

ANALIZA MODELOWA PRZEMIESZCZANIA AZOTU W ZLEWNI GRABI

Anna ZDANOWICZ

Instytut Melioracji i Użytków Zielonych, Zakład Zasobów Wodnych

Słowa kluczowe: GIS, transport azotu, użytkowanie terenu, wody gruntowe, zanieczyszczenia obszarowe

Streszczenie

Badania modelowe przeprowadzone w zlewni rzeki Grabi są próbą oceny ładunku azotu azotanowego wnoszonego do rzeki z wodami gruntowymi. Analizie podlegała: ocena infiltracji efektywnej i ładunku azotu wnoszonego z powierzchni terenu do wód gruntowych oraz ocena migracji azotu azotanowego w tych wodach i przemiany, którym podlega ten składnik w warstwie wodonośnej w czasie przemieszczania się do odbiorników powierzchniowych.

Scenariusz transportu azotu (ładunek wyrażony w $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{r}^{-1}$) z powierzchni terenu (gleby) do wód gruntowych, stworzony za pomocą systemu GIS, wskazuje na wyraźną zależność tego procesu od stopnia użytkowania rolniczego zlewni. Czynnikiem limitującym ilość azotu dostającego się do wód gruntowych jest jego nadwyżka wynikająca ze struktury i charakteru gospodarki rolnej w poszczególnych gminach zlewni Grabi. Ilość azotu azotanowego, która może dopłynąć do wód gruntowych w górnej części zlewni o mniejszym stopniu antropopresji, wynosi średnio $10 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{r}^{-1}$. W dolnej części zlewni, intensywniej użytkowanej rolniczo, z większymi ośrodkami osadniczymi, wartości te wynoszą średnio $40 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{r}^{-1}$.

WSTĘP

Zagospodarowanie i użytkowanie dolin rzecznych może wpływać na jakość wód gruntowych, będących jedną z dróg przepływu zanieczyszczeń ze zlewni do rzeki. Wody gruntowe dopływają do rzeki z różnych odległości, drogami uzależnionymi od budowy geologicznej zlewni i warunków hydrogeologicznych. W za-

Adres do korespondencji: dr A. Zdanowicz, Instytut Melioracji i Użytków Zielonych, Zakład Zasobów Wodnych, 05-090 Raszyn; tel. +48 (22) 720-05-31 w. 201, e-mail: a.zdanowicz@imuz.edu.pl

leżności od użytkowania doliny wody gruntowe mogą ulegać dalszemu zanieczyszczeniu, ale dolina może pełnić również funkcję strefy buforowej.

Modele matematyczne stanowią pewne odzwierciedlenie rzeczywistego obiektu przedstawionego w postaci układu równań matematycznych. Dzięki ich zastosowaniu jesteśmy w stanie rozpoznać procesy wpływające na przemieszczanie się zanieczyszczeń z powierzchni terenu do wód gruntowych oraz z wodami gruntowymi do rzeki. Dzięki nowoczesnym modelom matematycznym można prognozować efekty działań podejmowanych w zlewni i proponować najbardziej optymalne metody rozwiązań ze względu na jakość wód gruntowych, jednocześnie minimalizując koszty proponowanego rozwiązania.

Modelowanie matematyczne, dzięki kompleksowej ocenie procesów zachodzących w systemach wodonośnych, może być jednym z lepszych narzędzi wspomagających ocenę stopnia zanieczyszczenia wód podziemnych i powierzchniowych.

Celem podjętych badań modelowych były:

- 1) ocena infiltracji efektywnej i ładunku azotu wnoszonego z powierzchni terenu do środowiska wód gruntowych (przepływ pionowy);
- 2) ocena migracji azotu azotanowego ($N-NO_3$) w wodach gruntowych i przemiany, którym podlega ten składnik w warstwie wodonośnej w czasie przemieszczania się do odbiorników powierzchniowych (przepływ poziomy).

METODY BADAŃ

Badania modelowe prowadzono dla zlewni Grabi. Jest to średniej wielkości rzeka nizinna w środkowej Polsce, prawobrzeżny dopływ Widawki w zlewni Odry. Jej długość wynosi 81,1 km, a całkowita powierzchnia zlewni – 819,5 km². Jest to systemem rzeczny o aluwialnym charakterze, który nie został radykalnie przekształcony i występują tam nadal prawie niezmiennione, naturalnie meandrujące odcinki trasy zalewowej.

Przyjęto założenie, że transport azotu do rzek odbywa się na skutek przepływu wód gruntowych, zarówno w pionie, jak i w poziomie.

Analizy warunków przemieszczania się azotu azotanowego ($N-NO_3$) w zlewni Grabi dokonano z wykorzystaniem Systemu Informacji Geograficznej (GIS). Bazy danych podstawowych zawarte w GIS można uznać za specyficzne. Są to: cyfrowe, statyczne, strukturalne czy dokumentacyjne modele terenu. Na ich podstawie można tworzyć wiele pochodnych modeli struktury, funkcjonowania i dynamiki krajobrazu, min. można rejestrować zmiany zachodzące w czasie na interesującym nas obszarze (np. na skutek antropopresji) w wodzie, glebie czy roślinach. Można też tworzyć scenariusze (modele) przestrzennego rozwoju interesującego nas zjawiska.

Opracowano liczne mapy tematyczne w programie ArcInfo, używając do digitalizacji map w skali 1: 50 000. Uwzględniały one:

- warunki klimatyczne (średnie roczne opady, ewapotranspiracja);
- topografię zlewni Grabi i głębokość występowania wód gruntowych;
- sieć hydrograficzną;
- użytkowanie terenu (obszary rolnicze, lasy, wsie i miasta, mokradła);
- rodzaje gleb (piaski, piaski gliniaste, piaski pylaste, gliny piaszczyste, gliny pylaste, utwory organiczne);
- rozkład nadwyżek azotu w zlewni Grabi w układzie gmin.

Dokonano oceny zasilania wód podziemnych. Objętość wody dopływającej do wód gruntowych obliczono jako różnicę średnich z wielolecia (1951–1980) opadów atmosferycznych i ewapotranspiracji. Do obliczeń wykorzystano program ABIMO [GLUGLA, FÜRTIG, 1997], w którym – oprócz warunków klimatycznych – uwzględnia się rodzaje gleb i głębokość zalegania wód gruntowych oraz użytkowanie terenu.

Obliczono czas transportu azotu azotanowego do wód gruntowych (w latach), czyli czas wymagany do przejścia azotu azotanowego z powierzchni gleby do wód gruntowych (strefy saturacji). Kolejnym etapem badań było obliczenie ładunku azotu wnoszonego do wód gruntowych, zgodnie z algorytmem obliczeniowym przedstawionym na rysunku 1. W modelu opisującym transport azotanów do wód gruntowych ujmuje się ilość azotu azotanowego wymywanego ze strefy korzeniowej gleby (oznaczonego w modelu jako N_1) do strefy nasyconej wód gruntowych, wykorzystując obliczone nadwyżki bilansowe azotu N_{sur} na powierzchni gleb i ustaloną denitryfikację mikrobiologiczną. Nadwyżka bilansowa azotu N_{sur} stanowiła podstawę do oceny poziomu intensyfikacji rolnictwa.

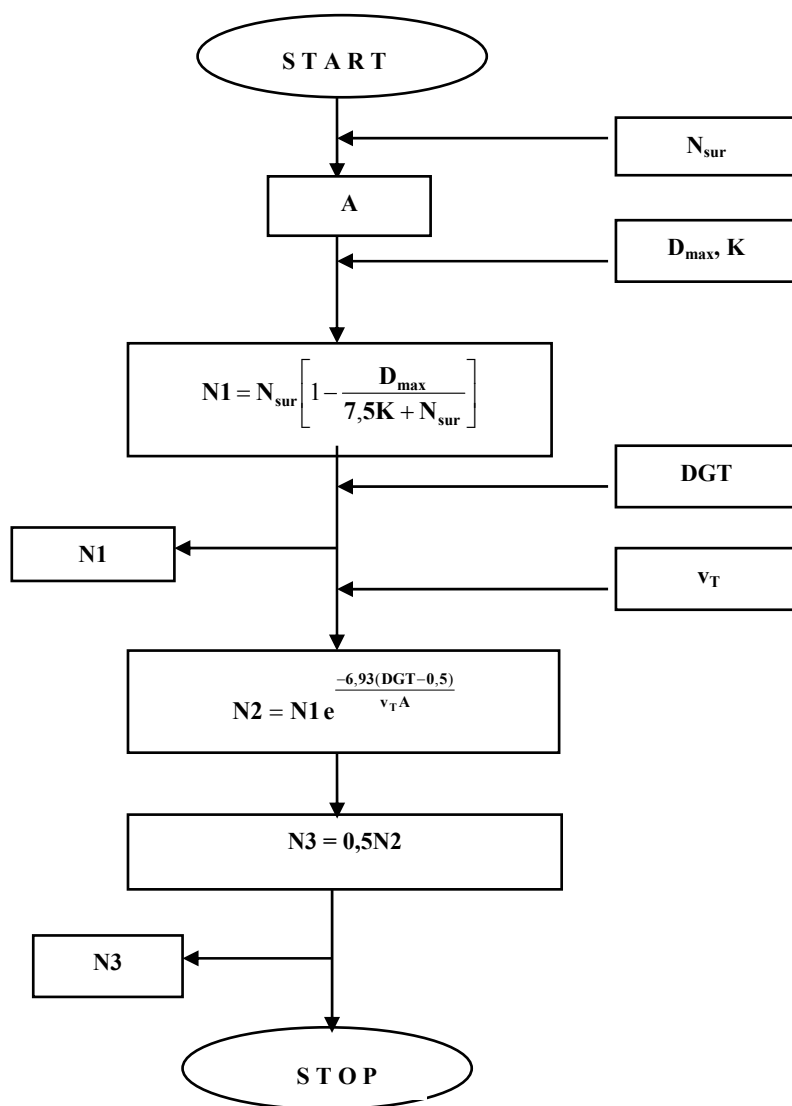
Nadwyżki azotu N_{sur} obliczono dla gmin zlewni Grabi na podstawie uproszczonego bilansu azotu. Są one wynikiem różnicy między masą wnoszoną i wynoszoną. Po stronie dopływu, określonego przez masę wnoszoną, uwzględniono nawożenie mineralne i organiczne, a po stronie odpływu (masa wynoszona) – azot wynoszony z plonami roślin [KLEINHANSS, 1994]. W bilansie nie uwzględniono wiązania azotu z atmosfery ani jego emisji do atmosfery. Obliczenia wykonano dla danych z 1989 r., w którym zużycie nawozów mineralnych w Polsce było największe.

Do określenia denitryfikacji posłużono się modelem, umożliwiającym obliczenie mikrobiologicznej redukcji nadwyżek azotu N_{sur} (w $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{r}^{-1}$) w górnej warstwie gleby (0,5 m) [KÖHNE, WENDLAND, 1992].

Wartości parametrów denitryfikacji (D_{max} , K) przyjmowano w zależności od rodzaju gleby – najmniejsze dla gleb lekkich, a największe dla ciężkich [Diffuse ..., 1999]. Wartość D_{max} potencjału denitryfikacji zawierała się w przedziale od 10 do 50 $\text{kg}\cdot\text{N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$, a stałej Michaelisa-Mentena K – od 2,5 do 6,7 $\text{mg}\cdot\text{N}\cdot\text{kg}^{-1}$ gleby.

Zmniejszenie ładunku azotu azotanowego pochodzącego ze strefy korzeniowej i transport do wód gruntowych w czasie t_T obliczono z wykorzystaniem systemu GIS za pomocą metod geo-statystycznych.

Ilość azotu azotanowego zmniejsza się również podczas przepływu przez strefę nienasyconą na skutek zachodzących procesów biochemicznych (w modelu ta ilość



Rys. 1. Algorytm obliczeniowy transportu azotu do wód gruntowych; A – okres ($A = 10$ lat), N_{sur} – bilansowa nadwyżka azotu, D_{max} – stała denitryfikacji, K – stała Michaelisa-Mentena, DGT – głębokość do zwierciadła wód gruntowych, V_T – prędkość transportu, $N1$ – ładunek azotu azotanowego ze strefy korzeniowej, $N2$ – zmniejszona nadwyżka azotu dopływająca ze strefy nienasyconej, $N3$ – ładunek azotu azotanowego transportowany do wód gruntowych [Diffuse ..., 1999]

Fig. 1. Algorithm to calculate the nitrogen transport to groundwater; A – period ($A = 10$ years), N_{sur} – nitrogen surplus, D_{max} – denitrification constant, K – Michaelis-Menten constant, DGT – depth to the groundwater table, V_T – travelling velocity, $N1$ – nitrogen load from the root zone, $N2$ – reduced N surplus leaving the unsaturated zone, $N3$ – nitrogen load transported towards groundwater [Diffuse ..., 1999]

jest oznaczona jako N_2). Można ją interpretować jako potencjalną, wejściową ilość azotu azotanowego, przechodzącą do wód gruntowych.

W modelu przyjęto, że ze względu na przemiany mikrobiologiczne oraz brak tlenu większość przeobrażeń azotu azotanowego będzie odbywała się w strefie podsiąku kapilarnego i na granicy strefy saturacji. Nie ma możliwości liczbowej oceny tych procesów. Do celów niniejszej pracy przyjęto, że 50% ładunku dopływającego ze strefy nasyconej (N_2) ulegnie przeobrażeniom. W związku z tym ładunek wnoszony do wód gruntowych, oznaczony jako N_3 , będzie wynosił $0,5N_2$ (rys. 1).

Kolejnym krokiem w trakcie obliczeń była ocena ładunku oraz czasu dopływu azotanów do rzek z zasilaniem gruntowym. Ładunek ten 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. Obliczenia transportu poziomego azotu azotanowego oparto na założeniach modelu WEKU [KUNKEL, WENDLAND, 1997], przyjmując założenia teorii filtracji Darcy'ego i Dupuita.

WYNIKI I DYSKUSJA

Jakość wód gruntowych na terenach wykorzystywanych przez człowieka w dużym stopniu zależy od sposobu użytkowania terenu. W zlewni Grabi przeważa użytkowanie rolnicze, brak też dużych ośrodków miejskich. Warunkuje to rodzaj zanieczyszczeń dostających się do cieków z wodami gruntowymi. Wysoki poziom wód gruntowych w zlewni Grabi (od 1 do 5 m poniżej terenu), w połączeniu z dominującymi glebami piaszczystymi i rolniczym charakterem zlewni, stwarza duże zagrożenie zanieczyszczenia pierwszej warstwy wodonośnej związkami biogenymi pochodzenia rolniczego.

W celu określenia ładunku azotu azotanowego dostającego się do wód gruntowych w programie ABIMO obliczono infiltrację efektywną (zasilanie wód gruntowych) – najważniejszy czynnik odpowiedzialny za przemieszczanie się azotanów do wód gruntowych.

Podstawowe dane wejściowe do obliczeń ładunku azotu azotanowego są reprezentowane przez bilansowe nadwyżki azotu, będące odzwierciedleniem produkcji rolniczej na danym terenie. Ze względu na największe nadwyżki azotu, dochodzące w 1989 r. do $90 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{r}^{-1}$, przyjęto ten rok za podstawę do obliczeń ładunku wejściowego. W następnych latach produkcja rolnicza stopniowo malała. Całkowita nadwyżka bilansowa azotu obliczona dla zlewni Grabi wynosi $5,2 \text{ Gg} \cdot \text{r}^{-1}$ ($5,2 \cdot 10^6 \text{ kg} \cdot \text{r}^{-1}$), w przeliczeniu na jednostkę powierzchni zlewni – $69,5 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, a dla powierzchni obszarów rolniczych – $91,4 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$. Wartości te zmniejszają się w wyniku denitryfikacji w górnej warstwie gleby, osiągając $57,3 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ w przeliczeniu na powierzchnię zlewni oraz $75,2 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ – obszarów rolniczych (tab. 1). Stanowią

Tabela 1. Ładunek azotu w przeliczeniu na obszary rolnicze i powierzchnię całkowitą zlewni Grabi**Table 1.** Nitrogen loads for arable land area and for total area of the Grabia catchment

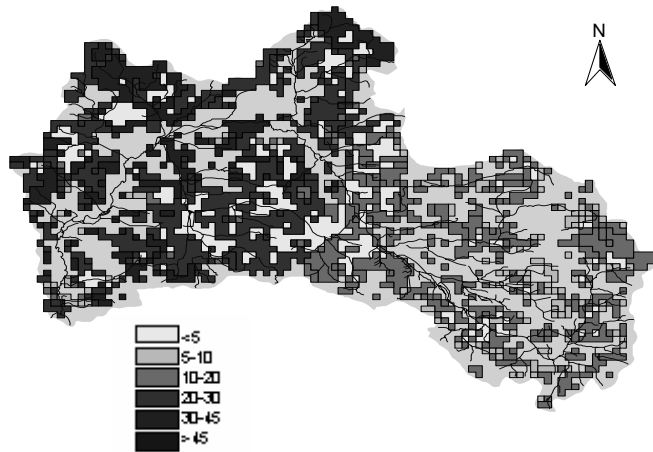
Wyszczególnienie Specification	Wartość w przeliczeniu na Value for	
	powierzchnię całkowitą ¹⁾ total area ¹⁾	obszary rolnicze ²⁾ arable land area ²⁾
Zasilanie – wartość średnia, mm·r ⁻¹ Mean recharge, mm·year ⁻¹	92,6	94,0
Całkowity ładunek azotu, Gg·r ⁻¹ Total nitrogen load, Gg·year ⁻¹		
– nadwyżka surplus (N_{sur})	5,2	
– przesiąkanie permeation ($N1$)	4,3	
– wejściowy input ($N3$)	0,1	
Ładunek charakterystyczny – wartości średnie, kg·ha ⁻¹ Specific load – mean value, kg·ha ⁻¹		
– nadwyżka surplus (N_{sur})	69,5	91,4
– przesiąkanie permeation ($N1$)	57,3	75,2
– wejściowy input ($N3$)	1,4	1,9
Zredukowany ładunek azotu – wartości średnie, kg·ha ⁻¹ Reduced specific load – mean value, kg·ha ⁻¹		
– denitryfikacja denitrification	12,1	16,2
– wejściowy input	55,9	73,3

¹⁾ Powierzchnia całkowita 752 km². ²⁾ Powierzchnia obszarów rolniczych 562,8 km².

¹⁾ Total area 752 km². ²⁾ Arable land area 562.8 km².

one ładunek azotu azotanowego wymywanego ze strefy korzeniowej. Ładunek ten ulega dalszemu zmniejszeniu i w efekcie zasilanie wód gruntowych tym składnikiem wynosi średnio 55,9 kg·ha⁻¹ w całej zlewni, a na obszarach rolniczych – 73,3 kg·ha⁻¹ (tab. 1).

Potencjalne ryzyko przedostania się azotanów do wód gruntowych zostało wyrażone między innymi prędkością transportu. Zawiera się ona w przedziale od 1 do 20 dm·r⁻¹. Jak wynika z przeprowadzonych obliczeń modelowych, na obszarach, na których zasilanie wód gruntowych przekracza 200 mm·r⁻¹, prędkość transportu jest duża – od 5 do 20 dm·r⁻¹, a czas transportu krótki – od 1 do 10 lat. Jest to widoczne w środkowej części zlewni Grabi. Wiąże się z tym duży ładunek azotanowego dopływający do wód gruntowych, który dochodzi do 45 kg·ha⁻¹·r⁻¹ (rys. 2). Mniejsze potencjalne ryzyko występuje w górnej, wschodniej części zlewni, gdzie prędkość transportu zmniejsza się do wartości <2 dm·r⁻¹, czas transportu odpowiednio zwiększa się do ponad 40 lat, a zasilanie wód gruntowych azotem azotanowym nie przekracza 50 mm·r⁻¹. W tej sytuacji ładunek tego składnika jest relatywnie mniejszy (ok. 10 kg·ha⁻¹·r⁻¹) (rys. 2).

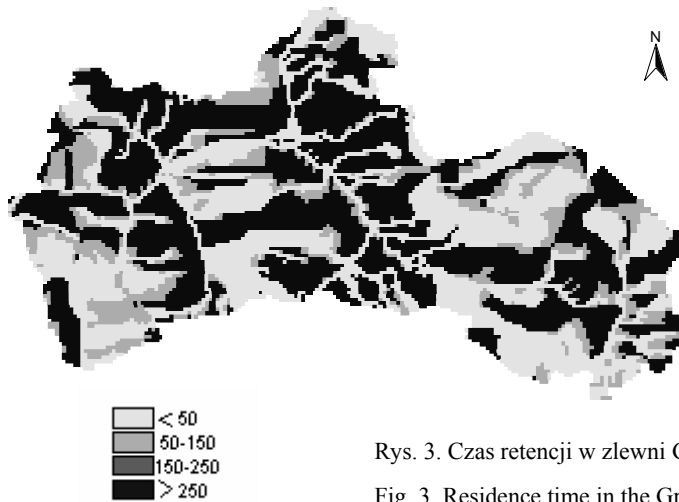


Rys. 2. Ładunek azotu zasilający wody gruntowe w zlewni Grabi, $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{r}^{-1}$

Fig. 2. Nitrogen transport to groundwater in the Grabia catchment, $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$

Przyjęto, że 50% azotu azotanowego opuszczającego strefę korzeniową po denitryfikacji w górnej warstwie gleby, a następnie transportowanego z przesiąkającą wodą pionowo do wód gruntowych to ładunek dopływający do sieci rzecznej.

Dokonano analizy przestrzennej zjawiska transportu azotanów w wodach podziemnych w czasie ich przemieszczania się do odbiorników powierzchniowych (rys. 3).



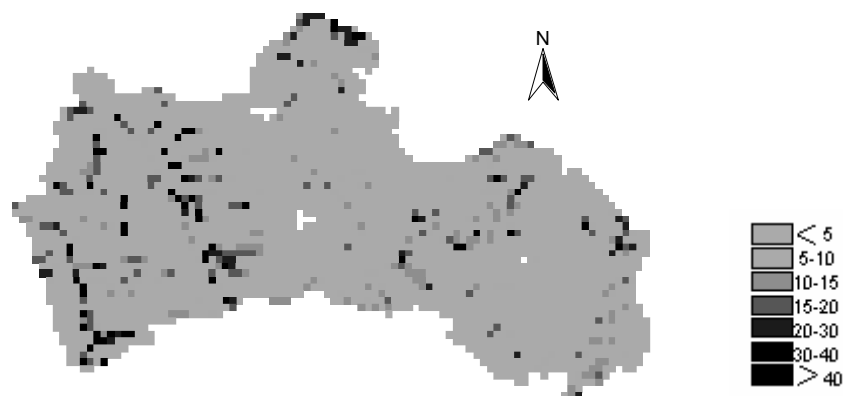
Rys. 3. Czas retencji w zlewni Grabi, lata

Fig. 3. Residence time in the Grabia catchment, years

Czas retencji (przechowywania wody) zależy od gęstości sieci rzecznej oraz współczynników filtracji. Na powierzchni zlewni wyróżniono obszary, na których czas retencji wynosi poniżej i powyżej 50 lat. Pierwszy przypadek dotyczy obszarów, z których ładunek azotu azotanowego wnoszonego do wód powierzchniowych

ocenia się na około $40 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, podczas gdy w drugim przypadku – około $10 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (rys. 4). Długi czas retencji oznacza długotrwałe przemieszczanie się azotanów z wodami gruntowymi do rzeki.

Ładunek azotu azotanowego zawarty w wodach gruntowych i ciekach był duży na obszarach intensywniej użytkowanych rolniczo, na których nadwyżki bilansowe azotu były maksymalne.



Rys. 4. Ładunek azotu dopływający do wód powierzchniowych z wodami gruntowymi w zlewni Grabi, $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$

Fig. 4. Transport of nitrogen load with groundwater to the surface water in the Grabia catchment, $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$

Podobne obliczenia, według identycznej metodyki, lecz w innej skali, wykonano dla całej zlewni Odry [MIODUSZEWSKI, ZDANOWICZ, 2000]. Intensywność produkcji rolniczej w zlewni Grabi, wyrażona bilansową nadwyżką azotu, jest mała w porównaniu z innymi regionami zlewni Odry. Największe bilansowe nadwyżki azotu, dochodzące do $181 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{r}^{-1}$, odnotowano w centralnej części zlewni Odry, obejmującej dawne województwo leszczyńskie [Diffuse ..., 1999].

Ładunek azotu azotanowego dopływającego do wód gruntowych w zlewni Grabi, dochodzący do $45 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{r}^{-1}$, mieści się w zakresie wartości minimalnych w zlewni Odry [Diffuse ..., 1999]. Dla porównania, w zlewni rzeki Orla (dopływ Warty) ładunek azotu azotanowego dopływającego do wód gruntowych osiąga wartość około $133 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{r}^{-1}$ [Diffuse ..., 1999].

WNIOSKI

1. Scenariusz transportu azotu azotanowego (ładunek wyrażony w $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{r}^{-1}$) z powierzchni terenu do wód gruntowych, stworzony za pomocą modelu ABIMO

w systemie GIS, wskazuje na wyraźną zależność tego procesu od stopnia użytkowania rolniczego zlewni. Czynnikiem decydującym o ilości azotu azotanowego dostającego się do wód gruntowych jest jego bilansowa nadwyżka wynikająca ze struktury użytkowania i intensywności gospodarki rolnej w poszczególnych gminach na obszarze zlewni Grabi.

2. Najbardziej zagrożone dopływem azotu azotanowego do wód podziemnych są obszary intensywniej użytkowane rolniczo, o największych bilansowych nadwyżkach azotu (środkowa część zlewni Grabi) w warunkach występowania wysokich opadów atmosferycznych (duża objętość wód opadowych infiltrujących do wód podziemnych, przekraczająca $200 \text{ mm}\cdot\text{r}^{-1}$). Ładunek azotu azotanowego dopływającego do warstw wodonośnych w mniejszym stopniu zależy od rodzaju gleby.

3. Przestrzenny rozkład ładunku azotu azotanowego wymywanego z gleby, uzyskany w wyniku modelowania, stwarza możliwość wyznaczenia obszarów wrażliwych, najbardziej narażonych na zanieczyszczenie wód podziemnych (i w efekcie wód powierzchniowych) związkami azotu. Może to być przydatne podczas podejmowania działań, zmierzających do poprawy jakości wody w danej zlewni przez zmniejszenie dopływu zanieczyszczeń obszarowych pochodzenia rolniczego do wód podziemnych i powierzchniowych.

LITERATURA

- Diffuse entries in rivers of the Oder Basin, 1999. Mater. Warszawa: DVWK 9. PAN, Bonn: DVWK ss. 125.
- KLEINHANS W., 1994. Assessment balance at regional and farm level: the balance approach (Fal) Braunschweig, Germany.
- KÖHNE CH., WENDLAND F., 1992. Modellgestützte Berechnung des mikrobiellen Nitrat-Abbaus im Boden. Int. Ber. KFA-STE-IB-1/92. FZ Jülich GmbH ss. 77.
- KUNKEL R., WENDLAND F., 1997. WEKU-a GIS supported stochastic model of groundwater residence times in upper aquifer for the supraregional groundwater management. Environm. Geol. 30 (1/2) s. 1–9.
- MIODUSZEWSKI W., ZDANOWICZ A., DANNOWSKI R., SEIDL J., DEUMLICH D., RADZUK L., KAJEWSKI I., 2000. Ocena dopływu zanieczyszczeń obszarowych do rzek w zlewni Odry. Gosp. Wod. nr 11 s. 417–421.

Anna ZDANOWICZ

ANALYSIS OF NITROGEN MOVEMENT IN THE GRABIA RIVER CATCHMENT

Key words: GIS, groundwater, land use, non point pollution, nitrogen transport

Modeling study in the Grabia river catchment is an attempt to evaluate nitrogen transport to the river with groundwater. Analyses included: estimation of the effective infiltration and nitrogen load which infiltrate from ground surface to groundwaters, estimation of nitrogen movement in groundwater, nitrogen transformations in aquifer during its flow to surface waters.

Model of nitrogen transport from the surface to groundwater (unit of nitrogen load is $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$), made by GIS programs, indicates significant dependency of this process on the intensity of agricultural use of catchment's area. Nitrogen surplus is the factor which limits the amount of nitrogen infiltrating to groundwaters. This factor depends on the structure and character of agricultural use in every community of the Grabia catchment. Nitrogen load which might flow to groundwater is $10 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$ in the upper, less intensively used part of the Grabia river catchment and $40 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$ in the lower part which is intensively used by agriculture and settlement.

Recenzenci:

prof. dr hab. Józef Koc

prof. dr hab. Zdzisław Zabłocki

Praca wpłynęła do Redakcji 19.12.2003 r.

