



**ochrona
wód
przed
zanie-
czyszcze-
niami**

WALDEMAR MIODUSZEWSKI, ANNA ZDANOWICZ

Instytut Melioracji i Użytków Zielonych, Falenty

RALF DANNOWSKI, JOZEF SEIDL, DETLEF DEUMLICH

Centrum Badawcze Użytkowania i Zagospodarowania
Krajobrazu Rolniczego, Müncheberg

LAURA RADCZUK, IRENEUSZ KAJEWSKI

Instytut Inżynierii Środowiska, Akademia Rolnicza, Wrocław

Ocena ładunku azotu i fosforu ze źródeł rolniczych wnoszonego do rzek w zlewni Odry

Przedstawiono metodykę i wyniki (w postaci map) obliczeń wielkości jednostkowych ładunków azotu i fosforu wprowadzanych z terenów rolniczych do rzek w zlewni Odry.

Gospodarka rolna, w tym intensywna produkcja roślinna, stanowi zagrożenie dla jakości wód powierzchniowych i gruntowych. Stosowane w uprawach nawozy mineralne i organiczne są wymywane z gleby, a następnie transportowane do warstw wodonośnych lub bezpośrednio do wód powierzchniowych.

Pomimo wybudowania w ostatnich latach wielu oczyszczalni komunalnych i przemysłowych nie obserwuje się istotnej poprawy jakości wód w rzekach; dotyczy to szczególnie zawartości fosforu i azotu. Uważa się, że wynika to głównie z braku redukcji zanieczyszczeń pochodzenia rolniczego. Ocenia się, że ilość około 350 000 ton azotu i co najmniej 5000 ton fosforu, wprowadzana do Morza Bałtyckiego z obszaru Polski, pochodzi z działalności rolniczej. Stanowi to około 50% całkowitego ładunku tych związków.

Uzyskanie istotnego i znaczącego zmniejszenia dopływu do rzek i wód podziemnych zanieczyszczeń obszarowych, z produkcji rolniczej, wymaga wdrożenia proekologicznych zasad i nowoczesnych technologii w praktyce rolniczej, obejmującej m.in. nowe regulacje prawne w zakresie stosowania nawozów, składowania obornika i gnojowicy, budowy oczyszczalni ścieków i zagospodarowania odpadów płynnych

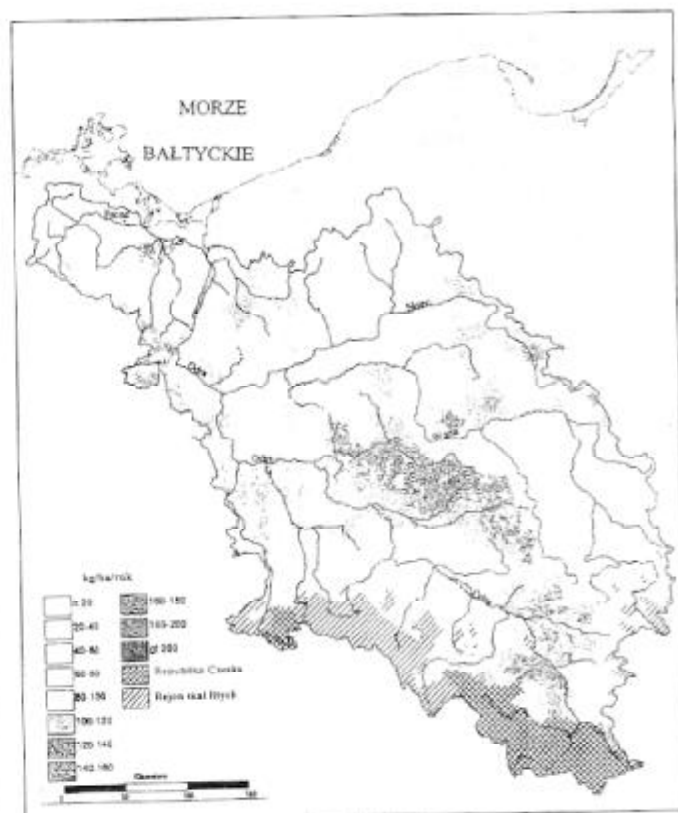
i stałych w gospodarstwach rolnych oraz utrzymanie (zwiększenie) biologicznej różnorodności krajobrazu rolniczego. Niezbędne jest również koncentrowanie sił i środków na obszarach wrażliwych z punktu widzenia zagrożeń jakości wód powierzchniowych i podziemnych. Wyznaczenie obszarów najbardziej wrażliwych na zanieczyszczenia wód związkami chemicznymi pochodzenia rolniczego wraz z oceną przestrzennego

rozkładu ładunku azotu i fosforu wymywanego z gleby w zlewni Odry stanowi przedmiot polsko-niemieckiego projektu badawczego sponсорowanego przez Niemiecką Agencję Ochrony Środowiska, a nadzorowanego przez Niemieckie Stowarzyszenie Zasobów Wodnych i Kształtowania Środowiska (DVWK) oraz Polską Akademię Nauk. Prace badawcze prowadzone są przez następujące instytucje: Instytut Melioracji i Użytków Zielonych w Falentach, Instytut Inżynierii Środowiska Akademii Rolniczej we

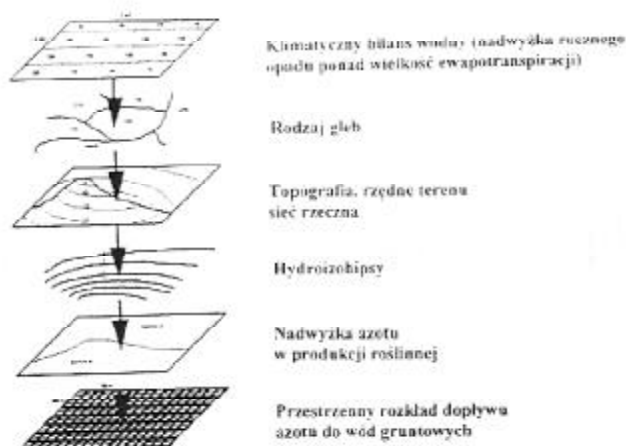
Wrocławiu oraz Instytut Hydrologii Niemieckiego Centrum Badawczego Użytkowania i Zagospodarowania Krajobrazu Rolniczego.

■ Podstawowe założenia

Całkowita powierzchnia zlewni Odry, łącznie z Zalewem Szczecińskim, wynosi 136 528 km², z czego 115 768 km² (84,9%) leży na terytorium Polski, 6346 km² (4,6%) w Republice Czeskiej

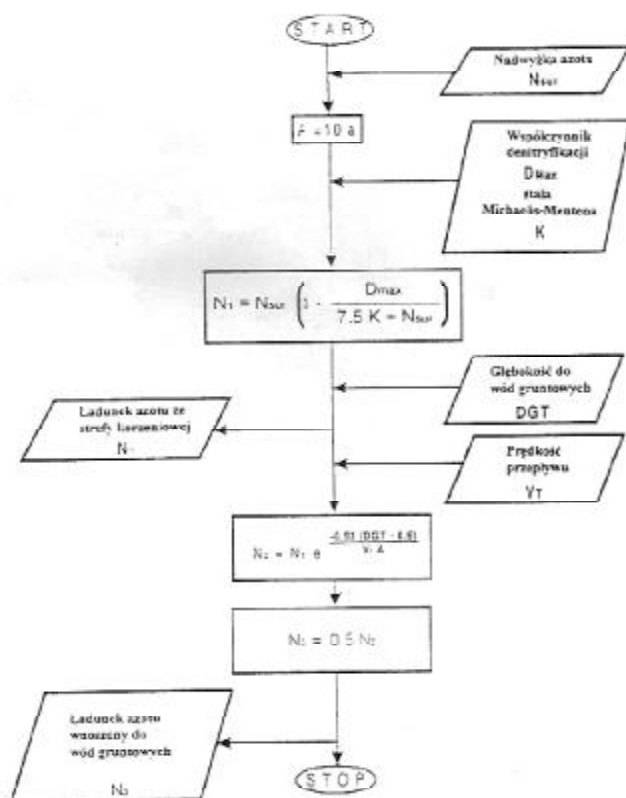


Rys. 1. Nadwyżka azotu w zlewni Odry



Rys. 2. Schemat danych w systemie GIS do analizy dopływu azotu do wód gruntowych

Rys. 3. Algorytm do obliczeń transportu azotu do wód gruntowych



i 14 416 km² (10,5%) w Niemczech. Przeprowadzone badania i studia objęły 114 049 km², tj. 83% całkowitej powierzchni zlewni Odry. Nie uwzględniano części zlewni znajdującej się w granicach Republiki Czeskiej oraz obszarów występowania skał litych. Skały lite pominięto ze względu na konieczność stosowania innych metod obliczeń filtracji na tego typu obszarach.

Obliczenia wynoszonego ładunku związków chemicznych prowadzono metodą oceny emisji zanieczyszczeń, tj. analizy procesu wymywania fosforu i azotu z gleby oraz transportu tych związków do rzek. Bilansowa nadwyżka fosforu i azotu oraz zawartość związków biogennych w glebach stanowiła podstawę do oceny poziomu intensyfikacji rolnictwa oraz identyfikacji podstawowych źródeł zanieczyszczeń obszarowych. Nadwyżka azotu (N_{sur}) była wyznaczona jako różnica azotu doprowadzonego do gleby z nawozami mineralnymi i organicznymi a azotem wynoszonym wraz z plonami [Kleinhanss, 1994]. Obliczenia zostały wykonane dla danych za rok 1989, który charakteryzuje się największym w historii rolnictwa zużyciem nawozów mineralnych. Na rys. 1 przedstawiono przestrzenny rozkład nadwyżek azotu w zlewni Odry.

Przy analizie transportu związków chemicznych uwzględniano rodzaj gleby, rzeźbę terenu oraz warunki hydrologiczne, hydrogeologiczne i klimatyczne. Transport i przemieszczanie się nadwyżki (N_{sur}) związków biogennych obliczono dla następujących założeń:

□ transport zanieczyszczeń obszarowych (azot i fosfor) odbywa się ze spływem powierzchniowym, tj. następuje wynoszenie związków biogennych z gleby na skutek procesów erozyjnych,

□ transport azotu do rzek następuje na skutek przepływu wód gruntowych – uwzględnia się tu przepływ pionowy w strefie areacji – aby ustalić ładunek wypływający z gleby i wnoszony do wód podziemnych, a następnie przepływ poziomy – aby ocenić ładunek azotu wnoszony do wód powierzchniowych (rzek i cieków).

Przy obliczeniach wykorzystywano system informacji geograficznej (GIS). Opracowano liczne mapy tematyczne w programie ArcInfo, przedstawiające następujące elementy:

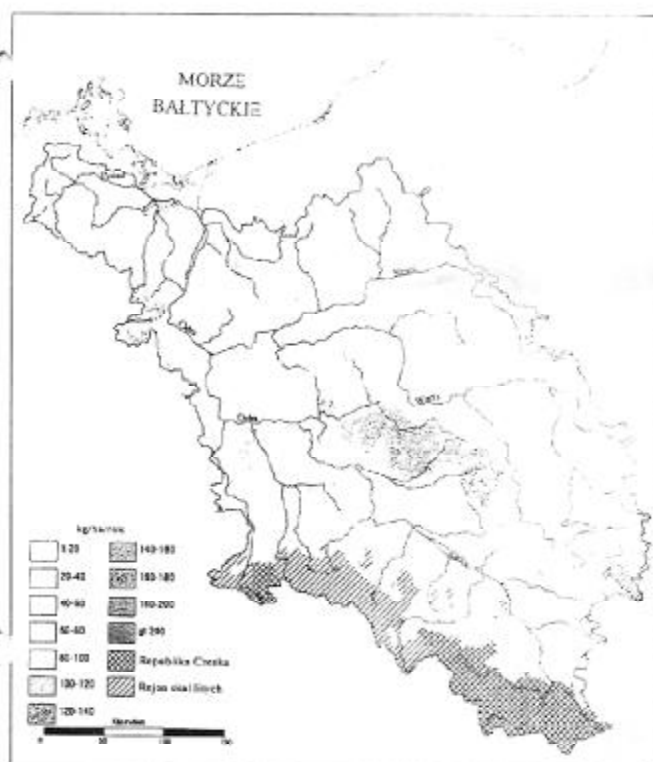
- warunki klimatyczne (średnie roczne opady atmosferyczne i ewapotranspiracja),
- przestrzenne zróżnicowanie nadwyżek azotu i fosforu na obszarach rolniczych,
- głębokość zalegania wód gruntowych – wykorzystano numeryczną mapę rzeźby terenu opracowaną przez USDA,
- współczynnik filtracji pierwszej warstwy wodonośnej oraz jej miąższość,
- użytkowanie terenu z podziałem na lasy, użytki rolne, obszary zabudowane, mokradła i wodę, wykorzystano dane z systemu CORINE,

- sieć hydrograficzna z podziałem na zlewnie trzeciego rzędu,
- gleby z podziałem na klasy wynikające z ich właściwości hydraulicznych (pojemność wodna, przepuszczalność).

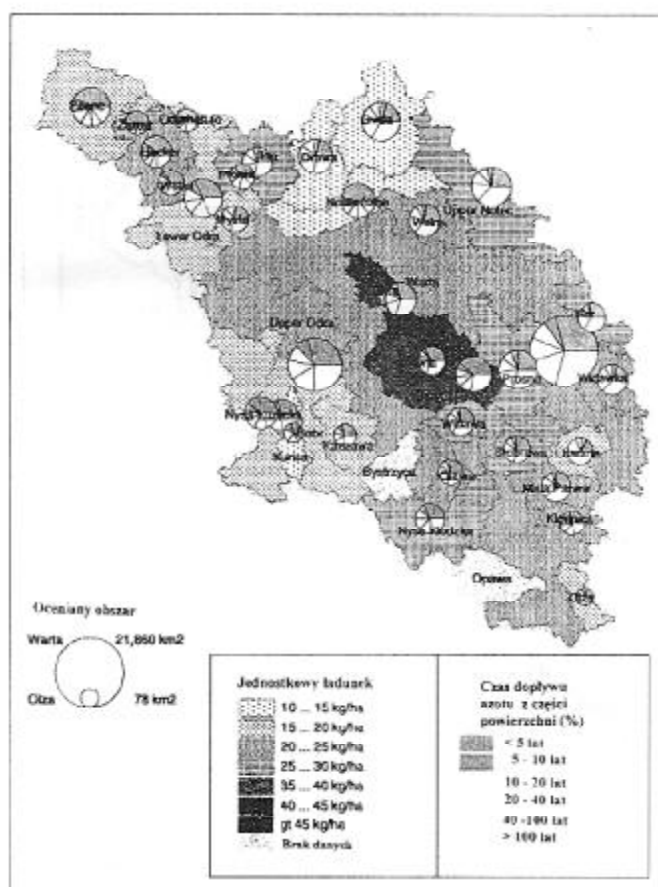
Na rys. 2 przedstawiono schemat wykorzystania danych w systemie GIS.

Ze względu na duży obszar rozpatrywanej zlewni przyjęto podstawową skalę map 1:200 000, lecz w wielu wypadkach informacje dotyczące poszczególnych parametrów były opracowywane w skali 1:100 000, a nawet 1:50 000. Starano się obliczenia prowadzić w granicach zlewni o powierzchni nie większej niż 500 km² (najkorzystniej pomiędzy 50 a 200 km²).

W trakcie realizacji projektu napotymano na liczne trudności, wynikające głównie z małej liczby danych, jakie są możliwe do uzyskania w postaci numerycznej. Zmusiło to do digitalizowania wieloanalogowych map wejściowych (np. glebowa, geologiczna) we własnym zakresie, co powodowało, że względu na małe środki finansowe i krótki okres opracowywania projektu, konieczność wprowadzania licznych uproszczeń i niezbędnych schematyzacji. Pewne trudności wynikają również z faktu, że bilansowanie azotu i fosforu jest możliwe jedynie w granicach gmin, a ob-



Rys. 4. Dopływ azotu do wód gruntowych



Rys. 5. Dopływ azotu do rzek w zlewni Odry wodami gruntowymi

liczenia prowadzone były dla zlewni rzecznych. Ostatnie szczegółowe dane na szczeblu gmin, dotyczące zużycia nawozów mineralnych, obejmują 1990 rok.

Obliczenia ładunku azotu wnoszonego do wód gruntowych i powierzchniowych

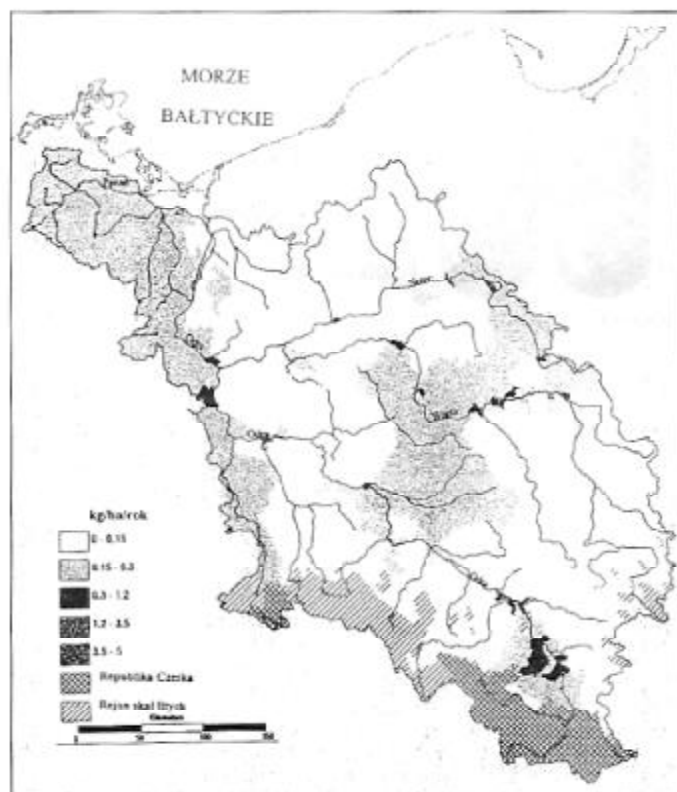
Objętość wody dopływającej do wód gruntowych obliczano jako różnicę średnich z wieloletnia opadów atmosferycznych i ewapotranspiracji. Wykorzystano do obliczeń model ABIMO [Glugla, Fürtig, 1997], pozwalający na uwzględnienie rodzaju gleby i głębokości zalegania wód gruntowych. W obliczeniach pominięto retencję glebową, ze względu na przyjmowanie do obliczeń wartości średnich rocznych z długiego okresu obserwacyjnego.

Ładunki azotu dopływające do wód gruntowych obliczano wg schematu przedstawionego na rys. 3. Prosty, lecz bardzo praktyczny model [Köhne, Wendland, 1992] denitryfikacji zastosowano do obliczeń ładunku azotu wymywanego ze strefy korzeniowej gleby (N_{kor}), uwzględniający mikrobiologiczne redukcje nadwyżki azotu (N_{sur}). Przyjęto potencjał denitryfikacji (D_{max}) w granicach

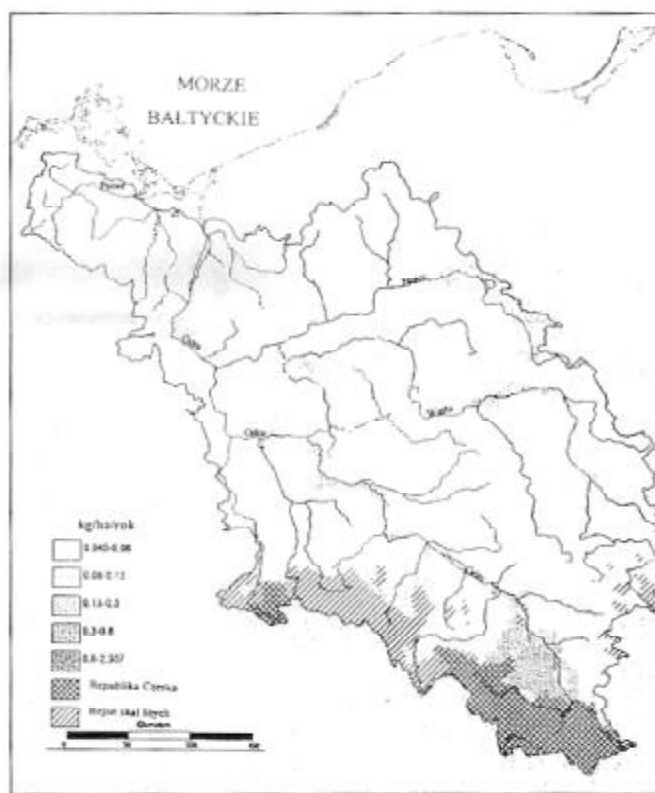
20–50 kg/ha/rok oraz stałą reakcji Michaelis-Mentena od 2,5 do 67 mg N/kg gleby w zależności od rodzaju gleby [Köhne, Wendland, 1992]. Przepływając przez strefę nienasyconą azot ulega dalszej redukcji na skutek procesów biochemicznych. Azot ulega redukcji do wielkości ładunku N_{g} (rys. 3). Ze względu na przemiany mikrobiologiczne oraz brak tlenu większość przeobrażeń azotu będzie następować w strefie podsięku kapilarnego i na granicy strefy saturacji. Brak jest możliwości liczbowej oceny tych procesów. Do celów niniejszej pracy przyjęto, że 50% ładunku dopływającego ze strefy nasyconej (N_{g}) ulegnie przeobrażeniu. Stąd objętość ładunku wnoszonego do wód gruntowych wynosić będzie $N_{\text{g}} - 0,5 N_{\text{g}}$. Na rys. 4 przedstawiono wyniki obliczeń przestrzennego rozkładu ładunku azotu wnoszonego do wód gruntowych.

Kolejnym krokiem prowadzonych obliczeń była ocena wielkości ładunku oraz czasu dopływu azotu do rzek z zasilaniem gruntowym. Zarówno wielkość ładunku, jak i czas dopływu zależą od budowy geologicznej (miąższości i współczynnika filtracji warstwy wodonośnej), gradientów hydraulicznych

(spadek zwierciadła wód gruntowych) oraz odległości koryta rzeki od źródeł zanieczyszczeń (gęstość sieci rzecznej). Obliczenia transportu poziomego związków azotu oparto na założeniach modelu WEKU [Kunkel, Wendland, 1997], przyjmując założenia teorii filtracji Darcy i Dupuita. Na rys. 5 przedstawiono wyniki obliczeń w postaci wielkości jednostkowego ładunku azotu [kg/ha] wnoszonego do rzek. Przedstawiono tu również niezbędny czas dopływu azotu z poszczególnych części zlewni (wyrażonych w procentach powierzchni w stosunku do całej zlewni) do rzeki. Z obszarów dalej położonych od rzeki czas dopływu azotu do wód powierzchniowych może być dłuższy od 100 lat (rys. 5). Należy zwrócić uwagę, że wyniki obliczeń przedstawiają wielkość ładunku dopływającego do rzeki w wypadku wieloletniego utrzymywania nadwyżki azotu, jaką obserwowano w 1989 roku. Ponieważ w Polsce wykorzystanie nawozów mineralnych uległo wyraźnemu zmniejszeniu (2–3-krotnie), to i automatycznie nadwyżka azotu (N_{sur}) też uległa zmniejszeniu. Należy więc sądzić, że przedstawione wyniki dopływu azotu do wód powierzchniowych są za-



Rys. 6. Jednostkowy ładunek azotu dopływający do rzek na skutek procesów erozyjnych



Rys. 7. Jednostkowy ładunek fosforu dopływający do rzek na skutek procesów erozyjnych

wyżone. Natomiast rozkład przestrzenny zarówno nadwyżek azotu, jak i ładunku doprowadzanego do rzek jest zbliżony do rzeczywistości. Należy również zwrócić uwagę, że w obliczeniach nie uwzględnia się procesów samooczyszczania się wód wzdłuż koryta rzeki. Jest to więc część azotu, która dopływa do rzek.

■ Ocena ładunku azotu i fosforu wnoszonego do rzek ze spływem powierzchniowym

Ocenę ładunku nutrientów (N i P) wynoszonych ze spływem powierzchniowym na skutek procesów erozyjnych wykonano jedynie dla gruntów ornych, zakładając że pozostałe formy użytkowania gruntów zabezpieczają je przed erozją. Do obliczenia objętości erodowanego materiału z obszaru zlewni wykorzystano zmodyfikowaną metodę USLE [Renard et al., 1991], według której wielkość wynoszonych gleby (A) ocenia się na podstawie wzoru:

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

gdzie: A – masa wynoszonych osadów w kg/ha/rok, R – współczynnik zależny od intensywności deszczu, był oceniony na podstawie rzeczywistych pomiarów

opadów w kilku stacjach meteorologicznych, K – współczynnik zależny od rodzaju gleby, oceniony na podstawie wykonanej mapy numerycznej gleb, LS – współczynnik zależny od długości i spadku zboczy, oceniony na mapach w skali 1:50 000, C – współczynnik zależny od rodzaju uprawianych roślin, oceniony na podstawie danych statystycznych dla gmin (rodzaje upraw i ich powierzchnie – przyjęto dane z 1989 r.), P – współczynnik zależny od podejmowanych działań mających na celu ograniczenie erozji (przyjęto jako równy 1,0 dla całej zlewni).

Mając obliczoną masę erodowanej gleby oraz zawartość fosforu (azotu) w glebie, oceniono ładunek związków biogennych wynoszonych ze zlewni [Deumlich, 1993]. Wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 6 i 7.

■ Analiza wyników i podsumowanie

Analizy i obliczenia transportu zanieczyszczeń obszarowych pochodzenia rolniczego (azot i fosfor) zostały wykonane dla bardzo dużego obszaru, tj. zlewni Odry. Przy obliczeniach wykorzystywano metody systemu informacji geograficznej (GIS). Ze względu na małą dostępność niezbędnych danych

w formie numerycznej wykonywano wstępne numeryczne mapy, co mogło oddziaływać na dokładności prowadzonych obliczeń. Pomimo tych trudności udało się wykazać, że produkcja rolnicza, a głównie nadmiar azotu, może spowodować poważne zagrożenia dla jakości wód gruntowych i powierzchniowych. Ponadto przedstawiono przestrzenny rozkład dopływu azotu do wód podziemnych i powierzchniowych. Najbardziej zagrożone są obszary o intensywnej produkcji rolniczej (duża nadwyżka azotu) w warunkach występowania wysokich opadów atmosferycznych (duża ilość wód opadowych infiltrujących do wód podziemnych). W mniejszym stopniu wielkość ładunku azotu dopływającego do warstw wodonośnych zależy od rodzaju gleby.

Przeprowadzone obliczenia wykazały więc obszary wrażliwe (najbardziej zagrożone) na zanieczyszczenia wód podziemnych związkami azotu.

Znacznie mniejsze ładunki azotu przenoszone są do rzek na skutek spływów powierzchniowych. Uważa się natomiast, że głównie tą drogą następuje zanieczyszczenie wód powierzchniowych związkami fosforu. Spływy powierzchniowe powodujące erozję obserwowane

je się jedynie po większych opadach atmosferycznych, podczas gdy wymywanie związków chemicznych z gleby następuje praktycznie po każdym opadzie w okresie pozawegetacyjnym. Stąd też azot ze spływów powierzchniowych stanowi mniejsze zagrożenie dla jakości wód w ciekach w stosunku do dopływającego z wodami gruntowymi. Natomiast fosfor dopływa do rzek głównie na skutek procesów erozyjnych.

Przedstawione w pracy wyniki obliczeń (ładunki azotu i fosforu pochodzenia obszarowego ze źródeł rolniczych) należy traktować jako wielkości średnie charakterystyczne dla większych obszarów. Wynika to z przyjętej metodyki prac oraz braku map numerycznych. Analiza tak dużego obszaru wymagała wielu uproszczeń, a dane statystyczne nie pozwalają na uwzględnianie obszarów mniejszych od powierzchni gminy. Tym niemniej uzyskane wyniki wyraźnie wskazują na zróżnicowanie przestrzenne ładunków azotu i fosforu wnoszonych do wód gruntowych i powierzchniowych.

LITERATURA

1. K. AUERSWALD, 1989, Predicting nutrient enrichment from long-term average soil loss. *Soil Technol.* 2.
2. T. BOGACKA, R. TAYLOR, 1997, Emisja azotu i fosforu z obszaru Polski do wód powierzchniowych. *Wiadomości IMiGW* 2.3.
3. D. DEUMLICH, 1993, Beitrag zur Erarbeitung einer Lössrodenkarte Deutschlands. *Arch. Acker-Planzenbau Bodenkd.*, Harwood Acad. Publ. 37.
4. G. GLUGLA, G. FÜRTIG, 1997, Berechnung langjähriger Mittelwerte des Wasserhaushalts für Lockergesteinsbereich. Dokumentation zur Anwendung des Rechenprogramms ABIMO. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Berlin.
5. W. KLEINHANSS, 1994: Assessment balance at regional and farm level: the balance approach (Fal) Braunschweig, Germany.
6. Ch. KÖNHE, F. WENDLAND, 1992, Modellgestützte Berechnung des mikrobiellen Nitratabbaus im Boden. *Int. Ber. RFA-STE-IB-1/92 FZ Jülich GmbH.*
7. R. KUNKEL, F. WENDLAND, 1997, WEKU-a GIS supported stochastic model of groundwater residence times in upper aquifer for the supra-regional groundwater management. *Environm. Geol.* 30 (1/2), Springer.
8. K. RENARD, G. FOSTER, G. WEESIES, 1991, Predicting soil erosion by water. A guide to conservation planning with Revised Universal Soil Loss Equation. USDA - ARS, Tucson, Arizona.