

Izabela Zimoch

Metoda analizy i oceny ryzyka eksploatacji systemów wodociągowych na terenach użytkowanych rolniczo

Systemy zaopatrzenia w wodę usytuowane na obszarach rolniczych są narażone na występowanie zdarzeń niepożądanych, związanych z charakterem użytkowania tych terenów (uprawa roślin, sadownictwo, użytki zielone, hodowla zwierząt). Działalność rolnicza jest źródłem licznych zanieczyszczeń chemicznych i biologicznych, które stanowią bezpośrednie zagrożenie jakości zasobów wodnych, wykorzystywanych do zaopatrzenia w wodę przeznaczoną do spożycia. Identyfikacja zagrożeń oraz zarządzanie ryzykiem w tych systemach pozwala na podejmowanie odpowiednich działań prewencyjnych i budowę systemu multibarier, jako skutecznej ochrony jakości wody w całym łańcuchu jej dostarczania do odbiorców. Z tego względu zastosowanie teorii ryzyka w ocenie bezpieczeństwa funkcjonowania systemu zaopatrzenia w wodę w procedurach zarządzania infrastrukturą wodociągową na terenach rolniczych jest w pełni uzasadnione. Zarówno plany bezpieczeństwa wody (water safety plans – WSP), jak i analiza zagrożeń i krytyczne punkty kontroli (hazard analysis and critical control points – HACCP) są sprawdzonymi procedurami zarządzania ryzykiem, które wdrożono w wielu krajach Europy i Ameryki Północnej [1–5]. Systemy zarządzania ryzykiem obejmują wszystkie etapy dostarczania wody od ujęcia do odbiorców oraz podkreślają znaczenie stref ochronnych ujęć wody i monitorowania jej jakości, jako jednych z najważniejszych elementów kontroli zagrożeń.

Najczęstszymi źródłami zanieczyszczenia wody na terenach rolniczych, gdzie w strukturze użytków rolnych występują zarówno grunty orne, jak i użytki zielone (łąki i pastwiska) oraz prowadzona jest intensywna hodowla zwierząt, są obornik, gnojowica i osady komunalne, wykorzystywane do wzbogacania pól uprawnych w substancje odżywcze (azot, fosfor, potas, węgiel) oraz chemikalia (np. pestycydy) stosowane do ochrony roślin. Jednocześnie wpływ na jakość wody ma również położenie obiektów hodowli zwierząt i pól uprawnych w stosunku do lokalizacji ujęć wody [6–8]. Problem mogą stanowić również zagrożenia bezpośrednio związane z rodzajem prowadzonych upraw rolniczych, szczególnie w rejonach, gdzie nie obowiązuje zakaz uprawy roślin genetycznie modyfikowanych [9, 10]. Zniesienie w Polsce w 2011 r. obowiązku ustanawiania stref ochronnych ujęć, a co za tym idzie – konieczności monitorowania sposobu użytkowania terenów w bezpośrednim sąsiedztwie ujęć, znacznie zwiększyło zagrożenie stanu jakości ujmowanych wód i bezpieczeństwa jej dostarczania do odbiorców.

Charakterystycznymi cechami systemów zaopatrzenia w wodę, eksploatowanych na terenach użytkowanych rolniczo, jest ich niewielka wydajność dobową, duże zróżnicowanie techniczne, znaczne rozproszenie ujęć oraz poszczególne składniki infrastruktury wodociągowej. Są to jedne z najważniejszych elementów istotnie wpływających na warunki hydrauliczne eksploatacji sieci wodociągowej oraz na jakość wody dostarczanej konsumentom. Długofalowym celem, w przypadku systemów wodociągowych na obszarach wiejskich, jest konieczność ich konsolidacji, która umożliwi poprawę warunków technicznych ich eksploatacji, przekładającą się na wzrost bezpieczeństwa dostarczania wody do odbiorców.

Zarówno czynniki zewnętrzne, jak i wewnętrzne warunkujące eksploatację systemów zaopatrzenia w wodę usytuowanych na terenach użytkowanych rolniczo wskazują na konieczność opracowania prostych i skutecznych metod zarządzania ryzykiem. Istnieje wiele metod analizy zagrożeń i szacowania ryzyka, a wybór odpowiedniej zależy między innymi od zakresu i celu analizy, etapu rozwoju systemu, dostępnych danych z eksploatacji i możliwości ich aktualizacji w przyszłości. Na podstawie wielu doniesień literaturowych [11–15] można jednoznacznie stwierdzić, że w badaniach infrastruktury technicznej powszechnie stosowane są niezależne metody szacowania ryzyka, takie jak jakościowa (surowa analiza ryzyka, analiza rodzaju i skutków niezawodności), ilościowa (schemat blokowy niezawodności, procesy Markowa) oraz jakościowo-ilościowa (analiza drzewa zdarzeń, analiza rodzajów skutków i krytyczności niezawodności, analiza drzewa niezdatności, macierz ryzyka). Należy podkreślić, że w analizie ryzyka systemów wodociągowych szczególne znaczenie ma metoda o charakterze uniwersalnym, tak zwana macierz ryzyka [16].

Uwarunkowania eksploatacji systemów wodociągowych usytuowanych na terenach rolniczych wskazują, że metoda analizy bezpieczeństwa ich funkcjonowania, oparta na macierzy ryzyka, może stanowić skuteczne narzędzie w codziennych procedurach zarządzania tymi systemami. Szczególnie w polskich realiach, gdzie użytki rolne stanowią 60,2% powierzchni kraju i blisko 87,7% tej powierzchni zajmują gminy wiejskie i miejsko-wiejskie [17], prosta metoda analizy ryzyka może znaleźć powszechne zastosowanie. Ponadto opracowanie i zastosowanie prostych metod analizy ryzyka jest zgodne z przesłaniem znowelizowanej dyrektywy Rady 98/83/WE w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi (Drinking Water Directive – DWD) [18], zawartym w załączniku II, część A, nakładającym obowiązek kontroli ryzyka zagrożenia zdrowia ludzi w całym łańcuchu dostarczania wody, począwszy

od zlewiska, poprzez pobieranie, oczyszczanie, magazynowanie i dystrybucję, aż do instalacji wodociągowych u odbiorców. Zalecana w tej dyrektywie metoda oceny ryzyka opiera się na ogólnych zasadach zawartych w europejskiej normie dotyczącej bezpieczeństwa zaopatrzenia w wodę oraz wytycznych zarządzania ryzykiem i zarządzania kryzysowego [19].

Metody badań

Szacowanie ryzyka eksploatacji systemów zaopatrzenia w wodę wymaga uwzględnienia wielu czynników określających potencjalne wystąpienie zagrożenia i jego konsekwencje. Warunkuje to konieczność stosowania w procedurach analitycznych wieloczynnikowych macryc ryzyka, które uwzględniają, oprócz prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia niepożądanego i skutków (społecznych, ekonomicznych i ekologicznych), również liczebność narażonej populacji konsumentów wody, ekspozycję na zagrożenie czy też stopień ochrony systemu wodociągowego przed skutkami zagrożenia. Na podstawie badań przeprowadzonych w latach 2010–2015 w grupie małych systemów zaopatrzenia w wodę usytuowanych na terenach rolniczych województw opolskiego i kujawsko-pomorskiego, składających się z kilku układów zasilania w wodę, opracowano metodę szacowania ryzyka utraty bezpieczeństwa dostarczania wody o wymaganej jakości. Metoda ta obejmuje dwa etapy analizy. Pierwszy stanowi ocenę ryzyka cząstkowego (r_{UZWi}) w przypadku każdego i-tego wydzielonego układu zasilania z wykorzystaniem pięcioparametrycznej macrycy ryzyka, uwzględniającej prawdopodobieństwo wystąpienia zagrożenia (definiowane jako przekroczenie dopuszczalnej liczby bakterii *Escherichia coli*, bakterii grupy coli, ogólnej liczby mikroorganizmów wyrosłych w temperaturze 22°C oraz dopuszczalnej ilości azotanów), ekspozycję na zagrożenie pozostające w związku z prowadzoną działalnością rolniczą, liczbę narażonych konsumentów, skutki finansowe związane z wystąpieniem złej jakości wody oraz stopień ochrony systemu wodociągowego przed potencjalnym zagrożeniem. Na podstawie wyznaczonej wartości ryzyka, każdemu układowi zasilania w wodę zostaje przyporządkowana kategoria ryzyka (tolerowane, kontrolowane, nieakceptowane). W drugim etapie analizy określa się ryzyko całego systemu zaopatrzenia w wodę (R_{SZW}). Metoda ta została opracowana dla systemów wodociągowych składających się co najmniej z trzech niezależnych układów zasilania.

Opracowany algorytm analityczny opiera się na zdefiniowanych wartościach wag poszczególnych zmiennych ryzyka. Wartość ryzyka cząstkowego, w przypadku każdego i-tego układu zasilania w wodę, wyznacza się ze zmodyfikowanej formuły dotyczącej obszarów rolniczych [16]:

$$r_{UZWi} = \frac{P_n E_z L_m S_f}{O_s} \quad (1)$$

w której:

P_n – waga punktowa związana z prawdopodobieństwem wystąpienia danego zdarzenia niepożądanego

E_z – waga punktowa związana z ekspozycją na zagrożenie

L_m – waga punktowa związana z zagrożoną liczbą mieszkańców

S_f – waga punktowa związana ze stratami finansowymi

O_s – waga punktowa związana z poziomem ochrony systemu przed zagrożeniami (monitoring, ujęcia awaryjne, zbiorniki wody czystej)

Następnie określa się wartości zmiennych z równania (1) i przypisuje im udział w szacowanym ryzyku za pomocą określonych wag – poziom niski ($L=1$), poziom średni ($M=2$), poziom wysoki ($H=3$). W ten sposób otrzymuje się wartości ryzyka r_{UZWi} z przedziału $\langle 0,33; 81 \rangle$, a następnie jego trzystopniową kategoryzację (tab. 1).

Tabela 1. Kategorie ryzyka w przypadku układu zasilania w wodę
Table 1. Risk categories for a water supply arrangement

Kategoria ryzyka	Wartość liczbowa ryzyka (1)	Miara ryzyka (Mr_{UZWi})
Tolerowane	$0,33 \leq r \leq 6,0$	$L=1$
Kontrolowane	$8,0 \leq r \leq 8,0$	$M=2$
Nieakceptowane	$24 \leq r \leq 81$	$H=3$

Wagi punktowe prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia niepożądanego (P_n), poziomu ekspozycji na zagrożenie (E_z) i stopnia ochrony systemu wodociągowego (O_s) wyznacza się za pomocą arkusza identyfikacji zmiennej ryzyka (tab. 2–4), na podstawie którego w przypadku poszczególnych czynników (z_i) wyznaczana jest jej wartość z równania (2), a następnie jej udział w szacowanym ryzyku r_{UZWi} (L, M, H):

$$Z = \sum_{i=1}^I z_i \quad (2)$$

w którym:

Z – zmienna ryzyka (odpowiednio P_n, E_z oraz O_s)

i – i-ty element zmiennej określony w arkuszu identyfikacyjnym ($i=1, \dots, I$)

z_i – miara i-tego elementu wyrażona skalą punktową (odpowiednio p_{ni}, e_{zi}, o_{si})

Tabela 2. Arkusz identyfikacji prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia niepożądanego (P_n)
Table 2. Undesirable event probability (P_n) identification sheet

i	Element p_{ni} w prawdopodobieństwie wystąpienia zdarzenia niepożądanego (P_n)	Miara punktowa
1	Bakterie grupy coli w ujmowanej wodzie	
	nie występują	1
	występują raz na dwa lata	2
	występują częściej niż raz na dwa lata	5
2	Bakterie <i>Escherichia coli</i> w ujmowanej wodzie	
	nie występują	1
	występują raz na 5 lat	5
	występują częściej niż raz na 5 lat	10
3	Przekroczenie dopuszczalnej wartości ogólnej liczby mikroorganizmów w temp. 22°C w ujmowanej wodzie	
	nie występuje	1
	występuje raz na rok	3
	występuje częściej niż raz na rok	5
4	Przekroczenie dopuszczalnej zawartości azotanów w ujmowanej wodzie	
	nie występuje	1
	występuje raz na 5 lat	3
	występuje częściej niż raz na 5 lat	5
Kryteria klasyfikacji prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia niepożądanego (P_n)		
$P_n \in \langle 4, 8 \rangle$ – zdarzenie mało prawdopodobne		$L=1$
$P_n \in \langle 9, 13 \rangle$ – zdarzenie dosyć prawdopodobne		$M=2$
$P_n \in \langle 14, 25 \rangle$ – zdarzenie prawdopodobne		$H=3$

Tabela 3. Arkusz identyfikacji ekspozycji na zagrożenia pochodzenia rolniczego (E_z)Table 3: Identification sheet for exposures to an agricultural danger (E_z)

i	Element e_{z_i} w ekspozycji ujęcia na zanieczyszczenia pochodzenia rolniczego (E_z)	Miara punktowa
1	Głębokość studni	
	do 10 m	6
	od 10 m do 30 m	3
	powyżej 30 m	1
2	Odległość studni od pól uprawnych	
	do 0,5 km	6
	od 0,5 km do 3 km	3
	powyżej 3 km	1
3	Odległość studni od obiektów hodowli zwierząt	
	do 0,5 km	6
	od 0,5 km do 3 km	3
	powyżej 3 km	1
4	Stosowanie osadów komunalnych w celu zwiększenia żyzności gleby na terenach przyległych do ujęcia	
	tak	3
	nie	1
5	Nawożenie gruntów ornych przyległych do ujęcia z użyciem gnojowicy lub obornika	
	tak	3
	nie	1
6	Odprowadzanie ścieków (np. z produkcji zwierzęcej) do cieków wodnych w obszarze zasilania warstwy wodonośnej ujęcia	
	tak	3
	nie	1
7	Występowanie terenów leśnych w sąsiedztwie ujęcia w odległości	
	do 3 km	5
	od 3 km do 10 km	2
	powyżej 10 km	1
Kryteria klasyfikacji ekspozycji na zanieczyszczenia pochodzenia rolniczego (E_z)		
$E_z \in (7, 13)$ – mała ekspozycja na zagrożenie		L=1
$E_z \in (14, 19)$ – średnia ekspozycja na zagrożenie		M=2
$E_z \in (20, 32)$ – duża ekspozycja na zagrożenie		H=3

Zmienną związaną z liczebnością populacji (L_m) narażonej z powodu dostarczania wody o złej jakości wyznaczono na podstawie danych Głównego Inspektoratu Sanitarnego [20] oraz przyjętej klasyfikacji małych wodociągów pracujących z wydajnością nie większą niż 1000 m³/d, w przypadku których określono następujące kategorie wraz z przypisanymi im wagami:

- systemy dostarczające wodę do 500 mieszkańców: $L=1$,
- systemy dostarczające wodę do 501÷1500 mieszkańców: $M=2$,
- systemy dostarczające wodę do ponad 1500 mieszkańców: $H=3$.

Tabela 4. Arkusz identyfikacji stopnia ochrony systemu wodociągowego przed zdarzeniami niepożądanymi (O_s)Table 4: Identification sheet for water supply system protection level against undesirable events (O_s)

i	Element o_{z_i} w sposobie ochrony systemu wodociągowego (O_s)	Miara punktowa
1	Monitoring jakości ujmowanej wody	
	codzienna kontrola jakości	10
	okresowa kontrola jakości (co najmniej raz w kwartale)	5
	wyrywkowa kontrola jakości w przypadku awarii	1
2	Monitoring jakości wody czystej	
	codzienna kontrola jakości	10
	okresowa kontrola jakości (co najmniej raz w kwartale)	5
	wyrywkowa kontrola jakości w przypadku awarii	1
3	Korzystanie ze studni awaryjnych lub alternatywnego sposobu dostarczania wody	
	tak	3
	nie	1
4	Strefa ochrony ujęć wody	
	obejmuje cały układ zaopatrzenia w wodę	6
	obejmuje połowę ujęć wody	3
	brak strefy ochrony	1
5	Monitoring działalności gospodarczej stanowiącej ryzyko skażenia zasobów wodnych	
	tak	3
	nie	1
6	Monitoring oddziaływania nieorganicznych odpadów rolniczych na jakość wody	
	tak	3
	nie	1
Kryteria klasyfikacji stopnia ochrony systemu wodociągowego (O_s)		
$O_s \in (6, 9)$ – niski stopień ochrony		L=1
$O_s \in (10, 22)$ – średni stopień ochrony		M=2
$O_s \in (23, 35)$ – wysoki stopień ochrony		H=3

Na podstawie zgromadzonych danych pochodzących z lat 2010–2015, dotyczących wysokości kosztów postępowania administracyjnego oraz kosztów poniesionych przez administratorów systemów wodociągowych na działania podjęte w sytuacji wystąpienia zdarzenia niepożądanego, dokonano podziału wielkości strat finansowych (S_f) na trzy kategorie (L, M, H) wraz ze zdefiniowanymi wagami:

- dostrzegalne zmiany organoleptyczne wody, pojedyncze skargi konsumentów, straty finansowe do 2,5 tys. zł (koszty dezynfekcji i procedur organów nadzoru): $L=1$,
- znaczne, widoczne zmiany organoleptyczne (odczuwalny zapach, zwiększone barwa i mętność), złe samopoczucie części konsumentów, liczne skargi, komunikaty

w regionalnych mediach publicznych, strata finansowa w przedziale 2,5÷5 tys. zł związana z potrzebą zapewnienia dostawy wody w czasie wystąpienia zdarzenia niepożądanego (koszty wyłączenia sieci lub określonego obszaru zasilania w wodę, koszty dezynfekcji, koszty procedur organów nadzoru): $M=2$,

– niedyspozycje zdrowotne konsumentów, wymagane wsparcie i porady medyczne dla osób narażonych na konsumpcję wody o złej jakości, zaangażowanie profesjonalnych służb ratowniczych, poważne efekty toksyczne obserwowane wśród organizmów wskaźnikowych, informacje w mediach ogólnokrajowych, strata finansowa powyżej 5 tys. zł związana z potrzebą zapewnienia dostawy wody w czasie wystąpienia zagrożenia (koszty wyłączenia sieci lub określonego obszaru zasilania w wodę, koszty dezynfekcji, koszty procedur organów nadzoru, koszty odszkodowań): $H=3$.

Integralnym elementem metody badawczej jest drugi etap, w którym określa się kategorię ryzyka całkowitego (tolerowane, kontrolowane, nieakceptowane) systemu wodociągowego wykorzystującego co najmniej trzy niezależne układy zasilania. Na podstawie określonych w przypadku każdego i -tego układu zaopatrzenia w wodę miar ryzyka cząstkowego (Mr_{UZW_i} – tab. 1) wylicza się wartość ryzyka całkowitego (R_{SZW}) z formuły:

$$R_{SZW} = \sum_{i=1}^n Mr_{UZW_i} \quad (3)$$

w której n oznacza liczbę wszystkich układów zasilania w wodę w całym systemie zaopatrzenia w wodę ($n \geq 3$).

W tabeli 5 przedstawiono klasyfikację całkowitego ryzyka systemu zaopatrzenia w wodę, w skład którego wchodziły trzy układy zaopatrzenia w wodę. Klasyfikacja całkowitego ryzyka, w przypadku systemów zaopatrzenia w wodę złożonych z więcej niż trzech układów zaopatrzenia w wodę, jest następująca:

– ryzyko tolerowane (wartość skali punktowej):

$$\langle (L_{d,T}(3)+j); (L_{d,K}(3)+(2j-2)) \rangle \quad (4)$$

– ryzyko kontrolowane (wartość skali punktowej):

$$\langle (L_{d,K}(3)+(2j-1)); (L_{d,NA}(3)+(3j-2)) \rangle \quad (5)$$

– ryzyko nieakceptowane (wartość skali punktowej):

$$\langle (L_{d,NA}(3)+(3j-1)); (L_{g,NA}(3)+3j) \rangle \quad (6)$$

przy czym:

$j=n-3$ (n – liczba układów zaopatrzenia w wodę wchodzących w skład systemu wodociągowego; granice wartości ryzyka w przypadku systemu o trzech układach zaopatrzenia w wodę przyjmuje się według tabeli 5).

Tabela 5. Kategorie całkowitego ryzyka systemu zaopatrzenia w wodę złożonego z trzech układów zasilania w wodę

Table 5. Categories of total risk for water supply system comprising three water supply arrangements

Kategoria ryzyka całkowitego (R_{SZW})	Symbol dolnej granicy	Symbol górnej granicy	Skala punktowa	
			dolna granica	górna granica
Tolerowane (T)	$L_{d,T}(3)$	$L_{g,T}(3)$	3	4
Kontrolowane (K)	$L_{d,K}(3)$	$L_{g,K}(3)$	5	6
Nieakceptowane (NA)	$L_{d,NA}(3)$	$L_{g,NA}(3)$	7	9

Przedmiot badań

Badania obejmowały dwa gminne systemy zaopatrzenia w wodę, zlokalizowane w powiecie głubczyckim (województwo opolskie). Systemy te składają się z różnej liczby układów zasilania eksploatujących zasoby wód podziemnych. Występujące tu warunki glebowe, ukształtowanie terenu oraz długi okres wegetacyjny przyczyniają się do intensywnego rozwoju gospodarki rolnej na tych terenach (uprawy rolne, hodowla zwierzęca), stanowiącej główne zagrożenie jakości wody dostarczanej do konsumentów. Produkcja roślinna opiera się na uprawie ziemniaków, buraków cukrowych oraz zbóż. W przypadku hodowli zwierząt podstawę stanowi hodowla bydła. Ponadto prowadzona jest na tych terenach przemysłowa hodowla drobiu oraz trzody chlewnej. Całość uzupełniają niewielkie gospodarstwa indywidualne z drobną hodowlą zwierząt gospodarskich [7].

System zaopatrzenia w wodę gminy Baborów składa się z ośmiu układów zaopatrzenia w wodę, które zaopatrzą łącznie 6310 mieszkańców. Układy te charakteryzują się dużym zróżnicowaniem średniej dobowej ilości oczyszczonej wody w zakresie od 11 m³/d (Szczyty i Czerwone Osiedle) do 490 m³/d (Dziećmarów-Boborów). W tym systemie woda ujmowana jest z głębokości od 3,5 m do 70 m. Z kolei system zaopatrzenia w wodę gminy Głubczyce składa się z jedenastu niezależnych układów zaopatrzenia w wodę, w których studnie ujmują wodę z głębokości od 2,5 m do 50 m. System ten dostarcza wodę do blisko 24 tys. odbiorców, przy czym około 80% wody pochodzi z jednego układu zasilania (Głubczyce – 2900 m³/d). Najmniejszą średniodobową wydajność w czasie badań (około 1,5 m³/d) odnotowano w układzie zasilania Lwówiany–Głubczyce Las. Na obszarze objętym badaniami układy zasilania w wodę usytuowane są na terenach użytkowanych rolniczo lub w ich bezpośrednim pobliżu [7].

Przeprowadzona ocena ryzyka eksploatacji systemów zaopatrzenia w wodę gmin Baborów i Głubczyce obejmowała ich eksploatację w latach 2010–2015. Na podstawie danych uzyskanych z sześcioletniego monitoringu kontrolnego i przeglądowego, prowadzonego przez organy nadzoru [21], zgromadzono i uporządkowano (pod względem zdefiniowanych kryteriów) takie wskaźniki jakości wody (ujmowanej i oczyszczonej), jak zawartość azotanów, liczba bakterii grupy coli i *Escherichia coli* oraz liczba mikroorganizmów wyrosłych w temperaturze 22 °C.

W oparciu o dokumentację techniczną administratorów poszczególnych systemów zaopatrzenia w wodę, zgodnie z procedurami metodyki badawczej, opracowano i przeanalizowano dane dotyczące sposobu użytkowania obszarów eksploatacji układów zaopatrzenia w wodę, zabezpieczeń w strefach ochrony ujęć, stopnia ekspozycji studni głębinowych na zanieczyszczenia pochodzenia rolniczego, liczby mieszkańców korzystających z danego wodociągu, skutków finansowych związanych z wystąpieniem zdarzeń niepożądanych, w tym kosztów postępowania administracyjnego prowadzonego przez Powiatową Stację Sanitarno-Epidemiologiczną w Głubczycach.

Dyskusja wyników

Na podstawie uporządkowanego zbioru danych z każdego układu zaopatrzenia w wodę, wchodzącego w skład systemów zaopatrzenia w wodę gminy Baborów i gminy Głubczyce, wyznaczono wartości wag zmiennych ryzyka

cząstkowego (r_{UZWi}). Uzyskanym wartościom ryzyka cząstkowego każdego układu zaopatrzenia w wodę przypisano jedną z kategorii ryzyka (tab. 1). Kategoryzacja ta, wraz z odpowiadającymi im wartościami wag, pozwoliła w kolejnym etapie analizy wyznaczyć z równania (3) wartość ryzyka całkowitego gminnych systemów wodociągowych (R_{SZW}). Wykorzystując formuły (4)–(6) wyznaczono następnie wartości progowe poszczególnych kategorii ryzyka (tolerowane, kontrolowane i nieakceptowane – tab. 6) w odniesieniu do systemów zaopatrzenia w wodę gmin Baborów i Głubczyce.

Tabela 6. Charakterystyka ryzyka całkowitego dwóch systemów zaopatrzenia w wodę
Table 6. Characteristics of total risk for the two municipal water supply systems

Parametr	System zaopatrzenia w wodę	
	gmina Baborów	gmina Głubczyce
Skala punktowa ryzyka tolerowanego	(8, 13)	(11, 19)
Skala punktowa ryzyka kontrolowanego	(14, 20)	(20, 29)
Skala punktowa ryzyka nieakceptowanego	(21, 24)	(30, 33)
Wartość ryzyka całkowitego	14	14
Kategoria ryzyka całkowitego	kontrolowane	tolerowane

Przeprowadzone badania wykazały, że w systemie zaopatrzenia w wodę gminy Baborów występuje ryzyko kontrolowane, co uzasadnia konieczność wprowadzenia procedur zarządzania ryzykiem dostawy wody. Czynniki, które miały szczególnie wpływ na wartość ryzyka cząstkowego (r_{UZWi}) w poszczególnych układach zasilania były prawdopodobieństwo wystąpienia zanieczyszczenia zasobów wodnych azotanami i mikroorganizmami oraz ekspozycja na te zagrożenia. Ponadto w tym systemie wodociągowym wystąpiły wysokie koszty usuwania skutków pogorszenia jakości wody w całym łańcuchu zaopatrzenia od ujęcia aż do odbiorców. Wyznaczone z równania (1) wartości liczbowe ryzyka w przypadku każdego z ośmiu układów zaopatrzenia w wodę charakteryzowały się zmiennością od 2 do 12, z których dwa układy zostały zaklasyfikowane do kategorii ryzyka kontrolowanego, natomiast pozostałe sześć to układy zasilania, w których ryzyko było na poziomie tolerowanym.

Warunki eksploatacji systemu zaopatrzenia w wodę gminy Głubczyce i skuteczny system zabezpieczeń przed konsekwencjami zagrożeń pochodzenia rolniczego pozwoliły na zaliczenie ryzyka całkowitego do kategorii ryzyka tolerowanego. Ten system wodociągowy składa się jedynie z trzech układów zaopatrzenia w wodę, których ryzyko określono na poziomie kontrolowanym. W tym przypadku czynnikiem, który wpływał na tę klasyfikację była wysoka liczebność populacji narażonej na zagrożenia. Ponadto w tych układach zaopatrzenia w wodę identyfikacja częstotliwości zdarzeń niepożądanych, wynikających z rolniczego użytkowania terenu, wskazała, że zagrożenie zanieczyszczeniem zasobów wodnych stanowi zdarzenie prawdopodobne, z przypisaną wysoką wagą (H). W pozostałych ośmiu układach zasilania wyliczone ryzyko określono jako tolerowane. Wartości ryzyka cząstkowego w przypadku poszczególnych jedenastu układów zasilania w systemie zaopatrzenia w wodę tej gminy wynosiły od 1 do 18.

Podsumowanie

Eksploatacja systemów zaopatrzenia w wodę na terenach użytkowanych rolniczo jest narażona na różne czynniki wpływające na poziom bezpieczeństwa dostarczania wody do odbiorców. Zaproponowana metoda wyznaczania wartości ryzyka całkowitego ma uniwersalny charakter, pozwalający na jej wykorzystanie do identyfikacji wielu zagrożeń. Wykorzystuje ona zdefiniowane wartości wag punktowych poszczególnych parametrów szacowania ryzyka według równania (1). Uniwersalność przedstawionej metody badawczej wynika również z faktu, że zaproponowane wartości wag punktowych w pięcioparametrycznej macierzy ryzyka mogą być dowolnie modyfikowane w zależności od indywidualnych cech analizowanego systemu wodociągowego.

Opracowana metoda pozwala także na ocenę i porównanie poziomu bezpieczeństwa dowolnego systemu zaopatrzenia w wodę oraz wskazanie istotnych czynników stanowiących największe zagrożenie jakości wody dostarczanej konsumentom.

LITERATURA

1. Guidelines for Drinking-Water Quality. 4th edition. WHO, Geneva 2011.
2. J. A. S. NAVALPORTO, M. S. PEREZ, F. G. QUIROGA: Water supply and water footprint in the urban region of Madrid (Spain). *International Journal of Business and Social Science* 2013, Vol. 4, No. 11, pp. 23–28.
3. B. WRRNER, J. J. O'DOHERTY: European Waters – Current Status and Future Challenges. Synthesis. EEA Report No. 9, EEA, Copenhagen 2012.
4. A. LINDHE, S. STURM, J. ROSTUM, F. KOZISEK, D. W. GARI, R. BEUKEN, C. SWARTZ: Risk Assessment Case Studies: Summary Report (Contract No. 018320). TECHNÉAU 2010.
5. I. KISSLING-NÄF, S. KUKS: The Evolution of National Water Regimes in Europe. Transitions in Water Rights and Water Policies. Springer Science & Business Media. B.V., 2004.
6. A. MASSARUTTO: Agriculture, water resources and water policies in Italy. *FEEM Working Paper* 2000, No. 33.99.
7. I. ZIMOCZ, A. KUŚNIERSKI: Wpływ działalności rolniczej na jakość wody w systemach zaopatrzenia w wodę na przykładzie zmian stężeń azotanów. *Instal* 2016, nr 2, ss. 50–53.
8. B. MOSS: Water pollution by agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 2008, Vol. 363, No. 1491, pp. 659–666.
9. C. ZHU, S. NAQVI, S. GOMEZ-GALERA, A. M. PELACHO, T. CAPELL, P. CHRISTOU: Transgenic strategies for the nutritional enhancement of plants. *Trends in Plant Science* 2007, No. 12, pp. 548–555.
10. M. BUIATTI, P. CHRISTOU, G. PASTORE: The application of GMOs in agriculture and in food production for a better nutrition: Two different scientific points of view. *Genes & Nutrition* 2013, Vol. 8, No. 3, pp. 255–270.
11. M. E. COLEMAN, H. M. MARKS: Qualitative and quantitative risk assessment. *Food Control* 1999, Vol. 10, No. 4–5, pp. 289–297.
12. G. CHUNG, K. LANSEY, G. BAYRAKSAN: Reliable water supply system design under uncertainty. *Environmental Modelling & Software* 2009, Vol. 24, No. 4, pp. 449–462.
13. K. PIETRUCHA-URBANIK, J. RAK, B. TCHÓRZEWSKA-CIEŚLAK: Safety analysis of water supply systems including protection barriers. *Journal of Polish Safety and Reliability Association* 2013, Vol. 3, No. 2, pp. 241–248.
14. I. ZIMOCZ, E. ŁOBOS: Comprehensive interpretation of safety of wide water supply systems. *Environment Protection Engineering* 2012, Vol. 38, No. 3, pp. 107–117.

15. I. ZIMPOCH, J. PACIEJ: Spatial risk assessment of drinking water contamination by nitrates from agricultural areas in the Silesia province. *Desalination and Water Treatment* 2016, Vol. 57, No. 3, pp. 1084–1097.
16. J. RAK, B. TCHÓRZEWSKA-CIEŚLAK: Five-parametric matrix to estimate the risk connected with water supply system operation. *Environment Protection Engineering* 2006, Vol. 32, No. 2, pp. 36–47.
17. GUS: Powierzchnia i ludność w przekroju terytorialnym w 2015r. Informacje i Opracowania Statystyczne. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2015.
18. Dyrektywa Komisji (UE) 2015/1787 z 6 października 2015 r., L 260/6.
19. Polska Norma PN-EN 15975-2:2013-12: Bezpieczeństwo zaopatrzenia w wodę pitną – Wytyczne zarządzania kryzysowego i ryzyka – Część 2: Zarządzanie ryzykiem.
20. Stan sanitarny kraju w roku 2014. Jakość wody przeznaczonej do spożycia. Główny Inspektorat Sanitarny, Warszawa 2014 (gis.gov.pl/images/bw/stan_sanitarny_wps_2014.pdf).
21. Dane dotyczące jakości wody w powiecie głubczyckim w latach 2010–2016. Materiały archiwalne, Powiatowa Stacja Sanitarno-Epidemiologiczna, Głubczyce 2016.

Zimoch, I. Method of Risk Analysis and Assessment of Water Supply System Exploitation in Agricultural Areas. *Ochrona Srodowiska* 2016, Vol. 38, No. 4, pp. 33–38.

Abstract: The 2011 abolition of obligation to establish water intake protection zones in Poland significantly increased the risk of water supply system exploitation, especially in small, rural areas. In case of water supply systems situated in agricultural zones, crop production and animal husbandry in the vicinity of water intakes may constitute a major threat. This article presents a groundwater quality threat assessment method for agricultural areas. The proposed assessment procedure is based on the universal method of five-parameter matrix that includes the following risk variables: probability of water contamination,

exposure of water supply system to agricultural threats, financial effects, number of endangered consumers and threat-protection level of water supply system. For each of water supply arrangements being exploited in a given water supply system a partial risk value with its categorization (tolerated, controlled and unacceptable risk) is determined, followed by definition of a total risk for the water supply system. The paper demonstrates practical applications of the presented research method to risk evaluation in the example of two existing, rural water supply systems located in areas with intensive agricultural activity. The analysis was conducted during a 6-year research period (2010–2015).

Keywords: Rural water supply system, agricultural threats, risk, safety, risk matrix.