

*Ireneusz Kajewski*

**OCENA PODATNOŚCI WÓD PODZIEMNYCH  
NA ZANIECZYSZCZENIE  
PESTYCYDAMI ORGANICZNYMI W NATURALNYCH  
UWARUNKOWANIACH ZLEWNI ROLNICZEJ**

---

***ASSESSMENT OF GROUNDWATER VULNERABILITY  
TO POLLUTION BY ORGANIC PESTICIDES  
IN ENVIRONMENTAL CONDITIONS  
OF AGRICULTURAL CATCHMENT***

**Streszczenie**

Specyficzna podatność wód podziemnych na zanieczyszczenie przez pestycydy organiczne zależy od czynników naturalnych (glebowych, klimatycznych i hydrologicznych) oraz od właściwości pestycydów, takich jak współczynnik sorpcji oraz czas połowicznego rozkładu. Problematyka oceny podatności wód podziemnych na zanieczyszczenie sprowadza się najczęściej do opracowania mapy lub map podatności i ich późniejszej analizy. Mapy podatności wód podziemnych na zanieczyszczenie przez pestycydy opracowano w środowisku GIS, wykorzystując system oparty na liczbowym indeksie AF, zaproponowany przez Rao i wsp. w 1985 r. Dla obszaru zlewni rolniczej Ciesielska Woda opracowano mapy podatności wód podziemnych na zanieczyszczenie przy różnych kombinacjach współczynnika sorpcji i czasu połowicznego rozkładu (tab. 2, rys. 1, 2). Analiza opracowanych map podatności pozwoliła na identyfikację pestycydów, których stosowanie w danych warunkach naturalnych badanej zlewni może stanowić największe ryzyko zanieczyszczenia wód podziemnych (rys. 3).

**Słowa kluczowe:** wody podziemne, podatność na zanieczyszczenie, syntetyczne pestycydy organiczne, GIS

### Summary

*Specific groundwater vulnerability to pollution by organic pesticides depends on natural conditions in agricultural catchment (climatic, hydrologic and soils) as well as pesticide properties, such as sorption coefficient by organic carbon and pesticide persistence in the soil environment. The most comprehensive method of presenting the assessment of groundwater vulnerability to pollution is its mapping and further analysis of maps. Maps of groundwater vulnerability to pollution by organic pesticides have been produced in GIS environment using Attenuation Factor (AF) approach, evaluated by Rao et al. in 1985. For the area of Ciesielska Woda agricultural catchment 25 maps of groundwater vulnerability to pollution by pesticides have been produced, for various combinations of  $K_{oc}$  and  $t_{1/2}$  (table 2, figures 1 and 2). Analysis of the maps clearly identified these pesticides, which are the most dangerous for groundwater quality in particular natural conditions within the catchment area (figure 3)*

**Key words:** groundwater, vulnerability to pollution, synthetic organic pesticides, GIS based modelling

### WPROWADZENIE

Podatność wód podziemnych na zanieczyszczenie określa stopień ryzyka negatywnego oddziaływania działalności człowieka na jakość wód podziemnych w określonych warunkach naturalnych. Ochrona wód podziemnych i ich podatność na zanieczyszczenie są różnymi, ale powiązаныmi z sobą zagadnieniami; sposób ochrony systemu wodonośnego powinien być podyktowany oceną jego podatności na zanieczyszczenie [Krogulec 2004]. Ocena podatności wód podziemnych na zanieczyszczenie stanowi istotny element badań środowiskowych, raportów oddziaływania na środowisko i innych opracowań mających na celu ochronę środowiska [Macioszczyk 2006].

Oprócz czynników naturalnych o podatności wód podziemnych na zanieczyszczenie decydują w dużym stopniu również właściwości substancji zanieczyszczającej, tak określoną podatność określa się mianem **podatności specyficznej** lub **podatności zintegrowanej** [Krogulec 2004]. Szczególnym, niezmiernie istotnym problemem związanym z jakościową ochroną wód podziemnych jest ich podatność na zanieczyszczenie pestycydami. Pestycydy stanowią bardzo liczną grupę związków chemicznych, głównie syntetycznych substancji organicznych. Ze swej istoty są one substancjami toksycznymi, co sprawia, że zanieczyszczenie nimi wód może stanowić poważne konsekwencje zdrowotne dla konsumentów. Polskie normy jakości wód podziemnych w zakresie dotyczącym zawartości pestycydów [Rozporządzenie M. Ś., 2008, Dyrektywa 2006/118/WE] ustalają górną granicę zawartości poszczególnych pestycydów w wodach podziemnych o dobrym stanie chemicznym (klasa I, II i III) na 0,1 µg/l, przy czym sumaryczna zawartość poszczególnych pestycydów wykrytych i oznaczonych ilościowo w ramach badań monitoringowych nie może przekraczać 0,5 µg/l.

Problematyka oceny podatności wód podziemnych na zanieczyszczenie dla określonego obszaru najczęściej sprowadza się do sporządzenia mapy lub map podatności oraz ich późniejszej analizy.

W pracy przedstawiono rezultaty analiz podatności wód podziemnych na zanieczyszczenie przez różne pestycydy organiczne (charakteryzujące się różną podatnością na immobilizację wynikającą z sorpcji i różną trwałością w środowisku) przeprowadzone dla warunków naturalnych występujących na obszarze zlewni rzeki Ciesielskiej Wody, położonej w zlewni Widawy. Wyniki analiz pozwalają na określenie, które ze znanych pestycydów stanowią większe, a które mniejsze zagrożenie dla jakości wód podziemnych w określonych warunkach glebowych, hydrogeologicznych i klimatycznych zlewni.

### OPRACOWANIE MAPY WRAŻLIWOŚCI WÓD PODZIEMNYCH NA ZANIECZYSZCZENIE PRZEZ PESTYCYDY ORGANICZNE

Podstawę opracowania map podatności specyficznej wód podziemnych na zanieczyszczenie przez pestycydy organiczne stanowi ilościowy wskaźnik możliwości zanieczyszczenia wód podziemnych przez pestycydy – indeks AF (*Attenuation Factor*) [Rao i in. 1985], zdefiniowany wzorem:

$$AF = \exp\left(-\frac{0,693 \cdot l \cdot R_F \cdot \Theta_{FC}}{q \cdot t_{1/2}}\right) \quad (1)$$

gdzie:

- $l$  – miąższość strefy aeracji [L];
- $\Theta_{FC}$  – połowa pojemność wodna strefy aeracji [ $L^3 \cdot L^{-3}$ ];
- $q$  – natężenie infiltracji efektywnej [ $L \cdot T^{-1}$ ];
- $t_{1/2}$  – czas połowicznego rozkładu pestycydu w strefie aeracji [T];
- $R_F$  – współczynnik opóźnienia [-];

$$R_F = 1 + \frac{\rho_d \cdot f_{oc} \cdot K_{oc}}{\Theta_{FC}} \quad (2)$$

w którym:

- $\rho_d$  – gęstość objętościowa szkieletu gruntowego [ $M \cdot L^{-3}$ ];
- $f_{oc}$  – zawartość węgla organicznego w glebie [ $M \cdot M^{-1}$ ];
- $K_{oc}$  – współczynnik sorpcji pestycydu przez węgiel organiczny [ $L^3 \cdot M^{-1}$ ];

Wartość indeksu AF zawiera się w granicach od 0 do 1, im wartość indeksu jest wyższa, tym większa jest podatność warstwy wodonośnej na zanieczyszczenie przez pestycydy. W tabeli 1 podano propozycję pięciu kategorii (klas) zagrożenia jakości wód podziemnych ze względu na wartość indeksu AF. Obszary o określonej podatności przedstawia się na mapach podatności zróżnicowanymi kolorami.

**Tabela 1.** Klasy podatności wód podziemnych na zanieczyszczenie wg indeksu AF [Khan, Liang 1989]**Table 1.** Categories of groundwater pollution potential according to AF index value

Indeks AF	<0,0001	0,0001–0,01	0,01–0,1	0,1–0,25	0,25–1,0
Podatność Vulnerability	bardzo niska very low	niska low	średnia medium	wysoka high	bardzo wysoka very high
Klasa podatności Vulnerability class	A1	A2	B	C	D

Mapy podatności wód podziemnych na zanieczyszczenie przez pestycydy organiczne opracowuje się obecnie techniką modelowania rastrowego w środowisku GIS [Khan, Liang 1989; Kajewski 2005]. Techniczne aspekty efektywnego opracowania map podatności na zanieczyszczenie pestycydami organicznymi przedstawił Kajewski [2008, 2008a].

Specyficzne właściwości pestycydów organicznych powodują, że mechanizm ich przemieszczania się przez strefę aeracji jest znacznie bardziej skomplikowany niż zanieczyszczeń konserwatywnych. W procesie transportu pestycydów organicznych niezmiernie istotną rolę odgrywa opóźnienie ich ruchu w stosunku do przepływu wody związane z sorpcją (przede wszystkim przez substancję organiczną zawartą w glebie) oraz zachodzące w trakcie migracji przez strefę aeracji reakcje rozkładu. Generalnie należy stwierdzić, że im podatność pestycydu na sorpcję jest mniejsza oraz im bardziej jest on odporny na degradację, tym większa jest możliwość jego dotarcia do zwierciadła wód gruntowych (a w konsekwencji pogorszenia się ich jakości). Właściwości migracyjne pestycydów organicznych w decydującej mierze są uzależnione od ich struktury chemicznej, co powoduje, że w określonych warunkach środowiskowych niektóre substancje mogą stanowić istotne zagrożenie dla wód podziemnych, podczas gdy inne można uznać za znacznie bardziej „bezpieczne”.

#### **OCENA PODATNOŚCI W NATURALNYCH UWARUNKOWANIACH ZLEWNI ROLNICZEJ**

Przestrzenna zmienność warunków naturalnych (rzeźby terenu, glebowych, geologicznych i hydrogeologicznych), jak również antropogenicznych (sposób wykorzystania i użytkowania powierzchni terenu), nawet na niewielkim obszarze, dla którego możliwe jest pominięcie zróżnicowania czynników klimatycznych, powoduje bardzo istotne różnice warunków migracji zanieczyszczeń – w tym pestycydów – przez strefę aeracji. Spośród parametrów modelu

(indeksu) AF przestrzenne zróżnicowanie czynników naturalnych i antropogenicznych dotyczy głównie parametrów glebowych (gęstości objętościowej, porowatości, zawartości substancji organicznej) oraz natężenia infiltracji efektywnej (zasilania zasobów wód podziemnych).

W określonych warunkach przyrodniczych przestrzenna zmienność wartości indeksu AF zależy wyłącznie od właściwości stosowanego pestycydu, to jest: współczynnika sorpcji przez węgiel organiczny ( $K_{oc}$ ) oraz czasu połowicznego rozkładu substancji ( $t_{1/2}$ ). Przestrzenna zmienność parametrów charakteryzujących warunki naturalne powoduje, że w różnych miejscach analizowanego obszaru wartość indeksu AF dla określonego pestycydu może się różnić bardzo znacząco. Różnice te zwykle wynoszą kilka, kilkanaście, a nawet kilkadziesiąt rzędów wielkości.

W celu oceny wpływu właściwości pestycydów (współczynnika sorpcji i czasu połowicznego rozkładu) na kształtowanie się wartości indeksu AF na obszarze zlewni Ciesielskiej Wody opracowano mapy podatności wód podziemnych na obszarze zlewni dla różnych wariantów  $K_{oc}$  i  $t_{1/2}$ . Ogółem wykonano 25 map dla różnych kombinacji tych parametrów, które przedstawiono w tabeli 2.

**Tabela 2.** Warianty opracowania map podatności dla hipotetycznych pestycydów  
**Table 2.** Combinations of  $K_{oc}$  and half-life time used for mapping groundwater vulnerability

		$K_{oc}$ [ $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ ]				
		0	16	46	77	107
$t_{1/2}$ [dni, days]	19	✓	✓	✓	✓	✓
	63	✓	✓	✓	✓	✓
	107	✓	✓	✓	✓	✓
	196	✓	✓	✓	✓	✓
	284	✓	✓	✓	✓	✓

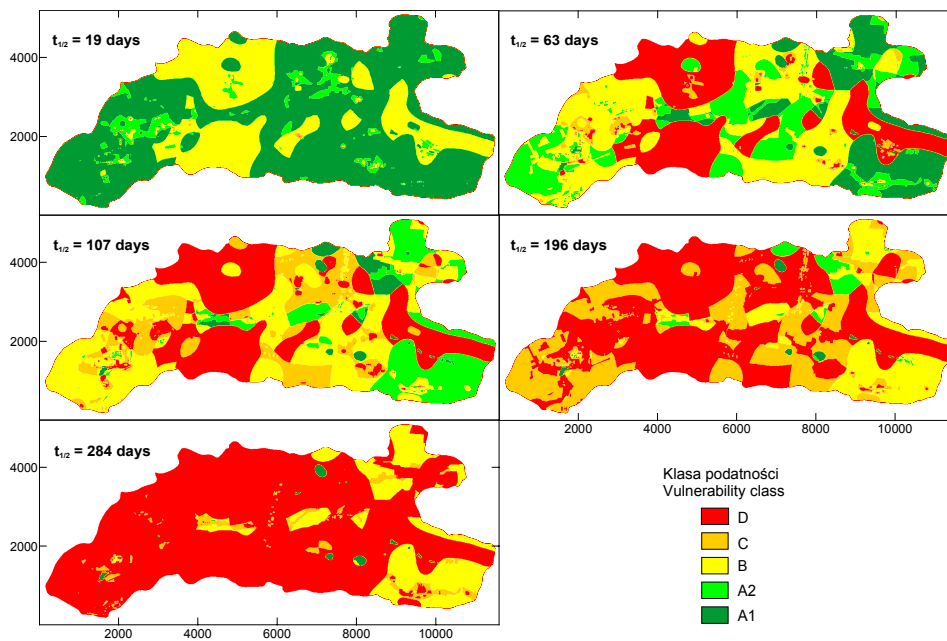
Mapy podatności dla dwóch wartości współczynnika sorpcji ( $K_{oc} = 0$  oraz  $K_{oc} = 107 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ ), przy pięciu różnych wartościach czasu połowicznego rozkładu przedstawiono na rysunkach 1 i 2.

W celu dokonania ilościowej analizy zależności podatności wód podziemnych na zanieczyszczenie przez pestycydy organiczne od czasu połowicznego rozkładu oraz współczynnika sorpcji przez węgiel organiczny przyjęto uogólniony wskaźnik podatności dla analizowanego obszaru w postaci średniej wartości indeksu AF ( $AF_{sr}$ ) dla obszaru zlewni określonej według wzoru:

$$AF_{sr} = \frac{\sum_{i=1}^N AF_i}{N} \quad (3)$$

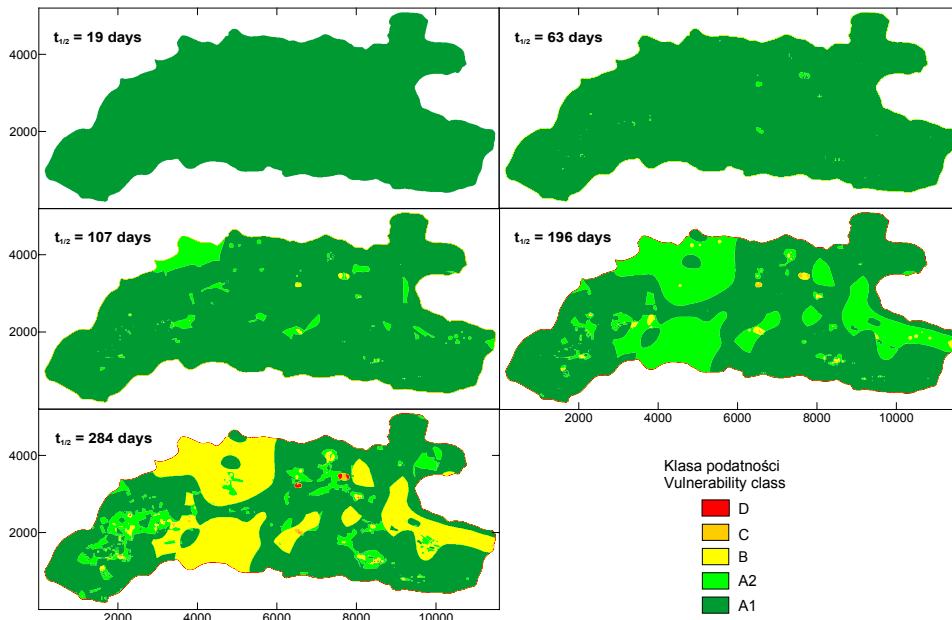
gdzie:

$AF_i$  – wartość indeksu AF w i-tej komórce analizowanego obszaru,  
 $N$  – całkowita liczba komórek na obszarze.

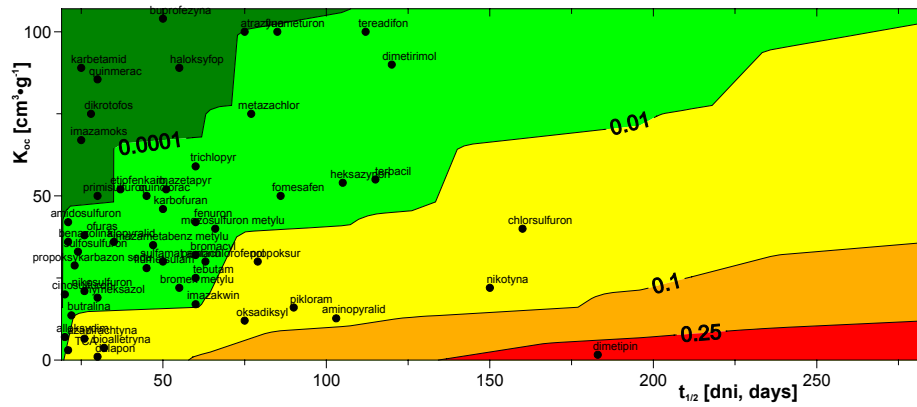


**Rysunek 1.** Mapy podatności przy współczynniku sorpcji  $K_{oc} = 0 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$  dla różnych czasów połowicznego rozkładu

**Figure 1.** Maps of groundwater vulnerability for  $K_{oc} = 0 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$  and various half-life time



**Rysunek 2.** Mapy podatności przy współczynniku sorpcji  $K_{oc} = 107 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$  dla różnych czasów połowicznego rozkładu  
**Figure 2.** Maps of groundwater vulnerability for  $K_{oc} = 107 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$  and various half-life time



**Rysunek 3.** Zależność średniej podatności zlewni ( $AF_{st}$ ) od czasu połowicznego rozkładu i współczynnika sorpcji  
**Figure 3.** Mean vulnerability of the catchment area ( $AF_{st}$ ) as a function of  $t_{1/2}$  and sorption coefficient  $K_{oc}$

Średnie wartości indeksu AF dla obszaru zlewni Ciesielskiej Wody wraz z odchyleniami standardowymi dla analizowanych kombinacji  $K_{oc}$  i  $t_{1/2}$  przedstawiono w tabeli 3, natomiast ogólną podatność zlewni na podstawie wartości wskaźnika  $AF_{sr}$  zestawiono w tabeli 4.

**Tabela 3.** Wartości wskaźnika  $AF_{sr}$  dla całego obszaru zlewni  
**Table 3.** Values of index  $AF_{sr}$  for the whole catchment

		$K_{oc} [cm^3 \cdot g^{-1}]$				
		0	16	46	77	107
$t_{1/2}$ [dni, days]	19	8,37E-03*	2,75E-05	3,61E-07	1,64E-08	1,17E-09
		1,54E-02**	7,42E-04	4,38E-05	3,21E-06	1,17E-09
	63	1,12E-01	1,05E-02	2,76E-04	2,88E-05	6,59E-06
		1,48E-01	1,98E-02	2,70E-03	7,62E-04	2,81E-04
	107	2,06E-01	4,19E-02	3,64E-03	4,22E-04	9,18E-05
		2,16E-01	6,45E-02	1,01E-02	3,54E-03	1,61E-03
	196	3,49E-01	1,16E-01	2,59E-02	6,52E-03	1,88E-03
		2,59E-01	1,46E-01	4,28E-02	1,50E-02	7,50E-03
	284	4,47E-01	1,84E-01	5,72E-02	2,08E-02	8,29E-03
		2,64E-01	1,93E-01	8,40E-02	3,58E-02	1,78E-02

\* wartość średnia (mean value); \*\* odchylenie standardowe (standard deviation)

**Tabela 4.** Ogólna podatność zlewni na podstawie wartości wskaźnika  $AF_{sr}$   
**Table 4.** General groundwater vulnerability for the whole catchment

		$K_{oc} [cm^3 \cdot g^{-1}]$				
		0	16	46	77	107
$t_{1/2}$ [dni, days]	19	A2	A1	A1	A1	A1
	63	C	B	A2	A1	A1
	107	C	B	A2	A2	A1
	196	D	C	B	A2	A2
	284	D	C	B	B	A2

Mapy podatności wód podziemnych na zanieczyszczenie pestycydami przedstawione na rysunkach 1 i 2 oraz wynikające z tych map wartości średniej podatności zlewni dla badanych kombinacji  $K_{oc}$  i  $t_{1/2}$  zestawiono w tabelach 3 i 4 w bardzo wyraźny sposób pokazują, że im podatność pestycydu na sorpcję jest mniejsza oraz im bardziej jest on odporny na degradację (to znaczy bardziej trwały w środowisku glebowym), tym podatność wód podziemnych na zanieczyszczenie na określonym obszarze jest większa.

Zależność średniej podatności całego obszaru zlewni  $AF_{sr}$  od wartości współczynnika sorpcji  $K_{oc}$  oraz czasu połowicznego rozkładu pestycydów przedstawiono w postaci mapy izolinii wskaźnika  $AF_{sr}$  (rys. 4), na którą nałożono dane punktowe, przedstawiające wybrane substancje aktywne (pestycydy).



Wartości współczynników sorpcji i czasów połowicznego rozkładu dla wybranych pestycydów, przedstawionych na rysunku 3 przyjęto według bazy danych Footprint PPDB (2010).

Na podstawie danych zawartych na rysunku 3 należy stwierdzić, że w naturalnych uwarunkowaniach zlewni Ciesielskiej Wody stosowanie zdecydowanej większości analizowanych pestycydów niesie niskie i bardzo niskie zagrożenie jakości wód podziemnych, bowiem średnia wartość indeksu AF dla całej zlewni nie przekracza wartości 0,01. W przypadku stosowania 10 pestycydów: TCA, azadirachtyny, dalaponu, bioalletryny, oksadiksyłu, propoksuru, pikloramu, aminopyralidu, chlorsulfuronu oraz nikotyny podatność wód podziemnych na zanieczyszczenie należy dla całej zlewni uznać za średnią, gdyż  $AF_{sr}$  zawiera się w granicach od 0,01 do 0,1.

W przypadku stosowania dimitipiny ( $K_{oc} = 1,6 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$  oraz  $t_{1/2} = 183$  dni) przestrzenny rozkład indeksu AF i wynikająca z niego wartość  $AF_{sr}$  sprawia, że cały analizowany obszar należy uznać za zagrożony zanieczyszczeniem wód podziemnych w bardzo wysokim stopniu, gdyż  $AF_{sr} > 0,25$ .

#### PODSUMOWANIE

W określonych warunkach naturalnych, które determinują określoną podatność naturalną wód podziemnych na zanieczyszczenie, podatność specyficzna na zanieczyszczenie przez pestycydy organiczne rośnie wraz ze zmniejszaniem się wartości współczynnika sorpcji ( $K_{oc}$ ) oraz jednoczesnym wzrostem czasu połowicznego rozkładu pestycydów ( $t_{1/2}$ ).

Przedstawiona metodyka analizy podatności wód podziemnych na zanieczyszczenie pestycydami organicznymi w określonych warunkach podatności naturalnej umożliwia identyfikację konkretnych pestycydów, których stosowanie na danym obszarze może stwarzać największe zagrożenie dla jakości wód podziemnych.

Przedstawiony przykład oceny i analizy podatności wód podziemnych na zanieczyszczenie pestycydami organicznymi stanowi twórcze i oryginalne rozwiązanie, które może stanowić podstawę do dalszych modyfikacji i uzasadnionych udoskonaleń.

#### BIBLIOGRAFIA

- Dyrektywa 2006/118/We Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 12 grudnia 2006 r. w sprawie ochrony wód podziemnych przed zanieczyszczeniem i pogorszeniem ich stanu.  
Footprint PPDB (Pesticide Properties Database). <http://www.herts.ac.uk/aeru/footprint>, 2007.  
Kajewski I. *Metodyka opracowania map podatności wód podziemnych na zanieczyszczenie przez pestycydy organiczne*. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich Nr 9/2008, s. 159–169.

- Kajewski I. *Koncepcja mapy wrażliwości wód podziemnych na zanieczyszczenie przez pestycydy organiczne* [w:] *Modelowanie Procesów Hydrologicznych*. B. Namysłowska-Wilczyńska (red.). Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 2008a, s. 493–512.
- Kajewski I. *Ocena podatności wód podziemnych na zanieczyszczenie przez pestycydy w skali regionalnej przy zastosowaniu GIS*. Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej we Wrocławiu Nr 520. Inżynieria Środowiska XIV, 2005, s. 55–69.
- Khan M. A., Liang T. *Mapping pesticide contamination potential*. Environmental Management 13 (2); 1989, s. 233–242.
- Krogulec E.. *Ocena podatności wód podziemnych na zanieczyszczenie w dolinie rzecznej na podstawie przesłanek hydrodynamicznych*. Wydawnictwo Uniwersytetu Warszawskiego. Warszawa 2004, s. 177.
- Macioszczyk A. (red). *Podstawy hydrogeologii stosowanej*. Wyd. Nauk. PWN. Warszawa 2006, s. 571.
- Rao P.S.C., Hornsby A.G., Jessup R.E. *Indices for ranking the potential for pesticide contamination of groundwater*. Soil and Crop Science Society of Florida Proceedings 44, 1985, s. 1–8.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 23 lipca 2008 r. w sprawie kryteriów i sposobu oceny stanu wód podziemnych. (Dz. U. Nr 143 poz 896 z dnia 6 sierpnia 2008 r.).

Dr inż. Ireneusz Kajewski  
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu  
Instytut Inżynierii Środowiska  
pl. Grunwaldzki 24, 50–363 Wrocław  
tel. 71 320–5559  
kajewski@up.wroc.pl

Recenzent: *Prof. dr hab. Tadeusz Bednarczyk*