

Prognozowanie efektów środowiskowych spowodowanych wprowadzeniem zasad dobrych praktyk rolniczych

**monografia pod redakcją:
Szymona Szewrańskiego
Romualda Żmudy**

Wrocław 2008 

Autorstwo i współautorstwo rozdziałów:

Eugeniusz Nowocień – Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa w Puławach (rozdz. 9)

Bogusław Podolski – Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa w Puławach (rozdz. 9)

Józef Sasik – Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Katedra Gospodarki Przestrzennej
(rozdz. 6, 8, 10, 12)

Szymon Szewrański – Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Katedra Gospodarki
Przestrzennej (rozdz. 2, 3, 8, 10, 12, 13)

Rafał Wawer – Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa w Puławach (rozdz. 4, 10, 12)

Romułd Źmuda – Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Instytut Kształtowania
i Ochrony Środowiska (rozdz. 5, 7, 8, 10, 11, 12, 13)

Opiniodawca

prof. dr hab. inż. Tadeusz Orlik

Redaktor merytoryczny

dr hab. inż. Krzysztof Pulikowski, prof. nadzw.

Opracowanie redakcyjne

mgr Elżbieta Winiarska-Grabosz

Korekta

Janina Szydłowska

Łamanie

Alicja Chmura

Projekt okładki

Agnieszka Jakóbiak

Monografie LXVI

Publikacja finansowana przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego

Grant badawczy 30/7–M/2004/G

Grant badawczy 74/7–M/2002/G

© Copyright by Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Wrocław 2008

ISBN 978-83-60574-46-1

WYDAWNICTWO UNIwersytetu PRZYRODNICZEGO WE WROCLAWIU

Redaktor Naczelny – prof. dr hab. Andrzej Kotecki

ul. Sopotka 23, 50–344 Wrocław, tel./fax 071 328–12–77

e-mail: wyd@up.wroc.pl

Nakład 100 + 16 egz. Ark. wyd. 8,5. Ark. druk. 7,75

Druk i oprawa: Wydawnictwo Tekst Sp. z o.o.

ul. Kossaka 72, 85–307 Bydgoszcz

Spis treści

1. WSTĘP	5
2. CEL I ZAKRES BADAŃ	6
3. BADANIA TERENOWE I LABORATORYJNE	7
3.1. Elementy meteorologiczne	7
3.2. Elementy hydrologiczne	8
3.3. Pomiary batometryczne	8
3.4. Badania laboratoryjne	9
3.5. Badania i wizje terenowe.....	10
4. SYSTEM INFORMACJI GEOGRAFICZNEJ	11
5. CHARAKTERYSTYKA GEOGRAFICZNA ZLEWNI BADAWCZEJ	16
5.1. Położenie geograficzne	16
5.2. Warunki klimatyczne	18
5.3. Podłoże geologiczne (morfogeneza).....	19
5.4. Ukształtowanie powierzchni zlewni	21
5.5. System hydrograficzny zlewni.....	23
6. ZASOBY GLEBOWE ZLEWNI MIELNICY	25
6.1. Typy, gatunki gleb – ich wybrane cechy fizyko-wodne i chemiczne	25
6.2. Skład chemiczny gleb	29
7. SYSTEM TRANSPORTU FLUWIALNEGO MIELNICY I JEGO FUNKCJONOWANIE	36
8. ROLNICZE ZAGOSPODAROWANIE ZLEWNI	41
9. SIEĆ DRÓG ROLNICZYCH	46
10. ZAGROŻENIE EROZJĄ WODNĄ GLEB	50
11. PRZESŁANKI DO WPROWADZENIA ZABIEGÓW OCHRONNYCH NA OBSZARZE WZGÓRZ TRZEBNICKICH NA PRZYKŁADZIE ZLEWNI MIELNICY	55
12. MODELOWANIE SKUTKÓW PRZEDSIĘWZIĘĆ ROLNOŚRODOWISKOWYCH	58
12.1. Model SWAT	58
12.2. Scenariusze zmian	60
12.3. Wyniki symulacji modelowych	65
13. PODSUMOWANIE I WNIOSKI	74
PIŚMIENNICTWO	79

1. WSTĘP

W niniejszej pracy przeanalizowano możliwości wykorzystania nowoczesnych metod modelowania i prognozowania środowiskowego, biorąc pod uwagę różne warianty rozwoju wsi, w warunkach członkostwa Polski w Unii Europejskiej. Przeprowadzone badania umożliwiły weryfikację przydatności istniejących narzędzi prognostycznych i dostosowanie ich do warunków lokalnych. Przede wszystkim realizacja badań zaowocowała zbudowaniem systemu informacji geograficznej (GIS) dla badanego obszaru. Końcowym efektem projektu jest praktyczne wdrożenie systemu, który nawiązuje poziomem i stopniem zaawansowania technologicznego do rozwiązań stosowanych w krajach wysoko rozwiniętych. Zdobyte doświadczenia mogą być wykorzystane w strategicznych ocenach oddziaływania na środowisko, pomogą symulować zagrożenia ze strony zanieczyszczeń przestrzennych pochodzenia rolniczego oraz określić tempo degradacji gleb na skutek erozji wodnej, poszerzą zakres zastosowań GIS w ochronie środowiska. Stanowią również pomoc w ocenie wskaźnikowej skuteczności wdrażania przepisów prawnych i rozwiązań organizacyjnych w zakresie rozwoju wsi i ochrony środowiska na terenach rolniczych. Monografia jest efektem wieloletnich badań erozyjnych prowadzonych w małej zlewni (o przeważającym rolniczym sposobie użytkowania gruntów) oraz interdyscyplinarnemu podejściu do zagadnienia i współpracy naukowców Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu i Instytutu Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa w Puławach. W pracy wykorzystano wyniki badań i analiz przeprowadzonych w ramach dwóch projektów badawczych finansowanych ze środków KBN nt.: „Transport fluwialny wybranych składników materii i jego dynamika jako odwzorowanie procesów denudacyjnych zlewni pokrytej glebami lessowymi”, realizowanego w latach 2002–2004 oraz „Prognozowanie efektów środowiskowych spowodowanych wprowadzaniem zasad dobrych praktyk rolniczych na przykładzie małej zlewni rolniczej”, realizowanego w latach 2004–2007.

2. CEL I ZAKRES BADAŃ

Celem badań było podjęcie próby prognozowania potencjalnych skutków środowiskowych, które mogą być powodowane zmianami w przestrzeni rolniczej związanymi z wdrażaniem zasad dobrych praktyk rolniczych i działań rolno-środowiskowych, wynikających z przepisów ochrony środowiska Unii Europejskiej. Główne etapy realizacji celu obejmowały m.in. zbudowanie systemu informacji geograficznej GIS dla obiektu badawczego, monitoring jakości środowiska wodnego oraz glebowego, modelowanie i prognozowanie matematyczne.

Obszarem interdyscyplinarnych badań była mała rolnicza zlewnia Mielnicy, położona w rejonie Wzgórz Trzebnickich (dolnośląskie), która prawie w całości pokryta jest glebami lessowymi. Zlewnia charakteryzuje się dominującą przewagą użytków rolnych, urozmaiconą rzeźbą i jest silnie degradowana procesami erozji wodnej. Dotychczasowe rozpoznanie zjawisk erozyjnych zachodzących na obiekcie wskazuje, iż roczne wskaźniki denudacji odpływowej kształtują się w bardzo szerokich granicach (od 0,38 do 44,37 Mg · km⁻²) i są uzależnione od towarzyszących im uwarunkowań hydrometeorologicznych [Żmuda 2006].

Badania realizowano zarówno poprzez prace kameralne, jak i pomiary, a także rozpoznanie terenowe. Analizy były przeprowadzone w oparciu o cyfrową bazę danych przestrzennych opracowaną w następujący sposób:

- georeferencja danych z monitoringu zlewni w oparciu o pomiary GPS;
- ortorektyfikacja i korekcja danych źródłowych: map analogowych, zdjęć lotniczych i satelitarnych;
- utworzenie przestrzennej bazy danych Cyfrowego Modelu Zlewni (rzeźba terenu; pokrywa glebowa; użytkowanie terenu z uwzględnieniem agrotechniki; sieć hydrograficzna i zbiorniki wodne);
- przygotowanie danych wejściowych do modelowania.

Kolejnym etapem projektu badawczego było przyjęcie scenariuszy zmian w zlewni (wprowadzenie Kodeksu Dobrych Praktyk Rolniczych i działań rolno-środowiskowych, zmiany klimatu, przekształcenia obszarowe, zmiany charakteru produkcji) i modelowanie przestrzenne zmian na obszarze zlewni (hydrologia, erozja, bilans składników chemicznych) wykonane w oparciu o kalibrację modelu na danych rzeczywistych z monitoringu środowiska. Dla przyjętych scenariuszy zmian w działalności rolniczej dokonano symulacji ich wpływu na środowisko. Prognozowanie skutków środowiskowych przeprowadzono z zastosowaniem modelu przestrzennego zbudowanego na podstawie aktualnych parametrów ekofizjograficznych i danych gospodarczych opisujących obszar badań. Wyniki symulacji zestawiono w ujęciu wskaźnikowym, zgodnym z macierzami agroiindykatorowymi.

3. BADANIA TERENOWE I LABORATORYJNE

Zadania badawcze były wykonywane z wykorzystaniem pomiarów bezpośrednich, wizji lokalnych i obserwacji terenowych, analiz laboratoryjnych oraz studialnych prac kameralnych.

W ramach monitoringu zlewni prowadzono następujące badania bezpośrednie:

- codzienne pomiary stanów wody;
- okresowe pomiary natężenia przepływu w cieku Mielnica;
- codzienne pomiary batometryczne metodą optyczną;
- okresowe pomiary jakości wód powierzchniowych;
- codzienne pomiary meteorologiczne (opady atmosferyczne, temperatura powietrza);
- pomiary cech fizykochemicznych gleb.

Ciągłe pomiary hydrometeorologiczne wykonywano do końca roku hydrologicznego 2005. Przez cały okres trwania projektu prowadzono liczne obserwacje terenowo-inwentaryzacyjne.

3.1. Elementy meteorologiczne

Charakterystykę elementów meteorologicznych opracowano na podstawie obserwacji prowadzonych na własnym posterunku meteorologicznym położonym na obszarze zlewni, we wsi Boleścín. Standardowe pomiary były dokonywane od 1982 roku. Latem 2004 roku posterunek meteorologiczny został wyposażony w urządzenie Vantage Pro amerykańskiej firmy Davis Instruments, wykonujące elektroniczne pomiary meteorologiczne. Urządzenie umożliwia m.in. ciągły pomiar wysokości opadów atmosferycznych, a wbudowany logger pozwala na bezobsługowe zapisy danych w stałych przedziałach czasowych. Umożliwia on natychmiastowe określenie czasów trwania opadów oraz ich intensywności. Pozyskuje się w ten sposób bardzo dokładnie oznaczone parametry deszczu, które stanowią podstawę modelowania matematycznego, wykorzystywanego w pracy. Stacja pomiarowa rejestrowała także zmiany temperatury powietrza atmosferycznego. Informacje były pozyskiwane automatycznie za pomocą czujników elektronicznych i zbierane w interwałach 15-minutowych. Ponadto do loggera dodatkowo podłączono czujniki ciśnienia powietrza, usłonecznienia, a także promieniowania UV oraz kierunku i prędkości wiatru. Wybrane wskazania były przydatne przy parametryzacji danych wejściowych do modelowania.

Kontrolne pomiary wysokości opadów atmosferycznych wykonywano ponadto korytkowym deszczomierzem rejestrującym *TPG-023* firmy Aster s.c. z Krakowa (dokładność pomiaru 0,1 mm). Komunikacja programu komputerowego z deszczomierzem realizowana jest za pośrednictwem łącza szeregowego RS 232, a opracowanie uzyskanych danych jest możliwe w środowisku systemu operacyjnego Windows.

Charakterystykę klimatyczną regionu opracowano na podstawie analizy wyników obserwacji z posterunków meteorologicznych IMGW (głównie posterunku w Trzebnicy i Chwałkowicach) oraz wcześniejszych wieloletnich pomiarów prowadzonych w Boleszynie.

3.2. Elementy hydrologiczne

Dane służące do charakterystyki hydrologicznej obszaru uzyskano na podstawie codziennych pomiarów stanów wody oraz okresowych pomiarów natężeń przepływów w przekroju hydrometrycznym przy różnych napęgniach koryta ciekłu. Pomiaru te stanowiły uzupełnienie dotychczasowego rozpoznania reżimu hydrologicznego Mielnicy i weryfikację ustalonych krzywych konsumpcyjnych w różnych przekrojach hydrometrycznych. Na początku okresu badawczego – w okresie późnowiosennym – przeprowadzono gruntowną konserwację stanowisk badawczych w korycie ciekłu. Codzienne obserwacje stanów wody prowadzono na ustabilizowanym odcinku koryta, w przekroju wyposażonym w łatę wodowskazową i limnigraf.

Pomiary intensywności przepływów wykonywano mikromłynkiem hydrometrycznym holenderskiej firmy Eijkelkamp, pozwalającym na wykonywanie pomiarów nawet przy minimalnych napęgniach koryta nie przekraczających 5 cm.

3.3. Pomiary batometryczne

Pomiary batometryczne prowadzono z wykorzystaniem przenośnego mikroprocesorowego mętnościomierza HI 93703 firmy Hanna Instruments. Urządzenie dokonuje pomiaru mętności wody, w zakresach 0–50 i 50–1000 NTU (Nephelometric Turbidity Unit). Pomiaru wykonywane są zgodnie z międzynarodowym standardem ISO 7027 oraz europejskimi normami EN 50081–1 i EN 50082–1. Działanie przyrządu opiera się na transmisji wiązki podczerwieni przez znajdującą się w kuwecie próbkę cieczy. Mikroprocesor przelicza poziom emisji na jednostki FTU (Formazine Turbidity Unit) lub równoważne z nimi jednostki NTU.

Powyższa metoda zaliczana jest do zastępczych – pośrednich sposobów oznaczania koncentracji rumowiska. Jej zaletą jest szybkość wykonania i możliwość uzyskiwania wyników bezpośrednio w terenie, bez zbędnego transportu do laboratorium pobranych próbek oraz uniknięcie czasochłonnych wagowych analiz laboratoryjnych. Użytkowanie urządzenia wymagało uprzedniego wyskalowania. Kalibrację przyrządu przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych Instytutu Kształtowania i Ochrony Środowiska UP we Wrocławiu. Materiał wykorzystany do cechowania mętnościomierza stanowiły rzeczywiste próbki wody pobrane z ciekłu Mielnica przy różnych uwarunkowaniach przepływu. Kalibracja polegała na skorelowaniu wartości koncentracji pomierzonych optycznie z wielkościami uzyskanymi z analizy suszarkowo-wagowej.

Uzyskane zależności o charakterze liniowym dobrze odwzorowują badane relacje, a charakteryzujące je wysokie współczynniki determinacji (dla mętności 0–50 FTU – $R^2=0,79$; 50–1000 FTU – $R^2=0,94$) upoważniają do stosowania wyprowadzonych zależ-

ności przy określaniu koncentracji rumowiska unoszonego. Dobowe ilości transportowanego poza przekrój batometryczny materiału glebowego obliczano jako funkcję zmacenia i natężenia przepływu z danego dnia.

3.4. Badania laboratoryjne

Poboru próbek wody do oznaczenia jej składu chemicznego dokonywano bezpośrednio do zakręcanych polietylenowych pojemników o pojemności 2 dm³. Przed pobraniem próbki butelki były każdorazowo myte i płukane wodą destylowaną, a w terenie pojemniki te dodatkowo przemywano wodą z ciekłu. Pobór prób miał miejsce zawsze w tym samym punkcie (posterunek batometryczno-hydrometryczny) koryta ciekłu. Próbkę w dniu pobrania dostarczano do laboratorium.

Analiza składu chemicznego wód pozwoliła na określenie zawartości całkowitych poszczególnych pierwiastków odpływających w wodzie. Metodyka oznaczeń laboratoryjnych była następująca:

- zawartość azotu amonowego ($N-NH_4$) – metodą spektrofotometryczną wg ISO 7150-1:1984, spektrofotometrem Cintra 5, typ UV-Visible Spectrometer firmy GBC Scientific Equipment;
- zawartość azotu azotanowego ($N-NO_3$) – metodą spektrofotometryczną z 2,6-dimetylofenolem wg ISO 7890-1:1986, aparatem jw.;
- zawartość azotu azotynowego ($N-NO_2$) – metodą spektrofotometryczną z 4-amino-benzenosulfonamidem wg ISO 6777:1984, aparatem jw.;
- zawartość azotu organicznego – po określeniu zawartości azotu ogólnego Kjeldahla i zawartości azotu amonowego;
- zawartość azotu całkowitego – po określeniu zawartości azotu ogólnego Kjeldahla i zawartości azotu azotanowego i azotynowego;
- zawartość ortofosforanów ogólnych – metodą spektrometryczną na aparacie jw. bez wstępnej filtracji, hydrolizy i mineralizacji;
- zawartość fosforu ogólnego (P_{og}) – metodą spektrofotometryczną z molibdenem amonu wg ISO 6878-1:1986, mineralizacja kwasem azotowym, aparatem jw.;
- zawartość potasu (K^+) – metodą spektrometrii płomieniowej w roztworze po mineralizacji utleniającej.

Uzyskane wielkości koncentracji (mg substancji w 1 dm³ próbki) oraz znajomość średnich dobowych natężeń przepływów pozwoliły na określenie ładunków poszczególnych związków i substancji chemicznych transportowanych wraz z wodami. Ładunki te obliczano metodą „przepływ – stężenie”.

W ramach zadań badawczych wykonano także aktualną analizę składu granulometrycznego i chemicznego gleb zalegających na obszarze zlewni. Punkty poboru gleb wytypowano, bazując na mapach glebowo-ewidencyjnych oraz sytuacyjno-wysokościowych, tak aby możliwym było szczegółowe przedstawienie warunków pedologicznych zlewni uwzględniających aktualne użytkowanie oraz zmienność warunkowaną ukształtowaniem rzeźby terenu. Lokalizację tych punktów w terenie określono z dokładnością ok. 5 m, za pomocą przenośnego odbiornika GPS. Dane pochodzące z ok. 50 lokacji

stanowiły podstawę do przeprowadzenia analiz przestrzennych i wykonania aktualnych map glebowo-sozologicznych zlewni Mielnicy.

Skład granulometryczny próbek glebowych określano metodą aerometryczną Cassagrande'a w modyfikacji Prószyńskiego. Skład chemiczny oznaczono ze szczególnym zwróceniem uwagi na zawartość form azotu (azot ogólny, azot amonowy, azot azotanowy), fosforu ogólnego i fosforanów oraz potasu. Ponadto określono odczyn gleb i zawartość takich pierwiastków jak Fe, Ca, Mg.

3.5. Badania i wizje terenowe

W całym okresie badawczym dokonywano wyjazdów terenowych. Ich celem były m.in. archiwizacje danych elektronicznych, przeglądy urządzeń pomiarowych, pobory prób wody i gleb, rejestracja form zjawisk erozyjnych itd. Obserwowano działalność rolników, w szczególności dotyczącą sposobów oraz kierunków przeprowadzania zabiegów agrotechnicznych, stosowania nawozów i środków ochrony roślin. Efektem wyjazdów terenowych i laboratoryjnych badań było zebranie materiału stanowiącego podstawę kompleksowej analizy problemów rolniczego wykorzystania środowiska w warunkach degradacji erozją wodną gleb.

4. SYSTEM INFORMACJI GEOGRAFICZNEJ

Podstawę do analiz przestrzennych zlewni potoku Mielnica stanowił Cyfrowy Model Zlewni, składający się z różnych przestrzennych warstw tematycznych, utworzonych poprzez digitalizację i obróbkę cyfrową danych analogowych. Warstwy przestrzenne modelu zlewni podzielono pod względem tematycznym na pięć grup.

Grupa I – warstwy informacji o rzeźbie terenu

Podstawową warstwę Cyfrowego Modelu Terenu utworzono poprzez digitalizację mapy topograficznej w skali 1:10 000 w następujących etapach:

1. skanowanie mapy topograficznej w rozdzielczości 100 dpc (rozdzielczość odpowiadająca wymiarowi liniowemu piksela równemu 1 m) do formatu TIFF;
2. georeferencja skanu do układu '65 w programie ArcView© 3.1 z rozszerzeniem „Image Warp” przy błędzie RMSE=0,86;
3. konwersja odwzorowania z układu 1965 do układu UTM z elipsoidą WGS84 w programie ERDAS Imagine© 8.4;
4. digitalizacja „on-screen” warstw, z cięciem warstwicowym wynoszącym 1,25 m w programie ArcView© 3.1 z rozszerzeniem „Screen Digitize Extension”;
5. uzupełnienie danych o warstwę punktową zawierającą wyniki pomiarów terenowych na obszarach wąwozów i zwartej zabudowy wiejskiej;
6. otrzymanie Cyfrowego Modelu Terenu (DEM) w wyniku interpolacji metodą TOPOGRID [Hutchinson 1989] w programie ARC/INFO© 7.2.1: zasięg interpolacji przyjęto na poziomie 1,25 m, zgodnie z przyjętym cięciem warstw mapy topograficznej;
7. wykonanie mapy spadków poleceniem Surface/Slope w programie ArcView© z rozszerzeniem „Spatial Analyst”;
8. wykonanie mapy wystawy stoków poleceniem Surface/Aspect w programie ArcView©;
9. wykonanie mapy krzywizny stoków za pomocą rozszerzenia „SWAT” w programie ArcView© 3.1.

Przyjęto spójną, jednakową dla wszystkich warstw typu „grid” rozdzielczość równą 10 m.

Grupa II – warstwy informacji o pokrywie glebowej

Utworzono warstwę wektorową – poligonową opracowaną w oparciu o archiwalną mapę glebowo-rolniczą w skali 1:5000 oraz uzupełniające badania terenowe. Zadanie to wykonano w następujących etapach:

1. skanowanie do formatu TIFF mapy glebowej w skali 1:5000 w rozdzielczości rastra wynoszącej 1 m;

2. georeferencja skanu mapy glebowej w programie ArcView© 3.1 z rozszerzeniem „Image Warp”;
3. digitalizacja „on-screen” konturów glebowych do poligonowej warstwy wektorowej z dołączoną bazą danych informacji o typach i gatunkach oraz kompleksach przydatności rolniczej gleb;
4. uzupełnienie bazy danych informacji przestrzennej o zmienne wejściowe do modeli cyfrowych uzyskane z analiz laboratoryjnych próbek poszczególnych gatunków gleb pobranych w terenie, w punktach określonych za pomocą odbiornika GPS [Józefaciuk i in. 2002; Wawer, Nowocień 2003]. Bazę danych uzupełniono na tym etapie badań o parametry: składu granulometrycznego gleb, zawartość węgla organicznego oraz parametry gęstości, szorstkości i stopnia pokrycia roślinnością, a także odporności gleb na erozję [Józefaciuk Cz., Józefaciuk A. 1996, 1999; Neitsch i in. 2001].

Grupa III – warstwa informacji o użytkowaniu terenu

Użytkowanie terenu opracowano na podstawie ortofotomapy otrzymanej poprzez ortorektyfikację sceny satelitarnej IKONOS z 2001 roku. Ostateczną warstwę wektorową otrzymano poprzez:

1. pomiary terenowe punktów charakterystycznych za pomocą odbiornika GPS [Asch 1999; Bertelme 1995; Wawer 2003]. Czas każdego pomiaru wynosił 10 min, co pozwoliło osiągnąć dokładność rzędu 50 cm;
2. ortorektyfikację sceny satelitarnej w programie ERDAS Imagine© 8.4 OrthoBase przy następujących ustawieniach parametrów ortorektyfikacji:
 0. rodzaj sensora – Frame Wild Camera;
 1. liczba punktów orientacji wewnętrznej – 4;
 2. odwzorowanie – UTM z elipsoidą WGS 84;
 3. całkowity błąd RMSE – 0.341;
 4. rozdzielczość wyjściowa ortofotomapy – 1 m;
3. klasyfikację nadzorowaną ortofotomapy w programie ERDAS Imagine© 8.4 Classifier z wyszczególnieniem 5 klas użytkowania: ornego, leśnego, użytków zielonych, sadowniczego i zabudowy zwartej;
4. konwersję wyniku klasyfikacji do formatu wektorowego w programie ERDAS Imagine© 8.4 Import;
5. uzupełnienie bazy danych o użytkowaniu terenu o zmienne wejściowe do modeli cyfrowych, uzyskane z zestawień tabelarycznych zamieszczonych w literaturze naukowej [Neitsch i in. 2001, Schmidt 2000], m.in: szorstkość wg Manninga oraz stopień pokrycia roślinnością.

Dane o użytkowaniu terenu weryfikowano w oparciu o informację przestrzenną pochodzącą z europejskiego systemu CORINE oraz na podstawie bezpośrednich wizji i obserwacji terenowych. Do klasyfikacji terenowej wykorzystano klucz CLC (tab. 1).

Tabela 1
Table 1

Oznaczenie klas użytkowania terenu wg standardu CORINE
Corine land cover classes

Klasy użytkowania CLC2000 – Corine land cover classes			
Nr	Poziom1 – Level 1	Poziom 2 – Level 2	Poziom 3 – Level 3
111	Obszary antropogeniczne Artificial surfaces	Zabudowa zwarta Urban fabric	Ciągła – Continuous
112			Nieciągła – Discontinuous
121		Tereny przemysłowe, komunikacja Industrial, commercial and transport units	Przemysł, komercja Industrial and commercial units
122			Drogi, torowiska – Road and rail networks and assoc. land
123			Port – Port areas
124			Lotniska – Airports
131		Kopalnie, budowy Mine, dump and construction sites	Kopalnie – Mineral extraction sites
132			Składowiska – Dump sites
133			Budowy – Construction sites
141		Sztuczne, nierolne tereny zielone Artificial non-agricultural vegetated areas	Miejskie tereny zielone Green urban areas
142	Sport i rekreacja – Sport and leisure facilities		
211	Obszary rolnicze Agricultural areas	Użytki rolne Arable land	Użytki rolne – Arable land
222		Uprawy trwałe Permanent crops	Sady i uprawy rzędowe Fruit trees and berry plantations
231		Pastwiska – Pastures	Pastwiska – Pastures
242		Urozmaicone tereny rolnicze Heterogeneous agricultural areas	Złożone struktury uprawowe Complex cultivation patterns
243			Teren użytkowany rolniczo z dużym udziałem roślinności naturalnej Land principally occupied by agriculture with significant areas of natural vegetation

Tabela 1 cd.
Table 1 cont.

Klasy użytkowania CLC2000 – Corine land cover classes			
Nr	Poziom 1 – Level 1	Poziom 2 – Level 2	Poziom 3 – Level 3
311	Obszary leśne i półnaturalne	Lasy Forests	Liściaste – Broad-leaved forest
312			Iglaste – Coniferous forest
313			Mieszane – Mixed forest
321	Forests and semi-natural areas	Krzewy i rośliny zielne Shrub and herbaceous vegetation associations	Naturalne użytki zielone Natural grassland
322			Torfowiska – Moors and heathland
324			Ekotony lasów Transitional woodland scrub
331			Przestrzeń otwarta, rzadko porośnięta lub nieporośnięta roślinnością Open spaces with little or no vegetation
332	Nagie skały – Bare rock		
333	Rzadko porośnięte tereny Sparsely vegetated areas		
334	Pogorzeliska – Burnt areas		
411 –523	Bagna i wody śródlądowe – Wetlands and water bodies		

Grupa IV – warstwa informacji o sieci komunikacyjnej

Warstwę otrzymano poprzez:

1. digitalizację „on-screen” [Adam, Gangopadhyay 1998; Asch 1999; Bertelme 1995; Wawer 2003] sieci drogowej z mapy topograficznej w skali 1:10000 w programie ArcView© 3.1 z podziałem na poszczególne klasy użyteczności dróg;
2. uzupełnienie bazy danych o informację o azymutach międzywęzłowych odcinków dróg z przedziałami co 45°, licząc od kierunku północy [Wawer 2004].

Grupa V – warstwa informacji o kierunkach uprawy działek

Kierunki uprawy działek otrzymano w wyniku digitalizacji głównych geograficznych kierunków uprawy z mapy topograficznej w skali 1:10 000, weryfikowanych w terenie i na podstawie interpretacji aktualnych fotogramów lotniczych [Józefaciuk i in. 2002, Wawer 2003].

Dzięki zbudowaniu zintegrowanego systemu informacji geograficznej dla zlewni Mielnicy możliwe było przeprowadzenie przestrzennych analiz hydrograficznych, oceny aktualnego stanu sieci komunikacyjnej oraz oszacowanie stopnia zagrożenia erozją wodną gleb.

Analizę sieci hydrograficznej zlewni Mielnicy przeprowadzono w programie Watershed Modeling System (WMS) w wersji 6.1. Analizę oparto na Cyfrowym Modelu Terenu (DEM) wyeksportowanym z ArcView© 3.1 poleceniem File/Export Data Source/ASCII Grid do formatu ASCII akceptowanego przez WMS. Analiza w programie WMS przebiegała w następującej kolejności etapach:

1. import Cyfrowego Modelu Terenu (DEM) w formacie ASCII;
2. analiza kierunków i akumulacji spływu poleceniem Drainage/Compute TOPAZ Flow Data w module DEM;
3. wybór punktu wylotowego zlewni w odwzorowaniu UTM WGS84; współrzędne punktu wylotowego ustalono na cieku głównym w oparciu o fotogram lotniczy i pomiary bezpośrednie GPS, a przekrój zamykający zlewnię pokrywał się z przekrojem przyjętym w dotychczasowych badaniach monitoringowych prowadzonych na tym obszarze;
4. wyznaczenie sieci hydrograficznej poleceniem Drainage/DEM>Stream Arcs z założonym progiem minimalnej wielkości mikrozwlewni, równym 20 ha;
5. utworzenie warstwy zawierającej kontury zlewni poleceniem Drainage/DefineBasins oraz Drainage/Basins>Polygons;
6. obliczenie parametrów geometrycznych zlewni poleceniem Drainage/Compute Basin Data;
7. wyeksportowanie otrzymanych warstw do formatu ArcView© poleceniem File/Sxport/Feature Poligons dla poligonowej warstwy konturów zlewni oraz poleceniem File/Export/Line Features dla liniowej warstwy sieci hydrograficznej.

Analiza układu działek i dróg rolniczych oraz ocena pilności utwardzania nawierzchni i urządzeń odwadniających dróg gruntowych opierała się na opracowaniu wartości 2 wskaźników: wskaźnika układu dróg rolniczych w rzeźbie terenu – IARRR oraz wskaźnika pilności utwardzania nawierzchni i umacniania urządzeń odwadniania powierzchniowego dróg rolniczych o nawierzchni gruntowej – UHRR [Wawer 2004].

Badania prowadzone w ramach niniejszej pracy obejmowały również ocenę uwarunkowań antropogenicznych wpływających na nasilenie erozji, jakościową analizę erozji wodnej powierzchniowej [Józefaciuk Cz., Józefaciuk A. 1996, 1999; Neitsch i in. 2001] oraz ilościową ocenę aktualnej erozji wodnej powierzchniowej [Nowocień, Wawer 2002]. Analizy jakościowej erozji wodnej powierzchniowej dokonano na podstawie macierzy wskaźników opracowanych przez Józefaciuków [1999]. Wszystkie analizy wykonano w środowisku ArcView© GIS 3.2 w oparciu o warstwy informacji przestrzennej Cyfrowego Modelu Zlewni Mielnicy.

Główne cele pracy zostały osiągnięte dzięki prognozowaniu środowiskowemu z wykorzystaniem modelu SWAT (Soil and Water Assesment Tool). Modelowanie pozwoliło na symulację efektów zabiegów ochronnych oraz ocenę ich zakresu, koniecznego dla utrzymania odpowiednich standardów ochrony środowiska rolniczego. Spośród wielu dostępnych modeli, po wstępnym rozpoznaniu teoretycznym i aplikacyjnym, wybrano model SWAT – ze względu na poprawność podstaw teoretycznych, stosunkowo dużą liczbę przeprowadzonych na świecie symulacji, przejrzysty interfejs użytkownika, łatwo mierzalne dane wejściowe oraz małe wymagania sprzętowe.

5. CHARAKTERYSTYKA GEOGRAFICZNA ZLEWNI BADAWCZEJ

Geograficzna lokalizacja obiektu pozwala już na samym wstępie prowadzenia rozpoznania zagrożenia terenu zjawiskami erozyjnymi wskazać nam co najmniej, z jakim rodzajem erozji będziemy mieli głównie do czynienia. Związane z położeniem geograficznym warunki klimatyczne, morfogenetyczne, pedologiczne, fizjograficzne i inne znajdują swoje odzwierciedlenie w działaniach antropogenicznych, w tym przydatności danego obszaru dla celów rolniczych. Występujący w minionych wiekach „głód ziemi” doprowadził do zajęcia pod uprawy płuźne terenów, które ze swojej natury powinny być zajęte przez lasy lub inne użytki zielone. Ekspansywna działalność rolnicza spowodowała przekształcenie naturalnych ekosystemów w często wielkoobszarowe uprawy monokulturowe, a urbanizacja, rozwój przemysłu i inne dziedziny życia człowieka przyczyniły się do zachwiania naturalnej równowagi ekologicznej, w tym przyspieszenia procesu erozji gleb.

5.1. Położenie geograficzne

Badania prowadzono na obszarze Wzgórz Trzebnickich rozciągających się na północ od Wrocławia. Są one częścią samodzielnej jednostki fizjograficznej, Wału Trzebnickiego, potocznie zwanego Kocimi Górami. Formacja ta leżąca w obrębie jednostki tektonicznej Monoklina Przedsudecka zaliczana jest do pasa Nizin Środkowopolskich i stanowi północne zamknięcie Niziny Śląskiej. Łagodne nachylenie stoków powoduje, że w krajobrazie na całej swej rozciągłości nie wszędzie dość wyraźnie się odznacza. Wzgórze Trzebnickie stanowią najwyższą część Wału charakteryzującą się zróżnicowanym ukształtowaniem rzeźby terenu (fot. 1 i 2).

Wzgórze Trzebnickie rozciągają się na północ od Wrocławia – od Wińska przez Strupinę, Oborniki Śląskie, Trzebnicę, Skarszyn, Niedary do Twardogóry. Jako mezoregion Wału Trzebnickiego tworzą równoleżnikowy pas (długi ok. 50 km i szerokości 5–10 km) stanowiący południową granicę Kotliny Żmigrodzkiej, od zachodu przylegają do Obniżenia Ścinawskiego, od wschodu do Wzgórz Twardogórskich – stanowiących ich przedłużenie, a od południa sąsiadują z Równiną Oleśnicką. Najwyższym wzniesieniem Wzgórz Trzebnickich, a zarazem całego Wału, jest Ciemna Góra osiągająca wysokość 258,3 m n.p.m. Wysokości względne w tym regionie wahają się od 80 do 120 m. Z najwyższych wzniesień można podziwiać rozległe, malownicze pejzaże Pradoliny Baryczy, a przy dobrej widoczności nawet Gór Sowich, Bardzkich, masyw Ślęży oraz Karkonosze ze szczytem Śnieżki.



Fot. 1. Panorama zlewni Mielnicy – widok w kierunku południowym (fot. Sz. Szewrański)
Phot. 1. Mielnica catchment panorama view over south side



Fot. 2. Panorama zlewni Mielnicy – widok w kierunku wsi Boleścín (fot. Sz. Szewrański)
Phot. 2. Mielnica catchment panorama view over Boleścín village

Najpiękniejszy fragment tej formacji, o dużych walorach przyrodniczo-krajobrazowych, rozciąga się między Trzebnicą a Obornikami Śląskimi. Występują tu liczne wąwozy, doliny, jary i parowy, o różnym stopniu dojrzałości, świadczące o procesach erozyjnych zachodzących na tym obszarze. Na 276 km², jakie przypadają pod Wzgórza Trzebnickie, średnia gęstość sieci wąwozowej wynosi 0,184 km·km⁻². Najsilniej porożciniane siecią wąwozową są południowe stoki, w okolicach Skarszyna, gdzie wskaźnik gęstości dochodzi do 5 km·km⁻² [Jary, Kida 2002]. Wartości te dowodzą, że gęstość sieci wąwozowej w tym rejonie jest porównywalna ze wskaźnikami dla Roztocza Gorajskiego i Płaskowyżu Nałęczowskiego, regionami uznawanymi za najbardziej rozczłonkowane przez wąwozy obszary Polski pokryte glebami lessowymi [Buraczyński 1990]. Jednakże erozja wąwozowa w stopniu bardzo silnym występuje tu zaledwie na ok. 1,1% powierzchni, a najczęściej w stopniu umiarkowanym (27,9% obszaru). Badania na obszarach lessowych Dolnego Śląska prowadzone przez pracowników Uniwersytetu Wrocławskiego wykazują, że współcześnie występujące procesy erozyjne na tym terenie to zasadniczo zjawiska erozji wodnej powierzchniowej, przeciwnie niż na terenach lessowych centralnej i wschodniej Polski [Cegła 1972, Jary 1991, Kida 1996].

Wytypowana do badań zlewnia cieką Mielnica położona jest na południowych krańcach Wzgórz. Powierzchnia całkowita zlewni, wyznaczona metodami GIS, wynosi 659,40 ha. Swoim zasięgiem obejmuje ona grunty sołectw: Bolescin, Głuchów Górny i Dolny, Radłów, Skotniki, Piersno i Krakowiany. Administracyjnie obiekt badawczy zlokalizowany jest w granicach województwa dolnośląskiego, w powiecie trzebnickim, w gminach Trzebnica i Zawonia (rys. 1 i 2).

5.2. Warunki klimatyczne

Na podstawie regionalizacji klimatycznej obszaru Polski wg Romera – Wzgórza Trzebnickie można zaliczyć do regionu klimatycznego kotlin i nizin podgórskich. Charakteryzuje się on klimatem stosunkowo łagodnym, o najkrótszej zimie i najdłuższym lecie w kraju. W związku z tym również i okres wegetacyjny trwa najdłużej w Polsce. Opady są mniejsze, lecz na ogół korzystnie rozłożone w czasie. Od początku maja do końca sierpnia na obszarze Wzgórz Trzebnickich panuje agroklimat umiarkowanie wilgotny, umiarkowanie ciepły i umiarkowanie słoneczny. W półroczu zimowym obszar Wzgórz wyraźnie odróżnia się od reszty regionu jako cieplejszy.

Roczne sumy opadów wahają się od 650 do 800 mm. Średnia liczba dni z opadem powyżej 0,1 mm waha się od 140 do 160 rocznie. Średnia roczna temperatura powietrza wynosi ok. 8°C, a długość okresu z temperaturami przekraczającymi 0°C liczy średnio od 290 do 310 dni rocznie. Termiczna zima (dni ze średnimi temperaturami poniżej 0°C) średnio rozpoczyna się pod koniec grudnia i trwa do końca lutego. W okolicach Wrocławia, od którego Wzgórza Trzebnickie oddalone są zaledwie o ok. 20 km, w okresie od kwietnia do października występują średnio 3,52 dni z opadem ponad 20 mm, 1,97 dnia z opadem ponad 25 mm i 1,29 dnia z opadem ponad 30 mm. Burze atmosferyczne średnio występują w ciągu 20,1 dni w okresie letnim (IV–X).



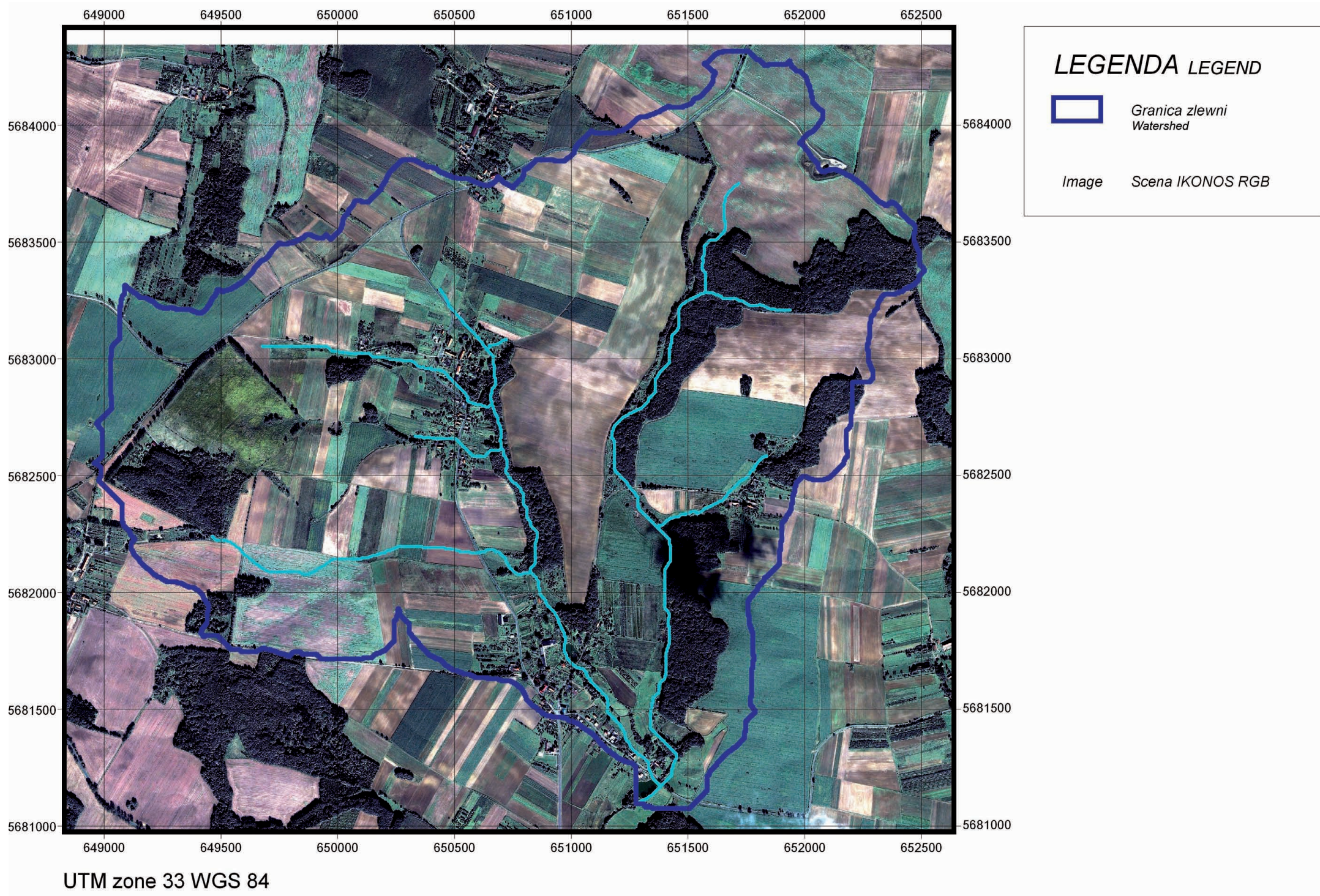
Rys. 1. Mapa poglądowa lokalizacji zlewni Mielnicy
Fig. 1. Mielnica catchment location map

5.3. Podłoże geologiczne (morfogeneza)

Pod względem geologiczno-strukturalnym Wzgórza Trzebnickie położone są w obrębie monokliny przedsudeckiej. Obszar ten był kształtowany przez ruchy górotwórcze i działalność lodolodu, kilkakrotnie wkraczało tu morze. Cechą charakterystyczną monokliny są liczne serie przedtrzeciorzędowych skał osadowych (głównie perm i trias). Budowa geologiczna Wzgórz Trzebnickich zasadniczo zdominowana jest przez utwory trzecio- i czwartorzędowe. Utwory powierzchniowe to głównie osady czwartorzędowe, takie jak: lessy, gliny glacialne i osady fluwioglacjalne.

Obecna rzeźba obszaru przedsudeckiego ukształtowała się prawie wyłącznie w czwartorzędzie. Następujące po sobie plejstoceńskie glacjały i interglacjały wywarły największy wpływ na rozwój monokliny przedsudeckiej. Dzisiejszy wygląd Wzgórz Trzebnickich jest wynikiem zmian, jakie miały miejsce w stadiale Warty zlodowacenia środkowopolskiego. W czasie tego zlodowacenia moreny końcowe pokryły czołowe moreny spiętrzone Wału Trzebnickiego i wyciśnięte glacitektonicznie wzniesienia osadów trzeciorzędowych. W późniejszych okresach (interglacjal eemski i ostatnie zlodowacenie bałtyckie), w wyniku procesów denudacji peryglacjalnej, pierwotna rzeźba monokliny przedsudeckiej została znacznie złagodzona.

Niezwykle istotnym procesem rzeźbotwórczym ostatniego zlodowacenia była akumulacja eoliczno-denudacyjna lessów na obszarze przedsudeckim. Lessy są najmłodszym osadem plejstoceńskim Wzgórz Trzebnickich. Utwory tego okresu pokrywają Wzgórza Trzebnickie, a w szczególności południowe ich stoki oraz duże obszary Równiny Wrocławskiej, Przedgórze Sudeckiego i przedpoła Sudetów Wschodnich, tworząc miejscami charakterystyczne wyżynne krajobrazy lessowe. Północna i południowa granica lessów trzebnickich biegnie niemal prostolinijnie i równoległe do siebie, przy czym krawędź południowa praktycznie pokrywa się z morfologiczną granicą Wzgórz. Krawędź północna nie zaznacza się wyraźnie w morfologii terenu [Jary 1996, Szponar 1998, Walczak 1970, Winnicki 1991, 1994]. Lessy te zbudowane z lessów dolnych, środkowych i górnych vistulańskich zalegają w łącznej warstwie od 3÷5 do nawet 25 metrów. W Boleścinie miąższość osadu szacuje się na ok. 10,2 m. Utwory pyłowe Wzgórz występują głównie w położeniu stokowym, o czym świadczą liczne smugowania i laminacje. Ich znaczna miąższość związana jest z przemieszczaniem materiału pylastego w wyniku soliflukcji i zmywów powierzchniowych (fot. 3). Gleby te na terenie Polski występują na południu kraju, głównie w okolicach Lublina, Rzeszowa, Kielc, Krakowa, Głubczyc i Wrocławia, tworząc nieciągłą pokrywę o zróżnicowanej miąższości [Cegła 1972]. Ich występowanie można podzielić na pięć zasadniczych regionów: lubelski, sandomierski i krakowski (w pasie wyżyn południowopolskich) oraz karpacki i sudecki (w pasie przedgórzy i pogórzy) [Maruszczak 1991].



Rys. 2. Mapa satelitarna zlewni Mielnicy [Satelitarnie Centrum Operacji Regionalnych SA 2004]
 Fig. 2. Satellite scene of Mielnica catchment



Fot. 3. Przykład zjawisk erozyjnych na obszarze zlewni Mielnicy (fot. R. Żmuda)
Phot. 3. Example of water erosion in Mielnica catchment

5.4. Ukształtowanie powierzchni zlewni

Zlewnia Mielnicy wznosi się między rzędnymi 169,38 m n.p.m. a 246,10 m n.p.m. Obszar źródłowy ciek Mielnica znajduje się na wysokości 218,10 m n.p.m. Średnia wysokość zlewni wynosi 208,70 m n.p.m, a średni jej spadek 2,9%. Ukształtowanie powierzchni zlewni Mielnicy przedstawiono w postaci mapy hipsometrycznej (rys. 3) oraz modelu 3D (rys. 4) zbudowanego w oparciu o Cyfrowy Model Terenu DEM, opracowany w ramach niniejszej pracy.

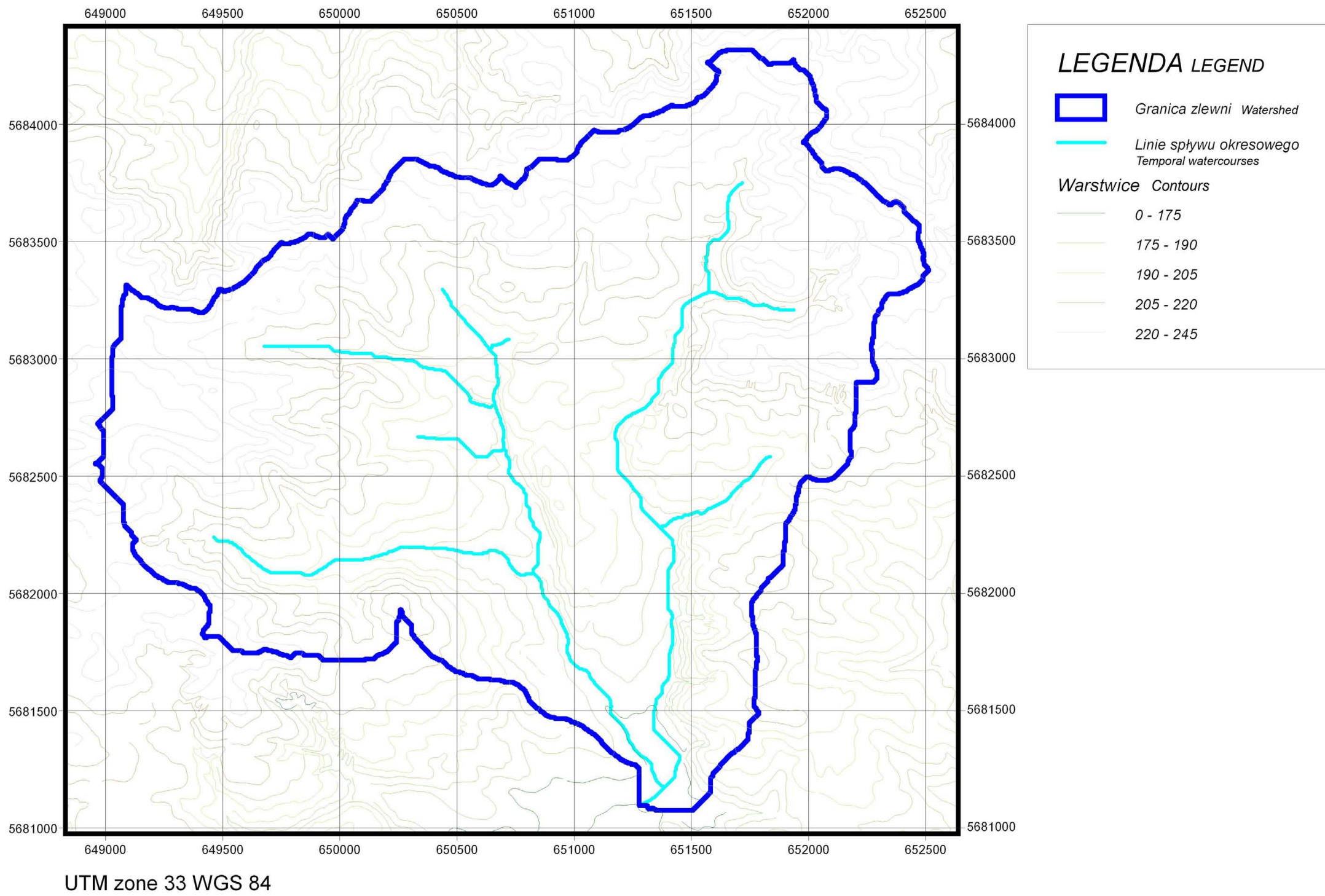
Na podstawie mapy sytuacyjno-wysokościowej w skali 1:10 000 oraz cyfrowego modelu terenu wyznaczono powierzchnie o jednakowych nachyleniach w pięciu przedziałach spadków (rys. 5). Podział taki jest zalecany przy określaniu zagrożeń erozyjnych obszarów lessowych. Udział poszczególnych klas w całkowitej powierzchni zlewni przedstawiono w tabeli 2. Z przedstawionych w niej danych wynika, że najwięcej jest obszarów o nachyleniach zboczy 3–6% – zajmują one ok. 40% całej powierzchni zlewni. Drugim co do wielkości zasięgu jest przedział spadków 0–3% – przypada na niego ok. 33% ogólnej powierzchni. Równie wysoki udział mają spadki w przedziale 6–10%, które zajmują ok. 17% areалу. Na spadki największe (powyżej 15%) przypada najmniejszy odsetek zajmowanej powierzchni całkowitej, bo nieco powyżej 5%. Ocena zjawisk erozyjnych wymaga ustalenia przestrzennego rozkładu terenów zajętych przez poszczególne klasy spadków. Spadki o najwyższych nachyleniach występują wzdłuż wschodniej granicy zlewni oraz w środkowej i zachodniej części obiektu badawczego. Rejony o najmniejszych nachyleniach są nieregularnie porzucane i dominują głównie na wierzchołkach wzniesień oraz w obniżeniach terenowych.

Tabela 2
Table 2

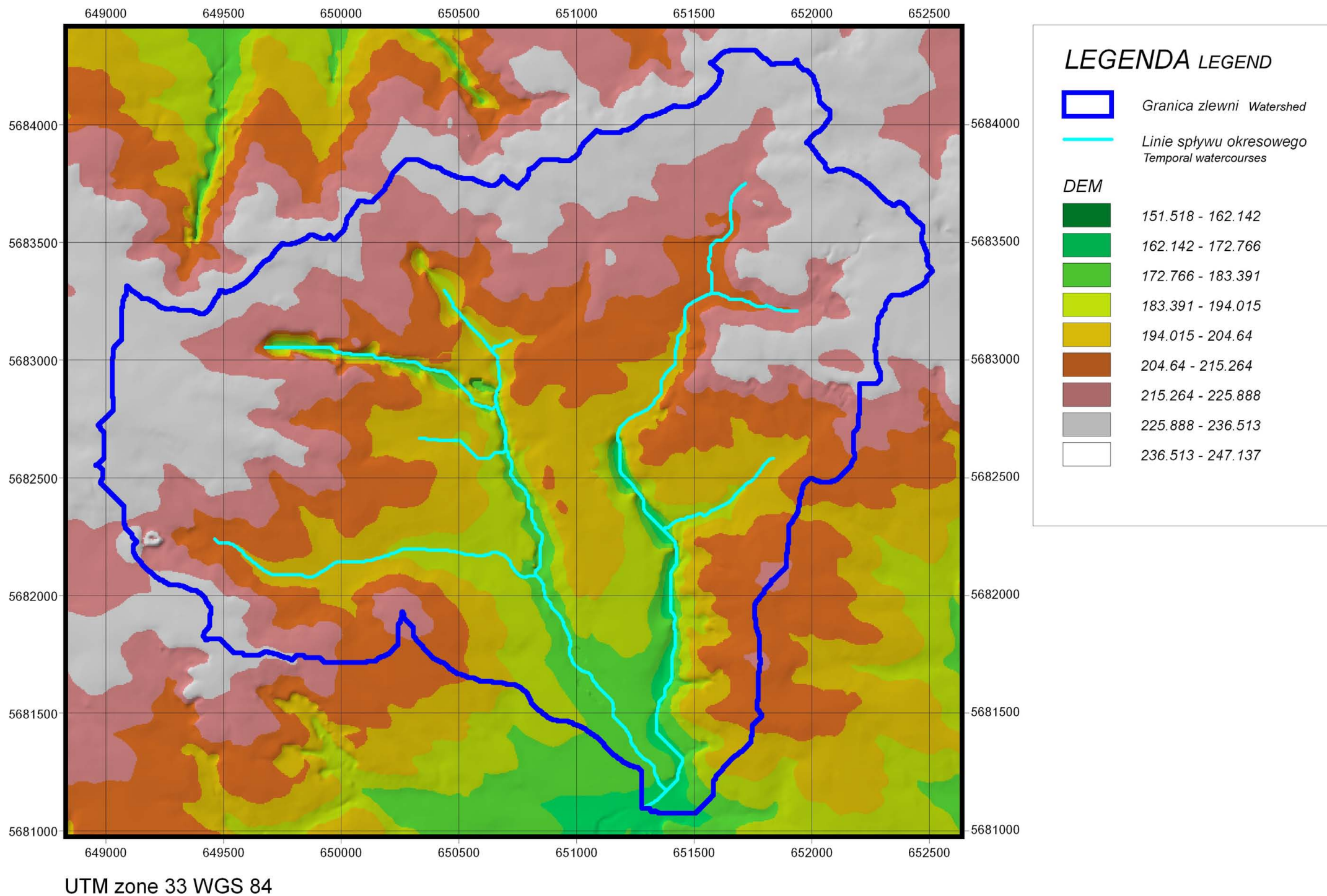
Obszary zlewni ciekii Mielnica zajęte przez poszczególne klasy spadków, opracowane na podstawie analiz GIS
Areas of different slope classes in Mielnica catchment calculated with GIS analyses

Klasy spadków Slope classes [%]	Powierzchnia – Area	
	[ha]	[%]
0–3	213,95	32,45
3–6	258,12	39,14
6–10	111,05	16,84
10–15	41,90	6,35
>15	34,38	5,21
Razem – Total:	659,40	100,00

W latach 2002–2004 Żmuda [2006], prowadząc badania erozyjne zachodzące w środowisku stokowym, dokonał rozpoznania ukształtowania stoku użytkowanego jako gruntu ornego. Ten sposób użytkowania przeważa na Wzgórzach Trzebnickich, a szczególnie na jego południowych krańcach. Przeprowadzone pomiary z użyciem aparatury geodezyjnej i GPS oraz opracowany na podstawie tych pomiarów profil stoku wykazały, że jego prostoliniowy kształt jest jednym ze świadectw aktywności erozyjnej stoków Wzgórz. Całkowita długość stoku wynosiła 177 m (stok krótki), a przy różnicy wysokości 11,91 m daje średnie jego nachylenie wynoszące 6,7% (umiarkowanie nachylenia). Większość stoków na tym obszarze obrazuje powyższa charakterystyka. Przejście z wierzchowiny w zbocze, w analizowanym przypadku, następuje w gwałtowny sposób. Lokalne deniwelacje terenowe wskazują również, że procesy erozji wodnej zachodzą tutaj z różną intensywnością. Górna partia stoku to strefa inicjacji spływu powierzchniowego. W trakcie prowadzenia badań stwierdzano w tej części objawy początków zmywów powierzchniowych oraz drobnych żłobin, nieprzekraczających głębokości ok. 1–3 cm. W strefie środkowej, w przypadku zaistnienia sprzyjających warunków, procesy erozyjne zachodzą już intensywnie. Następuje tam koncentracja spływu, a żłobiny przybierają głębokości dochodzące do 20 cm. W dolnej strefie stoku następuje akumulacja zmywanego materiału, ale podstawa erozyjna zlokalizowana dodatkowo na linii koncentracji spływu z podnóża okolicznych zboczy powoduje, że w miejscu tym często tworzą się głębokie żłobiny (nawet do ok. 80 cm). Ślady budowli melioracyjnych na tej linii spływu w dnie doliny pozwalają przypuszczać, że właśnie tutaj w minionych czasach umiejscowiona była tzw. sucha dolina. Charakter jej użytkowania został całkowicie zmieniony na grunty orne, a linia prowadzenia zabiegów agrotechnicznych doprowadzona została do samego dna. Zachodzące w tej części stoku procesy erozji liniowej, a także nieprofesjonalnie prowadzone przez właściciela gruntu zabiegi naprawcze dają początek tworzeniu się zbocza wklęsłego.



Rys. 3. Mapa hipsometryczna zlewni Mielnicy
 Fig. 3. Hypsometric map of Mielnica catchment



Rys. 4. Model 3D ukształtowania terenu zlewni Mielnicy
 Fig. 4. Elevation 3D model of Mielnica catchment

5.5. System hydrograficzny zlewni

Ciek główny (fot. 4.) do przekroju zamykającego ma długość ok. 3100 m. Długość zlewni wzdłuż najdłuższej drogi spływu wód powierzchniowych wynosi ok. 3700 m. Średnia szerokość zlewni wynosi 1,44 km. Współczynnik rozwinięcia działu wód, zwany także wskaźnikiem zwartości zlewni, osiąga wartość ok. 1,4. Gęstość sieci hydrograficznej wynosząca $0,84 \text{ km} \cdot \text{km}^{-2}$ świadczy o bardzo silnym nasileniu erozji wodnej gleb. Mała powierzchnia zlewni, niewielki stopień zalesienia, duże spadki, gęsta sieć dróg i wąwozów są czynnikami przyspieszającymi odpływ wody ze zlewni. Szczególnie w okresie letnim pojawiają się wywołane burzami spływy powierzchniowe i związane z tym gwałtowne i krótkotrwałe wezbrania. Sieć hydrograficzna zlewni została zilustrowana na rysunku 6.

W obrębie zlewni zlokalizowane są dwa zbiorniki wodne. Pierwszy z nich pełni funkcję stawu przypałacowego i jest praktycznie zbiornikiem przepływowym. W drugim prowadzony jest intensywny chów karpia, a gospodarka wodna związana jest z cyklem hodowlanym. Zrzuty wody ze zbiornika występują w różnych terminach i nie wynikają tylko z gospodarki wodnej stawu. Obserwacje terenowe wykazały, iż po okresie większych opadów właściciel, chcąc uniknąć prac konserwacyjnych (związanych z utrzymaniem odpowiedniej głębokości), dokonuje gwałtownych częściowych zrzutów wody. W efekcie tych zabiegów uruchomione osady denne trafiają bezpośrednio do cieku i znacznie go zanieczyszczają. Rola tych zbiorników wodnych w odprowadzaniu rumowiska oraz określaniu denudacji jednostkowej była przedmiotem pracy Szewrańskiego [2002] oraz Szewrańskiego i zespołu [2002a].



Fot. 4. Koryto cieku Mielnica na obszarze leśnym (fot. Sz. Szewrański)
Phot. 4. Mielnica stream bed in forest section

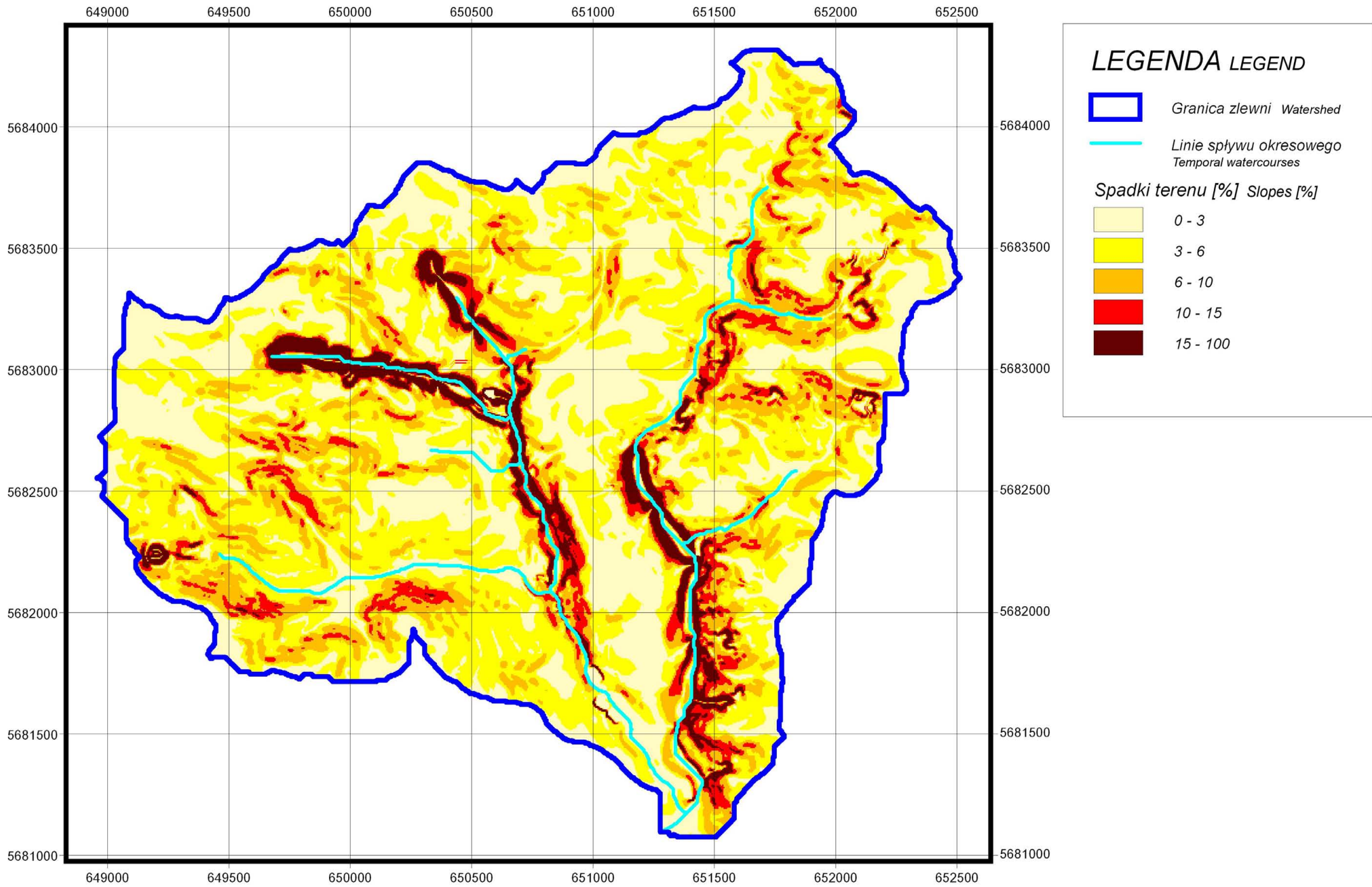
W trakcie prowadzenia badań zaobserwowano również znaczną degradację techniczną koryta cieku Mielnica. Między innymi są to nielegalnie ustawione „przegrody” na cieku. Wpływają one na warunki wodne terenów przyległych i warunki przepływu wód korytem cieku (fot. 5). Również dzikie wysypiska odpadów i inne zanieczyszczenia psują estetykę tego koryta, a także wpływają na warunki wodne oraz jakość wody (fot. 6).



Fot. 5. Nielegalna zabudowa koryta Mielnicy przypadkowym materiałem (fot. Sz. Szewrański)
Phot. 5. Illegal damming construction in Milenica stream bed



Fot. 6. Koryto Mielnicy zanieczyszczone odpadami bytowymi (fot. Sz. Szewrański)
Phot. 6. Mielnica stream bed contaminated by household wastes



UTM zone 33 WGS 84

Rys. 5. Mapa spadków w zlewni Mielnicy
 Fig. 5. Slope map of Mielnica catchment

6. ZASOBY GLEBOWE ZLEWNI MIELNICY

6.1. Typy, gatunki gleb – ich wybrane cechy fizyko-wodne i chemiczne

Gleby zlewni Mielnicy zostały przedstawione na podstawie archiwalnych danych kartograficznych oraz wykonanych przez autorów analiz składu granulometrycznego próbek glebowych. Przeanalizowano również zawartość wybranych składników chemicznych w wierzchnich warstwach gleb zalegających na obszarze zlewni. Na podstawie uzyskanych w trakcie badań danych przestrzennych sporządzono nowe mapy glebowe obiektu oraz mapy zawartości składników chemicznych w glebie.

Gleby obszaru zlewni Mielnicy przedstawiono w postaci typów i gatunków zgodnie z systematyką gleb Polski. Prezentowane informacje stanowią najbardziej aktualny stan wiedzy na temat okrywy glebowej badanego obszaru. Weryfikacja dotychczasowych danych możliwa była dzięki zastosowaniu najnowszych technik pomiarowych GPS i analiz GIS. Całokształt procesów glebotwórczych zachodzących na badanym obszarze przedstawia mapa typów gleb w zlewni ciek Mielnica (rys. 7). Powierzchnie zajęte przez poszczególne typy zostały przedstawione w tabeli 3.

Tabela 3
Table 3

Typy gleb w zlewni Mielnicy – opracowanie GIS 2007
Soil types in Mielnica catchment – GIS 2007

Typy gleb; Soil type		Powierzchnia; Area	
		[ha]	[%]
A	Gleby biellicowe i pseudobiellicowe Podsolich and pseudopodsolic soils	47,29	7,17
B	Gleby brunatne właściwe – Specific brown soils	32,59	4,94
Bd	Gleby deluwialne brunatne – Diluvial brown soils	19,22	2,91
Bw	Gleby brunatne wylugowane i brunatne kwaśne Leached and acidic brown soils	447,51	67,87
Bwd	Gleby deluwialne brunatne wylugowane Diluvial leached brown soils	65,40	9,92
Dz	Czarne ziemie zdegradowane – Degraded Black-earth	4,62	0,70
F	Mady – Alluvial soil	18,67	2,83
	Tereny zabudowane – Built up area	24,09	3,65
	Razem – Total:	659,40	100,00

Zlewnia cieką Mielnica jest bardzo słabo zróżnicowana pod względem typologicznym. Największy udział przypada na gleby brunatne, zajmujące ok. 85% powierzchni całkowitej. Wśród nich największy odsetek (ok. 78%) stanowią gleby brunatne wylugowane, a gleby brunatne właściwe – w przybliżeniu tylko 5%. Pierwsze z nich pokrywają praktycznie cały obszar zlewni, natomiast drugie rozmieszczone są głównie w północno-wschodniej części oraz w niewielkiej enklawie po stronie zachodniej. Pozostałe typy gleb zajmują tylko niewielkie powierzchnie, nieregularnie porozrzucane na obszarze zlewni. Spośród nich na gleby bielcowe przypada ok. 7% powierzchni w enklawach środkowej i północno-wschodniej części zlewni oraz 0,7% na czarne ziemie zdegradowane leżące w części środkowej. Mady (ok. 3%) zlokalizowane są na południu zlewni wzdłuż dolnego odcinka cieką Mielnica.

Również pod względem gatunkowym prawie cały obszar zlewni jest jednorodny i pokrywa go w zasadzie jeden gatunek gleb. Ilustruje to przedstawiona na rysunku 8 mapa gatunków gleb w zlewni Mielnicy. W tabeli 4 zestawiono powierzchnie pod poszczególnymi gatunkami gleb.

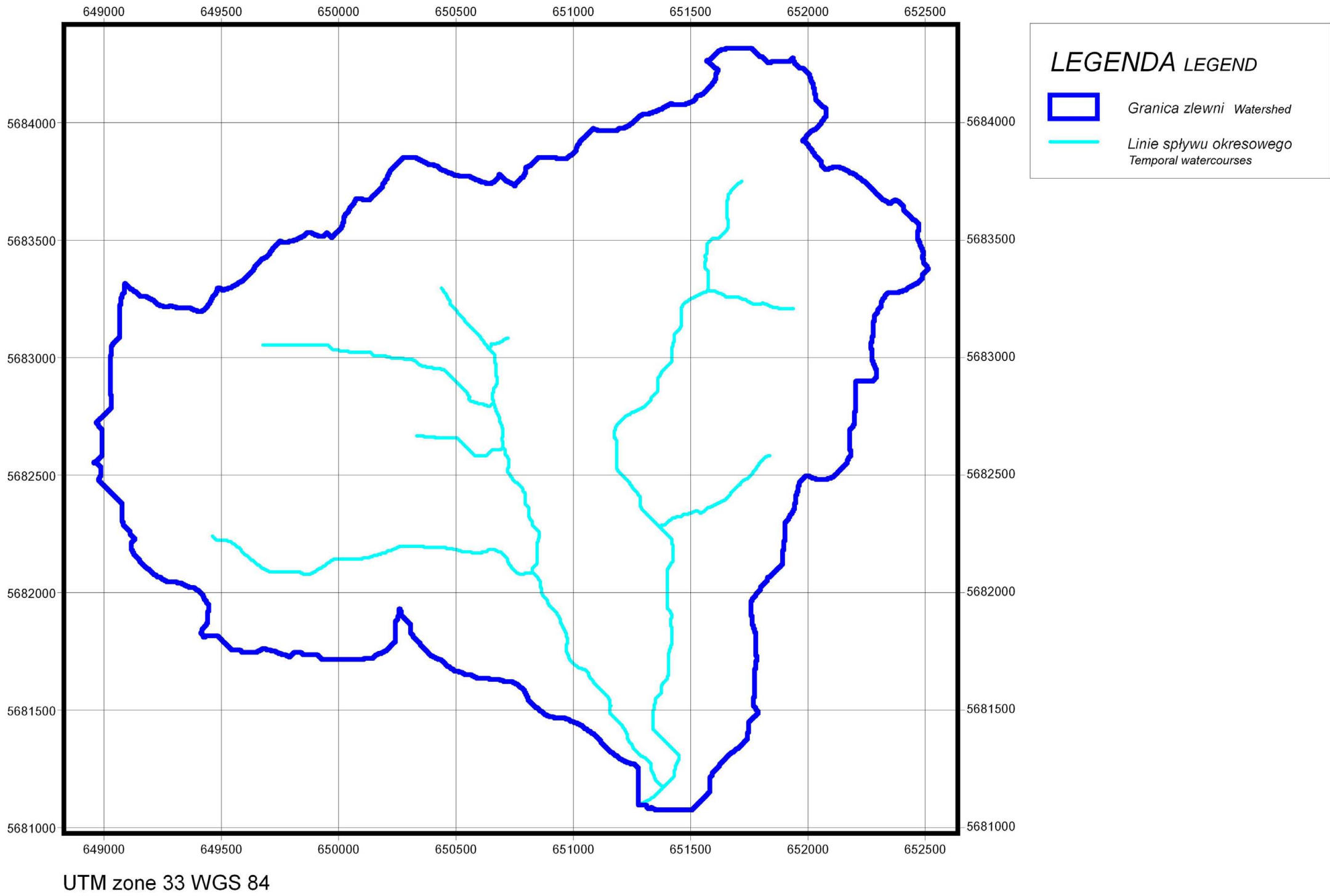
Tabela 4
Table 4

Gatunki gleb w zlewni Mielnicy
Soil textural group of Mielnica catchment

Gatunki gleby Soil textural group	Powierzchnia – Area	
	[ha]	[%]
Gлина średnia – Medium clay	4,81	0,73
Less – loess	634,49	96,22
Piasek gliniasty mocny pylasty – Heavy loamy sand	0,16	0,02
Piasek luźny – Fine sand	0,54	0,08
Pył ilasty (gleby pyłowe mocne) – Silty loam	18,67	2,83
Żwir – Gravel	0,72	0,11
Razem – Total	659,40	100,00

Dominującym gatunkiem gleby są lessy. Zajmują one ok. 96% całkowitej powierzchni zlewni. Pozostałe gatunki gleb zalegają na niewielkich skrawkach terenu porozrzucanych po całym obszarze. Pyły ilaste zajmują powierzchnię ok. 0,2 km² (ok. 3%) i leżą w południowej części zlewni wzdłuż dolnego odcinka cieką. W części zachodniej i wschodniej napotyka się niewielkie enklawy glin średnich, w północnej – piasków gliniastych mocnych a w północno-wschodniej – piasków luźnych. Obszary te mają niewielki udział procentowy w ogólnej powierzchni zlewni. Tak duży udział utworów lessowych sprawia, iż zlewnia ta jest bardzo narażona na procesy erozyjne, które są dodatkowo potęgowane silnie rozwiniętą gospodarką rolną.

Na potrzeby badań modelowych wytypowano, korzystając z algorytmów analizy przestrzennej GIS, lokalizację 50 punktów kontrolnych pomiarów składu granulometrycznego i chemicznego gleb.



Rys. 6. Sieć hydrograficzna zlewni Mielenicy
 Fig. 6. Hydrographic network of Milenica catchment

Tabela 5 – Table 5

Skład granulometryczny wierzchnich warstw gleby
Grain size distribution in top layer of soils

Nr próbki No. sample	Procentowa zawartość frakcji – Percentage of fraction									
	>1,0	1,0–0,5	0,5–0,25	0,25–0,1	0,1–0,05	0,05–0,02	<0,02	0,02–0,006	0,006–0,002	<0,002
1	1,3	12,7	10,2	8,1	9	36	24	7	6	11
2	1,3	9,2	4,8	6	11	34	35	7	15	13
3	0,9	9,6	3,7	6,7	9	34	37	17	6	14
4	1,4	8,3	7,2	6,5	6	29	43	18	10	15
5	0,8	1,8	1,3	0,9	7	46	43	15	13	15
6	1,3	1,4	1,9	1,7	6	43	46	21	13	12
7	1,2	8,7	8,3	9	11	30	33	17	6	10
8	2,1	7,6	8,2	7,2	7	33	33	16	4	13
9	0,2	0,5	1,6	2,9	12	43	41	19	6	16
10	0,8	2,6	3,5	4,9	9	39	41	14	11	16
11	0,1	1,2	1,2	1,6	10	45	41	26	7	8
11	0,8	2,3	4,5	5,2	14	41	33	15	9	9
13	0,6	9,3	8,8	7,9	13	34	27	17	5	5
14	0,9	8,7	6,5	9,8	9	32	34	15	3	16
15	3,2	8,3	7,6	7,1	6	39	32	15	6	11
16	4,3	6,8	7,6	8,6	8	41	28	9	10	9
17	1,3	2,4	1,6	3	7	42	44	9	9	26
18	0,1	1,6	2,4	3	19	39	35	21	7	7
20	0,3	1,5	1,2	1,3	9	43	44	26	6	12
22	0,7	2,1	3,3	4,6	16	27	47	16	15	16
23	0,6	1,2	2,4	2,4	10	40	44	25	6	13
24	0,1	1,3	1,8	3,9	11	44	38	23	7	8
26	1,1	2,3	2,4	1,3	11	39	44	19	11	14
27	0,5	16,2	7,6	11,2	13	32	20	9	7	7
28	1,3	1	1,5	1,5	12	44	40	24	7	9
29	1,7	1,1	0,4	1,5	13	44	40	21	7	12
32	0	0,5	0,5	1	11	44	43	27	4	12
36	0,6	1,2	1,3	2,5	12	45	38	21	5	17
37	1,6	0,9	0,6	0,5	11	44	43	26	8	9
38	0,6	0,3	0,3	0,4	9	46	44	29	6	9
39	0,9	9,5	3,7	6,8	9	33	38	18	8	12
41	1,7	2,3	0,9	2,8	16	39	39	14	14	11
42	1,8	1,3	1,5	2,2	25	39	31	13	9	9
43	0,6	1,2	1,7	2,1	8	43	44	25	13	6
44	1,3	0,6	2,1	2,3	25	40	30	14	12	4
45	0,3	0,5	0,5	0,1	10	48	40	26	5	9
46	0,8	1,1	0,8	2,1	7	51	38	20	8	10
47	2,3	0,7	1,8	3,5	18	44	32	11	11	10
48	0,6	1,2	1,7	3,1	21	40	35	20	5	10
49	1,1	2,4	6,8	16,8	16	28	30	11	5	14
50	1,5	4,6	12,6	5,8	16	25	36	24	6	6

Przedstawione w tabeli 5 wyniki badań składu granulometrycznego dowodzą, że badane gleby wykazują zróżnicowanie właściwości uzależnione od lokalizacji odkrywki w ukształtowaniu rzeźby zbrocza. W ich składzie, w zasadzie, nie stwierdzono frakcji szkieletowych, a frakcje piaskowe stanowią niewielki odsetek w badanych próbkach. Dominującą frakcją jest frakcja pyłowa (0,1–0,02 mm) stanowiąc we wszystkich próbkach ponad 50% objętości. Frakcje spławiane (poniżej 0,02 mm) mają równie wysoki udział, a największy z nich przypada na il pyłowy gruby. Badane utwory wykazywały również zróżnicowane zawartości iłu koloidalnego uzależnione od lokalizacji w rzeźbie stoku.

Ciężar właściwy gleb zalegających na obszarze zlewni wynosi przeciętnie ok. 2,6 Mg · m⁻³. Utwory lessowe zlewni Mielnicy charakteryzują się wysoką pojemnością wodną kapilarną i polową. Przepuszczalność wodna gleb waha się od 0,194 mm·min⁻¹ do 15,2 mm·min⁻¹ [Żmuda 2006].

6.2. Skład chemiczny gleb

Próbki gleb do analiz składu chemicznego pobrano w 50 miejscach, a analizy wykonano dla czterdziestu. Wyniki przeprowadzonych analiz przedstawiono w tabeli 6. Podczas pobierania próbek glebowych kierowano się:

- użytkowaniem terenu,
- gatunkami gleb,
- spadkami zboczy oraz położeniem na zboczu,
- warunkami wodnymi występującymi na danym zboczu itp.

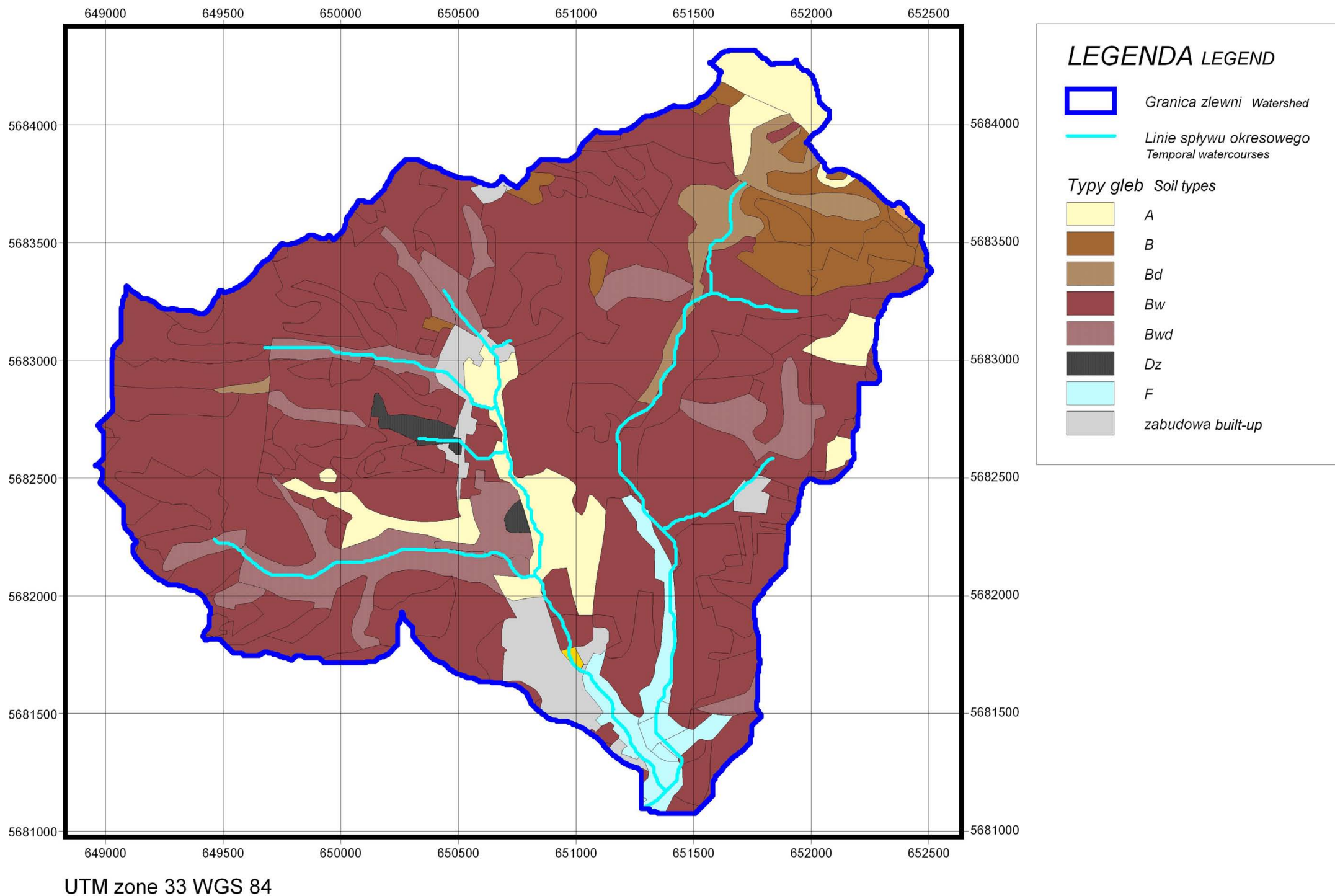
Starano się pobrać próbki w taki sposób, aby w miarę wiernie ukazywały warunki środowiskowe występujące na obszarze rozpatrywanej zlewni. Jedna próbka poddana analizie odzwierciedla występujące warunki na powierzchni ok. 16,5 ha. Dwie z nich (5% ogólnej ilości próbek) zlokalizowane były na obszarach leśnych (próbki nr 10 i 32), pięć (12,5 %) na użytkach zielonych lub terenach zadarnionych w suchych dolinach (próbki nr 4, 14, 15, 27 i 50). Po jednej próbce pobrano z pola, na którym uprawiano truskawki (nr 24), z plantacji porzeczek (nr 6) oraz sadu owocowego (nr 13).

Pozostałe próbki (30 szt. – 75%) zostały pozyskane z gruntów ornych, na których uprawiano:

- zboża (pszenica, pszenżyto, jęczmień, żyto) – 14 próbek,
- rzepak – 9 próbek,
- buraki cukrowe – 3 próbki,
- kukurydzę – 4 próbki.

Odczyn gleby

Z wykonanych analiz chemicznych wynika, że odczyn gleby pH–H₂O na gruntach ornych zmieniał się w szerokim zakresie: od 5,7 (próbka nr 18 położona na zboczu, uprawa pszenżyta oraz nr 36 również położona w środkowej części zbocza, ale pole było obsiane rzepakiem) do pH = 7,4 (próbka nr 11, również położona na zboczu i obsiana rzepakiem).



Rys. 7. Mapa poglądowa typów gleb w zlewni Mielnicy (oznaczenia w tab. 3)
 Fig. 7. Soil types map of Mielnica catchment (description in tab. 3)

Analizując odczyn gleby, można zauważyć, że najmniej zmieniał się on na gruntach, na których uprawiano buraki cukrowe (od 5,8 do 6,3) oraz kukurydzę (od 6,0 do 6,9).

Zdecydowanie najniższe wartości pH-H₂O pomierzono pod uprawami porzeczek (pH = 5,4). Analiza odczynu gleby na powierzchni zlewni Mielnicy wskazuje, że najniższe wartości pH-H₂O występują z reguły w pobliżu granicy zlewni, wyjątkiem była próbka nr 50 (w pobliżu przekroju zamykającego – pH-H₂O = 6,4).

Odczyn pH-KCl ma podobny przebieg do odczynu pH-H₂O. Na gruntach ornych jego wartość wynosi od 4,9 (uprawa rzepaku) do 6,8 (próbka nr 37 – uprawa jęczmienia oraz nr 11 – rzepak). Najniższe wartości odczynu gleby pomierzono pod uprawą porzeczek (pH = 4,6), a najwyższe na plantacji truskawek (próbka nr 24 – pH = 6,9). Rozkład odczynu gleby na powierzchni zlewni ma podobny przebieg jak odczynu pH-H₂O, tzn. najniższe wartości występują z reguły w najwyższych partiach zlewni a najwyższe w dolinach rzecznych.

Żelazo

Zawartość żelaza w próbkach glebowych przedstawiono w tabeli 6. Jego zawartość zmienia się w szerokim zakresie – od 1760 mg·kg⁻¹ (próbka nr 36 – uprawa rzepaku) do 23 950 mg·kg⁻¹ (próbka nr 47 – uprawa kukurydzy). Należy zaznaczyć, że zgodnie z oczekiwaniami najniższe wartości występowały na obszarach, gdzie był najniższy odczyn gleby.

Na gruntach ornych zawartość żelaza wynosiła od 1760 do 23 950 mg·kg⁻¹. Przeważnie najwyższe wartości występowały na gruntach ornych obsianych rzepakiem, a najniższe na gruntach, na których uprawiano kukurydzę (z wyjątkiem próbki nr 47 – w pobliżu kopalni piasku). Porównując użytkowanie terenu z zawartością żelaza w próbkach glebowych, stwierdzono, że najniższe wartości występują na obszarach zalesionych (od 5 750 mg·kg⁻¹ – próbka nr 32 do 14 550 mg·kg⁻¹ w próbce nr 10) i na użytkach zielonych (od 9 800 mg·kg⁻¹ – próbka nr 27 do 17 700 mg·kg⁻¹ w próbce nr 49). Rozkład zawartości żelaza w próbkach glebowych na obszarze zlewni wskazuje, że w dolinach rzecznych oraz dolnych partiach stoków zawartość żelaza była nieco wyższa niż na wysoczyźnie.

Wapń

Zawartość wapnia w pobranych próbkach gleby wynosiła od 772 mg·kg⁻¹ (grunty orne – próbka nr 48) do 2702 mg·kg⁻¹ (tereny zalesione – próbka nr 32).

Na gruntach ornych pomierzone wartości wynosiły od 772 do 2373 mg·kg⁻¹ (uprawa zbóż). Minimalne pomierzone wartości wapnia w glebie na gruntach ornych były zbliżone i kształtowały się następująco:

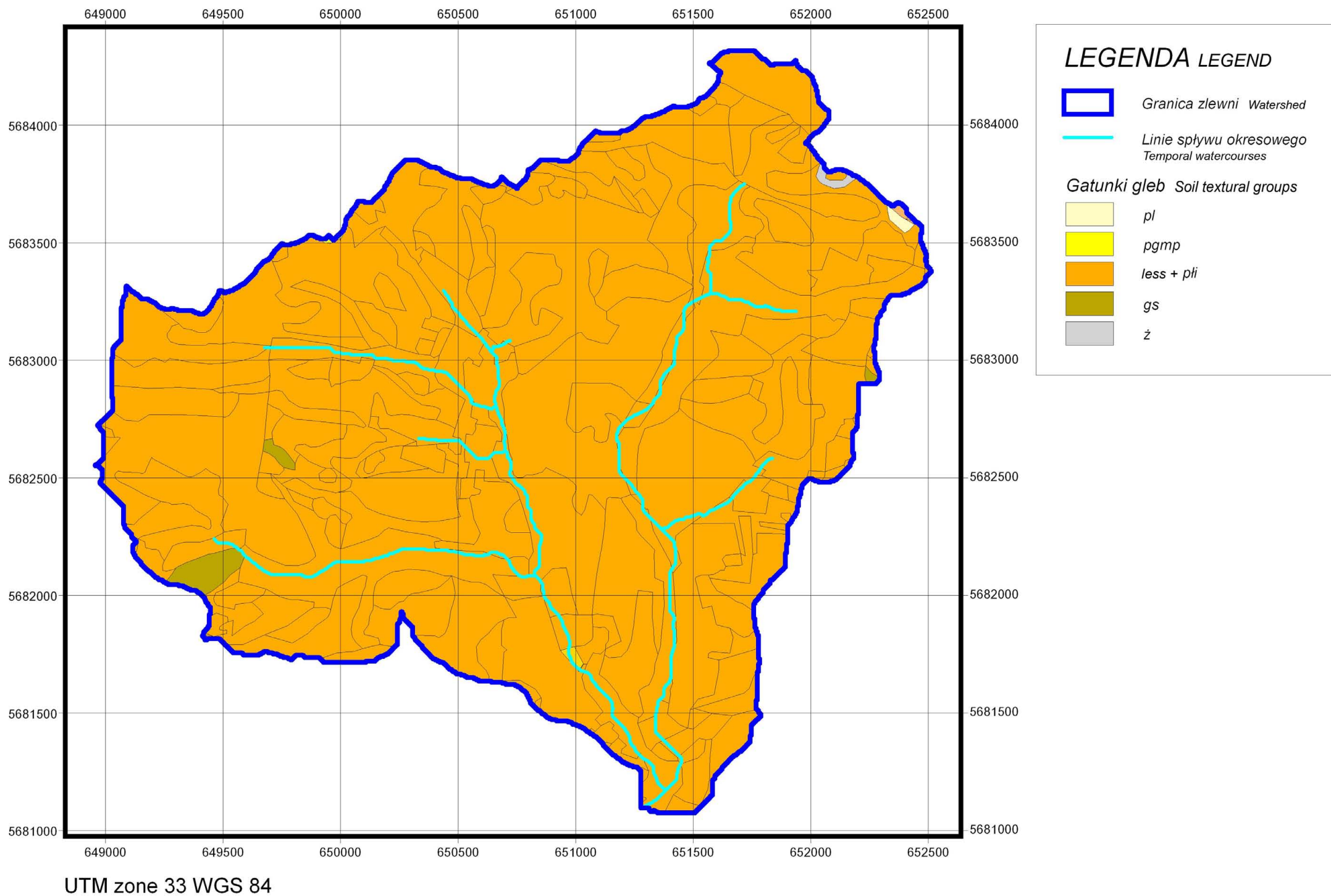
- uprawa kukurydzy – 772 mg·kg⁻¹ (próbka nr 48 – wysoczyzna);
- zboża – 915 mg·kg⁻¹ (próbka nr 42 – górna część zbocza);
- rzepak – 1143 mg·kg⁻¹ (próbka nr 36 – zbocze, na którym występują znaczne procesy erozyjne);
- buraki cukrowe – 963 mg·kg⁻¹ (próbka nr 17 – górna część zbocza).

Skład chemiczny wierzchnich warstw gleby
Chemical composition of top layer of soils

Nr próbki No. sample	Odczyn gleby Soil reaction		w mg·kg ⁻¹ suchej masy – of dry matter										Roślina – Crop
	pH H ₂ O	pH KCl	Fe	Ca	Mg	K	Fosforany Phosphates	Fosfor ogólny Phosphorus	N-NH ₄	N-NO ₃	Azot ogólny; Total nitrogen		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
1	6,0	5,5	11250	1372	275	7200	26,75	562	1,4	11	885		Kukurydza – Maize
2	6,3	5,2	10000	1015	162	8400	21,75	456	1,6	14	800		Zboże – Wheat
3	7,0	6,1	12700	1015	183	8200	25,12	506	1,4	19	1245		Zboże – Wheat
4	6,1	5,0	19750	1259	249	11000	27,87	590	2,0	15	3505		Buraki – Beets
5	6,5	5,4	14250	1272	328	7600	5,12	466	1,9	8	2370		Rzepak – Rape
7	7,2	6,8	15400	2373	148	6600	1,50	354	2,1	39	2065		Zboże – Wheat
8	7,0	6,1	12050	1272	135	7400	19,25	452	1,5	30	1695		Jęczmień – Barley
9	6,8	6,0	18900	1658	148	10000	27,12	586	1,5	12	1055		Rzepak – Rape
11	7,4	6,8	21450	1415	166	11200	12,00	534	1,8	23	1895		Rzepak – Rape
11.	6,8	6,3	13100	1329	253	9000	14,87	582	2,4	59	2315		Rzepak – Rape
16	6,3	5,5	21700	1629	83	12000	4,75	436	2,4	9	1070		Buraki – Beets
17	5,8	5,0	12500	963	48	7400	0,87	434	3,0	8	1225		Buraki – Beets
18	5,7	5,0	16250	972	75	10000	3,37	466	2,3	7	1080		Pszenżyto – Wheat
20	6,4	5,5	15450	1115	166	13600	25,87	672	2,3	9	1025		Pszenica – Wheat
22	7,1	6,3	17500	1415	92	10200	25,00	622	1,5	16	1410		Pszenica – Wheat
23	6,8	6,0	20100	1787	62	13800	3,75	340	2,9	21	1825		Pszenica – Wheat
26	6,9	6,3	20400	1415	122	11000	8,00	274	1,5	8	1145		Rzepak – Rape
28	6,8	6,1	12950	1472	131	7200	29,50	356	1,6	13	1485		Jęczmień – Barley
29	7,0	6,6	18950	1501	284	7800	46,00	408	1,6	23	1940		Rzepak – Rape

Tabela 6 c.d.
Table 6 cont.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
36	5,7	4,9	1760	1143	83	7200	4,37	262	2,8	8	1290	Rzepak – Rape
37	7,2	6,8	18650	2001	109	9000	69,00	396	4,0	19	1955	Jęczmień – Barely
38	7,1	6,7	13400	1432	26	6000	3,37	278	1,6	9	945	Rzepak – Rape
41	6,6	6,0	15600	1201	262	8200	41,50	338	3,2	21	1700	Pszenica – Wheat
42	6,2	5,4	13650	915	96	5800	7,87	234	5,9	8	1075	Pszenica – Wheat
43	6,3	5,6	18000	1200	170	8000	20,87	266	4,1	9	1265	Pszenica – Wheat
44	6,5	6,0	13400	1343	114	5800	35,50	364	2,8	8	1235	Kukurydza – Maize
45	6,8	6,3	14400	1193	192	7000	45,87	276	5,1	18	1640	Rzepak – Rape
46	6,4	5,8	14800	1057	118	6200	13,00	310	1,5	10	1240	Pszenica – Wheat
47	6,9	5,6	23950	1429	153	9400	5,37	228	1,4	2	900	Kukurydza – Maize
48	6,6	5,9	12200	772	240	7000	4,87	234	1,5	6	790	Kukurydza – Maize
24	7,3	6,9	14550	1887	57	8000	1,00	232	3,0	10	1110	Truskawki – Straw-berries
6	5,4	4,6	17800	1486	183	9600	3,39	416	1,6	29	1320	Porzeczka – Berry
14	7,2	6,6	10600	2215	131	9400	2,00	492	4,3	38	2425	Łąka – Meadow
15	6,0	5,2	15800	1615	109	9000	2,00	458	2,0	18	1755	Łąka – Meadow
27	7,3	6,5	9800	2244	187	7200	84,37	360	2,1	35	2685	Darń – Grassland
49	6,7	5,9	17700	1486	554	6400	1,62	180	1,4	7	920	Łąka – Meadow
50	6,4	5,1	17150	1529	175	6400	11,37	244	4,1	42	1885	Łąka – Meadow
13	6,7	6,1	17850	1572	140	11600	1,00	344	3,6	30	1460	Sad – Orchard
10	6,0	5,1	14450	843	188	7200	12,12	386	2,3	39	2115	Las – Forest
32	7,3	6,1	5750	2702	179	5600	7,50	316	7,2	26	2240	Las – Forest



Rys. 8. Mapa poglądowa gatunków gleb w zlewni Mielnicy (pl – piasek luźny; pgmp – piasek gliniasty mocny pylasty; pli – pyl ilasty; gs – glina średnia
 Fig. 8. Map of soil textural groups in Mielnica catchment (pl – fine sand; pgmp – heavy loamy sand; pli – silty loam; gs – medium clay)

Na użytkach zielonych oraz na obszarach zalesionych występowały podobne różnice i wynosiły one:

- na użytkach zielonych od 1486 mg·kg⁻¹ (próbka nr 49) do 2244 mg·kg⁻¹ (próbka nr 27);
- na obszarach zalesionych od 843 mg·kg⁻¹ (próbka nr 10) do 2702 mg·kg⁻¹ (próbka nr 32).

Analiza zawartości wapnia w wierzchniej warstwie gleby wskazuje, iż największe wartości występują w obniżeniach terenowych, a najniższe na wysoczyźnie.

Magnez

Oznaczona zawartość magnezu w wierzchniej warstwie gleby wynosiła od 26 do 55 mg·kg⁻¹. Na gruntach ornych jego zawartość kształtowała się w podobnych granicach:

- uprawa kukurydzy – od 114 mg·kg⁻¹ (próbka nr 44) do 275 mg·kg⁻¹ (próbka nr 1),
- pod zbożami od 62 mg·kg⁻¹ (próbka nr 23) do 262 mg·kg⁻¹ (próbka nr 41 – górna część zbocza),
- uprawa rzepaku – od 26 mg·kg⁻¹ (próbka nr 38) do 328 mg·kg⁻¹ (próbka nr 5 – wierzchowina),
- buraki cukrowe – od 48 mg·kg⁻¹ (próbka nr 17 – górna część zbocza) do 249 mg·kg⁻¹ (próbka nr 4 – położona na wierzchowinie).

Oznaczona zawartość magnezu pod użytkami leśnymi była mało zróżnicowana i wynosiła 179 mg·kg⁻¹ (próbka nr 32) oraz 188 mg·kg⁻¹ (próbka nr 10).

Zdecydowanie najwyższe zawartości magnezu występowały na użytkach zielonych i terenach zadarnionych – wahały się one od 109 mg·kg⁻¹ (próbka nr 15) do 554 mg·kg⁻¹ (próbka nr 49).

Potas

Zawartość potasu na obszarze zlewni Mielnicy wynosiła od 5 600 mg·kg⁻¹ (obszary zalesione) do 13 800 mg·kg⁻¹ (grunty orne).

Analizując zawartość tego składnika na gruntach ornych, należy stwierdzić, że najwyższe wartości występowały pod uprawą buraków cukrowych (od 7 400 mg·kg⁻¹ – próbka nr 17 do 12 000 mg·kg⁻¹ – próbka nr 16). Pomimo nieznacznej odległości między ww. próbkami różnice w zawartości tego pierwiastka wynoszą ok. 100%.

Równie wysokie zawartości potasu oznaczono pod zbożami, gdzie zawartość kształtowała się od 5 800 mg·kg⁻¹ (próbka nr 42) do 13 800 mg·kg⁻¹ (próbka nr 23). Najniższą, a jednocześnie najbardziej wyrównaną zawartość tego pierwiastka zaobserwowano na polach z uprawą kukurydzy – od 5 800 mg·kg⁻¹ (próbka nr 44) do 9 400 mg·kg⁻¹ (próbka nr 47).

Niewielką zmienność potasu w wierzchniej warstwie gleby obserwowano również na użytkach zielonych, gdzie jego zawartość wahała się od 6 400 mg·kg⁻¹ (próbka nr 49) do 9 400 mg·kg⁻¹ (próbka nr 14 – użytki zielone położone w górnej części dopływu bocznego).

Analizując rozkład potasu na obszarze zlewni, trudno jednoznacznie określić zasady przemieszczania się tego pierwiastka na rozpatrywanej powierzchni.

Fosforany

Zawartość fosforanów w glebach na obszarze zlewni Mielnicy wynosi od 0,87 do 84,37 mg·kg⁻¹. Na gruntach ornych najniższe wartości zaobserwowano pod uprawami buraków cukrowych – od 0,87 mg·kg⁻¹ (próbka nr 17 – na zboczu) do 27,87 mg·kg⁻¹ (próbka nr 4 – wierzchowina). Nieco wyższe ich wartości występują pod uprawą rzepaku – od 3,37 mg·kg⁻¹ (próbka nr 38) do 46,00 mg·kg⁻¹ (próbka nr 29 – zbocze) oraz pod zbożami – od 1,5 mg·kg⁻¹ (próbka nr 7 – dolina ciek) do 69,00 mg·kg⁻¹ (próbka 37 – dolina).

Najwyższe wartości fosforanów występują na użytkach zielonych – od 1,62 mg·kg⁻¹ (próbka nr 49 – w pobliżu przekroju zamykającego zlewnię) do 84,37 mg·kg⁻¹ (próbka nr 27).

Analizując rozkład zawartości fosforanów w wierzchniej warstwie gleby, trudno jest jednoznacznie określić zależność, występowania ich od sposobu użytkowania, typu gleb lub spadków.

Fosfor ogólny

Największe zawartości fosforu ogólnego pomierzono na gruntach ornych w próbce nr 20, która znajduje się w pobliżu linii wododziałowej, ale poniżej zwartego pasa zadrzewień. Najniższe wartości wystąpiły na użytkach zielonych, w pobliżu przekroju zamykającego zlewnię (próbka nr 49).

Na gruntach ornych (bez względu na uprawianą roślinę) zawartość fosforu ogólnego kształtuje się podobnie:

- uprawa kukurydzy – od 228 mg·kg⁻¹ (próbka nr 47 – wysoczyzna, w pobliżu granicy wododziałowej) do 56,2 mg·kg⁻¹ (próbka nr 1, również w pobliżu granicy wododziałowej);
- pod uprawami zbóż zawartość tego pierwiastka wynosiła od 234 mg·kg⁻¹ (próbka nr 42 – górna część zbocza) do 672 mg·kg⁻¹ (próbka nr 20 – górna część zlewni);
- uprawa rzepaku – od 262 mg·kg⁻¹ (próbka nr 36 – zbocze, na którym występują znaczne procesy erozyjne) do 586 mg·kg⁻¹ (próbka nr 9 – środkowa część zbocza);
- na gruntach ornych z uprawą buraków cukrowych zawartość fosforu ogólnego była najbardziej wyrównana i wahała się od 434 mg·kg⁻¹ (próbka nr 17 – górna część zbocza) do 590 mg·kg⁻¹ (próbka nr 4, położona na wierzchowinie w pobliżu linii wododziałowej).

Na użytkach zielonych zawartość fosforu ogólnego w wierzchniej warstwie gleby była podobna do pomierzonych na gruntach ornych i wynosiła od 180 mg·kg⁻¹ (próbka nr 49 – w pobliżu przekroju zamykającego zlewnię) do 492 mg·kg⁻¹ (próbka nr 14, położona w dolinie prawostronnego dopływu ciek Mielnica).

Na obszarach zalesionych zawartość fosforu zmieniała się w niewielkim zakresie i wynosiła 316 i 386 mg·kg⁻¹.

Analizując rozkład tego pierwiastka na obszarze zlewni, można zauważyć, że wyższych wartości możemy spodziewać się w dolinach rzecznych oraz niektórych obszarach wierzchowin.

Azot amonowy

Zawartość tego składnika w glebach na obszarze zlewni Mielnicy wynosiła od $1,4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (próbka nr 1 i 47, pierwsza z nich położona była na wierzchowinach, a druga w dolinie w pobliżu przekroju zamykającego) do $7,2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (obszary zalesione, próbka nr 32).

Na gruntach ornych najmniejsza zmienność tej formy azotu występowała pod uprawą kukurydzy – od $1,4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (próbki nr 1 i 47) do $2,8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (próbka nr 44 – dolna część zbocza) oraz buraków cukrowych, gdzie kształtowała się od $2,0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (próbka nr 4, w pobliżu granicy wododziałowej) do $3,0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (próbka nr 17, położona w środkowej części zbocza). Znacznie większe zróżnicowanie zachodziło pod pozostałymi uprawami:

- pod uprawami zbóż: od $1,4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (próbka nr 3, górna część zlewni) do $5,9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (próbka nr 43 – również górna część zlewni),
- uprawa rzepaku: od $1,5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (próbka nr 9, środkowa część zbocza, w górnej części zlewni oraz nr 26 – położona na zboczu, w środkowej części zlewni) do $5,1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (próbka nr 45 – wierzchowina).

Podobne zróżnicowanie występowało na użytkach zielonych, gdzie zawartość azotu amonowego zmieniała się od $1,4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (próbka nr 49, w pobliżu przekroju zamykającego) do $4,3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (próbka nr 14, w dolinie cieku bocznego zasilającego Mielnicę).

Z przeprowadzonego rozpoznania przestrzennego wynika, iż najwyższych zawartości azotu amonowego w glebie należy spodziewać się z reguły w dolinach rzecznych, a najniższych – na wierzchowinach.

Azot azotanowy

Zawartość azotu azotanowego w wierzchniej warstwie gleb wynosiła od $2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (próbka nr 47, położona była na wierzchowinie) do $5,9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (próbka nr 11, położona w środkowej części zbocza). Na gruntach ornych najniższe wartości N-NO_3 występowały pod uprawami kukurydzy – od $2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (próbka nr 47) do $11 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (próbka nr 1, położona na wierzchowinie w górnej części zlewni) oraz buraków cukrowych – od $8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (próbka nr 17, położona w środkowej części stoku) do $15 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (próbka nr 4, położona na wierzchowinie, w pobliżu granicy wododziału).

Znacznie większe zróżnicowanie tego składnika wystąpiło pod zbożami – od $7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (próbka nr 8) do $39 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (próbka nr 7) oraz rzepakiem – od $8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (próbki nr 5, 26 i 36) do $59 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (próbka nr 11, położona w dolinie rzecznej).

Zgodnie z oczekiwaniami wysokie wartości tego składnika obserwowano na obszarach zalesionych (26 i $39 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$).

Analiza zawartości azotu azotanowego w wierzchnich warstwach gleby wskazuje, iż największa zawartość tego składnika występuje w dolinach rzecznych oraz na liniach spływu wód.

Azot ogólny

Największe zróżnicowanie zawartości azotu ogólnego istnieje na gruntach ornych:

- uprawa kukurydzy – od 790 mg·kg⁻¹ (próbka nr 48 – wysoczyzna, górna część zlewni) do 1 235 mg·kg⁻¹ (próbka nr 44, środkowa część zlewni);
- pod uprawami zbóż zawartość azotu ogólnego wynosiła od 800 mg·kg⁻¹ (próbka nr 2 – wierzchowina) do 2 065 mg·kg⁻¹ (próbka nr 7 – dolina rzeczna);
- uprawa rzepaku – od 945 mg·kg⁻¹ (próbka nr 38, na zboczach) do 2 370 mg·kg⁻¹ (próbka nr 5 – na wierzchowinie);
- na gruntach ornych z uprawą buraków cukrowych zawartość azotu ogólnego wynosiła od 1 070 mg·kg⁻¹ (próbka nr 16) do 3 505 mg·kg⁻¹ (próbka nr 4, położona na wierzchowinie w pobliżu linii wododziałowej).

Na użytkach zielonych zawartość azotu ogólnego była zbliżona do wartości stwierdzonych na gruntach ornych i kształtowała się od 920 mg·kg⁻¹ (próbka nr 49) do 2 685 mg·kg⁻¹ (próbka nr 27). Na obszarach leśnych zawartość azotu ogólnego w glebach kształtowała się na podobnym poziomie i wynosiła 2 115 oraz 2 240 mg·kg⁻¹.

Największe zawartości azotu ogólnego występowały z reguły na liniach spływu wody, a najniższe na wierzchowinach.

7. SYSTEM TRANSPORTU FLUWIALNEGO MIELNICY I JEGO FUNKCJONOWANIE

W latach 1983–2004 zlewnia Mielnicy była przedmiotem badań prowadzonych przez Żmudę [2006], których efektem było rozpoznanie systemu fluwialnego zlewni i sposobu jego funkcjonowania. Zastosowany do osiągnięcia celu badawczego uniwersalny model systemu fluwialnego Stanley’ a A. Schumma [1977] zakłada funkcjonowanie w systemie dwóch zasadniczych podsystemów – koryta ciek i stokowego. Podsystemy te, ze względu na sposób funkcjonowania oraz indywidualne cechy, należy rozpatrywać jako kolejne dwa otwarte systemy.

W przypadku koryta ciek wyraźnie zaznacza się strefowość i odcinkowa zmienność jego cech wraz z biegiem potoku. Cechy te determinowane są charakterem doliny, którą płynie Mielnica. Wydzielono w niej trzy podstawowe strefy: górnej, środkowej oraz dolnej odcinka biegu, które mają różne warunki odpływu wody, dostawy materii, a także jej przemieszczania w skoncentrowany sposób. Górny odcinek Mielnicy ma charakter ciek okresowego, a wody powierzchniowe prowadzone są rowem między drogą a polami uprawnymi i niewielkimi pozostałościami łąk. Najniższa część tego odcinka biegnie pomiędzy skrajem dawnego parku podworskiego a zabudowaniami wsi Piersno. Ma on przeciętnie głębokość ok. 1,2 m, szerokość w dnie 0,6 m, skarpy są strome i mocno porośnięte roślinnością. Dolinę górnej części ciek zajmują głównie grunty orne. Nieprawidłowa agrotechnika powoduje wzmaganie się tam procesów erozji i zamulanie odbiornika. Istotnego znaczenia nabierają tutaj również lokalne drogi nieutwardzone oraz asfaltowe, które po opadach deszczu pełnią funkcję dróg transportu materii do ciek. W strefie środkowej biegu Mielnicy występuje głęboka dolina, pokryta wielogatunkowym lasem liściastym. Potok ma tutaj charakter naturalny, przebiega głębokim wąwozem z poszerzającą się stopniowo terasą zalewową. Koryto ciek w obrębie wąwozu jest mocno narażone na osuwanie i podmywanie. Strefa ta, ze względu na procesy korytotwórcze oraz naturalne warunki fizjograficzne, jest zarazem bardzo atrakcyjna krajobrazowo i przyrodniczo. W dużych łanach występuje tu objęta ścisłą ochroną gatunkową śnieżycą wiosenna, nadająca kompleksowi leśnemu niepowtarzalny aspekt wiosenny. Z drugiej strony, dolina jest jednocześnie najbardziej zdegradowana antropogenicznie. Degradacja następuje głównie na drodze nielegalnej wywózki i depozycji odpadów bytowych miejscowej ludności. Strefa dolna biegu Mielnicy to tereny z rozproszoną zabudową wiejską, lecz dość intensywnie zagospodarowana rolniczo. Występują tu niewielkie zabagnienia terenu, zajęte często przez mokre łąki. Jakość wód płynących uzależniona jest w dużej mierze od ilości ścieków bytowych odprowadzanych bezpośrednio do koryta oraz przesiąków z przyzmy obornikowych i silosów na kizsonkę. Na warunki odpływu wody i przepływu materii w tej strefie oddziałują dwa małe przepływowe stawy, na których prowadzona jest gospodarka rybacka.

Przeprowadzone rozpoznanie środowiska stokowego wykazało, że jako samodzielny otwarty system charakteryzują go takie cechy, jak:

- jednakowy sposób użytkowania – zasadniczym sposobem użytkowania są grunty orne, obejmujące swoim zasięgiem charakterystyczne elementy rzeźby stoku;
- typ i gatunek zalegających gleb – pod względem typów w zlewni dominują gleby brunatne, natomiast gatunkiem dominującym są gleby wytworzone z lessów;
- kierunek prowadzenia zabiegów agrotechnicznych i upraw – w zlewni, jak i na pozostałym obszarze Wzgórz Trzebnickich powszechną praktyką jest kierunek wzdłużstokowy wynikający z prostokątnego kształtu pól o dłuższym boku skierowanym wzdłuż linii największych spadków;
- rodzaj uprawianej przez rolników roślinności, dostosowany do prowadzonej gospodarki rolniczej – w tym przypadku zasiewy jednego rodzaju roślin obejmują zarówno wierzchowiny, zbocza, jak i podnóża stoków;
- ilość wprowadzanych przez rolników na pole nawozów – rodzaj nawozu i jego dawki generalnie są dostosowane do uprawianych roślin, jednakże wprowadzane równomiernie na wszystkie elementy stoku;
- jednorodne warunki meteorologiczne, jak np. ilość i tempo dostawy wód opadowych na powierzchnię stoku – założenie przyjęte ze względu na brak wykonanych badań ujmujących te elementy w rzeźbie stoku i prowadzenie ich wyłącznie na posterunku meteorologicznym;
- ilość deponowanych w zlewni składników chemicznych wnoszonych wraz z opadami atmosferycznymi – przyjęto założenie równej imisji ze względu na brak przeprowadzonego rozpoznania zmienności przestrzennej na rozpatrywanym obszarze.

W systemie tym występują jednakże cechy, które różnicują poszczególne jego strefy i nie pozostają bez znaczenia na tempo przemieszczania się materii w jego obrębie. Te różnicujące cechy to:

- skład granulometryczny – przy jednogatunkowości pokrycia glebowego zróżnicowany w rzeźbie stoku oraz zróżnicowane, a wynikające ze składu wskaźniki podatności gleb na zmywanie;
- właściwości fizyko-wodne – zróżnicowanie, w ujęciu konfiguracji terenu i głębokości zalegania w warstwach powierzchniowych, gęstości właściwej i objętościowej, porowatości, pojemności wodnej czy warunków infiltracji;
- odczyn gleb i zawartość składników chemicznych – zróżnicowane w rzeźbie stoku, głębokości pobrania próbki oraz sezonowo;
- uwarunkowania fizjograficzne – zróżnicowanie wzniesienia czy lokalnych spadków;
- widoczne objawy powierzchniowych procesów erozji wodnej gleb – spotykane na innych erodowanych obszarach i charakterystyczne dla poszczególnych fragmentów stoku.

Cechy te powodują, że w podsystemie stokowym zlewni Mielnicy, potraktowanym jako kolejny funkcjonujący system otwarty, można wyróżnić takie subsystemy, jak: wierzchowin stoków, zboczowy oraz podnóży stoków. W tym ostatnim subsystemie (jego najniższej części) obserwuje się występowanie cieków okresowych.

Zastosowanie podejścia systemowego oraz traktowanie zlewni jako otwartego i dynamicznego systemu składającego się z szeregu kaskadowo powiązanych ze sobą podsystemów sprawia, że możliwe staje się ustalenie relacji między nimi. Woda i tempo jej przemieszczania się od linii wododziałowej w kierunku koryta ciekłu oraz samym korytem stanowi zasadniczy nośnik materii organicznej i mineralnej, pochodzącej przede wszystkim ze stokowego środowiska morfogenetycznego. Stąd też zdarzenia geomorficzne zachodzące w zlewni znajdują swoje odbicie w dynamice procesów fluwialnych i stają się dobrym odzwierciedleniem zjawisk erozji wodnej gleb [Bartnik, Madeyski 1992; Figuła 1966; Froehlich 1975, 1992, 2002; Gładki 1978; Kopeć, Misztal 1990; Kostrzewski i in. 1994; Lipski i in. 1997; Orlik, Węgorzek 1994, 1995; Pałys 1992, 2001; Świąchowicz 2000]. Efektem końcowym jest odprowadzanie korytem ciekłu wszelkich postaci rumowiska poza zlewnię. W przypadku Mielnicy skupiono się na odprowadzaniu rumowiska unoszonego stanowiącego zasadniczą część transportu zwietrzliny oraz azotu, fosforu i potasu. Zobrazowanie reakcji podsystemu korytowego na procesy erozyjne zachodzące w podsystemie stokowym można przedstawić w postaci wskaźnika dostawy materii (DR – Delivery Ratio). Określone wskaźniki pojedynczych zdarzeń osiągają różne wartości, a także wykazują zróżnicowany przebieg sezonowy uzależniony od indywidualnych cech rozwoju i rodzaju roślinności pokrywającej stok oraz przebiegu warunków hydrometeorologicznych. Przykład takiego funkcjonowania przedstawia analiza przeprowadzona dla rumowiska unoszonego. Uzyskane wartości wskaźnika DR wykazują dużą jego zmienność w granicach od 0,0003 do 7,12%. W okresie uprawy na stoku buraków cukrowych DR przybierało wartości od 0,0003 do 3,03%. Wartości minimalne rejestrowane były na wiosnę i jesienią w terminie zbioru buraków. Okres silnego rozwoju nadziemnych części roślin charakteryzował się wartościami najwyższymi. W przebiegu tym odzwierciedla się funkcja ochronna nadziemnych części roślin, które im lepiej rozwinięte, tym lepiej osłaniają glebę na stoku przed destrukcyjnym działaniem opadu. Natomiast w trakcie uprawy na stoku pszenicy ozimej wartości DR kształtowały się w nieco węższym zakresie, bo od 0,04 do 7,12%, co świadczy o lepszej ochronie powierzchni stoku przez tę roślinę. Wartości najniższe notowano na wiosnę, a wzrost przeciwerozynnej ochrony gleby następował wraz z osiągnięciem kolejnych faz rozwojowych tego zboża.

Analiza wskaźników dostawy składników azotowych wykazuje, że tendencje zmian sezonowych mają podobny charakter – największe ich ilości odprowadzane są wiosną i jesienią. Wartości tego wskaźnika dla azotu ogólnego w przypadku rośliny okopowej są jednakże o wiele wyższe niż dla zbożowej. Wynika z tego, że w całym sezonie zasadnicza część wymywania tego składnika odbywa się w okresach braku okrywy roślinnej na powierzchni stoku i początkowych fazach wegetacji. Jednakże zakresy zmienności tego wskaźnika wskazują, że rośliny zbożowe znacznie lepiej go wykorzystują, a tym samym ograniczają jego odpływ ze środowiska stokowego. Podobne charaktery przebiegu zmienności czasowej odnotowano także dla azotu amonowego i tlenków azotu. Równie podobnie przedstawiała się dostawa do koryta Mielnicy fosforu, a stwierdzone wartości DR_p dodatkowo determinowane były w okresach wczesnowiosennych terminem i przebiegiem zejścia pokrywy śniegowej, natomiast w późniejszych – wystąpieniem deszczów i ich intensywnością. Określone wartości wskaźników dostawy potasu (DR_k) wykazują większe wymywanie tego składnika na wiosnę, natomiast w okresie letnim ilości odpły-

wające korytem cieką przeważnie dorównują uruchamianym na stoku. Wzrost wymywania stwierdzono po przeprowadzeniu nawożenia NPK w uzależnieniu od zastosowanej dawki nawozów i przebiegu opadów deszczów po wykonaniu nawożenia.

Określone wskaźniki dostawy oraz ich zmienność sezonowa wykazują, że terminami najsilniejszej aktywności erozyjnej zlewni Mielnicy są głównie okres wiosenny i jesienno-wiosenny. Wskaźniki dostawy materii osiągają wówczas najniższe wartości, świadcząc o nieporównywalnie większych ilościach zwietrzliny uruchamianych erozyjnie na stokach niż odpływających korytem cieką. W pozostałych okresach relacja między ilościami odprowadzanymi cieką a uruchamianymi w obrębie stoku jest wyższa (większe wartości DR), świadcząc o mniejszej aktywności erozyjnej obszaru. Relacje te ulegają jednak zmianom po długich okresach z opadami lub po wystąpieniu deszczów charakteryzujących się wysoką intensywnością chwilową.

W okresach posusznych Mielnica prowadzi swoim korytem niewielkie ilości rumowiska i składników chemicznych. Wystąpienie opadów atmosferycznych powoduje, że na posterunku hydrometryczno-batometrycznym obserwuje się wzrost natężeń przepływów, koncentracji rumowiska i składników chemicznych. W przypadku rumowiska jest on nieznaczny, natomiast składniki chemiczne odpływają w dużych koncentracjach. Osiągane wartości wskaźników dostawy materii przybierają wówczas wysokie wartości, co wskazuje na redepozycję i resuspensję materiału wcześniej dostarczonego do cieką. W obrębie środowiska stokowego transport zwietrzliny odbywa się w sposób skokowy, a dominującym sposobem przemieszczania jest transport podpowierzchniowy spływami hipodermicznymi. Opady atmosferyczne klasyfikowane nawet jako erozyjne przemieszczają tę zwietrzelinę po powierzchni stoku na stosunkowo niewielkie odległości. Tylko w przypadku wystąpienia deszczów o wysokiej intensywności chwilowej występujące na stoku spływy powierzchniowe i hipodermiczne przybierają wówczas znaczne rozmiary, a transportowana tymi wodami zwietrzelina dociera aż do podnóża stoku, wielokrotnie przekraczając ilości odpływające korytem cieką. Charakter przebiegu wezbrań notowanych w korycie cieką wyraźnie wskazuje, że wówczas następuje sprzężenie tych dwóch podsystemów. Ale nawet wtedy osiągnęte minimalne wartości wskaźników dostawy materii oraz generalnie niewspółmiernie niższe koncentracje w wodzie odpływającej korytem cieką niż na stoku świadczą o tym, że przepływ materii z systemu stokowego do korytowego jest ograniczony. Na drodze jej przepływu między wydzielonymi podstawowymi podsystemami istnieją i funkcjonują dodatkowe podsystemy spowalniające dostawę do cieką. Stanowią one bufor chroniący wody powierzchniowe przed znacznymi zanieczyszczeniami. Te kolejne podsystemy to przykorytowe, często równinne strefy proluwalne zajęte przez użytki zielone i zadrzewienia oraz obszary leśne, których pasmowa, poprzecznostokowa lokalizacja w miejscach charakteryzujących się występowaniem największych nachyleń terenu stanowi zabezpieczenie przeciwoerozyjne tych miejsc jak i terenów niżej położonych.

Doliny cieków często wykorzystywane są jako miejsca lokalizacji zbiorników wodnych wykorzystywanych do chowu ryb karpiowatych. Nowo budowane obiekty wkomponowują się jako nowe elementy w zlewni i traktowane mogą być w dwojaki sposób. Po pierwsze, ze względu na charakter lokalizacji na drodze skoncentrowanego spływu wód powierzchniowych stanowią fragment koryta cieką i tak jest w przypadku koryta

Mielnicy. Po drugie, stawy te stanowią nowy element zagospodarowania przestrzennego zlewni, który w warunkach zlewni Mielnicy nie pozostaje bez znaczenia dla funkcjonowania całego systemu transportu fluwialnego. Powyższa problematyka dotycząca tego obszaru poruszana była w pracach zespołu kierowanego przez Żmudę [2001] oraz Szewrańskiego i współpracowników [2002b]. Obiektywnej oceny roli stawów w transporcie materii można praktycznie dokonać, porównując ich oddziaływanie przy zaistnieniu takich samych czynników wpływających na procesy zachodzące w zlewni, co przy prowadzeniu badań środowiskowych jest praktycznie niemożliwe. Stąd też takiej oceny dokonano dla okresów podobnych przed rozpoczęciem funkcjonowania ww. stawów i po ich wybudowaniu. Za kryterium podobieństwa przyjęto podobieństwo meteorologiczne, uwzględniające prawdopodobieństwo wystąpienia opadów atmosferycznych oraz odchyłki od średniej wieloletniej temperatury powietrza. Dysponując obserwacjami dobowymi, obliczono w latach podobnych wskaźniki jednostkowej denudacji odpływowej dla poszczególnych zdarzeń transportu rumowiska unoszonego w cieku. Porównując uzyskane wielkości, stawy redukują wielkość tego wskaźnika o 56%, czyli w zakresie wyników uzyskanych przez innych autorów. Denudacja odpływowa bardzo często staje się wskaźnikiem zagrożenia zjawiskami erozji wodnej gleb, stąd też występowanie tego typu miejsc akumulacji rumowiska i nieuwzględnianie ich w podejmowaniu decyzji klasyfikujących zlewnię do stopni zagrożenia erozyjnego może doprowadzać do błędnych spostrzeżeń. Na problem ten zwracał uwagę w swojej pracy Szewrański [2002].

8. ROLNICZE ZAGOSPODAROWANIE ZLEWNI

W trakcie badań przeprowadzono liczne wizje lokalne, w czasie których zwracano uwagę na przestrzenne rozmieszczenie poszczególnych rodzajów użytków. Na ich podstawie oraz w oparciu o bazę CORINE i dane fotogrametryczne IKONOS sporządzono mapę użytkowania obszaru zlewni (rys. 9). Stanowi ona podstawę charakterystyki zagospodarowania zlewni. W opisie użytków posłużono się kluczem klasyfikacyjnym opartym na standardzie CORINE.

W zlewni dominują użytki rolnicze zajmujące ok. 78% całkowitej powierzchni, z czego na grunty orne przypada 67% areалу, a niewiele, bo zaledwie 7,6% – na użytki zielone (tab. 7). Tereny zadrzewione stanowią ok. 17% całości obszaru. Największe skupiska drzewostanu usytuowane są przede wszystkim we wschodniej części zlewni. W dolnych partiach zboczy, wzdłuż biegu cieków dominują użytki zielone. Resztę obszaru zajmują grunty orne i tereny zabudowane.

Tabela 7
Table 7

Struktura użytkowania w zlewni ciekii Mielnica
Land use pattern in Mielnica catchment

Rodzaj użytkowania – Kind of use	Powierzchnia – Area	
	[ha]	[%]
Użytki rolne – Arable land	413,09	62,65
Uprawy trwałe, sady, uprawy rzędowe Permanent crops, fruit trees and berry plantations	21,30	3,23
Łąki i pastwiska – Pastures	50,47	7,65
Urozmaicone tereny rolnicze (złożone struktury uprawowe) Complex cultivation patterns	9,34	1,42
Teren użytkowany rolniczo z dużym udziałem roślinności naturalnej – Land principally occupied by agriculture with significant areas of natural vegetation	18,89	2,87
Lasy liściaste – Broad-leaved forest	20,93	3,17
Lasy mieszane – Mixed forest	89,12	13,51
Zabudowa zwarta nieciągła + drogi – Discontinuous urban fabric + roads	34,85	5,28
Użytki przemysłowe – Industrial, commercial and transport units	1,42	0,21
Razem – Total	659,40	100,00

W ramach projektu oceniono przydatność produkcyjną gleb (tab. 8). Na podstawie danych z klasyfikacji gruntów rolnych opracowano mapę kompleksów przydatności rolnej (rys. 10).

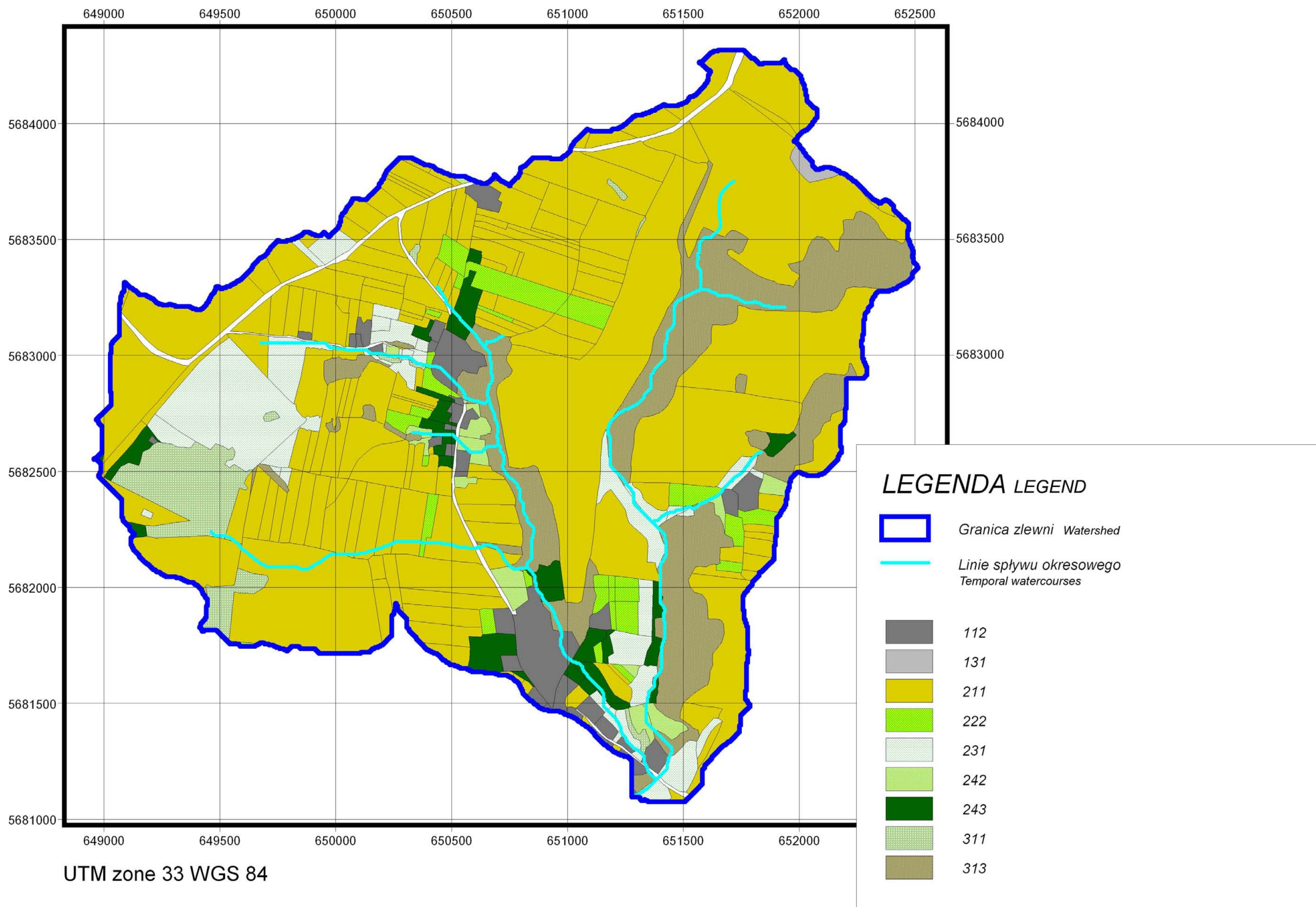
Tabela 8
Table 8

Kompleksy przydatności rolnej w przestrzeni produkcji rolnej zlewni Mielnicy
Complexes of agricultural suitability of a soil in Mielnica catchment

Kompleksy przydatności rolnej gleb Complexes of agricultural suitability of a soil		Powierzchnia – Area	
		[ha]	[%]
1	Pszenny bardzo dobry – Very good wheat	222,77	44,1
1z	Użytki zielone bardzo dobre i dobre Very good and good grassland	0,67	0,1
2	Pszenny dobry – Good wheat	202,36	40,1
2z	Użytki zielone średnie – Mean grassland	37,04	7,3
3	Pszenny wadliwy – Defective wheat	35,06	6,9
5	Żytni dobry – Good rye	6,50	1,3
6	Żytni słaby – Weak rye	0,16	0,0
7	Żytni bardzo słaby – Very weak rye	0,54	0,1
	Razem – Total	505,10	100,0

Największy udział powierzchniowy (ok. 84%) przypada na kompleksy pszenne bardzo dobre i dobre (fot. 7). Są to gleby zasobne w składniki pokarmowe o głębokim poziomie próchnicznym, dobrej strukturze, przepuszczalne, dobrze lub średnio przewiewne, magazynujące duże ilości wilgoci, choć okresowo mogą wykazywać małe niedobory. W zasadzie gleby nie wymagają regulacji stosunków wodnych, do uprawy są stosunkowo łatwe, osiąga się na nich wysokie plony nawet najbardziej wymagających roślin bez większych nakładów produkcyjnych. Około 7% obszarów zajmuje kompleks pszenno-żytni wadliwy, który obejmuje gleby średnio zwarte i ciężkie niecałkowicie zalegające na przepuszczalnych podłożach oraz głębokie i całkowite (średnio zwarte i ciężkie), ale położone na zboczach, narażone na szybki spływ wody. Występują w nich okresowo niedobory wilgoci i są wrażliwe na suszę. Nadają się bardziej pod uprawę pszenicy niż żyta, lecz wysokość plonów uzależniona jest przede wszystkim od ilości i rozkładu opadów. Pozostałe tereny zajmują 3 kompleksy żytnie z lepszymi glebami i niższym potencjałem produkcyjnym.

Ze względu na charakter pracy ważne było rozpoznanie potencjalnych dróg dostawy erodowanego materiału ze stoków do cieku. Znacząca pod tym względem jest ocena zagospodarowania rolniczego pojedynczych stoków i pól uprawnych. Kształty pól mają formę wydłużonych prostokątów, przy czym ich dłuższe granice biegną wzdłuż linii największych spadków. Wymusza to prowadzenie niezwykle niekorzystnej uprawy podłużnostokowej (fot. 8 i 9). Stosowane przy takim układzie pól zabiegi agrotechniczne przyspieszają i potęgują zmiany erozyjne. Układ ten wpływa również na usytuowanie dróg dojazdowych. W większości przypadków biegną one prostopadle do warstwic po linii spadków. Drogi stają się zasadniczymi korytami odpływowymi erodowanej gleby (fot. 10), a w skrajnych przypadkach przekształcają się w wąwozy, w których drogi biegną ich dnem (fot. 11).



Rys. 9. Mapa użytkowania zlewni Mielnicy (oznaczenia kodów CLC w tab. 1)
 Fig. 9. Land-use pattern in Mielnica catchment (CLC codes description in tab.1)



Fot. 7. Uprawy pszenicy na obszarze zlewni Mielnicy (fot. Sz. Szewrański)
Phot. 7. Wheat crop in Mielnica catchment



Fot. 8. Niekorzystny kierunek uprawy rolnych (fot. Sz. Szewrański)
Phot. 8. Unfavourable direction of agricultural measures



Fot. 9. Podłużnostokowy kierunek prowadzenia zabiegów agrotechnicznych (fot. R. Żmuda)
Phot. 9. Down-slope direction of agricultural measures



Fot. 10. Wylot drogi polnej na drogę asfaltową (fot. R. Żmuda)
Phot. 10. Agricultural road exit to asphalt road



Fot. 11. Skarpa wąwozu drogowego we wsi Bolescin (fot. Sz. Szewrański)
Phot. 11. Road gully bank in Bolescin village

9. SIEĆ DRÓG ROLNICZYCH

Zmiana układu dróg rolniczych w rzeźbie terenu oraz utwardzanie ich nawierzchni i budowa urządzeń odwodnienia powierzchniowego stanowią istotny element melioracji przeciwoerozyjnych i formowania poprawnego rozłogu gruntów na terenach erodowanych [Józefaciuk Cz., Józefaciuk A. 1996, 1999; Józefaciuk i in. 2000; Nowocien 1996; 1997, 1999, 2003; Wawer 2004; Ziemiński 1968].

Właściwie wytyczone i utwardzone drogi oprócz roli typowo gospodarczej dają również efekt ochrony przed erozją, rozpraszając spływ powierzchniowy bądź odprowadzając nadmiar wód opadowych. Literatura zaleca lokalizację dróg rolniczych poprzecznie do kierunku spadku terenu. Z punktu widzenia ochrony przeciwoerozyjnej jest to teza słuszna. Długoletnie obserwacje wykazały, że najbardziej podatne na rozmycie są drogi wzdłuż- i skośnostokowe oraz drogi w dnach dolinek śródboczowych, gdzie intensywność spływu powierzchniowego jest dużo większa niż na przyległych stokach, osiągając wartości dostatecznie wysokie, by wzbudzić rozwój żłobin, co w konsekwencji prowadzi do powstawania różnych form wąwozów [Nowocien 1996, 1999]. Dynamika zagłębiania się dróg rolniczych w terenach lessowych Wyżyny Lubelskiej sięga od 4,5 do 9,0 cm·rok⁻¹. Drogi rolnicze częstokroć stanowią główne źródło osadów trafiających do polskich rzek [Froehlich, Słupik 1980; Starkel 1980].

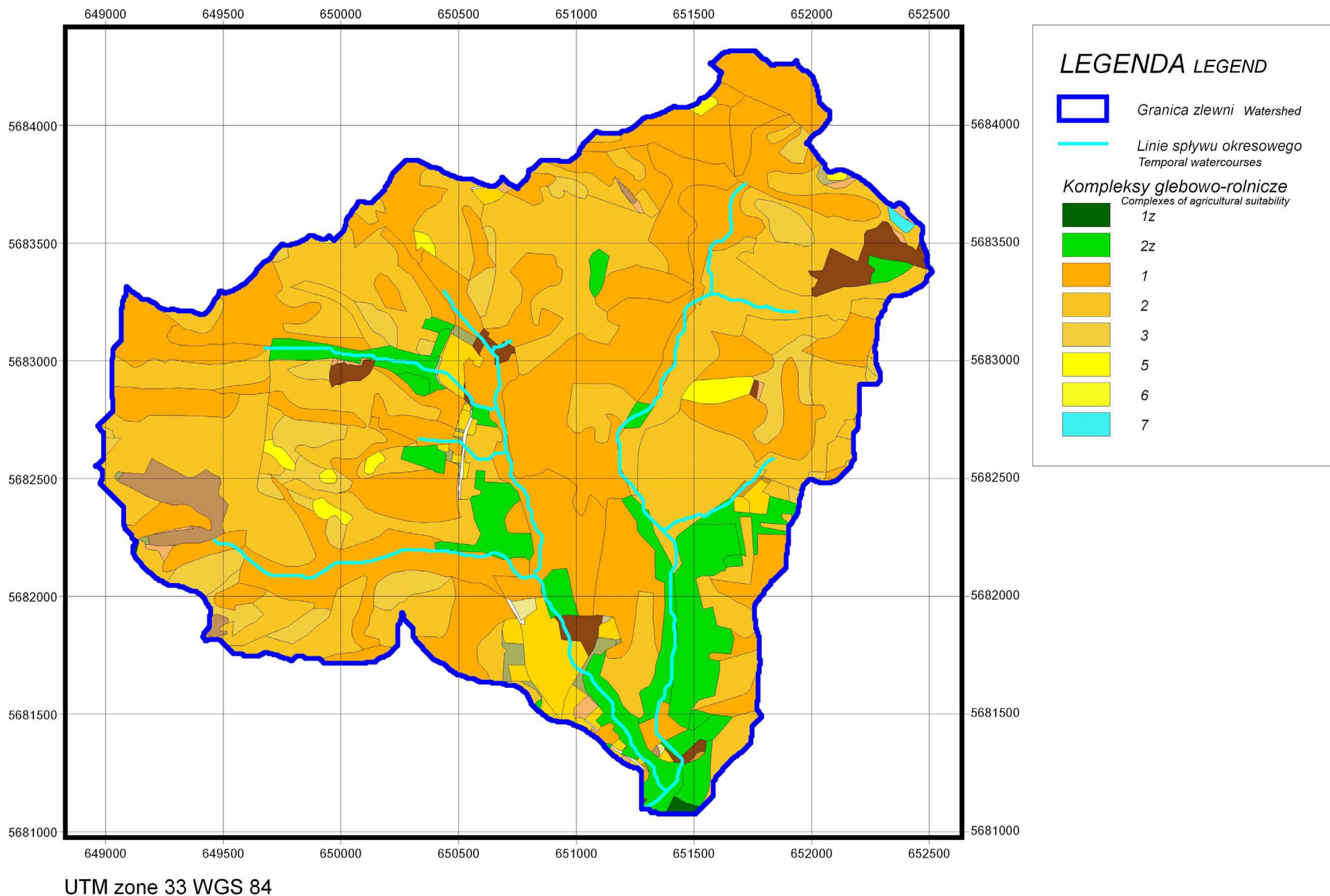
Podstawę analiz stanowił Cyfrowy Model Zlewni Mielnicy, składający się z kilku grup danych przestrzennych, utworzonych poprzez digitalizację i cyfrowe przetworzenie map analogowych [Wawer 2003]:

- mapy topograficznej w skali 1:10 000,
- mapy glebowo-rolniczej w skali 1:5 000,
- lotniczej ortofotomapy z nalogu FAO 1996 o rozdzielczości przestrzennej równej 1 m.

Studium opiera się na 2 wskaźnikach, opisujących stan istniejącej sieci dróg rolniczych: wskaźniku IARRR [Wawer 2004] oraz wskaźniku UHRR [Wawer 2003].

Wskaźnik IARRR (Indicator of Arrangement of Rural Road in Relief) określa położenie międzywęzłowych odcinków dróg rolniczych w rzeźbie terenu i wyrażony jest jako kąt pomiędzy odcinkiem drogi gruntowej i warstwicą. W pracy wykorzystano metodę pośrednią wyznaczania wskaźnika IARRR opierającą się na porównaniu azymutu odcinka drogi do wystawy stoku, która została zaimplementowana do programu ArcView GIS. Wystawa danej komórki DEM rozumiana jest jako najkrótsza droga w dół stoku do komórki sąsiedniej [Geiger 2001]. Wartości rastra wystawy stoków reprezentują geograficzny kierunek wystawy: 0 stanowi prawdziwą północ, 90 stopni reprezentuje wschód itd.

Zwektoryzowane odcinki międzywęzłowe dróg rolniczych o nawierzchni gruntowej zostały wstępnie podzielone na odcinki poprzez przecięcie konturami, uzyskanymi z DEM o interwale elewacji wynoszącym 5 m. Następnie dla każdego odcinka drogi



Rys. 10. Mapa kompleksów przydatności rolniczej gleb zlewni Mielnicy (oznaczenia kompleksów w tab. 8)
 Fig. 10. Soil agricultural map of Mielnica catchment (description of complexes of agricultural suitability in tab. 8)

uzyskano wartość azymutu oraz wartość wystawy centralnego punktu drogi poprzez nałożenie warstwy wystawy stoków. Na dwóch wymienionych zmiennych przeprowadzono szereg operacji arytmetycznych, uzyskując wartość bezwzględną kąta pomiędzy odcinkiem drogi a linią wystawy, prostopadłą do warstwic. Po ostatecznej transformacji otrzymano kąt płaski pomiędzy warstwicą a odcinkiem drogi gruntowej, stanowiący wartość liczbową wskaźnika IARRR [Wawer 2004].

Wskaźnik UHRR (Urgency of Hardening Rural Roads) wyróżnia klasy pilności utwardzania nawierzchni gruntowej i wprowadzania urządzeń odwadniania powierzchniowego dróg rolniczych

Metoda obliczania wartości wskaźnika UHRR opiera się na porównaniu spadków podłużnych dróg rolniczych oraz klas wysadzinowości gruntu (gleby) zalegającego w drodze. Metoda wyróżnia cztery stopnie pilności utwardzania nawierzchni dróg gruntowych [Wawer 2003]:

- stopień 1: bardzo pilne,
- stopień 2: pilne,
- stopień 3: umiarkowanie pilne,
- stopień 4: wskazane lokalnie.

Wektorowa warstwa przestrzenna zawierająca zdigitalizowaną sieć dróg rolniczych została przecięta warstwicami o cięciu 5 m, uzyskanymi z DEM. Powstałe odcinki dróg zostały poddane operacji cięcia i operacji geomatching poligonową warstwą przestrzenną reprezentującą pokrywę glebową. Wykorzystując rozszerzenie ArcView GIS „Surface Tool for Points, Polylines and Polygons” [Jeness 2008], obliczono spadki podłużne odcinków dróg rolniczych. Wykonano operacje arytmetyczne odpowiadające regule decyzyjnej wyznaczania wskaźnika UHRR, uzyskując mapę pilności utwardzania nawierzchni i umacniania urządzeń odwadniania powierzchniowego sieci dróg rolniczych w zlewni Mielnicy.

Wskaźnik IARRR

Wyniki analiz lokalizacji dróg wskazują niekorzystną strukturę położenia sieci drogowej w rzeźbie terenu (tab. 9). Łączna długość odcinków wzdłużstokowych przekracza 3 km, przy czym stwierdzono łączną długość dróg o idealnie wzdłużstokowym układzie na poziomie 205 m. Łączna długość dróg o korzystnym układzie poprzeczstokowym wynosi 1873 m, w tym idealnie przeciwstokowych tylko 81 m. Wizualizację ustaleń dla wskaźnika IARRR przedstawiono na rysunku 11.

Tabela 9

Table 9

Układ dróg rolniczych w rzeźbie terenu w oparciu o wskaźnik IARRR dla obszaru zlewni Mielnicy
Road arrangement in relief according to IARRR indicator in Mielnica catchment

IARRR	Układ dróg w rzeźbie Road arrangement in relief	Długość dróg – Road length	
		[m]	%
0	Idealnie przeciwstokowy Ideally perpendicular to slope	81	0,4
0–10	Przeciwstokowy Perpendicular to slope	1873	9,5
11–80	Ukośny do stoku Diagonal to slope	14746	74,8
81–90	Wzdłużstokowy Along to slope	3033	15,6
90	Idealnie wzdłużstokowy Ideally along to slope	205	1,0
Suma – Total		19702	100

Wskaźnik UHRR

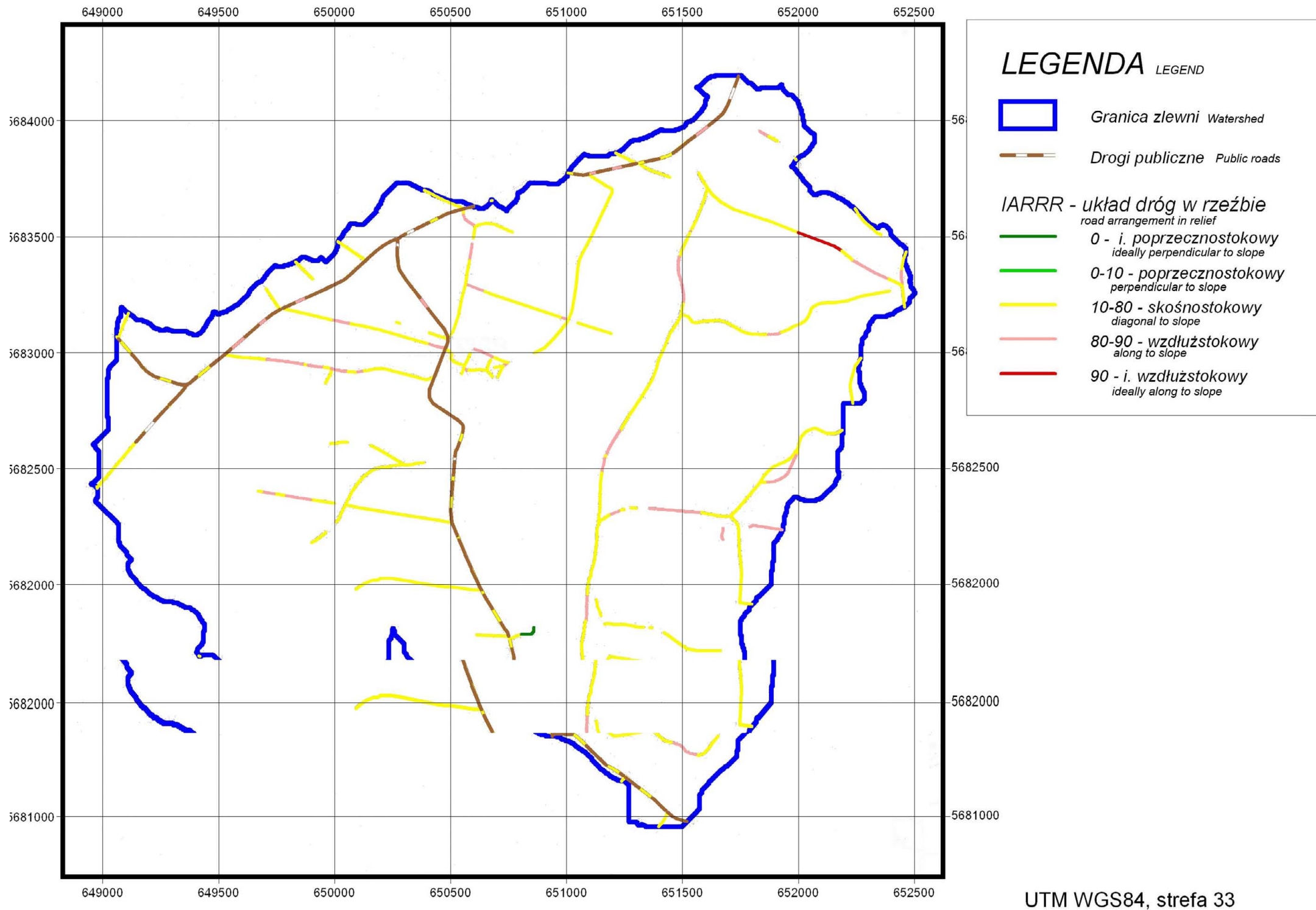
Wyniki rozpoznania stanu dróg (tab. 10) wskazują na bardzo duży udział odcinków dróg wymagających pilnych działań ochronnych w formie utwardzania nawierzchni oraz tworzenia bądź umacniania urządzeń odwadniania powierzchniowego. Około 50% dróg rolniczych zlokalizowanych w zlewni Mielnicy wymaga pilnej względnie bardzo pilnej ingerencji. Wizualizację tych ustaleń przedstawiono na rysunku 12.

Tabela 10

Table 10

Pilność utwardzania nawierzchni dróg rolniczych i umacniania ich urządzeń odwadniania powierzchniowego wg wskaźnika UHRR dla zlewni Mielnicy
The urgency of agricultural road hardening according to UHRR indicator in Milenica catchment

UHRR	Potrzeba utwardzania nawierzchni The urgency of agricultural road hardening	Długość dróg Road length	
		[m]	[%]
1	Bardzo pilna – Very urgent	2757,6	14,0
2	Pilna – Urget	7033,8	35,7
3	Umiarkowanie pilna – Moderate urgent	0,0	0,0
4	Wskazana lokalnie – Locally recommended	9910,1	50,3
Suma – Total		19702,0	100,0



Rys. 11. Wskaźnik IARR dróg rolniczych w zlewni ciekii Mielnica
 Fig. 11. IARR indicator of agricultural roads in Mielnica catchment

Wyniki analizy z wykorzystaniem wskaźnika IARRR wskazują na generalnie niekorzystny układ dróg rolniczych w rzeźbie terenu na obszarze zlewni potoku Mielnica. Udział poprawnie zlokalizowanych dróg jest niewielki. W przypadku przyszłych scaleń bądź reparcelacji, struktura sieci drogowej na badanym obszarze powinna zostać przebudowana w kierunku likwidacji wzdłużstokowych odcinków dróg rolniczych i zmniejszenia udziału dróg skośnostokowych [Nowocień 1997, 1999]. Podobnie niekorzystny wynik dała analiza z wykorzystaniem wskaźnika UHRR. Około 50% odcinków dróg wymaga pilnej ochrony, przy czym aż 14% dróg wymaga bardzo pilnej ochrony.

Porównując wyniki analiz uzyskane dla obszaru zlewni Mielnicy z wynikami badań przeprowadzonych w 2002 r. w zlewni Grodarza na Wyżynie Lubelskiej [Józefaciuk i in. 2002, Wawer 2003], stwierdzono dużo bardziej niekorzystny stan wysadzinowości dróg, gdzie w zlewni Grodarza udział klas 1 i 2 wskaźnika UHRR był o około połowę niższy niż w Mielnicy. W przypadku wskaźnika IARRR sytuacja w obu zlewniach jest analogiczna.

Weryfikacja wyników analiz przestrzennych GIS dla wskaźników IARRR i UHRR uzyskanych dla obszaru zlewni z rekonesansem terenowym wskazuje na poprawność metod w odwzorowaniu stanu dróg rolniczych. Drogi o wysokim wskaźniku UHRR podlegały rozmyciu i zagłębieniu, szczególnie intensywnemu na drogach o skośnostokowym układzie. Wnioski z analiz GIS zostały wykorzystane do opracowania scenariuszy kompleksowych działań rolno-środowiskowych na obszarze zlewni Mielnicy.

10. ZAGROŻENIE EROZJĄ WODNĄ GLEB

Badania obejmowały ocenę uwarunkowań antropogenicznych wpływających na nasilenie erozji, jakościową analizę erozji wodnej powierzchniowej oraz ilościową ocenę aktualnej erozji wodnej powierzchniowej.

Analizy jakościowej erozji wodnej powierzchniowej dokonano w oparciu o macierze wskaźników opracowanych przez A. i Cz. Józefaciuków [1996, 1999]. Pozwalają one, uwzględniając uwarunkowania pedologiczne, fizjograficzne, meteorologiczne, określić stopnie zagrożenia:

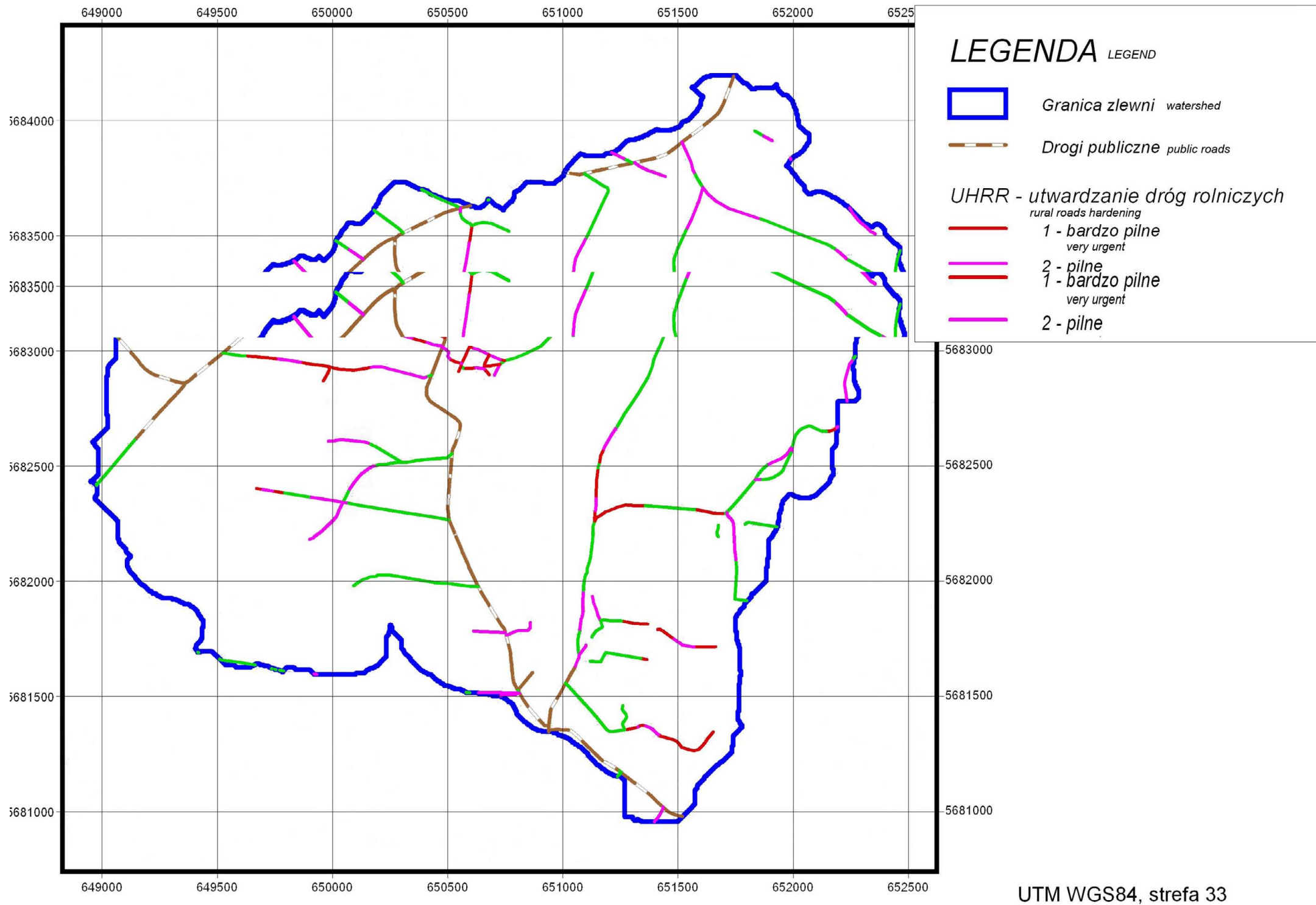
- erozją wodną potencjalną,
- nasilenia erozją wodną powierzchniową (erozja wodna aktualna),
- nasilenia erozją wąwozową.

Wszystkie analizy wykonano w środowisku ArcView© GIS 3.2, wykorzystując warstwy informacji przestrzennej Cyfrowego Modelu Zlewni Mielnicy. Wyznaczone stopnie zagrożenia erozją wodną powierzchniową oznaczają odpowiednio:

- Brak erozji: erozja nie występuje na danym obszarze (stopień 0).
- Erozja słaba: powoduje tylko niewielkie zmywy powierzchniowe gleby (stopień 1).
- Erozja umiarkowana: prowadzi do wyraźnego zmywania poziomu orno-próchnicznego i pogarszania właściwości gleby. Pełna regeneracja ubytków nie zawsze jest możliwa w toku uprawy konwencjonalnej (stopień 2).
- Erozja średnia: może doprowadzać do zupełnego zredukowania poziomu orno-próchnicznego i tworzenia się gleb o typologicznie niewykształconym profilu (zmywanych i namywanych). Zapoczątkowuje rozczłonkowanie się terenu i jest źródłem znacznej ilości rumowiska dostarczanego do rzek (stopień 3).
- Erozja silna: może przyczynić się do zniszczenia całego profilu gleby, a nawet części podłoża, z czym wiążą się zmiany pokrywy glebowej o charakterze typologicznym. Wynikiem jej jest duże rozczłonkowanie rzeźby terenu i zakłócenie stosunków wodnych (nieregularne przepływy i zanieczyszczenie wód rzecznych) (stopień 4).
- Erozja bardzo silna — w skutkach podobna do silnej, lecz intensywniej wyrażona i prowadząca do trwałego degradowania ekosystemów (stopień 5).

Wyznaczone w ten sposób obszary potencjalnego zagrożenia erozją wodną powierzchniową zostały zestawione w tabeli 11 i przedstawione na mapie wynikowej analizy GIS (rys. 13).

Analizując przestrzenne rozmieszczenie obszarów zagrożonych poszczególnymi stopniami nasilenia, można przyjąć, że generalnie pokrywa się ono z występującymi przedziałami spadków rozpatrywanej zlewni. Wpływ na taką sytuację ma jednorodność pokrycia glebowego, w związku z czym decydującym o przynależności do danego stopnia czynnikiem staje się nachylenie zboczy.



Rys. 12. Mapa wskaźnika UHRR dla sieci dróg rolniczych na obszarze zlewni cieką Mielnica
 Fig. 12. UHRR indicator of rural roads network in Mielnica catchment

Tabela 11
Table 11

Powierzchnie objęte poszczególnymi stopniami zagrożenia potencjalną erozją wodną
powierzchniową w zlewni ciekę Mielnica
Potential sheet erosion risk in Mielnica stream catchment

Nasilenie erozji Erosion rate	Powierzchnia – Area	
	[ha]	[%]
Brak (0) No erosion	0,82	0,1
Erozja słaba (1) Poor erosion	210,51	31,9
Erozja umiarkowana (2) Moderate erosion	261,71	39,7
Erozja średnia (3) Average erosion	110,98	16,8
Erozja silna (4) Strong erosion	38,44	5,8
Erozja bardzo silna (5) Very strong erosion	36,94	5,6
Razem – Total	659,40	100,0

Ocena zagrożenia potencjalnego pozwoliła jedynie wstępnie rozpoznać obszary, na których ze względu na ukształtowanie terenu oraz zaleganie danego rodzaju gleby zjawiska erozji wodnej mogą przebiegać z różną intensywnością. Nie uwzględnia ono szeregu czynników gospodarczo-antropogenicznych, wpływających między innymi na funkcję ochronną gleby. Na podstawie rozpoznania struktury zagrożenia potencjalnego oraz użytkowania poszczególnych obszarów opracowano mapę rzeczywistego zagrożenia erozją wodną. Stopnie zagrożenia potencjalnego zamienione zostały na wartości punktowe analogiczne dla każdego z nich. Uwzględniając sposób użytkowania, przypisano powierzchniom zalesionym 0 punktów, użytkom zielonym 1 punkt oraz gruntom ornym 3 punkty.

Uzasadnieniem takiej punktacji jest funkcja ochronna gleby poszczególnych rodzajów użytkowania (im słabsza funkcja ochronna tym większa ilość punktów). Metodyka zastosowana do oceny przestrzennego zagrożenia erozją wodną w zlewni Mielnicy została przedstawiona w pracy zespołowej kierowanej przez Żmudę [2005]. Wydzielone w ten sposób powierzchnie o punktacji będącej sumą zagrożenia potencjalnego i sposobu użytkowania sklasyfikowano w następujący sposób:

- erozja słaba (suma punktów = 1) – stopień 1,
- erozja umiarkowana (suma punktów = 2–3) – stopień 2,
- erozja średnia (suma punktów = 4–5) – stopień 3,
- erozja silna (suma punktów = 6–7) – stopień 4,
- erozja bardzo silna (suma punktów = 8) – stopień 5.

Powierzchnie, którym przypisano ww. stopnie zagrożenia rzeczywistego, zostały przedstawione w tabeli 12, natomiast wizualizację tego zagrożenia ukazano na rysunku 14.

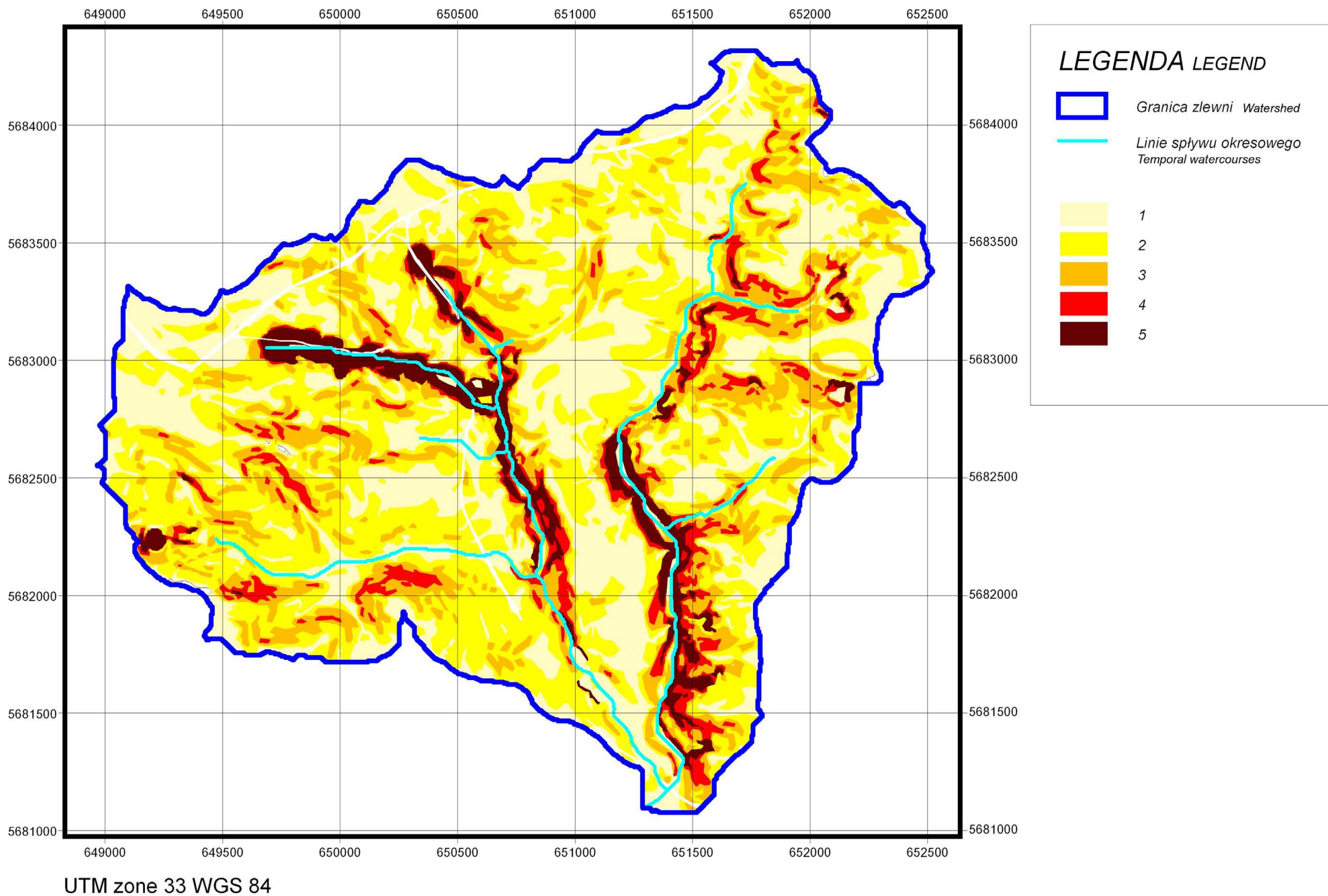
Tabela 12

Table 12

Zagrożenie rzeczywiste erozją wodną powierzchniową na obszarze zlewni Mielnicy
Actual sheet erosion risk in Mielnica catchment

Nasilenie erozji Erosion rate	Powierzchnia – Area	
	[ha]	[%]
Brak (0) – No erosion	201,67	30,6
Erozja słaba (1) Poor erosion	175,51	26,6
Erozja umiarkowana (2) Moderate erosion	193,80	29,4
Erozja średnia (3) Average erosion	65,58	9,9
Erozja silna (4) Strong erosion	15,00	2,3
Erozja bardzo silna (5) Very strong erosion	7,84	1,2
Razem – Total	659,4	100,0

Wyniki zestawione w powyższej tabeli wskazują na zmiany wielkości powierzchni zajmowanych przez poszczególne klasy zagrożeń. Po uwzględnieniu sposobu użytkowania najsilniej, bo 5. stopniem zagrożone jest ok. 7,84 ha. Na najniższe stopnie zagrożenia 1. i 2. przypada ponad 50% obszaru zlewni. Nowy rozkład przestrzenny zagrożenia zlewni erozją wodną jest w głównej mierze zdeterminowany ochronną funkcją użytków leśnych i trwałych zadarnień, które znacznie ograniczyły udział powierzchni zagrożonych. Niemniej, pomimo tego, ok. 15% powierzchni zlewni jest znacznie zagrożone rzeczywistą erozją wodną gleb. Gleba poddawana ciągłej presji czynnika antropogenicznego, jakim jest częste nieprawidłowe wykonywanie zabiegów agrotechnicznych na polach ornych oraz wadliwe prowadzenie kierunków upraw, ulega zmywaniu ze zboczy ku podstawie erozyjnej. Częste wizje lokalne w terenie pozwalają stwierdzić, że na obszarach kartowanych w najwyższych stopniach rzeczywistego zagrożenia najczęściej pojawiają się objawy erozji wodnej powierzchniowej nawet po niewielkich opadach (fot. 12–15).



Rys. 13. Mapa zagrożenia potencjalnego erozją wodną powierzchniową zlewni Mielnicy (oznaczenia legendy w tab. 11)
 Fig. 13. Map of potential sheet erosion risk in Mielnica catchment (legend description in tab. 11)



Fot. 12. Bezpośrednie obserwacje zjawisk erozji wodnej – zlewnia Mielnicy (fot. Sz. Szewrański)
Phot. 12. Survey observations of water erosion in Mielnica catchment



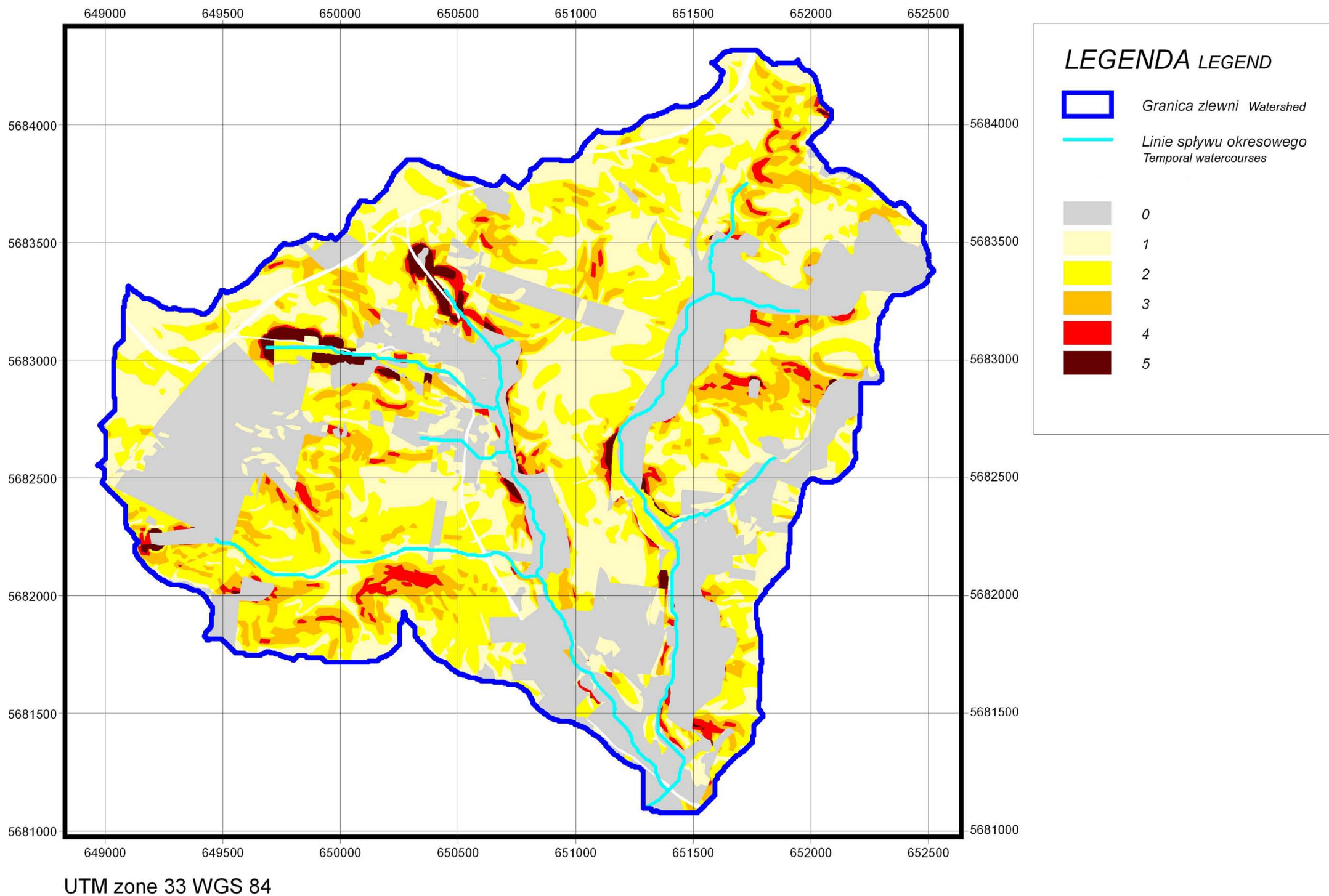
Fot. 13. Podnóże erodowanego stoku z widocznymi namywami (fot. Sz. Szewrański)
Phot. 13. Footslope of eroded field with diluvial deposits



Fot. 14. Przykład szkód erozyjnych w wyniku niewielkiego opadu atmosferycznego na polach po świeżo przeprowadzonych zabiegach agrotechnicznych (fot. Sz. Szewrański)
Phot. 14. Example of erosive changes in newly-cultivated arable plot after low intensity rainfall



Fot. 15. Redliny na polu z ziemniakami wypełnione namułami (fot. Sz. Szewrański)
Phot. 15. Sediment deposits in potatoes ridges



Rys. 14. Mapa rzeczywistego zagrożenia erozją wodną powierzchniową w zlewni Mielnicy (oznaczenia legendy w tab. 12)
 Fig. 14. Map of the actual sheet erosion risk in Mielnica catchment (legend description in tab. 12)

11. PRZESŁANKI DO WPROWADZENIA ZABIEGÓW OCHRONNYCH NA OBSZARZE WZGÓRZ TRZEBNICKICH NA PRZYKŁADZIE ZLEWNI MIELNICY

Wzgórza Trzebnickie na mapie Dolnego Śląska i przedpola Sudetów stanowią jeden z unikalnych i niepowtarzalnych mezoregionów. Z jednej strony są świadectwem pracy lodowców na obszarze Polski (szczególnie ostatniego zlodowacenia), z drugiej – posiadają walory przyrodnicze cechujące się niepowtarzalnym lokalnym kolorytem.

Pod względem geobotanicznym ten mezoregion położony jest w dziale brandenbursko-wielkopolskim, krainie południowowielkopolsko-łużyckiej, podkrajnie wschodniej [Matuszkiewicz 2007], podokręgu trzebnickim [Pawlak 1997]. Jest to obszar wyjątkowy ze względu na obecność licznych i rzadko spotykanych w innych rejonach przedstawicieli flory górskiej, kserotermicznej i torfowiskowej, a także wielu wymierających gatunków segetalnych, związanych z zanikającymi już tradycyjnymi formami upraw rolnych [Anioł-Kwiatkowska 2003]. Na Wzgórzach Trzebnickich spotkać można rośliny występujące tylko w górach, jak paprotnik kolczasty, przetacznik górski, bez koralkowy czy też rośliny objęte ochroną, takie jak np. storczyki, widłaki, śnieżynki, goździk kartuski, konwalia majowa i dzwonki bolońskie. Pozostałości naturalnych i seminaturalnych fitocenoz zachowały się przede wszystkim na stromych zboczach dolin i wąwozów, skarpach oraz w lokalnych obniżeniach terenu, przy czym zbocza dolin zajmują przede wszystkim różne typy zbiorowisk leśnych. Na skarpach i ścianach wyrobisk odnaleźć można liczne gatunki kserotermiczne i termofilne. Seminaturalne łąki świeże i wilgotne najczęściej związane są z dolinami cieków. Miejsca charakteryzujące się silnym uwilgotnieniem i zabagnione zajmują zazwyczaj zbiorowiska szuwarowe. Jednymi z najcenniejszych obiektów są doliny potoków, pokryte zazwyczaj fragmentami wielogatunkowych lasów liściastych. Pewien taki fragment leśny w dolnym biegu Mielnicy, już poza obszarem badanej zlewni, objęty jest ochroną prawną jako rezerwat przyrody „Las bukowy w Skarszynie” [Pender, Rybałtowska 1995].

Świadectwem wysokich walorów przyrodniczo-krajobrazowych bezpośrednio występujących w zlewni Mielnicy jest obecność na tym obszarze cennych i rzadkich siedlisk roślinnych. Przykładem jest objęta ochroną prawną i zlokalizowana w okolicy Piersna murawa napiaskowa *Koelerion glaucae*, ze stanowiskami rzadkich roślin trawiastych. Kolejne, cenne przyrodniczo obiekty to siedliska należące do grupy zagrożonych i rzadkich, a występujące w pobliżu Głuchowa Górnego – Grąd zboczowy (niżowy las zboczowy klonowo-lipowy *Acer platanoides* – *Tilia cordata*) oraz w pobliżu Bolescina – Grąd środkowoeuropejski *Galio sylvaticii*–*Carpinetum*, a także kwaśna buczyna niżowa *Luzulo pilosae*–*Fagetum* [Bobrowicz, Konieczny 2004].

Przedstawiona w rozdziałach wcześniejszych charakterystyka podłoża geologicznego gleb zalegających na Wzgórzach Trzebnickich oraz samych gleb wytworzonych ze skał macierzystych tego obszaru, w powiązaniu z panującymi warunkami meteorologicznymi sprzyjającymi rozwojowi rolnictwa, spowodowały, że to ostatnie stało się zasadniczym użytkownikiem gruntów i dominuje w strukturze użytkowania, wykorzystując prawie większość areалу. Fizjografia terenu w powiązaniu z wieloletnim użytkowaniem rolniczym gleb lessowych sklasyfikowanych do najwyższego stopnia podatności gleb na zmywanie – to główne przyczyny uaktywniania się procesów erozyjnych na Wzgórzach Trzebnickich potęgowanych działalnością antropogeniczną. Wieloletnie badania prowadzone w tym kierunku, na tym właśnie obszarze, wyraźnie wskazują nieracjonalne rolnictwo jako jedną z najważniejszych przyczyn degradacji środowiska naturalnego. Niekorzystne wpływy tej gałęzi gospodarki znajdują swoje odbicie w funkcjonowaniu systemów fluwialnych mających swe źródła właśnie na Wzgórzach Trzebnickich [Żmuda 2006]. Ważnym argumentem jest również fakt, że część tych cieków zasila rzekę Barycz, w dolinie której utworzono park krajobrazowy „Dolina Baryczy”. Spływające ze Wzgórz wody, częstokroć niskiej jakości, zanieczyszczone związkami azotu i fosforu prowadzą w konsekwencji do obniżania jakości środowiska jednego z najcenniejszych przyrodniczo w skali europejskiej obszarów, jakim jest właśnie dolina Baryczy. Dominacja na Wzgórzach Trzebnickich obszarów rolniczych wpływa również na jakość krajobrazu tej krainy. Przewaga pól ornych w monokulturze, często o powierzchniach przekraczających kilkanaście hektarów powoduje, że krajobraz rolniczy mezoregionu posiada ubogą strukturę ekologiczną. Znajdują się jednak fragmenty obszarów o bardziej naturalnej formie krajobrazu (fot. 16).



Fot. 16. Fragment obszaru zlewni cieków Mielnica o bogatej strukturze ekologicznej krajobrazu rolniczego (fot. R. Żmuda)
Phot. 16. Mielnica catchment section with the rich ecological structure of the agricultural landscape

Przytoczone powyżej rozważania na temat konieczności wprowadzenia zabiegów ochronnych na obszarze Wzgórz Trzebnickich mają swoje uzasadnienie poparte zarówno walorami przyrodniczymi, jak i skutkami działalności antropogenicznej przedstawionymi w rozdziałach wcześniejszych. Szansa poprawy tej sytuacji istnieje i to bardzo realnie. Obszar gminy Trzebnica, w którego skład wchodzi część Wzgórz oraz przeważająca część rozpatrywanej zlewni Mielnicy, włączony został do Krajowego Programu Rolnośrodowiskowego w strefie priorytetowej „Dolina Odry” (02B) [Bobrowicz, Konieczny 2004]. Program ten powinien zostać opracowany do roku 2014. Dla gminy oraz części Wzgórz Trzebnickich jest to szansa, którą należy wykorzystać w trakcie opracowywania konkretnych działań. Przestrzenie rolnicze charakteryzujące się silną antropogenizacją mogą nabrać nowego, przyjaznego przyrodzie i człowiekowi wyglądu estetycznego, a obszar ten może stanowić wzorcowy przykład współistnienia przyrody i rolnictwa oraz świadomego gospodarowania zasobami natury z minimalizacją negatywnych skutków dla przyrody. Przedstawione w następnym rozdziale wariantowe propozycje działań ochronnych i modelowane skutki ich podjęcia to przykład nowoczesnego myślenia o otoczeniu człowieka, popartego możliwościami współczesnej techniki informatycznej.

12. MODELOWANIE SKUTKÓW PRZEDSIĘWZIĘĆ ROLNO-ŚRODOWISKOWYCH

Współczesna technika komputerowa pozwala, przy wykorzystaniu istniejących narzędzi i programów, prognozować skutki działań rolno-środowiskowych, które mogą być wdrożone w najbliższych latach na obszarze zlewni. Rozpatrzenie hipotetycznych i prawdopodobnych scenariuszy zmian zachodzących w przestrzeni produkcji rolnej powinno stanowić jeden z zasadniczych elementów podejmowania decyzji o działaniach ingerujących w ww. przestrzeń, których faktyczne skutki będą możliwe do oceny dopiero przez przyszłe pokolenia. Przyjęto, iż zastosowane modelowanie matematyczne powinno uwzględniać prognozy zmian klimatycznych, jakie mogą mieć miejsce w najbliższym 50-leciu.

12.1. Model SWAT

Główne cele projektu zostały osiągnięte poprzez walidację modelu SWAT (Soil and Water Assessment Tool) względem danych rzeczywistych pochodzących z monitoringu zlewni Mielnicy. SWAT został zaprojektowany pierwotnie jako narzędzie do ciągłych, długoterminowych symulacji wpływu różnych scenariuszy użytkowania terenu na jakość środowiska w zlewni, przy czym siłą motoryczną wszystkich modelowanych zjawisk jest bilans wodny. Podstawowe równania opisujące bilans wodny obejmują: odpływ powierzchniowy (metoda SCS Curve Numbers oraz Green-Ampt'a), potencjalną i aktualną ewapotranspirację, spływ śródpokrywowy oraz odpływ gruntowy.

W oparciu o dane fizycznych właściwości pokrywy glebowej, strukturę użytkowania terenu, topografię (DEM) – zawarte w rozszerzonej bazie danych przestrzennych oraz dane ze stacji meteorologicznych, wsparte wbudowanym generatorem pogody – możliwe jest określenie bieżącej wilgotności profilu glebowego w jednodniowych interwałach czasowych. Parametry funkcyjne generatora pogody wbudowanego w SWAT zostały wprowadzone na podstawie meteorologicznych danych archiwalnych i pochodzących z bieżących badań. Umożliwiło to wprowadzenie scenariuszy zmian klimatu. Poniżej zestawiono najważniejsze parametry wejściowe do modelu (* – parametry opcjonalne).

1. Parametry wejściowe właściwości pokrywy glebowej do modelu SWAT:

- HYDGRP – grupa hydrologiczna gleb (USDA),
- TEXTURE* – tekstura gleby (USDA),
- SOL_Z – głębokość zalegania spągu warstwy,
- SOL_BW – gęstość objętościowa w stanie wilgotnym,
- SOL_AWC – dostępna pojemność wodna,
- SOL_K – przewodność hydrauliczna nasycona,
- SOL_CBN – zawartość Corg,

- CLAY – zawartość frakcji iłu (USDA),
 - SIL – zawartość frakcji pyłu (USDA),
 - SAND – zawartość frakcji piasku (USDA),
 - ROCK – zawartość frakcji kamienistej (USDA)
 - USLE_K – wskaźnik podatności na erozję K wg USLE.
2. Parametry wejściowe charakterystyki użytkowania terenu do modelu SWAT:
- IDC – klasa rośliny/pokrywy roślinnej,
 - BIO_E – stosunek biomasa/energia,
 - HVSTI – wskaźnik plonowania,
 - BLAI – maksymalna powierzchnia liści,
 - FRGRW1 – ułamek sezonu wegetacyjnego odpowiadający 1. punktowi na krzywej optymalnego rozwinięcia liści,
 - LAIMX1 – ułamek maksymalnej wartości indeksu powierzchni liści odpowiadający 1. punktowi krzywej optymalnego rozwinięcia liści,
 - FRGRW2 – ułamek sezonu wegetacyjnego odpowiadający 2. punktowi na krzywej optymalnego rozwinięcia liści,
 - LAIMX2 – ułamek maksymalnej wartości indeksu powierzchni liści odpowiadający 2. punktowi krzywej optymalnego rozwinięcia liści,
 - DLAI – ułamek sezonu wegetacyjnego, w którym liście zaczynają opadać,
 - CHTMX – maksymalna wysokość rośliny/pokrywy roślinnej,
 - RDMX – maksymalny zasięg korzeni roślin,
 - T_OPT – temperatura optymalna dla wzrostu roślin,
 - T_BASE – minimalna temperatura, od której rozpoczyna się wzrost roślin,
 - CNYLD – ułamek zawartości N w ziarnie,
 - CPYLD – ułamek zawartości P w ziarnie,
 - BN1 – ułamek zawartości N w roślinie w fazie wschodu,
 - BN2 – ułamek zawartości N w roślinie w połowie fazy dojrzałości,
 - BN3 – ułamek zawartości N w roślinie w fazie dojrzałości,
 - BP1 – ułamek zawartości P w roślinie w fazie wschodu roślin,
 - BP2 – ułamek zawartości P w roślinie w połowie fazy dojrzałości,
 - BP3 – ułamek zawartości P w roślinie w fazie dojrzałości,
 - WSYF – dolna granica indeksu plonów,
 - USLE_C – minimalna wartość wskaźnika C (USLE),
 - CO2HI – koncentracja CO₂,
 - BIOEMI – tempo biomasa–energia odpowiadające 2. punktowi krzywej użycia promieniowania,
 - RSDCO_PL – wskaźnik rozkładu resztek roślinnych,
 - OV_N – szorstkość powierzchni wg Manninga,
 - EFTMIX – efektywność mieszania,
 - DEPTIL – głębokość mieszania;
3. Parametry wejściowe danych ze stacji meteorologicznych do modelu SWAT:
- RAIN_YRS – liczba lat obserwacji,
 - WLATITUDE* – szerokość geograficzna położenia stacji,

- WLONGITUDE* – długość geograficzna położenia stacji,
- WELEV* – wysokość położenia stacji w m n.p.m.,
- TMPMX – średnia maksymalna temperatura powietrza,
- TMPMN – średnia minimalna temperatura powietrza,
- TMPSTDMX – odchylenie standardowe maksymalnej temperatury powietrza,
- TMPSTDMN – odchylenie standardowe minimalnej temperatury powietrza,
- PCPMM – średni opad,
- PCPSTD – odchylenie standardowe opadu,
- PR_W1 – prawdopodobieństwo wystąpienia dnia mokrego po dniu suchym,
- PR_W2 – prawdopodobieństwo wystąpienia dnia mokrego po dniu mokrym,
- PCPD – średnia liczba dni z opadem,
- RAINHHMX – maksymalny 0,5 h opad w całym okresie obserwacji,
- SOLARAV – średnie dzienne promieniowanie słoneczne,
- DEWPT – średnia temperatura punktu rosy,
- WNDAY – średnia prędkość wiatru.

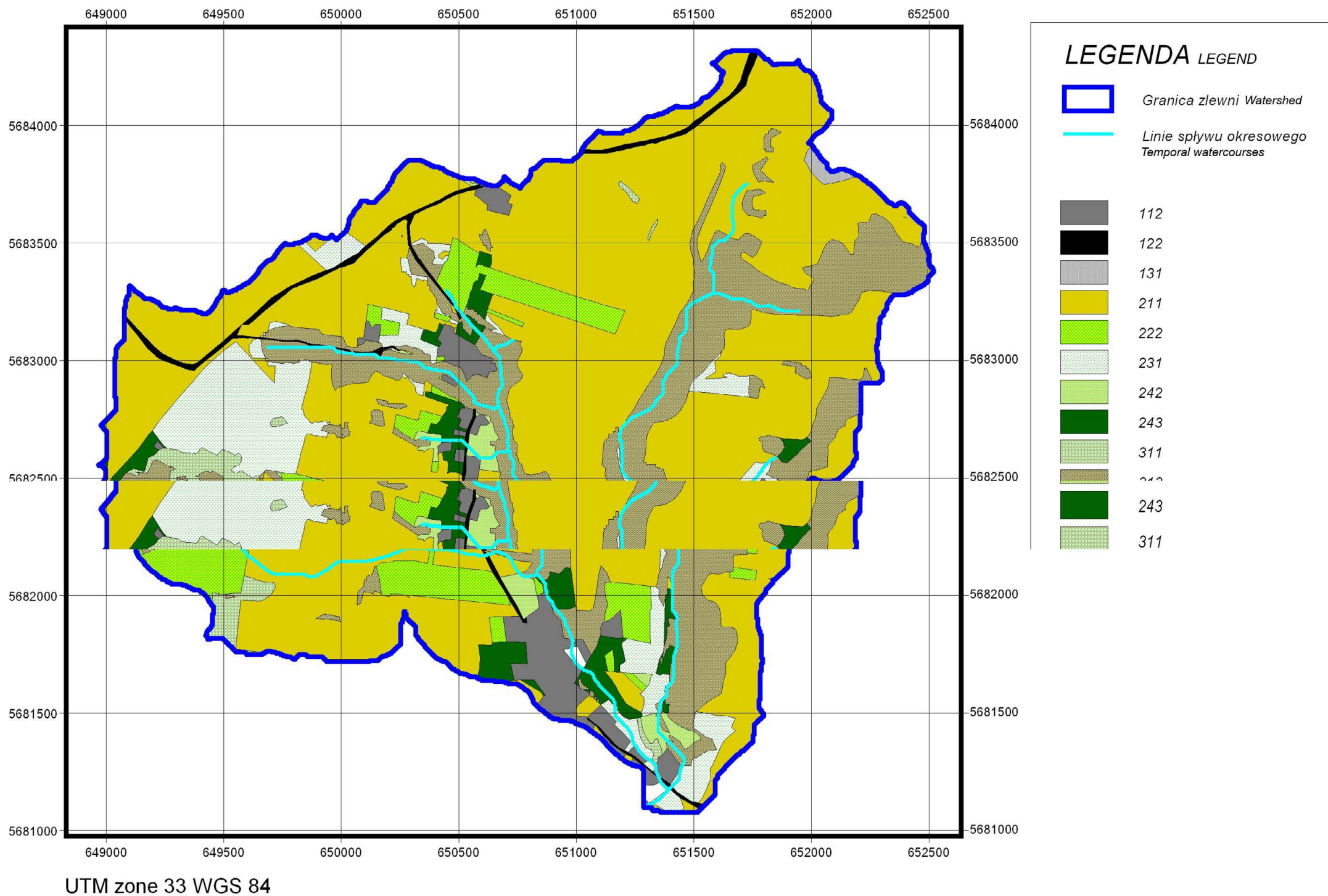
Modelowanie przeprowadzono w oparciu o Cyfrowy Model Zlewni Mielnicy i archiwalne dane meteorologiczne z lat 1982–2004 oraz bieżący monitorin zlewni cząstkowej z okresu 2004–2005. Otrzymane wyniki modelowania wykazywały znaczne rozbieżności zarówno w części dotyczącej hydrologii, jak i zanieczyszczeń obszarowych. Różnice wielkości otrzymanych z modelowania i obserwowanych sięgały ok. 42% dla danych hydrologicznych, ok. 64% dla erozji wodnej gleb i aż ok. 82% dla biogenów. Dlatego też przeprowadzono 2-etapową kalibrację modelu na danych z monitoringu: 1 etap obejmował kalibrację modułu SWAT obejmującego zależność opad–odpływ, drugi etap dotyczył modułów zanieczyszczeń obszarowych. Wykorzystano mechanizm kalibracji wbudowany w model SWAT. Kalibracja poprawiła dopasowanie danych z wyników modelowania względem obserwowanych, przy czym zdecydowanie lepsze wyniki dała kalibracja danych hydrologicznych, gdzie błąd modelowania obniżył się do poziomu kilku procent. Sprawdzenie jakości kalibracji na danych średnich z okresu lat 90. dało zbliżone rezultaty. Ponieważ kalibracja modułu hydrologii SWAT na danych rzeczywistych dała dobre rezultaty, zaniechano cross-walidacji przy użyciu modelu WMS.

12.2. Scenariusze zmian

Propozycje działań rolnośrodowiskowych dobrano do warunków lokalnych i opracowano wg zaleceń Kodeksu Dobrej Praktyki Rolniczej. Zaproponowane działania są zgodne z europejskimi standardami zrównoważonego gospodarowania i produkcji rolnej przyjaznej środowisku. Opracowując scenariusze modelowe, oparto się m.in. na aktach prawa polskiego, dyrektyw Unii Europejskiej oraz zaleceń Komisji Helsińskiej (HELCOM), dostosowując je do uwarunkowań lokalnych i specyfiki obszaru rozpoznanego w trakcie badań, a także wyników analiz GIS przeprowadzonych w ramach niniejszych badań.

Propozycje zmian w charakterze produkcji rolnej dotyczyły m.in. zagadnień z zakresu:

- sposobu uprawy roli,
- struktury użytków rolnych,



Rys. 15. Wizualizacja działań rolno-środowiskowych w zlewni Mielnicy objętych wariantem VAR1 (oznaczenie CLC w tab.1)
 Fig. 15. Agri-environmental measures in Mielnica catchment in VAR1 scenario (CLC description in tab.1)

- zmianowania,
- gospodarki nawozowej,
- zapobiegania zanieczyszczeniu wód płynących m.in. poprzez wprowadzenie systemów buforowych.

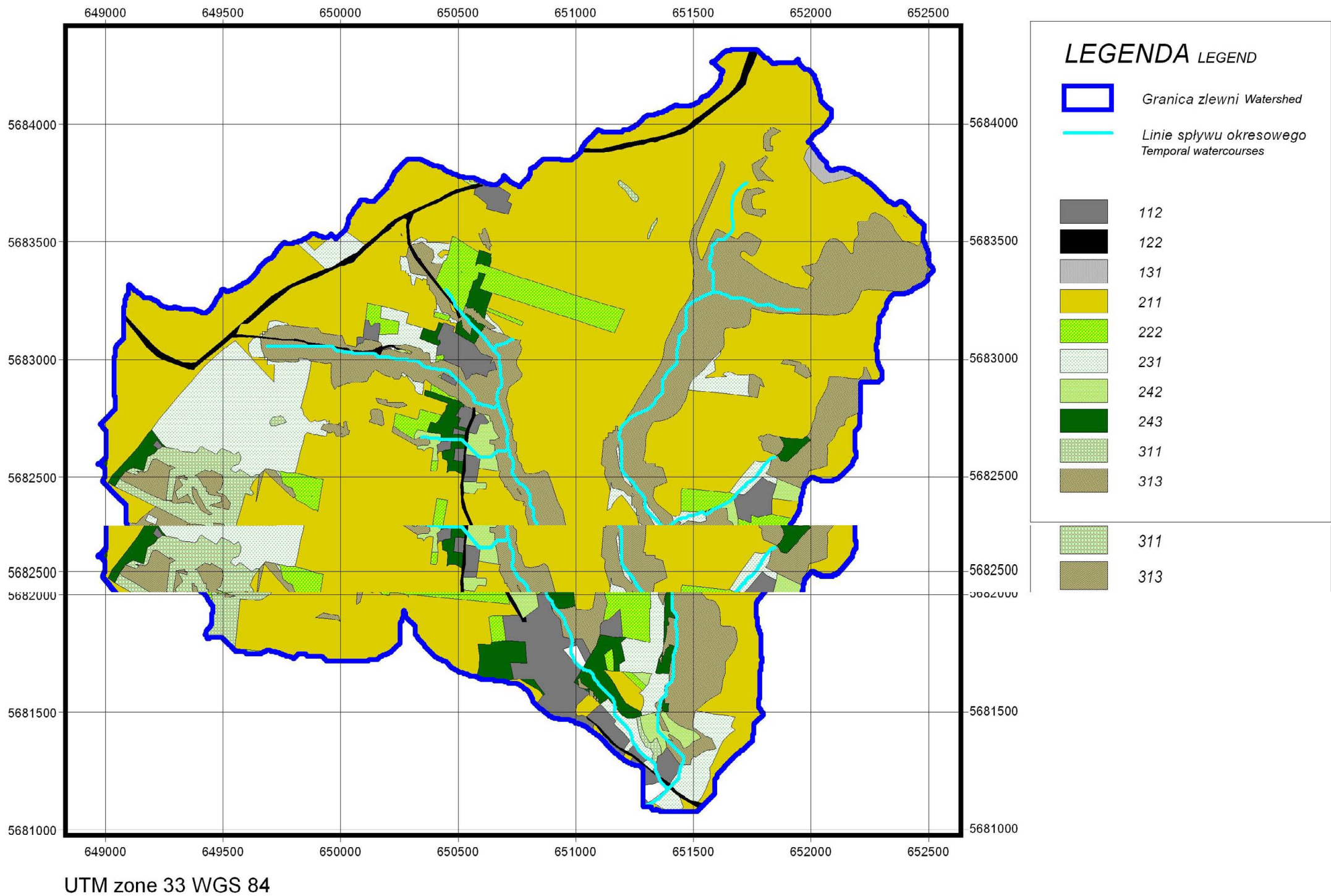
Ze względu na fakt, iż badana zlewnia ulega silnym procesom degradacji gleb, szczególną uwagę zwrócono na systemy i działania przeciwerozyjne. Zaproponowano m.in.:

- trwałe zalesianie gruntów na stokach o nachyleniu powyżej 15%;
- trwałe zadarnianie lub uprawy sadownicze na gruntach o nachyleniu 10–15%;
- stosowanie specjalnego sposobu uprawy roli na gruntach położonych na stokach o nachyleniu do 10%, zwłaszcza na długich skłonach, mimo ich słabszego narażenia na erozję wodną;
- przeciwerozyjne zagospodarowanie dróg spływu wód opadowych i zabezpieczenie dróg rolniczych;
- stosowanie płodozmianów przeciwerozyjnych, w skład których powinny wchodzić rośliny motylkowate, ich mieszanki z trawami oraz rośliny ozime tworzące zwartą okrywę już w okresie jesiennym;
- wprowadzanie poplonów osłaniających glebę;
- wykonywanie zabiegów uprawowych na stokach w kierunku poprzecznym do nachylenia;
- wprowadzenie na zboczach uprawy bezorkowej (np. przy użyciu kultywatora z szerokimi łapami, a do uprawy przedsięwnej – biernych zestawów uprawowych, z brony lub kultywatora i wału strunowego albo pierścieniowego);
- wykonywanie głęboszowania na glebach silnie zagrożonych erozją, jako dodatkowego zabiegu przeciwerozyjnego, w celu zwiększenia pojemności wodnej gleby i ułatwienia wsiąkania wody do głębszych jej warstw.

Poniżej przedstawiono scenariusze zmian, które zostały przyjęte do dalszych badań i analiz modelowych. Założono, iż w pracy zostaną rozpatrzone:

1. **Wariant „zerowy” (VAR0)** – to sytuacja, w której na obszarze zlewni Mielnicy nie będą zachodziły zmiany w charakterze i sposobie produkcji rolnej. Bez zmian pozostaną struktura użytków, sposoby uprawy. Zakłada się niezmiennie w czasie poziomy nawożenia gruntów rolnych. Parametry wejściowe do modelu matematycznego będą zgodne z istniejącymi obecnie uwarunkowaniami zlewniowymi. W wariantcie zerowym uwzględniono prognozy niekorzystnych zmian klimatycznych, które mogą wystąpić w najbliższych latach.
2. **Wariant „rolno-środowiskowy niepełny” (VAR1)** – w tym scenariuszu zaprojektowano hipotetyczne rozwiązania, które mogą mieć miejsce w rolniczej przestrzeni produkcyjnej zlewni Mielnicy. Dotyczą one głównie sposobu uprawy gleb i przyjaznej środowisku agrotechnice. W symulacji VAR1 (rys. 15) nie założono zmian w strukturze użytkowania – kształt i układ działek pozostają niezmiennie. W szczególności wariant „rolno-środowiskowy umiarkowany” uwzględnia:
 - ograniczenie ilości zabiegów uprawowych i nawożeń do niezbędnego minimum w odpowiednich terminach;

- prowadzenie zmianowania dla utrzymania dobrej struktury i gospodarki wodnej gleb, obejmującego możliwie dużą ilość roślin dobrze chroniących glebę przed erozją;
 - dobór roślin chroniących glebę przed wymywaniem cząstek glebowych, nawozów i środków ochrony roślin;
 - prowadzenie uprawy wstęgowej z naprzemiennym wysiewem roślin okopowych, zbóż, kukurydzy i ochronnych motylkowych oraz traw, pasy roślinności ochronnej (żyto ozime i łubin) o szerokości 10÷15 metrów;
 - uprawę pól w sposób poprzecznostokowy dla ograniczenia spływu wód oraz orkę z odkładaniem skib do góry;
 - wcześniejszy termin siewu, zwłaszcza roślin ozimych, który zapewnia lepsze krzewienie i bardziej skuteczne zabezpieczenie przed erozją;
 - obsiew mieszkanką traw poboczy dróg dojazdowych oraz w strefie buforowej wzdłuż cieków;
 - zakaz wypalania ściernisk i traw;
 - przyjęcie poziomu nawożenia azotem poniżej 170 kg·ha⁻¹ oraz optymalnej dawki NPK 300 kg·ha⁻¹.
3. **Wariant „rolno-środowiskowy pełny” (VAR2)** – jest on w stosunku do scenariusza VAR1 znacznie bardziej rozbudowany. Założono, iż wszystkie proponowane zalecenia dobrej agrotechniki należy uzupełnić o zmiany strukturalne w obrębie użytków rolnych na obszarze zlewni. Wariant VAR2 (rys. 16) obejmuje następujące elementy zgodne z propozycjami VAR1:
- optymalizacja ilości zabiegów uprawowych i nawożeń,
 - prowadzenie odpowiedniego zmianowania i dobór roślin glebochronnych oraz wcześniejszy termin siewu,
 - stosowanie uprawy wstęgowej i poprzecznostokowej,
 - przyjęcie dawek nawożenia na ww. poziomach.
- Powyższe propozycje, po dokonaniu analiz przestrzennych GIS, zostały poszerzone o elementy fitomelioracji i inne zabiegi o podobnym działaniu, mające na celu m.in. zwiększenie retencji obszarowej, hamowanie spływu wody, rozpraszanie strug i przechwytywanie niesionego materiału glebowego. Obejmowały one:
- Zalesienia – zaproponowano na części wierzchołwin, na zboczach i gruntach wzdłuż cieków, ze względu na wyjątkowo duże właściwości ochronne drzew. Zdecydowano się na wyłączenie z użytkowania rolniczego prawie wszystkich fragmentów terenu o spadku powyżej 15% i większości o spadkach powyżej 10% – ze względu na postępującą erozję wodną lessu. Zaplanowano nowe nasadzenia, głównie klonowe, dębowe, modrzewiowe i jesionowe. W skład przemieszczeń pojedynczych i grupowych wchodzić będą: jesion, lipa, brzoza, osika, dąb, jawor, olsza, sosna, topola i grab. Dla roślinności drugiego piętra wybrano czeremchę, wierzbę, bez czarny, lipę i osikę. W runie znajdować się mają: bluszcz, malina, jeżyna, niecierpek, rokitnik, pokrzywa, chmiel, trzcina i głóg. Proponuje się przed każdym zalesieniem zastosowanie dwóch przedplonów, np. z roślin motylkowych i ich mieszanek z łubinem, a następnie z wierzby krzewiastej, leszczyny pospolitej,



Rys. 16. Wizualizacja działań rolno-środowiskowych w zlewni Mielnicy objętych wariantem VAR2 (oznaczenie CLC w tab.1)
 Fig. 16. Agri-environmental measures in Mielnica catchment in VAR2 scenario (CLC description in tab.1)

dzikiej róży i gruszy pospolitej. Obszary leśne mają być rozbudowane w strefie cieków tak, aby powstał korytarz ekologiczny wraz z istniejącymi lasami i sadami, planowanymi strefami buforowymi i użytkami zielonymi. Uwzględniając gatunki już występujące w strefie cieków, zaprojektowano lasy głównie bukowe z jaworem, modrzewiem, dębem, bzu czarnym i głogiem oraz jesionowe ze świerkiem, osiką, wierzbą, bzu czarnym i leszczyną. Runo powinny stanowić rokitnik, jeżyna, malina, bluszcz, niecierpek, pokrzywa i turzyca. Zalesienia o podobnym składzie gatunkowym pojawią się również wzdłuż cieków okresowych.

- Sady – ze względu na wysoki potencjał produkcyjny gleb zalegających na obszarze zlewni zdecydowano się na wprowadzenie sadów jako zastępczej formy zadrzewień. Rozwiązanie to dotyczy zboczy o nachyleniu od 10 do 15% i wystawie południowej. Proponowanymi drzewami owocowymi powinny być wiśnia, jabłoń, brzoskwinia, a z krzewów porzeczka. Dopuszcza się ponadto możliwość wprowadzenia upraw winorośli, którym sprzyjają warunki cieplne regionu. Jest to obszar o największych predyspozycjach określonych na podstawie sumy aktywnych temperatur powietrza (rocznej sumy średnich temperatur dziennych powyżej 10°C). Nasadzenia powinny mieć układ poprzecznostokowy. Wśród możliwych do wykorzystania odmian zaliczają się szczepy odporne na szkodniki i mrozy:
 - Aurora, Festiwalnyj, Rakisz – na wina białe,
 - Iliczewskij Rannij, Rondo, Cascade – na wina czerwone.
- Zakrzewienia – zaplanowano wprowadzenie formacji glebochronnych składających się z krzewów i darni na bardzo stromych skarpach powstałych między poszczególnymi polami w wyniku nieprawidłowego wykonywania zabiegów uprawowych; dla jak najlepszego umocnienia tych terenów wybrano rajgras wyniosły, życicę trwałą i kostrzewę owczą, a z krzewów ligustr pospolity, malinę właściwą, jeżynę popielicę, trzmielinę zwyczajną i różę dziką.
- Strefy buforowe – zaproponowano pasy o szerokości 25 m składające się ze stref o szerokości 4, 6 i 15 m oraz pasy szerokości 18 m ze strefami o szerokości 3, 5 i 10 m zlokalizowane wzdłuż cieków. Skład gatunkowy będą stanowić m.in.:
 - głóg dwuszyjkowy, jałowiec pospolity, bez czarny i dzika róża – w strefie I,
 - leszczyna pospolita, śliwa rdzawa, śliwa ałycza, czeremcha i dereń właściwa – w strefie II,
 - drzewa wysokie, m.in. dąb, buk i grab – w strefie III.
- Zadrzewienia śródpolne – zaproponowano nasadzania w postaci jednogatunkowych, ażurowych pasów o szerokości min. 5 m, zorientowanych na osłonę gleb przed wiatrami zachodnimi. Gatunki możliwe do wykorzystania to: lipa drobnolistna, klon zwyczajny, czereśnia dzika, bez dziki, róża dzika.
- Zadarnianie – nowe łąki i pastwiska zostały zaprojektowane na stokach o nachyleniu 10–15% i stanowią funkcjonalne uzupełnienie trwałych zadrzewień i zakrzaceń. Do wysiewu proponuje się takie gatunki jak: kostrzewa czerwona, stokłosa prosta, kupkówka pospolita, życica trwałą, nostryk biały, lucerna sierpowata i nerkowata oraz koniczyna łąkowa. Zadarnione będą również pobocza dróg dojazdowych. W tym przypadku do obsiewu zaleca się zastosować takie rośliny jak:

rajgras wyniosły, życica trwała, kostrzewa owcza, kostrzewa łąkowa, wyczyniec łąkowy w miejscach o większej wilgotności oraz jako dodatek tymotkę łąkową.

W wariantcie VAR2 uwzględniono również potrzebę modernizacji sieci dróg rolnych występujących na obszarze zlewni. Zaproponowano rozwiązania systemowe, które zostały omówione w rozdziale wcześniejszym. Dla poprawnego funkcjonowania agroekosystemu zlewni Mielnicy konieczne się udrożnienie, a następnie poprawna konserwacja systemów melioracji podstawowych zlokalizowanych na obiekcie. Istniejące rowy melioracyjne są silnie zaniedbane. Ich prawidłowe funkcjonowanie musi wiązać się z wykaszaniem skarp, usuwaniem namulów i elementów roślinnych z dna, a także przycinaniem drzew i krzewów w przypadku blokowania drożności rowu. W czasie badań terenowych szczególną uwagę zwrócono na znaczną degradację ekologiczną koryta i doliny cieku Mielnica. Ciek jest mocno zamulony i zanieczyszczony odpadami. Obserwowane są nielegalne zrzuty ścieków. Sporadycznie pojawia się „dzika” regulacja i zabudowa techniczna koryta cieku. Powyższe nieprawidłowości muszą być bezwzględnie usunięte.

4. **Wariant „rolnictwa intensywnego” VAR3** – stanowi całkowicie hipotetyczny scenariusz pogłębiania się negatywnych, szkodliwych dla środowiska procesów intensyfikacji produkcji żywnościowej. Jakkolwiek zaproponowany wariant daleki jest od obecnie panujących proekologicznych tendencji, to jednak jego modelowanie wydaje się być interesujące dla poznania naukowego (rys. 17).

Scenariusz „rolnictwo intensywne” zakłada m.in.:

- likwidację miedz i zadrzewień śródpolnych,
- częściowe wylesienie terenów i przeznaczenie je na cele produkcji żywności,
- likwidację istniejących stref przejściowych i buforowych wzdłuż koryta cieku,
- komasację gruntów, pojawianie się wielkoobszarowych upraw monokulturowych,
- intensywną uprawę roli,
- wzrost poziomu nawożenia azotem ponad 170 kg·ha⁻¹.

Obecnie ten najgorszy scenariusz jest mało prawdopodobny, niemniej w przyszłości, na skutek kryzysu energetycznego, załamania klimatycznego, czynników politycznych lub demograficznych prawdopodobieństwo to może ulec radykalnej zmianie.

W modelowaniu środowiskowym uwzględniono również trendy zmian klimatycznych prognozowane przez IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Do oceny potencjalnych tendencji na obszarze Polski przydatne okazały się wyniki „downscalingu” Globalnych Modeli Cyrkulacji i danych IPCC Data Distribution Centre (DDC), obszernie opracowane przez Instytut Geofizyki PAN, które wykorzystano w parametryzacji generatora pogody modelu SWAT i scenariuszach zmian rolności środowiskowych na obszarze zlewni Mielnicy [Christensen i in. 2007; IPCC 2000; Liszewska 2004; Liszewska, Osuch 2002]. Dodatkowe informacje dotyczące tendencji zmian klimatycznych pochodziły z raportu WWF Polska [Sadowski 2006] oraz najnowszych analiz scenariuszowych [EEA 2006c; IPCC 2007]. Dokumenty te wskazują, iż w Polsce należy spodziewać się poważnych konsekwencji ocieplenia klimatu – podniesienia średniej temperatury rocznej o 5°C do końca XXI wieku. Spowoduje to wzrost opadów w okresie wiosennym o ok. 20%, a spadek latem o ok. 15%, spadek plonów roślin ozimych – ziemniaka o ok. 70%, buraka cukrowego o ok. 15%, wzrost plonów roślin ciepłolubnych: kukurydzy, soi, słonecznika o

ok. 30–40%. Należy się liczyć ze zmniejszeniem liczby pastwisk. Wykorzystane w projekcie ogólnodostępne dane klimatyczne dotyczą obszaru całej Polski. W przyszłości należy podjąć próbę bardziej szczegółowego określenia długofalowych tendencji klimatycznych, w odniesieniu do regionu agroklimatycznego, w którym położony jest obiekt badawczy.

12.3. Wyniki symulacji modelowych

Jednym z podstawowych celów prowadzonych badań było opracowanie wyników końcowych, zgodne z aktualnymi potrzebami w zakresie pozyskiwania i obróbki informacji środowiskowej. Założono, iż modelowanie środowiskowe ma być narzędziem wspomagania decyzyjnego i ocen skutków środowiskowych podejmowanych rozstrzygnięć. W trakcie realizacji badań dokonano przeglądu, dostępnych i będących w fazie opracowań, macierzy wskaźników rolno-środowiskowych. Przyjęto założenie, iż wskaźniki powinny wykazywać pewien ciąg cech, który sprawia, iż stają się one użytecznym narzędziem wspomagającym decyzje. Po pierwsze, wskaźniki mają mieć odpowiednie znaczenie dla prowadzenia polityki rolnej, ekologicznej i społeczno-gospodarczej. Powinny być po prostu ważne z punktu widzenia podmiotów podejmujących decyzję. Dane i informacje dostarczane za pomocą wskaźników mają być w najwyższym stopniu reprezentatywne i łatwe w interpretacji. Powinny dać możliwość oceny trendów rozwojowych oraz zmian zachodzących w otoczeniu zarówno w sferze społecznej, gospodarczej, jak i w środowisku [EEA 2006a, b; EEA/CIFAS 2006a,b; Komisja Europejska 2000, 2001, 2006; OECD 1999a,b,c, 2001].

Przedstawione wyżej ogólne wytyczne pozwoliły na właściwą selekcję danych wyjściowych z symulacji SWAT. W efekcie wybrano te parametry, które zawierają informację zbieżną z wymogami macierzy agroindykacyjnych. Analiza i prezentacja wyników wymagała selekcji i generalizacji ponad 60 możliwych cząstkowych danych wyjściowych SWAT. Ostatecznie zdecydowano się oceniać zmiany takich elementów, jak:

- PRECIP – wysokość opadów atmosferycznych [mm],
- WYLD – wskaźnik odpływu ze zlewni [mm],
- FLOW_OUT – średniodobowy przepływ wody w cieku [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$],
- SED_OUT – ładunek sedymentów wynoszonych ze zlewni [Mg],
- ORGN_OUT – ładunek azotu organicznego wynoszonego ze zlewni [kg N],
- ORGP_OUT – ładunek fosforu organicznego wynoszonego ze zlewni [kg P],
- NO3_OUT – ładunek azotanów wynoszonych ze zlewni [kg N],
- MINP_OUT – ładunek fosforu mineralnego wynoszonego ze zlewni [kg P].

Modelowanie zostało przeprowadzone dla 4 scenariuszy zmian przestrzenno-strukturalnych w zlewni Mielnicy, w których planowane działania rolno-środowiskowe i inne oraz założenia modelowe dla poszczególnych scenariuszy zostały przedstawione w wcześniejszym podrozdziale. Przyjęto następujące główne horyzonty czasowe, dla których dokonano symulacji: do roku 2016, do roku 2030 oraz do roku 2050. Podstawowym krokiem czasowym przyjętym w modelowaniu jest 1 miesiąc. Całkowita liczba wariantów obliczeniowych dla 4 scenariuszy wyniosła:

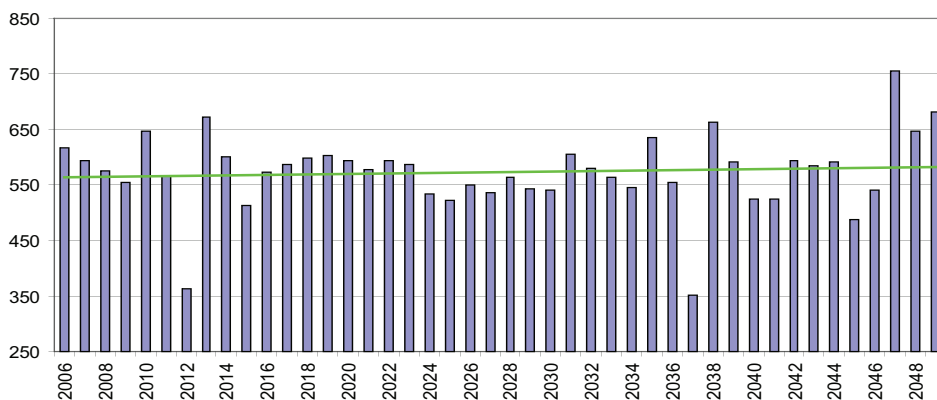
$$4 \times 12 \text{ miesięcy} \times 44 \text{ lata} \times 8 \text{ parametrów} = 16\,896 \text{ przypadków.}$$

Dla wieloletnich przedziałów obliczeniowych przyjęto zmienne parametry generatora pogody SWAT, uwzględniające tendencje zmian klimatycznych na terenie Polski (omówione wcześniej).

Zmiany średnioterminowe uwzględniły wzrost temperatur powietrza na poziomie 1°C. Założono zmiany wysokości opadów atmosferycznych w miesiącach styczeń–kwiecień +10%; maj–wrzesień -5% oraz październik–grudzień +10%.

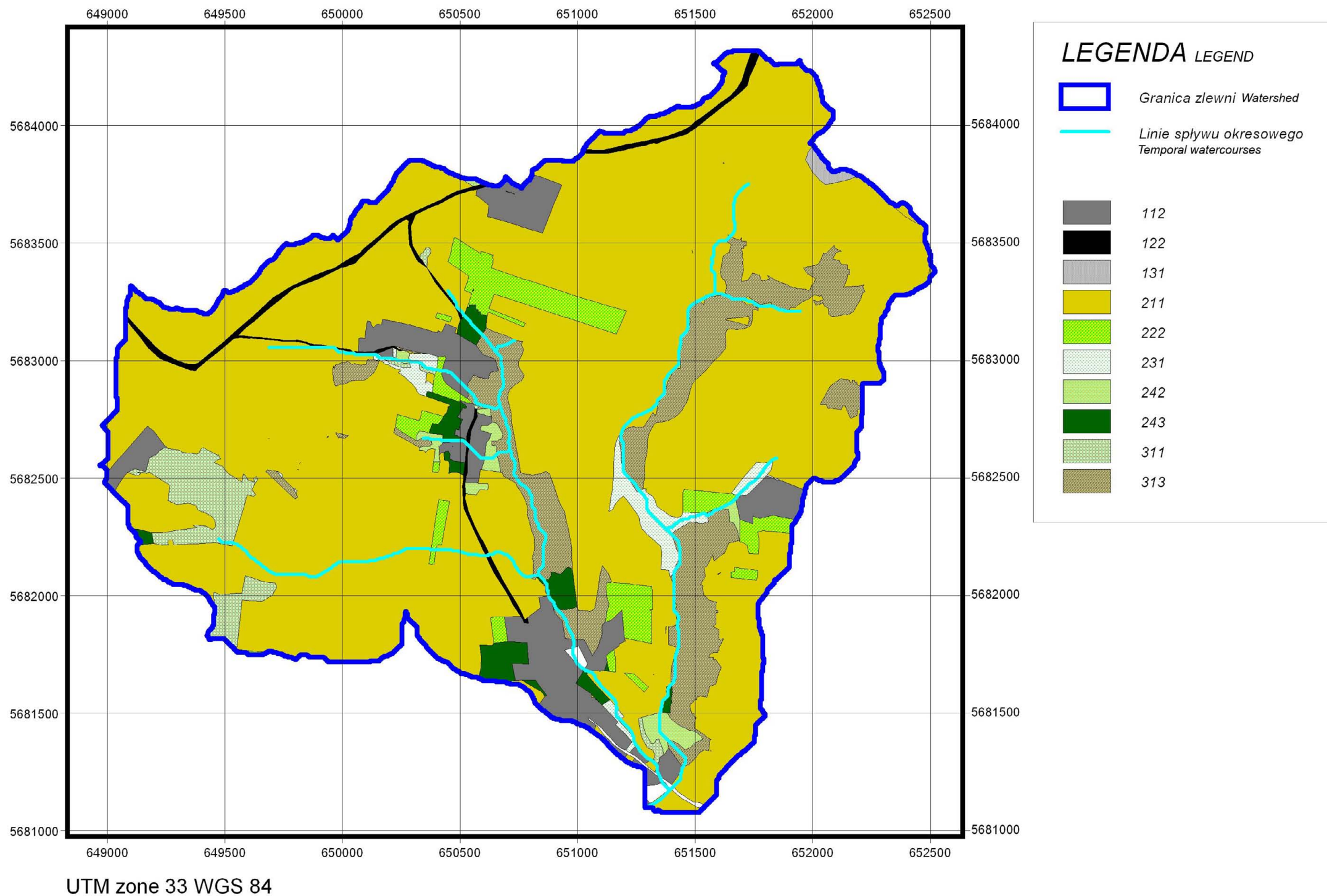
Tendencje długoterminowe zakładały wzrost temperatur powietrza 3,5°C. Zmiany wysokości opadów zaprogramowano w zakresach: styczeń +15%; luty–kwiecień +20%; maj–wrzesień -15%; październik–listopad +20% oraz grudzień +15%. Symulacje prawdopodobnych warunków opadowych w latach 2006–2050 przedstawiono na rysunku 18.

W rozpatrywanym okresie przewidziano stopniowy trend wzrostowy ilości opadów. Najbardziej stabilne okresy opadowe występują pomiędzy 2016 a 2034 rokiem. Największe zróżnicowanie tych warunków zasymulowano w ostatniej dekadzie modelowanego okresu. Przedstawione powyżej roczne sumy opadów atmosferycznych zostały obliczone w oparciu o sztucznie wygenerowane sumy miesięczne. W niniejszych badaniach nie symulowano pojedynczych zdarzeń hydrometeorologicznych – ich celem były analizy długoterminowe. W przyszłości warto podjąć próby symulacji komputerowej dla krótszych okresów. Wygenerowane warunki opadowe nie stanowią prawdziwego odzwierciedlenia rzeczywistości. Są one mniej lub bardziej prawdopodobne (np. skrajnie niskie opady w 2012 i 2037 r.) i tworzą wyłącznie warunki brzegowe do dalszych obliczeń symulacyjnych i analiz porównawczych.



Rys. 18. Symulacja rocznych sum opadów atmosferycznych [mm] w latach 2006–2050
Fig. 18. Simulation of the annual precipitation [mm] in years 2006–2050

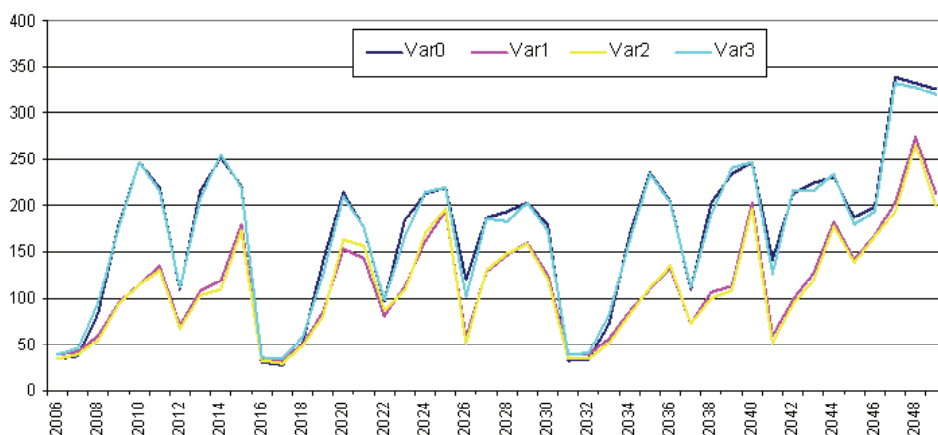
Badania wykonane w ramach niniejszej pracy miały odpowiedzieć na pytanie: w jaki sposób hydro-geoekosystem zlewniowy zareaguje na różne sposoby zagospodarowania, zachodzące w takich samych warunkach klimatycznych? Jednocześnie Autorzy chcieli poznać wielkość względnych różnic w tych reakcjach.



Rys. 17. Wizualizacja niekorzystnych działań w zlewni Mielnicy objętych wariantem VAR3 (oznaczenie CLC w tab.1)
 Fig. 17. Negative changes in Mielnica catchment in VAR3 scenario (CLC description in tab.1)

Zaproponowane zmiany zagospodarowania i rolnośrodowiskowego użytkowania terenu mają wpływ na wielkość odpływu wód ze zlewni. Poniżej przedstawiono symulacje komputerowe wskaźników odpływu dla różnych wariantów produkcji i intensywności gospodarki rolnej (rys. 19).

Przedstawione na rysunku 19 przebiegi wygenerowanych wartości wskaźnika odpływu wskazują, że w przypadku realizacji dwóch scenariuszy zagospodarowania powierzchni zlewni zgodnie z założeniami rolnośrodowiskowymi (VAR1 i VAR2) powinno nastąpić zwiększenie się retencji powierzchniowej i glebowej w zlewni. Wzrost udziału powierzchni zalesionych i trwale zadarnionych wyraźnie wpływa na ilość wód odpływających ze zlewni. W wariantach „zerowym” (VAR0) i „rolnictwa intensywnego” (VAR3) wskaźniki odpływu są zdecydowanie wyższe. Może to świadczyć o relatywnie niskiej zdolności retencyjnej zlewni zagospodarowanej w obecny sposób.

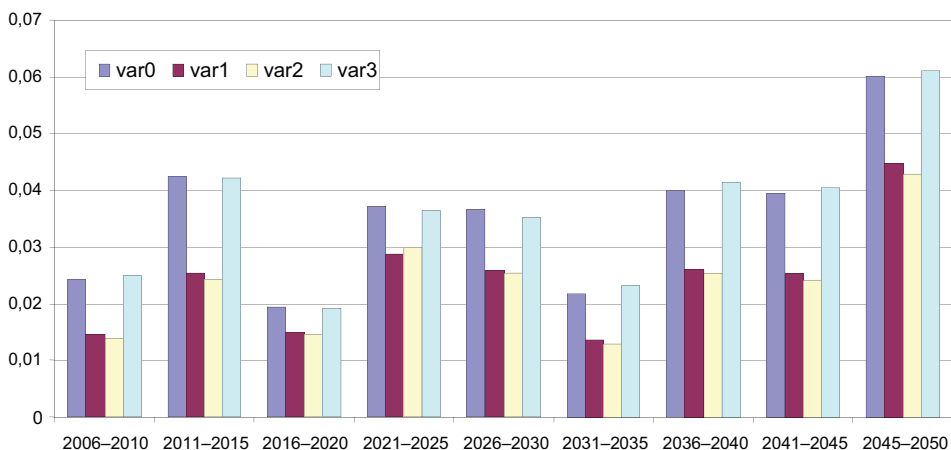


Rys. 19. Długookresowa symulacja wskaźnika odpływu [mm] ze zlewni w latach 2006–2050
 Fig. 19. Simulation of runoff rate [mm] in Mielnica catchment in years 2006–2050

Do dalszych analiz porównawczych zdecydowano się zagregować prognozowane wskaźniki w postaci średnich miesięcznych, obliczanych w następujących okresach 5-letnich: 2006–2010, 2011–2015, 2016–2020, 2021–2025, 2026–2030, 2031–2035, 2036–2040, 2041–2045, 2045–2050.

Z metodycznego punktu widzenia agregacja symulowanych danych wydaje się być uzasadniona, gdyż „wygładzenie” sztucznie generowanych wartości pozwoliło wyraźniej uchwycić i zaakcentować zmienność prezentowanych wskaźników w czasie. W szczególności zabieg ten pozwolił na oszacowanie względnych różnic pomiędzy wskaźnikami dla poszczególnych scenariuszy zmian rolno-środowiskowych. Uzyskane w ten sposób wartości wskaźników odpływu ze zlewni zagospodarowanych rolno-środowiskowo (VAR1 i VAR2) są niższe o 20–40% od wartości wskaźników otrzymanych dla zlewni zagospodarowanych w sposób przewidziany wariantami VAR0 i VAR3.

Podobne relacje można zaobserwować w odniesieniu do średnich dobowych wartości natężenia przepływu ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) oczekiwanych w cieku Mielnica (rys. 20). Uwagę zwraca fakt, iż odpływy ze zlewni zagospodarowanej jak w wariancie VAR3 w drugiej połowie symulowanego okresu zaczynają nieznacznie rosnąć w stosunku do zlewni zagospodarowanej jak w wariancie VAR0. Jest to reakcja systemu fluwialnego na ubytek użytków sprzyjających retencjonowaniu wód. Wyraźnie niższe są natężenia przepływów w wariantach zagospodarowania zlewni VAR2 i VAR3. Wpływ zwiększonego udziału lasów i trwałych użytków zielonych na dynamikę odpływu jest niezaprzeczalny.

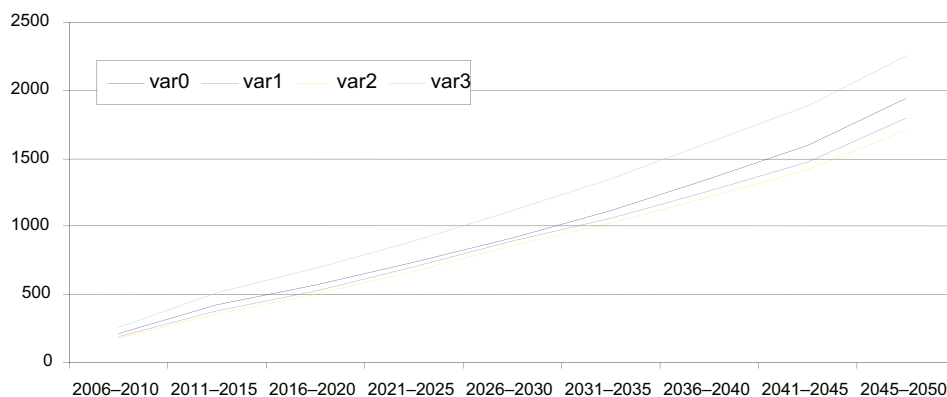


Rys. 20. Symulacja średnich dobowych natężeń przepływów [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$] w cieku Mielnica w latach 2006–2050

Fig. 20. Simulation of the mean daily water flow [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$] in Mielnica stream in years 2006–2050

W prezentowanych uwarunkowaniach zagospodarowania zlewni wariantami VAR1 i VAR2 – najniższe prognozowane natężenia przepływów stanowią ok. 60% objętości przepływów powstających w wyniku odpływu wód ze zlewni zagospodarowanej jak w wariancie VAR3. Najwyższe osiągają natomiast wartość ok. 80% dla ww. wariantu. Uzyskane dane symulacyjne wskazują na potencjalną możliwość zwiększenia retencji obszarowej o ok. 20% w stosunku do stanu istniejącego. Działania rolno-środowiskowe mogące przyczynić się do bardziej efektywnej gospodarki wodnej na obszarze zlewni w zasadzie są niezbędne, szczególnie w przypadku Polski, której zasoby wodne są niewielkie. Przeprowadzone prognozy wskazują, iż w przypadku braku działań ochronnych (VAR0) zmiany klimatyczne będą powodowały stopniowe zwiększanie się odpływu wód, co w konsekwencji wpłynie niekorzystnie na wielkość produkcji rolniczej oraz zasoby wód gruntowych. Zaniechanie wprowadzenia obszarowych zmian środowiskowych może w przyszłości sprawić, iż zlewnia zagospodarowana w obecny sposób będzie funkcjonowała tak samo jak zlewnia intensywnie użytkowana (VAR3).

Wraz z odpływającą wodą ze zlewni wynoszona jest zwierzelina stanowiąca rumowisko unoszone. Jest to głównie drobnoziarnisty materiał skalny oraz pyły mineralne dostające się do cieku w efekcie procesów wietrzenia i erozji powierzchniowej zachodzących na obszarze zlewni. O ilości tego materiału decyduje tzw. wskaźnik dostawy rumowiska uzależniony głównie od intensywności opadów, spadku zboczy oraz warunków hydrologicznych. Czasami odrębnie wymienia się również rumowisko zawieszane, na które składają się najdrobniejsze koloidalne cząsteczki mineralno-organiczne (o średnicy $< 0,02$ mm) unoszące się w wodzie pod wpływem sił przyciągania międzycząsteczkowego. Przebieg transportu rumowiska unoszonego w ciągu roku jest nierównomierny. Największa ilość przenoszonej materii przypada na okres wezbrań hydrologicznych i nasilonej erozji powierzchniowej – stąd też prezentacja ładunków sedymentu w cieku stanowi wskaźnikowe ujęcie procesów zachodzących obszarowo. Na potrzeby oceny porównawczej wpływu zagospodarowania terenu na względne ilości wynoszonych sedymentów (w Mg) opracowano krzywe sumowe z wielolecia objętego prognozowaniem (rys. 21). W poszczególnych 5-letnich okresach obliczeniowych przyjęto stałe średnioroczne wielkości denudacji (wcześniej obliczone na podstawie symulacji miesięcznych).



Rys. 21. Symulacja średniorocznych ładunków sedymentu – [Mg] wynoszonych ze zlewni Mielnicy w latach 2006–2050

Fig. 21. Simulation of the mean annual sediment loads [Mg] in Mielnica stream in years 2006–2050

Przedstawione na rysunku 21 krzywe wskazują wyraźną reakcję geosystemu fluwialnego na wylesienia i intensyfikację rolnictwa (VAR3). Ilości sedymentów wynoszonych na skutek nasilenia się procesów erozyjnych w zlewni zagospodarowanej i eksploatowanej jak w wariantcie rolnictwa intensywnego VAR3 stanowi od 120 do 150% ładunków prognozowanych w przypadku zlewni zagospodarowanych rolnośrodowiskowo (VAR1 i VAR2). Analiza tendencji zmian denudacji w czasie wskazuje, iż zjawiska erozyjne mogą się nasilać wraz z pogłębianiem się zmian klimatycznych. W całym okresie prognozowania erozja powierzchniowa będzie się stopniowo nasilała. Gwałtowny wzrost

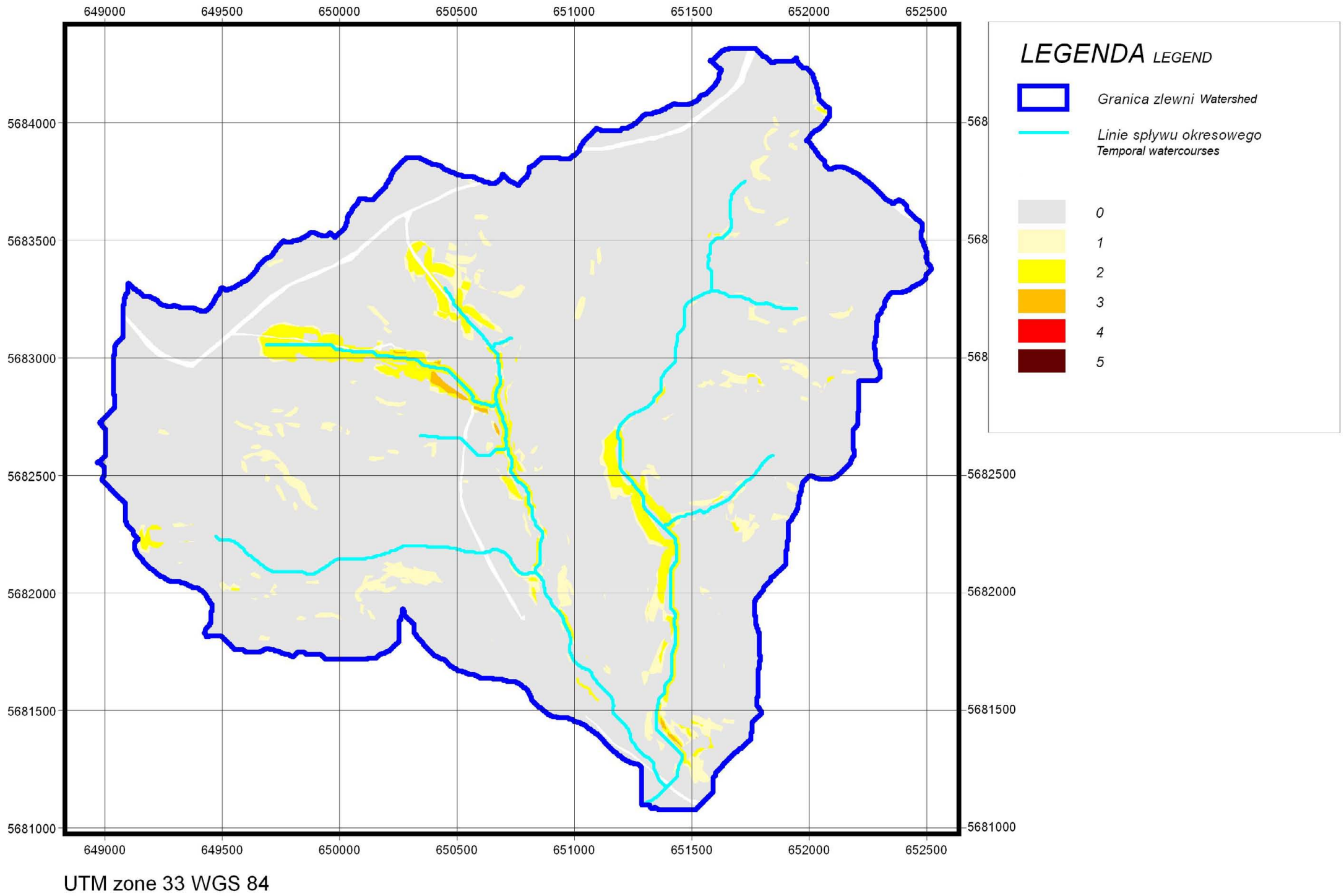
dynamiki tych zjawisk może nastąpić po roku 2040. W tym kontekście warto zwrócić uwagę na reakcje zlewni utrzymującej dotychczasowy sposób zagospodarowania VAR0. Wynoszenie sedimentów w tym przypadku jest większe niż ze zlewni „rolno-środowiskowych”. W niektórych okresach do roku 2030 jest prawie takie samo. Po roku 2030, kiedy zmiany klimatyczne są wyraźniejsze, dynamika denudacji zlewni (VAR0) wyraźnie przewyższa wartości prognozowane dla wariantów zagospodarowania VAR1 i VAR2 o ok. 10–25%. Symulacje wskazują, iż w przyszłości procesy erozyjne na rozpatrywanym obszarze będą się nasilały. Zagospodarowanie przeciwezyjne w ramach istniejącego układu użytkowania gruntów może zabezpieczyć zlewnię przed przewidywanymi negatywnymi skutkami środowiskowymi. Wyniki uzyskane podczas modelowania ukazują również niewielkie różnice w obrębie samych wariantów rolno-środowiskowych – scenariusz „pełny” – VAR2 jest bardziej glebochronny niż scenariusz „niepełny” – VAR1. Większy udział zalesień w strukturze gruntów i bardziej ekstensywna uprawa wpłynęły na ilość zwietrzliny wynoszonej ze zlewni. W ramach prac studialnych odwzorowano wyniki symulacji numerycznej SWAT w środowisku graficznym ArcView. Dzięki temu możliwe było przedstawienie opracowań kartograficznych ilustrujących prawdopodobne przestrzenne zmiany w dynamice procesów erozji wodnej gleb na obszarze zlewni Mielnicy. Długoterminowe symulacje dla scenariuszy VAR1, VAR2 i VAR3 przedstawiono na rysunkach 22–24. Stopnie nasilenia erozji wodnej aktualnej wyrażono wg klasyfikacji IUNG.

Oprócz rumowiska ciek transportuje również związki chemiczne. Wynoszone są one w formach związanych z tym rumowiskiem, jak również jako materiał rozpuszczony. Substancje chemiczne dostarczane są do cieków przez wody podziemne, na drodze zrzutów ścieków oraz spływów powierzchniowych niosących zanieczyszczenia obszarowe. Rodzaj materiału rozpuszczonego zależy między innymi od gatunku gleb, użytkowania zlewni, zanieczyszczenia środowiska i gospodarki wodno-ściekowej. Wahania ilości form rozpuszczonych składników są zazwyczaj znacznie mniejsze niż wahania ilości rumowiska unoszonego. Największe zróżnicowanie transportowanych związków występuje w okresie wezbrań, natomiast największa koncentracja – w czasie niżówek. Poniżej przedstawiono prognozowane krzywe sumowe dla biogenów opisanych parametrami wynikowymi SWAT:

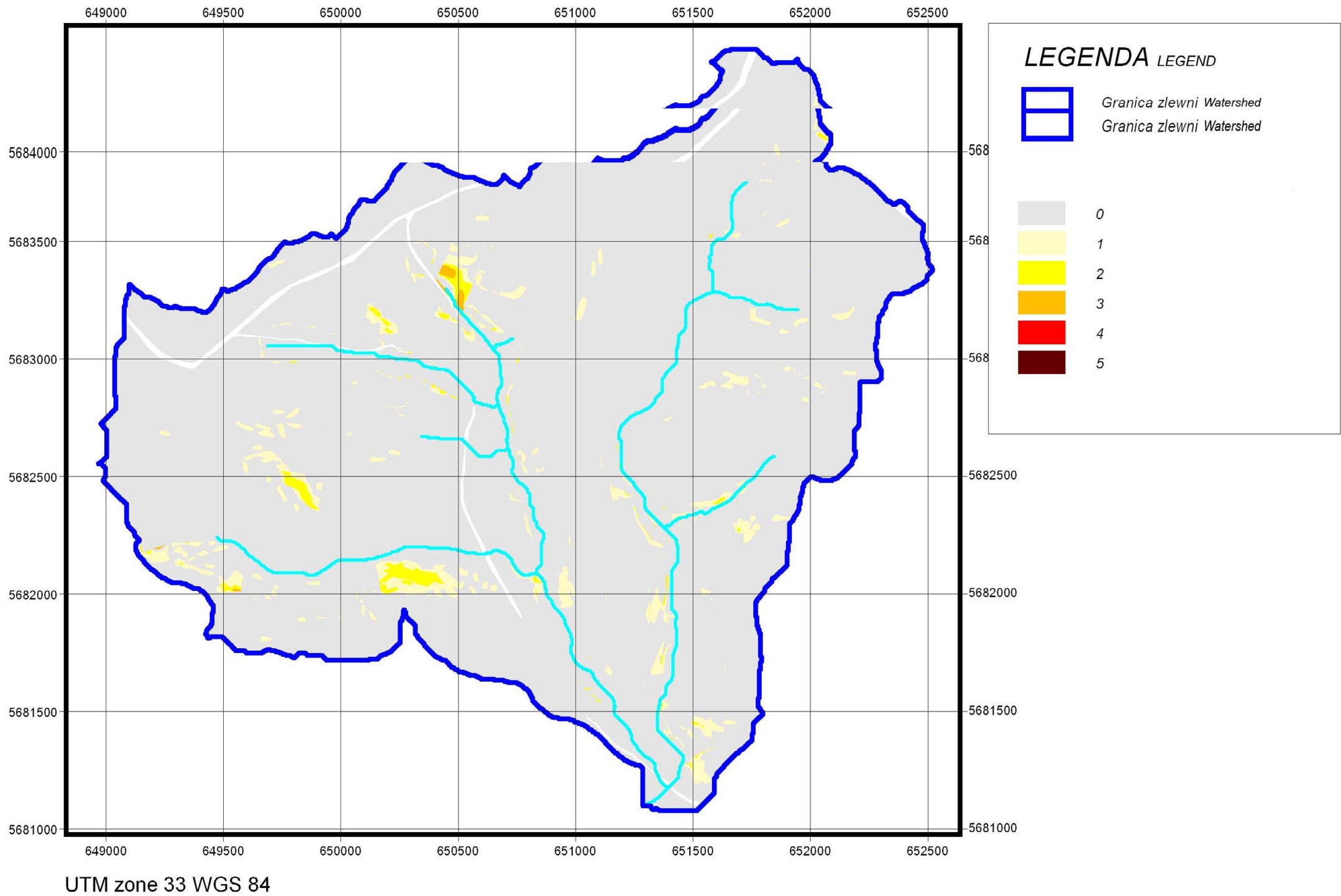
- ORGN_OUT – ładunek azotu organicznego wynoszonego ze zlewni (kg N),
- ORGP_OUT – ładunek fosforu organicznego wynoszonego ze zlewni (kg P),
- NO3_OUT – ładunek azotanów wynoszonych ze zlewni (kg N),
- MINP_OUT – ładunek fosforu mineralnego wynoszonego ze zlewni (kg P).

Na rysunkach 26 i 27 zobrazowano kształtowanie się zsumowanych średniorocznych ładunków azotu i fosforu organicznego odprowadzanych w wodach odpływających ze zlewni Mielnicy.

Prezentowane na poniższych rysunkach (25–26) wyniki symulacji odprowadzania poszczególnych składników chemicznych zaskakują odwrotną niż w odniesieniu do dotychczasowych rozważań relacją pomiędzy reakcjami na zagospodarowanie zlewni zaproponowane w wariantach VAR1 i VAR2 a VAR3. Zarówno w przypadku wynoszenia organicznych form azotu, jak i fosforu wielkości uruchamiane i transportowane ciekami w wariantcie rolno-środowiskowym są wyraźnie wyższe niż w wariantcie rolnictwa intensywne. Wyniki modelowania są całkowicie odmienne od oczekiwanych. W trakcie

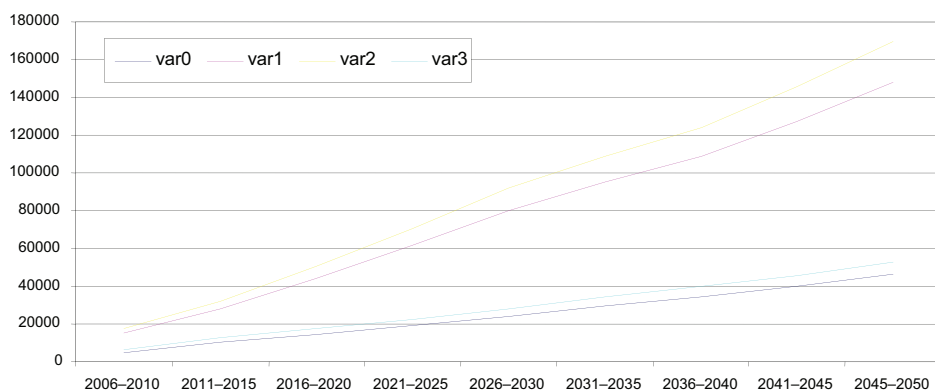


Rys. 22. Zmiany erozyjne VAR1 (oznaczenia w tab. 12)
 Fig. 22. Water erosion changes in VAR1 (description in tab. 12)



Rys. 23. Zmiany erozyjne VAR2 (oznaczenia w tab. 12)
 Fig. 23. Water erosion changes in VAR2 (description in tab. 12)

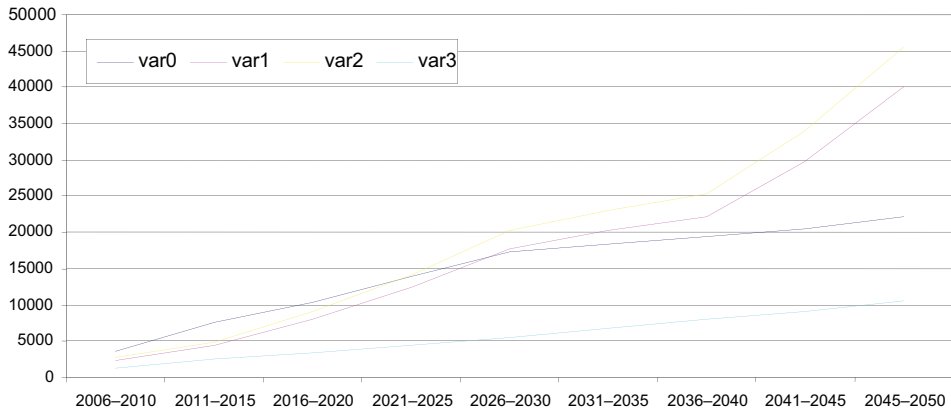
analizy zaistniałej sytuacji rozpatrzono dwie hipotezy wyjaśniające otrzymane wyniki symulacji. Po pierwsze – w wariantach zagospodarowania zlewni VAR1 i VAR2 zaproponowano zwiększoną ilość użytków zielonych i lasów. Na tej podstawie w trakcie obliczeń modelem SWAT zwiększyła się produkcja pierwotna w układzie całej zlewni. Stwierdzono, że algorytmy obliczeniowe opisujące transport składników organicznych do koryta cieką nie oddają w pełni złożoności procesów fizykochemicznych i w rezultacie otrzymano tak niespodziewane wyniki symulacji. Po szerszej, szczegółowej analizie założono, że otrzymane wyniki są możliwe do zaakceptowania, ponieważ zaproponowane w ramach scenariuszy rolno-środowiskowych nowe zadrzewienia i zadarnienia w znaczny sposób zmieniły charakter strefy bezpośredniego zasilania koryta cieką. W najbardziej „ekologicznym” wariantcie ciek, w zasadzie na całej długości, przepływa przez nowe zalesienia. Rozważano więc prawdopodobieństwo, iż w tej sytuacji może rzeczywiście dochodzić do zwiększonego dostawania się do wód płynących obumarłej materii roślinnej, a model poprawnie zareagował na zadane warunki brzegowe. Niemniej kwestia wynoszenia form organicznych ze zlewni pozostaje otwarta i w przyszłości powinna być przedmiotem kolejnych prób symulacyjnych.



Rys. 25. Symulacja średniorocznych ładunków azotu organicznego [kg] wynoszonego ze zlewni Mielnicy w latach 2006–2050

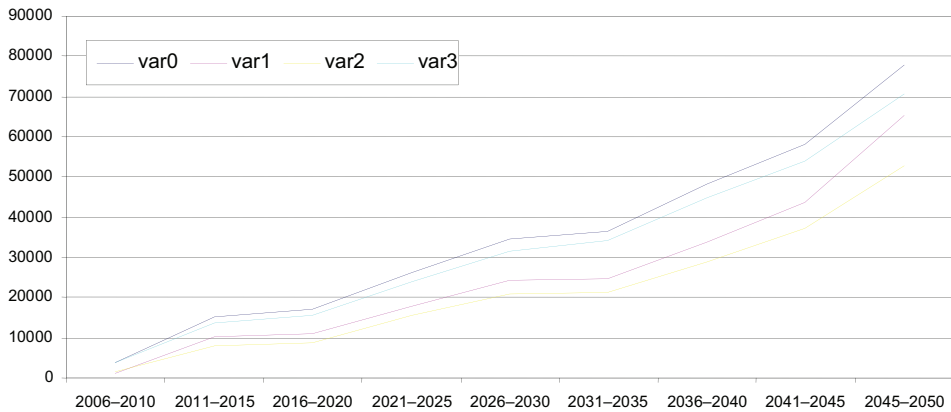
Fig. 25. Simulation of the mean annual organic nitrogen loads [kg] in Mielnica stream in years 2006–2050

Za największe zagrożenie dla czystości wód na terenach użytkowanych rolniczo uważa się wymywanie azotanów poza strefę korzeniową roślin. Azotany, w przeciwieństwie do azotu amonowego, nie są sorbowane przez kompleks sorpcyjny i przedostają się poza obszar glebowy do wód. Ich ilość dostająca się do wód zależy między innymi od przepuszczalności gleby, ukształtowania terenu oraz występujących warunków meteorologicznych. Wielkość wynoszenia azotanów jest dobrym wskaźnikiem rolno-środowiskowym, ilustrującym stopień intensyfikacji rolnictwa na wybranym obszarze. Wieloletnie symulacje komputerowe dla zlewni w różnych wariantach użytkowania przedstawiono na rysunku 27.



Rys. 26. Symulacja średniorocznych ładunków fosforu organicznego [kg] wynoszonego ze zlewni Mielnicy w latach 2006–2050

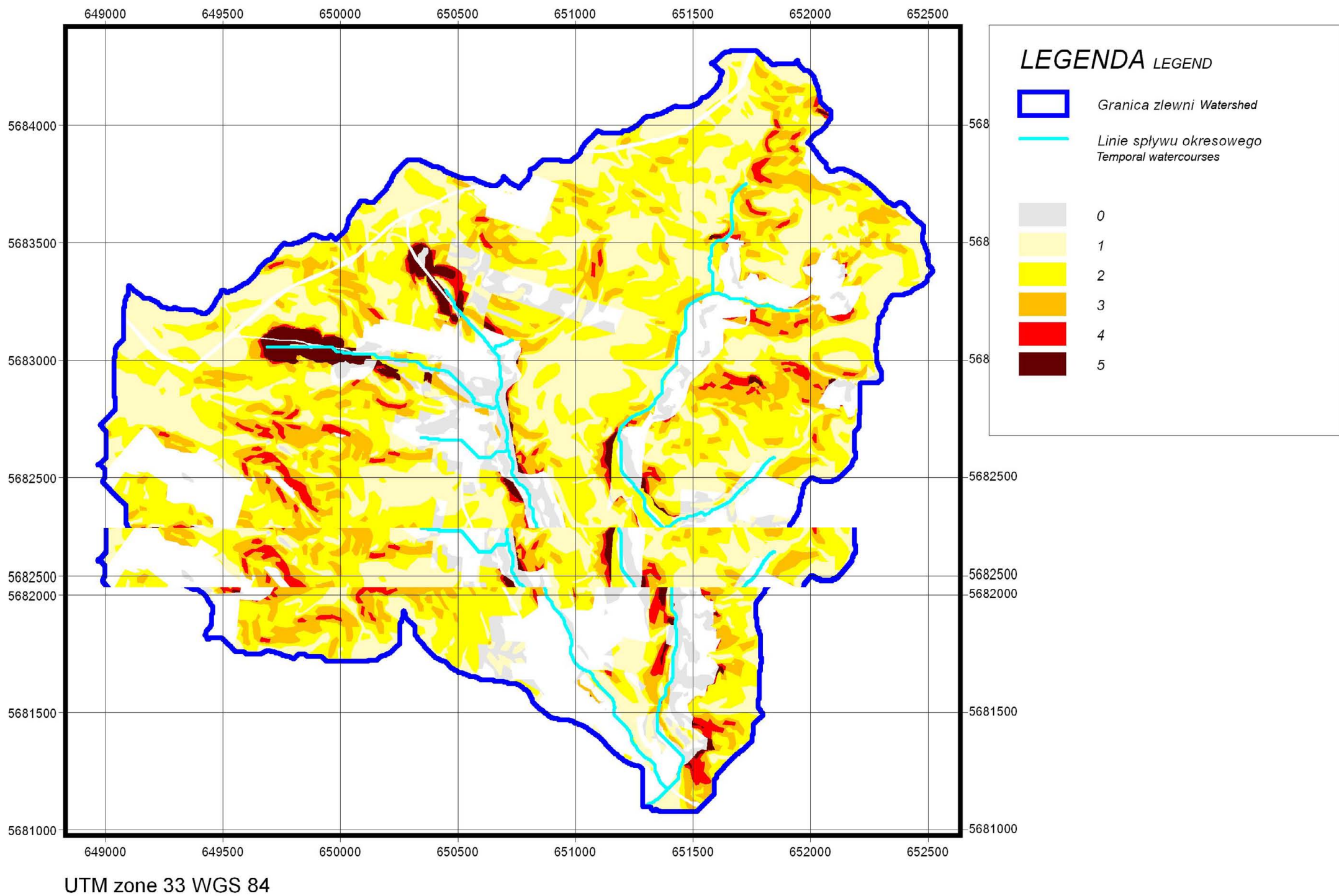
Fig. 26. Simulation of the mean annual organic phosphorous loads [kg] in Mielnica stream in years 2006–2050



Rys. 27. Symulacja średniorocznych ładunków azotanów [kg] wynoszonych ze zlewni Mielnicy w latach 2006–2050

Fig. 27. Simulation of the mean annual nitrates loads [kg] in Mielnica stream in years 2006–2050

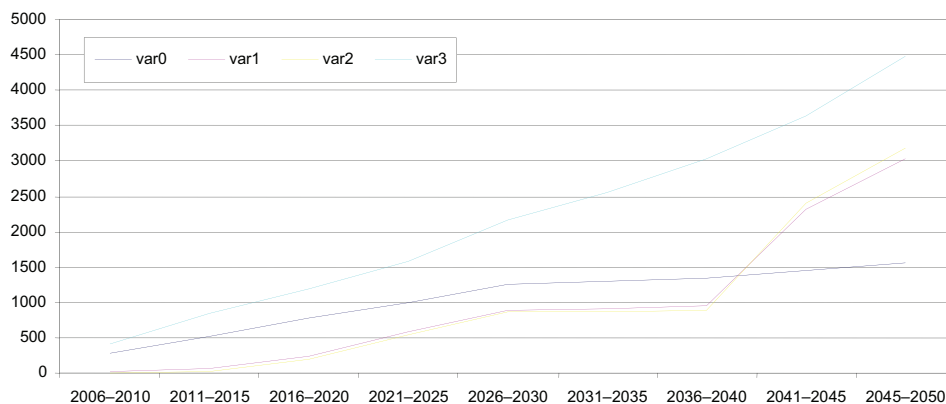
Otrzymane wyniki symulacji wskazują na znaczny przyrost ilości azotanów w wodach odpływających ze zlewni intensywnie użytkowanej rolniczo (VAR3). Założony wzrost poziomu nawożenia mineralnego oraz zwiększenie udziału powierzchni gruntów ornych powoduje wyraźny wzrost odprowadzanych ładunków. Największe otrzymane różnice występują między wariantami zagospodarowania VAR3 a VAR2 (pełny rolno-środowiskowy). Kąt nachylenia krzywych sumowych wskazuje na względnie stały średnioroczny poziom wynoszenia azotanów, wielkość transportu wzrasta dopiero w ostaniej dekadzie.



Rys. 24. Zmiany erozyjne VAR3 (oznaczenia w tab. 12)
 Fig. 24. Water erosion changes in VAR3 (description in tab. 12)

Może to oznaczać, iż powolne zmiany klimatyczne nie wpływają na dynamikę procesu w takim stopniu jak np. zmiana użytkowania i intensywność produkcji. Dopiero kumulacja negatywnych zmian i wzajemna ich interakcja (np. z nasilającą się erozją wodną) powoduje gwałtowny przyrost ilości azotanów w wodach.

Wzajemne powiązania pomiędzy procesami zachodzącymi w systemie fluwialnym zlewni dobrze ilustruje rysunek 28 będący zestawieniem symulacji średniorocznych ładunków fosforu mineralnego wynoszonych ze zlewni Mielnicy.



Rys. 28. Symulacja średniorocznych ładunków fosforu mineralnego [kg] wynoszonych ze zlewni Mielnicy w latach 2006–2050

Fig. 28. Simulation of the mean annual mineral phosphorous loads [kg] in Mielnica stream in years 2006–2050

W prezentowanych na rysunku 28 symulacjach dla rozpatrywanych wariantów zagospodarowania zlewni wyraźnie widoczna jest zdecydowanie największa ilość ładunków fosforu wynoszonych ze zlewni „intensywnie użytkowanej”. Analizy szczegółowe średnich wieloletnich wskazują przeciętnie 2-krotnie większe wymywanie fosforu ze zlewni zagospodarowanej wg wariantu VAR3 niż wariantów VAR1 i VAR2, choć zdarzają się okresy, w których symulacje prognozują nawet różnicę 7-krotną. Wyniki te korespondują z wynikami analiz dotyczących erozji wodnej i denudacji odpływowej. Fosfor mineralny jest bowiem najczęściej wynoszony ze zlewni na drodze zmywów powierzchniowych. W założonych scenariuszach wariant VAR3 charakteryzuje się najmniejszą przeciwoerozyjną ochroną gleb i w efekcie czego zlewnia jest narażona na nasilające się procesy erozyjne gleb. Wielkość wymywania fosforu mineralnego jest w tym kontekście również dobrym wskaźnikiem procesów zachodzących w zlewni.

13. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Obszarem prowadzonych badań była mała zlewnia rolnicza cieką Mielnica, położona na południowych stokach Wzgórz Trzebnickich (woj. dolnośląskie), która prawie w całości pokryta jest glebami lessowymi. Obszar ten charakteryzuje się dominującą przewagą użytków rolnych, urozmaiconą rzeźbą i jest silnie degradowany procesami erozji wodnej. Badania monitoringowe prowadzone w zlewni obejmowały: codzienne pomiary stanów wody, okresowe pomiary natężenia przepływu, codzienne pomiary batometryczne, okresowe analizy jakości wód powierzchniowych, codzienne pomiary warunków meteorologicznych, okresowe pomiary cech fizykochemicznych gleb. W zlewni przeprowadzono także częste wizje terenowo-inwentaryzacyjne.

Uzyskane wyniki badań terenowych stanowiły podstawę 3 etapów prac analitycznych i prognostycznych:

- przeprowadzenia studiów uwarunkowań fizjograficznych, przyrodniczych, pedologicznych, hydrologicznych i meteorologicznych zlewni,
- zbudowania kompletnego Cyfrowego Modelu Zlewni opartego na systemie ArcGIS,
- opracowania scenariuszy działań ochronnych w zlewni i oceny ich skutków środowiskowych z wykorzystaniem narzędzia SWAT.

Podstawę analiz studialnych stanowiła cyfrowa baza danych przestrzennych opracowana w następujących etapach:

- georeferencja danych z monitoringu zlewni w oparciu o pomiary GPS,
- ortorektyfikacja i korekcja danych źródłowych: map analogowych, zdjęć lotniczych i satelitarnych,
- utworzenie bazy danych przestrzennych (rzeźba terenu, pokrywa glebowa, użytkowanie terenu z uwzględnieniem agrotechniki, sieć hydrograficzna i zbiorniki wodne),
- przygotowanie danych wejściowych do modelowania.

Potencjał produkcji rolnej w zlewni jest wysoki. Pod względem przydatności rolnej gleb największy udział powierzchniowy (ok. 84%) stanowią kompleksy pszenne bardzo dobre i dobre. Około 7% obszarów zajmuje kompleks pszenno-wadliwy. Pozostałe tereny zajmują 3 kompleksy żytnie z lżejszymi glebami i niższym potencjałem produkcyjnym. Dominującym gatunkiem gleby są lessy (zaliczane do najbardziej podatnych na zmywanie gleb), zajmujące ok. 96% całkowitej powierzchni zlewni. Pod względem typologicznym w zlewni dominują gleby brunatne (ok. 85%).

Skład chemiczny wierzchnich warstw gleb wskazuje szeroki zakres zmienności ich odczynu (pH-H₂O od 5,7 do 7,4), osiągając najniższe wartości z reguły w najwyższych partiach zlewni, a najwyższe w dolinach rzecznych. Równie znaczna jest zmienność zawartości wybranych składników chemicznych w wierzchnich warstwach gleb zlewni. W dolinach cieków oraz dolnych partiach stoków zawartość żelaza jest wyższa

(ok. 23 950 mg·kg⁻¹) niż w partiach przywierzchwinowych (1760 mg·kg⁻¹). Podobnie przedstawia się zawartość wapnia, którego ponadto więcej jest w glebach obszarów zalesionych (2702 mg·kg⁻¹) niż na gruntach ornych (772 mg·kg⁻¹). W przypadku potasu sytuacja jest odwrotna. Grunty orne wykazują większe zawartości tego składnika (13 800 mg·kg⁻¹) niż obszary leśne (5600 mg·kg⁻¹). Użytki zielone i tereny zadarnione wykazują zdecydowanie większe zawartości magnezu (554 mg·kg⁻¹) niż pozostałe obszary (26 mg·kg⁻¹). W dolinach cieków oraz niektórych partiach wierzchwinowych stoków zlewni stwierdzono wyższe zawartości fosforu w glebach. Zawartość fosforanów wahała się w szerokich granicach od 0,87 do 84,37 mg·kg⁻¹. W przypadku składników azotowych największe zawartości azotu ogólnego, amonowego i azotanowego odnotowano na liniach spływu wód ze stoków, a najniższe na wierzchwinach.

Ukształtowanie rzeźby terenu zlewni jest zróżnicowane. Najwięcej jest obszarów o nachyleniach zboczy 3–6% – zajmują one ok. 40% całej powierzchni zlewni. Tereny o nachyleniach 6–10% zajmują ok. 17% areалу wszystkich gruntów. Na spadki największe (>15%) przypada najmniejszy odsetek zajmowanej powierzchni całkowitej, bo nieco powyżej 5%.

Analiza występujących warunków meteorologicznych i wynikających z nich uwarunkowań hydrologicznych procesów erozji wodnej gleb zachodzących w zlewni potwierdza istotność ich znaczenia w przekształcaniu denudacyjnym Wzgórz Trzebnickich. Szczególnego znaczenia nabiera intensywność chwilowa opadów, przybierająca często rozmiary dotychczas rzadko spotykane (przekraczająca nawet 100 mm·h⁻¹). To właśnie ona, szczególnie w okresach posusznych, staje się jedną z głównych przyczyn szybkich sposobów przemieszczania wody i składników materii na stoku (powstawanie spływów powierzchniowych i hipodermicznych).

Wyznaczenie potencjalnego i rzeczywistego zagrożenia zjawiskami erozji wodnej powierzchniowej, zachodzącymi w zlewni Mielnicy, pozwala stwierdzić, że aktualną erozją wodną najsilniejszego 5. stopnia zagrożone jest ok. 7,84 ha. Na najniższe stopnie zagrożenia 1. i 2. przypada ponad 50% obszaru zlewni. Na obszarach zaliczonych do najwyższej zagrożonych (łącznie 15% powierzchni zlewni) skutki erozji wodnej powierzchniowej są widoczne nawet po niewielkich opadach, ale charakteryzujących się wysoką intensywnością chwilową. Przeważający orny sposób użytkowania gruntów, przy wzdłużstokowym kierunku prowadzenia zabiegów agrotechnicznych, w powiązaniu z uwarunkowaniami meteorologicznymi, pedologicznymi i fizjograficznymi powoduje, że obszar ten powinien zostać pilnie objęty zagospodarowaniem przeciwoerozyjnym. Lokalizacja poszczególnych pól w powyższych warunkach topograficznych terenu skutkuje niekorzystną strukturą położenia sieci drogowej w rzeźbie terenu. Określone wartości wskaźnika IARRR wykazują, że długość odcinków dróg o układzie wzdłużstokowym przekracza 3 km, przy czym ok. 205 m to drogi o idealnie wzdłużstokowym układzie. Długość dróg o korzystnym układzie poprzecznostokowym wynosi 1873 m, w tym idealnie przeciwstokowych tylko 81 m. Udział poprawnej lokalizacji dróg w stosunku do rzeźby terenu jest niewielki i wynosi zaledwie 15,6%. Sytuacja taka skutkuje potrzebą wprowadzenia na drogi działań ochronnych, ocenianych wskaźnikiem UHRR. Określone wartości tego wskaźnika świadczą o bardzo dużym udziale odcinków dróg wymagających pilnych działań ochronnych w postaci utwardzania nawierzchni oraz tworzenia bądź umacniania istniejących

urządzeń odwadniania powierzchniowego. Około 50% dróg rolniczych zlokalizowanych w zlewni Mielnicy wymaga pilnej względnie bardzo pilnej ingerencji, przy czym aż 14% dróg wymaga ochrony bardzo pilnej.

Dzięki aplikacji Systemu Informacji Geograficznej możliwa była weryfikacja i aktualizacja dotychczasowego stanu wiedzy na temat uwarunkowań procesów erozyjnych zachodzących w zlewni Mielnicy. Wykorzystując metody komputerowej analizy danych przestrzennych (m.in. obrazów satelitarnych IKONOS, cyfrowego modelu terenu DEM), określono aktualne parametry opisowe obiektu badawczego.

Kolejnym etapem było przyjęcie scenariuszy zmian w zlewni (wprowadzenie Kodeksu Dobrych Praktyk Rolniczych i działań rolno-środowiskowych, zmiany klimatu; przekształcenia obszarowe; zmiany charakteru produkcji). Rozpatrzono następujące warianty podejmowania działań w zlewni:

1. wariant „zerowy” (VAR0) – zakładający sytuację, w której na obszarze zlewni Mielnicy nie będą zachodziły zmiany w charakterze i sposobie produkcji rolnej;
2. wariant „rolno-środowiskowy niepełny” (VAR1) – w tym scenariuszu zaprojektowano hipotetyczne rozwiązania, które mogą mieć miejsce w rolniczej przestrzeni produkcyjnej zlewni Mielnicy (dotyczą one głównie sposobu uprawy ziemi i przyjaznej środowisku agrotechnice, nie założono zmian w strukturze użytkowania);
3. wariant „rolno-środowiskowy pełny” (VAR2) – w którym założono, iż wszystkie proponowane zalecenia dobrej agrotechniki należy uzupełnić o zmiany strukturalne w obrębie użytków rolnych;
4. wariant „rolnictwa intensywnego” (VAR3) – stanowiący hipotetyczny scenariusz pogłębiania się negatywnych, szkodliwych dla środowiska procesów intensyfikacji działalności rolniczej.

Końcowym etapem prac była próba prognozowania długoletnich skutków środowiskowych spowodowanych wyżej opisanymi zmianami w praktyce produkcji rolnej. Modelowanie przestrzenne obszaru zlewni wykonane w środowisku SWAT uwzględniło prawdopodobne zmiany klimatyczne mogące zachodzić na obszarze Polski. Analizy prognostyczne krótko-, średnio- i długookresowe przeprowadzono dla lat 2006–2050.

Prezentowane w publikacji wyniki symulacji modelowych nie wyczerpują bogatych możliwości analitycznych narzędzia prognostycznego, które jest wynikiem prac badawczych objętych niniejszym opracowaniem. Ilość scenariuszy i kombinacji wariantów pogodowych możliwych do uwzględnienia w trakcie przeprowadzania modelowania jest w zasadzie nieograniczona. Zbudowany od podstaw Cyfrowy Model Zlewni oraz zaadaptowany do niej model matematyczny będą mogły być w najbliższym czasie udoskonalane (m.in. o dynamiczne modelowanie zmian klimatycznych w skali regionu agroklimatycznego) oraz modyfikowane i weryfikowane na podstawie nowych propozycji scenariuszy zmian zagospodarowania przestrzennego zlewni. Najważniejszym efektem końcowym zrealizowanych badań i przeprowadzonych analiz jest wdrożenie zintegrowanego narzędzia analitycznego opartego na zbudowanym od podstaw systemie GIS oraz modelu prognostycznym SWAT dla fragmentu mezoregionu fizycznogeograficznego Wzgórza Trzebnickie. Opracowany Cyfrowy Model Zlewni może stanowić podstawę dla dalszych projektów badawczych i prac naukowych. Końcowy efekt, jakim jest aplikacja i wdroże-

nie systemu GIS/SWAT, pozwala obecnie nawiązać poziomem i zaawansowaniem technologicznym do rozwiązań analitycznych stosowanych w krajach wysoko rozwiniętych.

Na podstawie przeprowadzonych badań bezpośrednich i analiz przestrzenno-prognostycznych sformułowano następujące wnioski końcowe:

1. Obszar Wzgórz Trzebnickich i występujące tam uwarunkowania pedologiczne, fizjograficzne, meteorologiczne w powiązaniu z rolniczym sposobem użytkowania o generalnie niekorzystnym z punktu widzenia profilaktyki przeciwoerozyjnej kierunkiem prowadzenia zabiegów agrotechnicznych jest mezoregionem, który powinien zostać pilnie objęty działaniami ochronnymi. Działania te powinny w pierwszej kolejności być wprowadzone w górnych partiach Wzgórz i poparte analizą skutków środowiskowych ocenianych na podstawie opracowania różnych wariantów zagospodarowania terenu.

2. Opracowane scenariusze zmian zagospodarowania zlewni Mielnicy wykazują, że w przypadku niepodjęcia działań ochronnych (VAR0) zmiany klimatyczne będą powodowały stopniowe zwiększanie się odpływu wód, co w konsekwencji wpłynie na wielkość produkcji rolniczej oraz zasoby wód gruntowych. Zaniechanie wprowadzenia obszarowych zmian środowiskowych może w przyszłości sprawić, iż zlewnia zagospodarowana w obecny sposób będzie funkcjonowała tak samo jak zlewnia intensywnie użytkowana (VAR3).

3. Wprowadzenie rolno-środowiskowego zagospodarowania zlewni (VAR1 i VAR2) spowoduje zwiększenie się retencji powierzchniowej i glebowej, na co wskazują długoterminowe symulacje wskaźnika odpływu. Osiągane wielkości wskaźnika, w tych wariantach zagospodarowania, są niższe o ok. 20–40% od wskaźników otrzymanych dla pozostałych wariantów. Niepodjęcie żadnych działań ochronnych (VAR0) lub wzrost intensywności rolnictwa na tym obszarze (VAR3) będą w przyszłości skutkowały wzrostem częstotliwości występowania ekstremalnych zjawisk hydrologicznych o charakterze maksymalnym, a tym samym powodowały zwiększenie degradacji środowiska zjawiskami erozyjnymi.

4. Wzrost intensywności rolnictwa na obszarze Wzgórz Trzebnickich w perspektywie długoterminowej spowoduje zwiększenie ilości sedymentów wynoszonych wraz z odpływającymi poza ten obszar wodami. Wielkości te mogą stanowić od 120 do 150% ładunków zwietrzliny prognozowanych w przypadku zlewni zagospodarowanych rolno-środowiskowo. Analiza tendencji zmian denudacji w czasie wskazuje, iż zjawiska erozyjne mogą się nasilać wraz z pogłębianiem się zmian klimatycznych.

5. Wprowadzenie do zagospodarowania zlewni pełnego wariantu rolnośrodowiskowego (VAR2) wpłynie pozytywnie na ograniczenie ilości składników chemicznych wymywanych z gleb i odprowadzanych poza zlewnię w stosunku do ilości szacowanych w przypadku wzrostu intensywności rolnictwa na tym obszarze (VAR3). Wyniki symulacji wynoszenia fosforu mineralnego korespondują z analizami dotyczącymi erozji wodnej powierzchniowej gleb i denudacji odpływowej. Prognozowane wskaźniki wskazują przeciętnie 2-krotnie większe ilości fosforu odprowadzanego ze zlewni zagospodarowanej jak w wariantcie VAR3 niż w wariantach VAR1 i VAR2, choć możliwe są różnice nawet 7-krotne. Podobnie przedstawia się symulacja wynoszenia azotanów wraz z odpływającymi wodami.

6. Symulacja wynoszenia organicznych form azotu i fosforu w wariacie zagospodarowania rolno-środowiskowego daje wyraźnie większe wielkości ładunków tych składników chemicznych niż wielkości prognozowanych dla wariantu rolnictwa intensywnego. Wyjaśnianie tego mechanizmu pozostaje na razie niejednoznaczne i w przyszłości będzie przedmiotem kolejnych badań oraz prób symulacyjnych.

7. Celowym wydaje się prowadzenie dalszych prac rozwojowych nad opracowanym narzędziem prognostycznym, które powinno stanowić nieodzowny element wspomagania decyzyjnego. Udoskonalanie ma dotyczyć m.in. dynamicznego modelowania zmian klimatycznych w skali regionu agroklimatycznego oraz wprowadzenia elementów analizy ekonomiczno-własnościowej do konstruowania propozycji scenariuszy zmian zagospodarowania przestrzennego w ujęciu zlewniowym.

PIŚMIENNICTWO

- Adam N.R., Gangopadhyay A., 1998. Database issues in geographic information systems. Kluwer international series on advances in database systems, GRK-99/8. Kluwer Academic Publishers, Boston. Dordrecht. London.
- Anioł-Kwiatkowska J., 2003. Zagrożenia flory synantropijnej Dolnego Śląska – problemy wymierania archeofitów. Zagrożone gatunki flory naczyniowej Dolnego Śląska, 151–164.
- Asch K., 1999. GIS in Geowissenschaften und Umwelt. GRK–99/2. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- Bartnik W., Madeyski M., 1992. Denudacja w małych zlewniach górskich jako jeden z czynników określania natężenia erozji. Zesz. Nauk. AR Krak. 271, Sesja nauk., „Erozja gleb i gospodarowanie na terenach urzeźbionych”, z. 35, cz. I, 257–265.
- Bertelme N., 1995. Geoinformatik – Modelle, Strukturen, Funktionen. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Bobrowicz G., Konieczny K., 2004. Waloryzacja przyrodnicza gminy Trzebnica. Polskie Towarzystwo Przyjaciół Przyrody „pro Natura”, Wrocław.
- Buraczyński J., 1990. Rozwój wąwozów na Roztoczu Gorajskim w ostatnim tysiącleciu. Annales UMCS, vol. XLIV/XLV, sectio B, Lublin, 95–104.
- Cegła J., 1972. Sedymentacja lessów Polski. Acta Univ. Wratisl., Studia Geogr. 168, Wrocław.
- Christensen J.H., Hewitson B., Busuioc A., Chen A., Gao X., Held I., Jones R., Kolli R.K., Kwon W.-T., Laprise R., Magana Rueda V., Mearns L., Menéndez C.G., Räisänen J., Rinke A., Sarr A., Whetton P., 2007. Regional Climate Projections, [w:] Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (red.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- EEA/CIFAS, 2006a. Study report – Report on recommended farm advisory tools. Final draft, December 2006.
- EEA/CIFAS, 2006b. Study report – Review of existing farm advisory tools and farm level indicators. Final Report, June 2006.
- EEA, 2006a. Integration of environment into EU agriculture policy – the IRENA indicator-based assessment report. Report 2/2006.
- EEA, 2006b. Ocena integracji ochrony środowiska z polityką rolną. UE. EEA Briefing 01/2006.
- EEA, 2006c. Vulnerability and adaptation to climate change in Europe. Technical report 7/2005.

- Figuła K., 1966. Badania transportu rumowiska w ciekach górskich i podgórskich o różnej budowie geologicznej i użytkowaniu. PWRiL, Wiad. IMUZ, t. VI, z. 3, Warszawa, 131–145.
- Froehlich W., 1975. Dynamika transportu fluwialnego Kamienicy Nawojowskiej. Pr. Geogr. IGiPZ PAN.
- Froehlich W., 1992. Mechanizm erozji i transportu fluwialnego w zlewniach beskidzkich. Pr. Geogr. IGiPZ PAN.
- Froehlich W., 2002. Badania transferu zwietrzelin w beskidzkim systemie fluwialnym. Mat. Symp. Nauk. „Erozja gleb i transport rumowiska rzecznego”, Zakopane 10–12.X.2002, 52–57.
- Froehlich W., Stupik J., 1980. Land roads as a source of water and sediment income to watercourse.. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 225, 257–268.
- Geiger J., 2001. Line.FromandToAz Script, version 2.5. Manual.
- Gładki H., 1978. Badania ilościowe natężenia erozji na obszarze Karpat i Podkarpacia. [w:] Wyd. PTG „Natężenie erozji gleb górskich na podstawie badań ruchu rumowiska”, Warszawa, 15–28.
- Hutchinson M.F., 1989. A New Procedure for Gridding Elevation and Stream Line Data With Automatic Removal of Spurious Pits. Journal of Hydrology: 106, 211–232.
- IPCC, 2000. Emissions Scenarios – A Special Report of IPCC Working Group III – Summary for Policymakers. WMO/UNEP.
- IPCC, 2007. Climate Change 2007. The Physical Science Basis Summary for Policymakers – Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, WMO/UNEP.
- Jary Z., 1991. Profil utworów lessowych w Trzebnicy koło Wrocławia, [w:] H. Maruszczak (red.), Podstawowe profile lessów w Polsce, UMCS, Lublin, 196–200.
- Jary Z., 1996. Chronostratygrafia oraz warunki sedymentacji lessów południowo-zachodniej Polski na przykładzie Płaskowyżu Głubczyckiego i Wzgórz Trzebnickich. Acta Univer. Wratisl. 1766, Studia Geogr. LXIII, Wrocław.
- Jary Z., Kida J., 2002. Erozja wązowowa na obszarach lessowych południowo-zachodniej Polski. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln. 487, Warszawa, 79–86.
- Jenness J., 2008. Surface Tools extensions for ArcView 3.x, v.1,6a Manual.
- Józefaciuk Cz., Józefaciuk A., 1996. Erozja i melioracje przeciwerozyjne. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa.
- Józefaciuk Cz., Józefaciuk A., 1999. Ochrona gruntów przed erozją. Wydawnictwo IUNG, Puławy.
- Józefaciuk Cz., Józefaciuk A., Nowocień E., Wawer R., 2002. Przeciwerozyjne zagospodarowanie zlewni wyżynnej potoku Grodarz z uwzględnieniem ograniczania powodzi. Monografie i rozprawy naukowe, Wyd. IUNG, z. 4.
- Józefaciuk Cz., Nowocień E., Wawer R., 2000. Sytuowanie dróg w terenach erodowanych. Folia Univesitatis Agriculturae Stetinensis, z. 217 Agric. 87, 77–80.
- Kida J., 1996. Niektóre cechy rzeźby lessowej Opolszczyzny. Acta Universitatis Wratislaviensis 1808, seria A, t. VIII, Wrocław, 43–61.

- Komisja Europejska, 2000. Communication from the Commission to the Council and the European Parliament – Indicators for the Integration of Environmental Concerns into the Common Agricultural Policy, COM(2000)20final.
- Komisja Europejska, 2001. Communication from the Commission to the Council and the European Parliament – Statistical Information needed for Indicators to monitor the Integration of Environmental concerns into the Common Agricultural Policy – COM(2001)144final.
- Komisja Europejska, 2006. Komunikat komisji dla rady i parlamentu europejskiego – Opracowanie rolno-środowiskowych wskaźników monitorowania włączenia problematyki ochrony środowiska do wspólnej polityki rolnej. KOM(2006) 508 wersja ostateczna.
- Kopeć S., Misztal A., 1990. Wpływ różnej okrywy roślinnej na ochronę przed erozją gleb użytkowanych rolniczo w warunkach górskich. *Probl. Zagospod. Ziem Górskich*, 30, 127–138.
- Kostrzewski A., Mazurek M., Zwoliński Z., 1994. Dynamika transportu fluwialnego górnej Parsęty, jako odbicie funkcjonowania systemu zlewni. *Wyd. Stow. Geomorfologów Polskich*, Poznań.
- Lipski C., Żołubak P., Jakubowski T., 1997. Wpływ użytkowania na ochronę gleb przed erozją na przykładzie części zlewni potoku Kamienica Zabrzeńska. [w:] *Wyd. AR w Poznaniu „Przyrodnicze i techniczne problemy ochrony i kształtowania środowiska rolniczego”*, Poznań, 107–111.
- Liszewska M., 2004. Climate reconstructions and projections for Poland and Central Europe, *Publ. of the Institute of Geophysics PAS*, E-4(377), Potential Climate Changes and sustainable water management, 19–24.
- Liszewska M., Osuch M., 2002. Climate Changes in Central Europe Projected by General Circulation Models., *GeoJournal (Kluwer Academic Publishers)* vol. 57, no. 3, 155–163.
- Maruszczak H., 1991. Ogólna charakterystyka lessów w Polsce. [w:] H. Maruszczaka (red.), *Podstawowe profile lessów w Polsce*, wyd. UMCS w Lublinie, sectio A, 1–12.
- Matuszkiewicz J. M., 2007. *Zespoły leśne Polski*. PWN Warszawa.
- Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R., Williams J.R., 2001. *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation*. Blackland Research Center.
- Nowocień E., 1996. Dynamika rozwoju wąwozów drogowych na obszarach lessowych. *Pam. Puł.*, z. 107, 101–111.
- Nowocień E., 1997. Specyfika planowania dróg rolniczych w terenach erodowanych, *Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu*, z. 312, 209–216.
- Nowocień E., 1999. Badania nad planowaniem i projektowaniem wybranych elementów dróg rolniczych na wyżynnych obszarach chronionego krajobrazu, *Pam. Puł.*, z. 119, 93–100.
- Nowocień E., 2003. The Study Of Planning And Designing Some Elements Of Agricultural Roads Located Within Upland Protected Areas. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities*, Volume 6, Issue 2, CIVIL ENGINEERING Series.

- Nowocien E., Wawer R., 2002. Zastosowanie programu EROSION 3D w prognozowaniu nasilenia erozji wodnej na przykładzie zlewni potoku Grodarz. *Fragmenta Agronomica*, 1 (73), 153–170.
- OECD, 1999a. *Environmental Indicators for Agriculture Vol. 1: Concepts and Framework*.
- OECD, 1999b. *Environmental Indicators for Agriculture Vol. 2: Issues and Design – „The York Workshop”*.
- OECD, 2001. *Environmental Indicators for Agriculture Volume 3: Methods and Results*.
- Orlik T., Węgorok T., 1994. Melioracje przeciwoerozyjne w ochronie krajobrazu agrosystemów terenów wyżynnych. *Zesz. Nauk. AR Wroc.* 246, Konferencje III, t. II, 209–216.
- Orlik T., Węgorok T., 1995. Zagrożenie erozyjne w zlewni rzeki Ciemięgi i koncepcja przeciwdziałania, [w:] *Mat. konf. nauk–techn. „Proekologiczne zagospodarowanie zlewni rzeki Ciemięgi”*, 16–17.11.1995, Lublin, 51–63.
- Pałys S., 1992. Wpływ zabiegów przeciwoerozyjnych na natężenie erozji wodnej gleb w Elizówce. *Zesz. Nauk. AR Krak.* 273, Sesja Naukowa 35, cz. II, Kraków, 3–9.
- Pałys S., 2001. Erozja wodna w zlewniach z okresowym odpływem wody na Wyżynie Lubelskiej w latach 1987–1999. *Folia Universitatis Agriculturae Stetinensis* 217, *Agricultura* 87, Szczecin, 179–182.
- Pawlak W. (red.), 1997. *Atlas Śląska Dolnego i Opolskiego*. Uniw. Wroc. Pracownia Atlasu Dolnego Śląska, Wrocław.
- Pender K., Rybałtowska Z., 1995. Szata roślinna rezerwatu „Las bukowy w Skarszynie”. *Acta Universitatis Wratislaviensis* 1667, Wrocław, 79–99.
- Sadowski M., 2006. Ocena potencjalnych skutków społeczno-gospodarczych zmian klimatu w Polsce. Instytut Ochrony Środowiska/WWF.
- Schmidt J. (red.), 2000. *Soil Erosion – Application of Physically Based Models*, Springer Germany.
- Schumm S.A., 1977. *The fluvial system*. Wyd. John Wiley, New York.
- Starkel L., 1980. Erozja gleb a gospodarka wodna w Karpatach. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.* 235, 103–118.
- Szewrański S., 2002. The influence of the small reservoirs on the amount of suspended sediment in a stream and the sediment yield value. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities, Environmental Development*, volume 5, Issue 2, <http://www.ejpau.media.pl/series/volume5/issue2/environment/art-02.html>.
- Szewrański S., Sasik J., Żmuda R., 2002a. Ocena zamulania małych zbiorników wodnych zlokalizowanych w silnie erodowanej zlewni rolniczej. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.* 487, Warszawa, 345–352.
- Szewrański S., Sasik J., Żmuda R., 2002b. The water erosion process against the background of outflow condition changes in upland catchment. *Geografický časopis* 54, z. 4, 355–365.
- Szponar A., 1998. Wybrane problemy czwartorzędu południowo-zachodniej Polski. *Acta Univ. Wratisl.* 2083, *Studia Geogr.* LXXI, Wrocław.

- Świąchowicz J., 2000. Rola stoków i den dolin w odprowadzaniu zawiesiny ze zlewni pogórskiej, [w:] Wyd. Inst. Geogr. UJ „Przemiany środowiska na Pogórzu Karpackim”, Kraków, 31–49.
- Walczak W., 1970. Obszar przedludecki. PWN, Warszawa.
- Wawer R., 2003. Zastosowanie cyfrowego modelowania obszaru zlewni Grodarza dla celów zagospodarowania przeciwoerozyjnego. Rozprawa doktorska. IUNG.
- Wawer R., 2004. An Indicator for Estimating Arrangement of Rural Roads in Terrains Relief and Its Digital Implementation in GIS on the Example of Grodarz Stream Watershed, Electronic Journal of Polish Agricultural Universities. Civil Engineering Series. Vol. 7, Is. 2.
- Wawer R., Nowocień E., 2003. Application of Sinmap terrain stability model in Grodarz stream watershed. Electronic Journal of Polish Agricultural Universities. Environmental Development Series. Vol. 6, Is.1.
- Winnicki J., 1991. Wstępne wyniki badań geologicznych osadów czwartorzędowych w rejonie Trzebnicy. Śląskie Spr. Archeol. 32, 21–28.
- Winnicki J., 1994. Utwory pyłowe Wzgórz Trzebnickich. Śląskie Spr. Archeol. 35, 26–38.
- Ziemnicki S., 1968. Melioracje przeciwoerozyjne. PWRiL, Warszawa, 360.
- Żmuda R., 2006. Funkcjonowanie systemu transportu fluwialnego w małej zlewni zagrożonej erozją wodną gleb. Zesz. Nauk. AR Wroc., 544, Rozprawy CCXLIII.
- Żmuda R., Sasik J., Szewrański S., 2001. Wpływ sposobu użytkowania małego stawu na ilość odprowadzanych składników chemicznych. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol. 475, Warszawa, 527–537.
- Żmuda R., Sasik J., Szewrański S., 2005. Analiza potrzeb zmian zagospodarowania przestrzennego Wzgórz Trzebnickich w aspekcie ochrony przed erozją wodną gleb. Acta Agrophysica 115, vol. 5(1), Lublin, 229–237.

FORECASTING THE ENVIRONMENTAL EFFECTS CAUSED BY THE IMPLEMENTATION OF PRINCIPLES OF GOOD AGRICULTURAL PRACTICES

Summary

Results of research programme, which was aimed at analysing the possibilities of environmental modelling and impact assessment of agricultural spatial management and land-use changes, are presented in this study.

Research was carried out in small catchment of Mielnica stream, located in the Trzebnica Hills region. Study site is covered by loess soils, which are severely degraded by processes of water erosion.

Environmental monitoring in catchment included hydrological measurements of the water level and stream flow. Sediment load and surface water chemical composition had been assessed. Everyday meteorological monitoring was been provided. Soil physical and chemical characteristics had been studied. There were many survey investigation and direct inspections.

During the research completely new digital spatial database was build, as well as Digital Catchment Model had been applied with ArcGIS technology. Obtained thematic layers had included specific information on land surface morphology, soil cover and land use pattern with farming measures data, hydrographic network and local communication infrastructure.

Geographic Information System combined with SWAT (Soil and Water Assesment Tool) was used for environmental modeling. Potential impact was assessed for different scenarios, which had been defined with consideration of principles of Good Agricultural Practice Code, agri-environmental measures application, climate changes, forecasted spatial developments and economical issues. Modelled environmental effects of different spatial changes and farming practices in investigated catchment are presented this study.

Key words: environmental impact assessment, GIS, environmental modelling, good agricultural practices

PROGNOZOWANIE EFEKTÓW ŚRODOWISKOWYCH SPOWODOWANYCH WPROWADZENIEM ZASAD DOBRYCH PRAKTYK ROLNICZYCH

Streszczenie

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki prac badawczych, których celem było przeanalizowanie możliwości prognozowania i oceniania skutków środowiskowych powodowanych zmianami w sposobie zagospodarowania i użytkowania przestrzeni rolniczej.

Badania prowadzono w małej zlewni ciekłu Mielnica, położonej na południowych stokach Wzgórz Trzebnickich. Obszar ten w całości pokrywają gleby lessowe, które ulegają silnej degradacji w wyniku procesów erozji wodnej.

Badania monitoringowe prowadzone w zlewni obejmowały pomiary hydrologiczne stanów wody i natężenia przepływu. Określano wielkości ładunku sedymentów oraz analizowano skład chemiczny wód powierzchniowych. Prowadzono codzienny monitoring warunków meteorologicznych. Oznaczono cechy fizykochemiczne gleb zalegających na obiekcie badawczym. W zlewni przeprowadzono częste wizje terenowo-inwentaryzacyjne.

W ramach prac badawczych opracowano cyfrową bazę danych przestrzennych i wykorzystując technologię ArcGIS zbudowano kompletny Cyfrowy Model Zlewni. Warstwy tematyczne zawierały szczegółowe dane dotyczące rzeźby terenu; pokrywy glebowej; użytkowania terenu z uwzględnieniem agrotechniki; sieci hydrograficznej oraz lokalnej infrastruktury komunikacyjnej.

System informacji geograficznej w powiązaniu z aplikacją SWAT (Soil and Water Assessment Tool) wykorzystano do prognozowania środowiskowego. Oceny skutków dokonano dla różnych wariantów uwzględniających m.in. upowszechnianie Kodeksu Dobrych Praktyk Rolniczych i działań rolno-środowiskowych, zmiany klimatyczne; przewidywane przekształcenia obszarowe oraz zmiany charakteru produkcji. W pracy przedstawiono potencjalne skutki środowiskowe dla różnych scenariuszy zagospodarowania przestrzennego i użytkowania analizowanej zlewni.

Słowa kluczowe: ocena oddziaływania na środowisko, GIS, modelowanie środowiskowe, dobre praktyki rolnicze