1993: *Ocena stanu czystości wód powierzchniowych w zlewni Raby na tle źródeł zanieczyszczenia*, w: *Zlewnia Raby jako obszar alimentacji wód i zanieczyszczeń dla zbiornika retencyjnego w Dobczycach*, Monografia 145, Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, 131–153.
16. Pawlik-Dobrowolski J., Krzemień E., Kurzbauer A., 1992: *Prognozowany dopływ substancji chemicznych w materiale unoszonym do zbiornika retencyjnego w Dobczycach*, *Wiadomości Instytutu Melioracji i Użytków Zielonych*, T. XVII, z. 2, 481–496.
17. 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.
18. Van Oost K., Govers G., Desmet P., 2000: *Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage*, *Landscape Ecology*, 15, 577–589.
19. Van Rompaey A., Verstraeten G., Van Oost K., Govers G., Poesen J., 2001: *Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach*, *Earth Surface Processes and Landforms* 26 (11), 1221–1236.
20. Verstraeten G., Van Oost K., Van Rompaey A., Poesen J., Govers G., 2002: *Evaluating an integrated approach to catchment management to reduce soil loss and sediment pollution through modelling*, *Soil Use and Management*, 18, 386–394.
21. Verstraeten G., Van Rompaey A., Poesen J., Van Oost K., Govers G., 2003: *Evaluating the impact of watershed management scenarios on changes in sediment delivery to rivers?*, *Hydrobiologia*, 494, 153–158.
22. Wischmeier W.H., Smith D.D., 1978: *Predicting Rainfall Erosion Losses – A Guide to Conservation Planning*, USDA Handbook 537, Washington, D.C.