

Podatność naturalna i specyficzna wód podziemnych na obszarach rolniczych

Sebastian Zabłocki¹

Intrinsic and specific groundwater vulnerability in the agricultural areas. Prz. Geol., 63: 1135–1139.

Abstract. The main aim of the work was to evaluate intrinsic and specific vulnerability of groundwater. An assessment of intrinsic vulnerability to groundwater pollution was elaborated on the basis of the original DRASTIC method. An assessment of specific vulnerability to groundwater pollution by nitrate was elaborated by two independent methods. First method – Nitrate Vulnerability Index (NV) was an adaptation of DRASTIC method, second was based on the quotient of nitrate loads (L_N) and recharge rate (R), and expected nitrate concentration (NO_3^{exp}) were computed in this method. The results were presented in the relation to four homogenous regions called hydrozones: upland, top of the upland, plain and valley. The results of the DRASTIC method indicated on higher vulnerability of the aquifer in the plain (average IPZ = 155) and lower in the upland (IPZ = 125). The results of both specific vulnerability methods confirmed high vulnerability of the aquifer in the upland unit (the nitrate concentration in the range of 10–25 mg/dm³ in 25% of the unit area; average NV = 94) and lower in the plain area (the range of 0–5 mg/dm³ in the 47% of unit area; average NV = 81). The results present a high difference between intrinsic and specific vulnerability mainly caused by agricultural activity in the upland.

Keywords: vulnerability, groundwater, land use, agriculture, nitrates

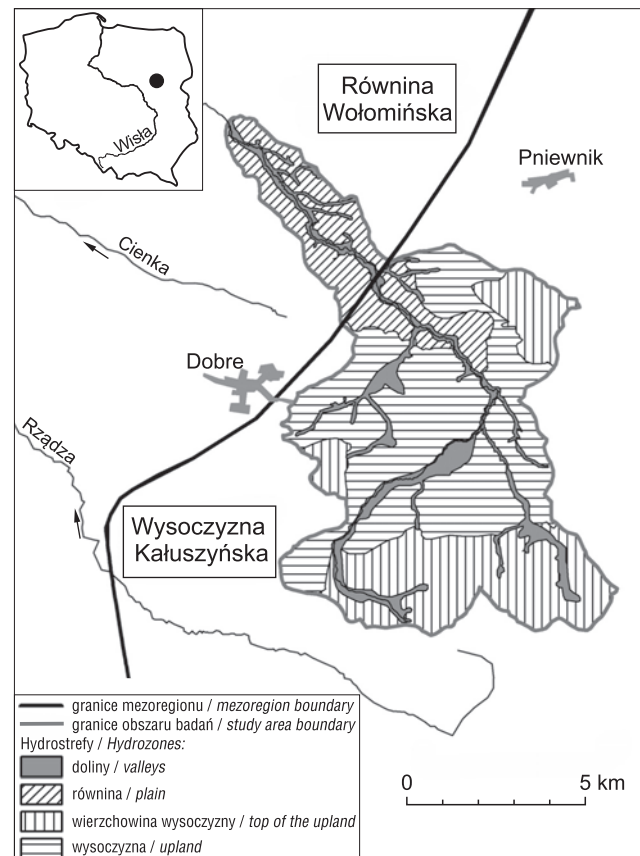
Ocena podatności naturalnej i specyficznej na terenach rolniczych jest szczególnie ważna ze względu na wysokie stężenia azotanów w wodach podziemnych. Efekt zanieczyszczenia azotanami może być odczuwalny w skali regionalnej zarówno dla użytkowników wód podziemnych, jak i dla ekosystemów zależnych od tych wód. Wskazanie obszaru potencjalnie zagrożonego zanieczyszczeniem stanowi sygnał do podjęcia działań zmierzających do wyznaczenia obszarów szczególnie narażonych (OSN) na zanieczyszczenie azotanami pochodzenia rolniczego, na których stosowanie azotu należy ograniczyć. Wyznaczanie OSN jest efektem wdrożeń wytycznych tzw. Dyrektywy azotanowej (Dyrektywa, 1991) do Prawa wodnego (Ustawa, 2001).

Celem przeprowadzonych badań była ocena podatności naturalnej i specyficznej na obszarze o charakterze rolniczym. Uzyskane wyniki miały umożliwić zdefiniowanie relacji podatności naturalnej, podatności specyficznej oraz pomierzonych w terenie stężeń azotanów. Do oceny podatności naturalnej zastosowano metodę DRASTIC (Aller i in., 1987), natomiast do oceny podatności specyficznej użyto metody Nitrate Vulnerability index (NV) (Martinez-Bastida i in., 2010) oraz metody opartej na wyrażeniu zagrożenia zanieczyszczeniem poprzez spodziewane stężenia azotanów w wodach podziemnych (NO_3^{exp}) (Duda i in., 2011). Weryfikacja wyników za pomocą badań bezpośrednich miała na celu wskazanie najodpowiedniejszej metody określenia stopnia zagrożenia wód podziemnych azotanami.

MATERIAŁ I METODY

Badania prowadzono na obszarze o dobrze rozpoznanych warunkach hydrogeologicznych, zlokalizowanym ok. 60 km na wschód od Warszawy w granicach dwóch jednostek geomorfologicznych: Wysoczyzny Kałuszyńskiej i Równiny Wołomińskiej (ryc. 1). Głównym obiektem badań był przypowierzchniowy poziom wodonośny, występujący w przemytych glinach zwałowych z piaszczystymi soczewkami oraz w piaskach i żwirach fluwiogłacial-

nych zlodowacenia warty. Przeprowadzone rozpoznawanie hydrogeologiczne umożliwiło wydzielenie czterech hydrostref, w których warunki hydrogeologiczne, geomorfologiczne, geologiczne itp. są homogeniczne. Zdefiniowane



Ryc. 1. Lokalizacja obszaru badań na tle jednostek fizyczno-geograficznych

Fig. 1. Location of the study area on the background of geographic units

¹ Instytut Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej, Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; s.zablocki@uw.edu.pl.

obszary to: wysoczyzna (33 km²), wierzchowina wysoczyzny (21 km²), równina (12 km²) i doliny cieków (9 km²). Ze względu na odmienne charakterystyki, wyniki badań podatności odniesiono do tych obszarów. Chemiczne badania terenowe, dotyczące m.in. stężeń azotanów w źródłach, piezometrach i studniach kopanych oraz w systemach drenarskich, wykonano w latach 2007–2012 w 89 punktach, z czego w latach 2010–2012 w 14 punktach prowadzono regularne pomiary w interwale 2-tygodniowym lub miesięcznym.

Do określenia podatności naturalnej na zanieczyszczenie zastosowano, zalecaną przez amerykańską Agencję Ochrony Środowiska (EPA), metodę DRASTIC (Aller i in., 1987), która jest wykorzystywana powszechnie w Polsce, głównie w przypadku warstw wodonośnych o charakterze porowym (Kajewski, 2001; Żurek i in., 2002; Krogulec, 2004). Jest ona zaliczana do metod rangowych i składa się z 7 parametrów o określonych wagach, które dla celu niniejszej oceny podatności pozostały niezmienione (tab. 1). Dobór rang w obrębie pojedynczego parametru wynika głównie z dokładności rozpoznania warunków hydrogeologicznych. Dyskretyzację przestrzeni przeprowadzono w kroku 25×25 m. Wynikiem końcowym jest tzw. indeks podatności IPZ, określony zgodnie ze wzorem:

$$IPZ = D_{\text{ranga}} \cdot D_{\text{waga}} + R_{\text{ranga}} \cdot R_{\text{waga}} + A_{\text{ranga}} \cdot A_{\text{waga}} + S_{\text{ranga}} \cdot S_{\text{waga}} + T_{\text{ranga}} \cdot T_{\text{waga}} + I_{\text{ranga}} \cdot I_{\text{waga}} + C_{\text{ranga}} \cdot C_{\text{waga}}$$

Objaśnienia do wzoru zamieszczono w tabeli 1.

Do określenia podatności specyficznej na zanieczyszczenie azotanami pochodzenia rolniczego zastosowano metodę Nitrate Vulnerability Index (NV) zaproponowaną przez Martinez-Bastidę i in. (2010). Jest ona adaptacją metody DRASTIC, opracowaną w celu uwzględnienia wpływu zagospodarowania terenu na wyniki podatności specyficznej na zanieczyszczenia azotanami. Jej zastosowanie wiąże się z wprowadzeniem do wzoru indeksu LU, określającego potencjalne ryzyko związane ze sposobem zagospodarowania.

$$NV \text{ index} = \text{index IPZ (DRASTIC)} \cdot LU$$

Indeks LU przyjmuje wartości 0,1–1,0, co po uwzględnieniu sposobu zagospodarowania terenu skutkuje niezmienną wartością indeksu IPZ dla LU = 1 lub obniżeniem podatności specyficznej w stosunku do podatności naturalnej określonej metodą DRASTIC. W tabeli 2 przedstawiono wartości indeksu LU w odniesieniu do wyróżnionych na terenie badań 15 typów użytków gruntowych (stan na 2012 r.).

Ocenę podatności specyficznej wód podziemnych na zanieczyszczenia azotanami również przeprowadzono jako scenariusz zagrożenia jakości, którego wynikiem jest spodziewane stężenie azotanów w wodach podziemnych (NO₃exp) (Duda i in., 2011). Do przeprowadzenia tej oceny

Tab. 1. Zakres wartości parametrów w metodzie DRASTIC i ich dominujące rangi
Table 1. Range of parameter values in the DRASTIC method and their dominant ranks

Parametr <i>Parameter</i>	Symbol	Zakres wartości parametru <i>Range of parameter values</i>	Zakres rang <i>Range of rank</i>	Ranga o największej powierzchni <i>Rank with greatest area</i>	Wartość parametru w randze o największej powierzchni <i>Parameter value in rank with greatest area</i>	Obszar zajmowany przez rangę o największej powierzchni <i>Area percent of rank with greatest area</i>	Waga parametru <i>Weight of parameter</i>
Głębokość do zwierciadła wody od pow. terenu <i>Depth to groundwater</i>	D	0–23 m	3–10	8	3–5 m	34%	5
Wysokość infiltracyjnego zasilania wód podziemnych <i>Recharge net</i>	R	0–220 mm/rok <i>0–220 mm/year</i>	1–7	1	<50 mm/rok <i><50 mm/year</i>	30%	4
Litologia warstwy wodonośnej <i>Aquifer media</i>	A	gliny zwałowe, ily, mułki ÷ piaski eoliczne <i>glacial tills, clays, muds ÷ eolian sands</i>	2–9	8	piaski i żwiry <i>sands and gravels</i>	41%	3
Rodzaj pokrywy glebowej <i>Soil type</i>	S	czarne ziemie ÷ gleby biellicowe <i>arenosol ÷ cambisol</i>	5–9	9	gleby biellicowe <i>cambisol</i>	62%	2
Nachylenie terenu <i>Terrain slope</i>	T	0–18%	3–10	9	1–2%	37%	1
Wpływ strefy aeracji <i>Impact of vadose zone</i>	I	ily, gliny ÷ piaski i żwiry <i>clays, tills ÷ sands and gravels</i>	2–8	8	piaski i żwiry <i>sands and gravels</i>	40%	5
Wodoprzepuszczalność warstwy wodonośnej <i>Conductivity of the aquifer</i>	C	0,46–14 m/d	1–5	2	2–4 m/d	35%	3

Tab. 2. Wartości indeksu LU dla poszczególnych form użytkowania terenu (Martinez-Bastida i in., 2010, zmienione)
Table 2. LU index values for particular land use forms (Martinez-Bastida et al., 2010, modified)

Wartość indeksu LU LU index value	Formy użytkowania terenu Land use forms
1,0	grunty orne, sady i plantacje krzewów <i>arable fields, orchards and plantations</i>
0,9	łąki i pastwiska / <i>grasslands</i>
0,8	obszary zabudowy jednorodzinnej i zagrodowej, drogi o szer. >6 m, odkrywki eksploatacji piasków i żwirów, składowiska odpadów komunalnych <i>detached houses and farms, roads over 6 m width, places of sand and gravel exploitation, municipal waste landfills</i>
0,6	nieużytki (okres nieużytkowania <5 lat) / <i>fallow lands (no activity to 5 years)</i>
0,3	grunty rolne nieużytkowane, porośnięte drzewami i krzewami (okres nieużytkowania >5 lat); obszary z niskimi krzewami pod liniami energetycznymi <i>agricultural land with no activity, overgrown by trees and bushes (no activity over 5 years); areas with low shrubs under the electricity lines</i>
0,2	las, zadrzewienia śródpolne, zadrzewienia wzdłuż cieków (łęgowe) <i>forests, midfield shelterbelts, riparian forests along rivers</i>

niezbędna jest znajomość ładunku azotu wnoszonego do warstwy wodonośnej z powierzchni terenu wraz z infiltrującymi wodami oraz wielkość zasilania infiltracyjnego. Zdefiniowane badaniami terenowymi formy użytkowania terenu, umożliwiły wyróżnienie pięciu typów obszarów o charakterystycznych wielkościach ładunku azotu (tab. 3). Wielkość zasilania infiltracyjnego określono za pomocą hydrodynamicznych badań modelowych (Zabłocki, 2012). Ocenę aktualnego zagrożenia wód podziemnych azotanami uzyskano przez obliczenie spodziewanych stężeń azotanów w wodach podziemnych zgodnie ze wzorem (Żurek i in., 2004):

$$\text{NO}_3\text{exp} = \frac{L_N}{R} \cdot 443$$

gdzie:

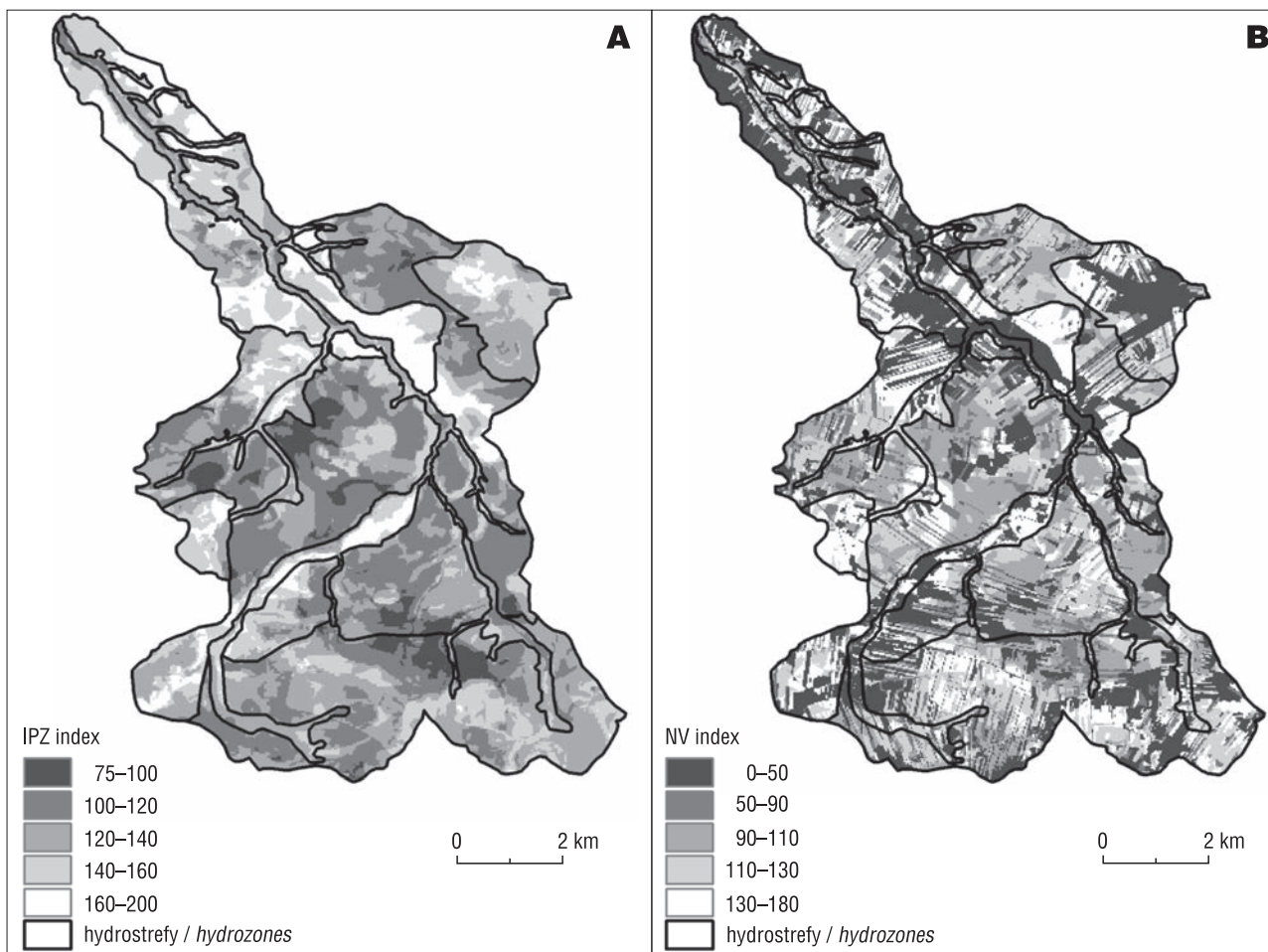
L_N – ładunek azotu wylugowywanego przez wody infiltracyjne z profilu glebowego [kg N/ha · rok],
 NO_3exp – stężenie azotanów spodziewane w wodach podziemnych [mg/dm³],
 R – zasilanie infiltracyjne [mm/rok].

WYNIKI BADAŃ

Na obszarze badań wydzielono pięć klas podatności naturalnej. Wartości indeksu podatności IPZ zmieniały się w zakresie 75–185. Wartości średnie dla poszczególnych hydrostref wskazały hydrostrefę najmniej podatną na zanieczyszczenia (wysoczyzna, IPZ = 125) i najbardziej podatną (równina, IPZ = 155), (tab. 4; ryc. 2). Na wysoczyźnie

Tab. 3. Wielkość ładunku azotu w zależności od charakteru obszaru
Table 3. Nitrogen load values according to the characteristic of area

Typ obszaru Area type	Wielkość ładunku azotu [kg N/ha · rok] Nitrogen load values [kg N/ha · year]	Uwagi Comments
Lasy i zadrzewienia <i>Forests and shelterbelts</i>	1,54	odpowiada średniemu stężeniu azotanów w opadzie 6,86 mg/dm ³ ; wartość wyższa niż wg Dudy i in. (2011) – 0,5 kg N/ha · rok <i>corresponds to the average nitrate concentration in precipitation 6.86 mg / dm³; a higher value than by Duda et al. (2011) – 0.5 kgN/ha · year</i>
Doliny <i>Valleys</i>	1,67	wyższy niż na obszarach leśnych ze względu na zwiększony udział materii organicznej w obiegu azotu <i>higher than in the forest areas due to the increased proportion of organic matter in the nitrogen cycle</i>
Zabudowa jednorodzinna i zagrodowa <i>Detached houses and farms</i>	4,64	na podst. badań terenowych oraz wyników analizy czynnikowej (Zabłocki, 2013); wg Żurek i in. (2010) – 4,6 kg N/ha · rok <i>based on field research and the results of factor analysis (Zabłocki, 2013); by Żurek et al. (2010) – 4.6 kg N/ha · year</i>
Składowiska odpadów komunalnych <i>Municipal waste landfills</i>	6,60	na podst. badań terenowych oraz wyników analizy czynnikowej (Zabłocki, 2013) <i>based on field research and the results of factor analysis (Zabłocki, 2013)</i>
Rolne <i>Agricultural</i>	1,08–14,11	przy wskaźniku wymycia od 0,02 do 0,15 na podst. chemizmu wód systemów drenarskich oraz wyników analizy czynnikowej (Zabłocki, 2013); przy poziomie nawożenia w przeliczeniu na czysty składnik od 65,3 do 94,1 kg N/ha · rok dla gmin na obszarze badań wg wyników Powszechnego Spisu Rolnego z 2010 r. (Powszechny..., 2010) <i>at the elution rate of 0.02 to 0.15 based on water chemistry taken from drainage systems and the results of factor analysis (Zabłocki, 2013); at the level of fertilization in terms of pure component from 65.3 to 94.1 kg N / ha · year for communities in the research area by Agricultural Census of 2010 (Powszechny, 2010)</i>



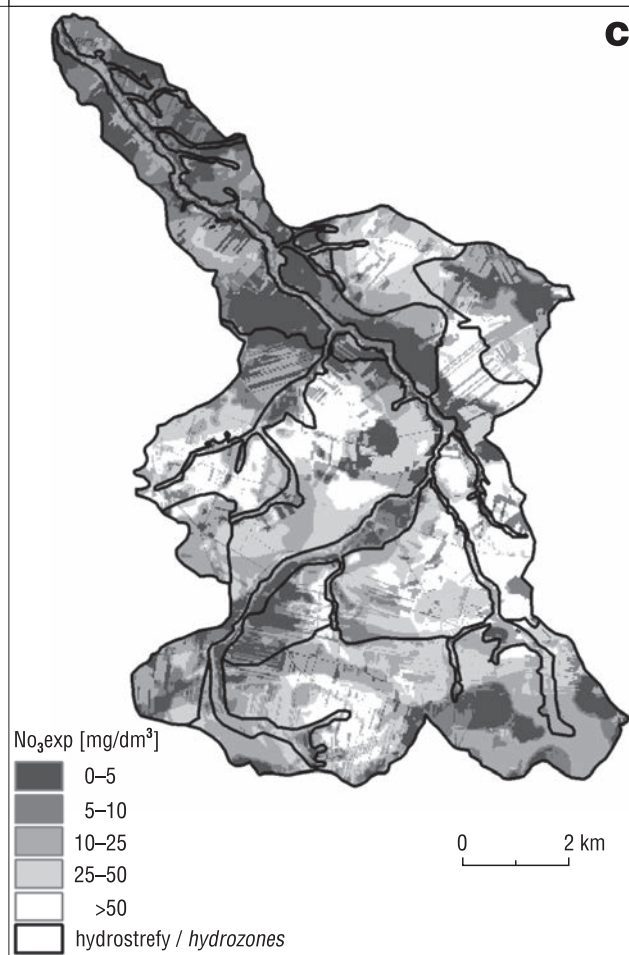
Ryc. 2. Podatność naturalna i specyficzna na terenie badań. **A** – metoda DRASTIC; **B** – metoda NV; **C** – metoda spodziewanych stężeń azotanów (NO_3exp)

Fig. 2. Intrinsic and specific vulnerability in the study area. **A** – DRASTIC method; **B** – NV method; **C** – method of expected nitrate concentrations (NO_3exp)

dominuje podatność niska (42%) i średnia (32%). Na wierzchołku wyczołki przeważa klasa średnia (45%), przy podobnym udziale niskiej (23%) i średnio wysokiej (23%). W hydrostrefach dolinnych największą powierzchnię ma klasa średnia (czyli 49%) oraz, z racji dominującego płytkiego występowania zwierciadła wód podziemnych, średnio wysoka (30%). Na równinie dominuje udział klasy średniowysokiej (45%) przy znacznym udziale wysokiej (40%).

W celu określenia klas podatności specyficznej, porównywalnych z klasami podatności naturalnej, wyniki obliczeń metodą NV również podzielono na 5 grup. Wartości indeksu podatności NV zmieniały się w zakresie 16–175. Rozkład otrzymanych wyników jest bimodalny. Wartości średnie dla poszczególnych hydrostref układają się od najmniej podatnej (dolina, $\text{NV} = 81$) do najbardziej podatnej (wyczołki, $\text{IPZ} = 155$), (tab. 4; ryc. 2). Na wyczołkach dominuje podatność średnia (29%), udział pozostałych klas jest zbliżony. Na wierzchołku wyczołki nieznacznie przeważa klasa bardzo niska (32%) nad średniowysoką (26%). W hydrostrefach dolinnych i na obszarze równiny największą powierzchnię ma klasa bardzo niska – obejmuje prawie połowę obszaru (42–45%).

W wyniku obliczeń trzecią metodą uzyskano spodziewane stężenia azotanów (NO_3exp) w zakresie 1,01–138,92 mg/dm^3 .



Tab. 4. Średnia wartość indeksu podatności lub stężeń azotanów na obszarze badań
Table 4. Average vulnerability index and nitrate concentrations in the research area

Indeks podatności lub stężeń azotanów <i>Vulnerability index or nitrate concentrations</i>	Obszar badań <i>Research area</i>	Hydrostrefa / <i>Hydrozone</i>			
		wysoczyzna <i>upland</i>	wierzchowina wysoczyzny <i>top part of upland</i>	równina <i>plain</i>	dolina <i>valley</i>
IPZ	133	125	130	155	138
NV	90	94	90	87	81
NO ₃ exp [mg/dm ³]	10–25	10–25	10–25	<5	10–25

Największą powierzchnię (30,57%) zajmują tereny o średnim zagrożeniu wód podziemnych (azotany o stężeniu 10–25 mg/dm³), na obszarze wysoczyzny i wierzchowiny obejmują odpowiednio ok. 25% oraz ok. 41% powierzchni (ryc. 2). Na terenie równiny występują one lokalnie (2,38 km²), a największą grupą jest najniższy ze spodziewanych zakresów stężeń azotanów od 0 do 5 mg/dm³, obejmujący 46,56% powierzchni hydrostrefy. Stwierdzono występowanie obszarów potencjalnie zagrożonych zanieczyszczeniem wód azotanami (40–50 mg/dm³) oraz obszarów potencjalnie zanieczyszczonych (>50 mg/dm³) wg Rozporządzenia Ministra Środowiska (Rozporządzenie, 2002). Większość tych obszarów występuje na terenie wysoczyzny i wierzchowiny wysoczyzny.

W celu weryfikacji zastosowanych metod dokonano ich porównania ze stężeniami azotanów pomierzonych w terenie. Do wykonania macierzy korelacji (tab. 5) wykorzystano dane z 89 punktów obserwacyjnych. Uzyskane wyniki ogólnie wskazują na słabą korelację lub jej brak. Korelacja wyników podatności naturalnej ze specyficzną wynosi 0,06–0,16. Zaproponowana metoda NV, przeznaczona do oceny podatności specyficzej ze strony azotanów osiąga niewiele wyższą korelację ze stężeniami azotanów niż metoda DRASTIC na poziomie 0,38. Największą zgodność otrzymano z metodą określającą spodziewane stężenia azotanów (NO₃exp) – 0,70.

WNIOSKI

Wyniki przeprowadzonych badań wykazały, że największą korelację z pomierzonymi stężeniami azotanów otrzymano poprzez zastosowanie metody bazującej na określeniu spodziewanych stężeń azotanów (NO₃exp) w wodach podziemnych. Metoda ta jest bardziej odpowiednia niż metoda NV, gdyż w dokładniejszy sposób uwzględnia wpływ rolnictwa na jakość wód podziemnych. Konieczna jest tu znajomość stosowanych dawek nawozów oraz wartości wskaźnika wymycia, gdyż nie jest ona stała jak przyjęto w Rozporządzeniu Ministra Środowiska

Tab. 5. Macierz korelacji liniowej pomiędzy wynikami podatności naturalnej i specyficzej oraz pomierzonymi w terenie stężeniami azotanów

Table 5. Correlation matrix between the results of intrinsic and specific vulnerability and nitrate concentrations measured during fieldwork

	DRASTIC	NV	NO ₃ exp
NV	0,16	–	–
NO ₃ exp	0,06	0,35	–
NO ₃ pomierzone <i>measured</i>	–0,28	0,38	0,70

(Rozporządzenie, 2002). Ocena podatności naturalnej w odniesieniu do charakteryzowanego obszaru jest nieadekwatna do wyników podatności specyficznej ze względu na występowanie największej powierzchni gruntów rolnych na obszarach o najniższej podatności (wysoczyzna). Z kolei dla obszarów o wysokiej podatności naturalnej (równina) podatność specyficzna będzie niska ze względu na przeważające występowanie obszarów leśnych.

Wyznaczenie obszarów o spodziewanych stężeniach azotanów w wodach podziemnych powyżej 50 mg/dm³ (potencjalne obszary OSN) wskazuje przybliżoną lokalizację przeprowadzenia dalszych badań terenowych w celu potwierdzenia występowania obliczonych stężeń azotanów lub korekty obecnego zagrożenia.

LITERATURA

- ALLER L., BENNETT T., LEHR J.H., PETTY R.J. & HACKETT G. 1987 – DRASTIC: A standardized system of evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. Ada, Oklahoma.
- DUDA R., WITCZAK S. & ŻUREK A. 2011 – Mapa wrażliwości wód podziemnych Polski na zanieczyszczenie w skali 1 : 500 000. AGH, Kraków.
- DYREKTYWA 91/676/EWG – Dyrektywa rady z dn. 12 grudnia 1991 r. dotycząca ochrony wód przed zanieczyszczeniami powodowanymi przez azotany pochodzenia rolniczego (Dz.U.UE L z dnia 31 grudnia 1991 r.).
- KAJEWSKI I. 2001 – Zastosowanie systemu DRASTIC dla oceny zagrożenia wód podziemnych. [W:] Współczesne Problemy Hydrogeologii, T. 10 (2): 63–68. Oficyna Wydaw. SUDETY, Wrocław.
- KROGULEC E. 2004 – Ocena podatności wód podziemnych na zanieczyszczenia w dolinie rzecznej na podstawie przesłanek hydrodynamicznych. Wyd. UW, Warszawa.
- MARTINEZ-BASTIDA J.J., ARAUZO M. & VALLADOLID M. 2010 – Intrinsic and specific vulnerability of groundwater in central Spain: the risk of nitrate pollution. *Hydrogeol. J.*, 18: 681–698.
- POWSZECHNY spis rolny 2010 – www.stat.gov.pl (stan na 01.2013 r.).
- ROZPORZĄDZENIE Ministra Środowiska z dn. 23 grudnia 2002 r. w sprawie kryteriów wyznaczania wód wrażliwych na zanieczyszczenie związkami azotu ze źródeł rolniczych (Dz.U. nr 241, poz. 2093).
- USTAWA z dn. 18 lipca 2001 r. Prawo wodne (tekst jedn., Dz.U. 2014, poz. 850).
- ZABŁOCKI S. 2012 – Ocena wielkości zasilania przypowierzchniowego poziomu wodonośnego w zlewni Osownicy (dorzecze Liwca) na podstawie wyników badań modelowych. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 451: 247–256.
- ZABŁOCKI S. 2013 – Zastosowanie analizy czynnikowej w celu identyfikacji procesów kształtujących chemizm płytkich wód podziemnych na obszarach użytkowanych rolniczo. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 456: 651–658.
- ŻUREK A., CZOP M. & MOTYKA J. 2010 – Azotany w wodach jurajskiego piętra wodonośnego w rejonie Olkusza. *Geologia*, 36 (1): 109–134.
- ŻUREK A., DUDA R. & WITCZAK S. 2004 – Realizacja zaleceń dyrektywy „azotanowej” w Polsce na tle innych krajów Unii Europejskiej. Problemy wykorzystania wód podziemnych w gospodarce komunalnej. XV symp. Nauk.-techn. Gospodarowanie wodami podziemnymi w UE, PZLiTS Częstochowa: 104–113.
- ŻUREK A., WITCZAK S. & DUDA R. 2002 – Ocena podatności szczylinowych zbiorników podziemnych na zanieczyszczenie. [W:] Rubin H., Rubin K. & Witkowski A. (red.), Jakość i podatność wód podziemnych na zanieczyszczenie. *Prace Wydz. Nauk o Ziemi UŚL*, 22: 241–254.