

Barbara TCHÓRZEWSKA-CIEŚLAK, Krzysztof BORYCZKO  
 Rzeszów University of Technology (Politechnika Rzeszowska)

## SAFETY ANALYSIS IN WATER SUPPLY SYSTEMS

### Analiza bezpieczeństwa w eksploatacji systemów wodociągowych

**Abstract:** *In the aspect of water management, the Water Directive regulates water management with the principle of sustainable development, in shaping, protecting, using and managing water resources. Analysis and assessment of the CWSS safety is a complex issue, including the analysis of potential threats, their effects and safety systems (barriers). The analysis is performed in terms of the water consumers health safety, threats of lack or deficit in water supply and threats to the environment. This process should include the analysis of the existing condition, possible potential threats and safety and repair procedures.*

**Keywords:** water supply system, risk, safety

**Streszczenie:** *Dyrektywa Wodna reguluje gospodarowanie wodami zgodnie z zasadą zrównoważonego rozwoju w kontekście: kształtowania i ochrony zasobów wodnych, korzystania z wód oraz zarządzania zasobami wodnymi. Analiza i ocena bezpieczeństwa SZZW jest zagadnieniem złożonym, obejmującym swym zakresem: analizę potencjalnych zagrożeń, ich skutków oraz tzw. systemów (barier) bezpieczeństwa. Prowadzi się ją przede wszystkim pod kątem bezpieczeństwa zdrowotnego konsumentów wody, ale również zagrożeń wynikających z braku lub deficytu dostaw, a także zagrożeń dla środowiska. Proces ten powinien zawierać elementy analizy stanu istniejącego, jak również możliwych potencjalnych zagrożeń, procedur zabezpieczających oraz naprawczych.*

**Słowa kluczowe:** systemy wodociągowe, ryzyko, bezpieczeństwo

## **1. Introduction**

Water resources management should be conducted in such a way that, acting in harmony with the public interest, it prevents the occurrence of avoidable deterioration of ecological functions of waters. Water supply in accordance with the principle of sustainable development should be considered based on the concepts of:

- the needs, in particular the basic need to provide people with health-safety water,
- water resources capacity to meet the needs of present and future generations, including the protection of resources, in the era of observed climate changes [13].

According to the Act on collective water supply and sewage disposal, "(...) the water supply and sewage company is obliged to ensure the capacity of its water supply facilities to supply water in the required quantity and pressure, as well as supply water in a continuous and reliable manner (...)". Supervision over the quality of water intended for human consumption is exercised by the bodies of the State Sanitary Inspection on the principles set out in the provisions on the State Sanitary Inspection. For years, the current definition of the dependability of Collective Water Supply System (CWSS) says that it is a feature of the system describing its ability to perform its functions, i.e. providing water to the recipients in the required quantity, at the appropriate pressure, with quality parameters in accordance with the applicable standard and at an acceptable price, at any time and in given operating conditions [5,6,10,12]. Safety is a term referring to the absence of a threat, the guarantee of liquidation or minimization of threats, the certainty that nothing bad will happen and its ensuring should be a priority in the operation of systems. With regard to consumers of drinking water, it is understood as the likelihood of avoiding hazard arising from the consumption of water of a quality not complying with the current standard or water lack. The paradigm is to take as a measure of loss of CWSS safety the so-called risk function, which describes the relationship between the adopted risk parameters. A holistic and multi-faceted approach to the problem includes comprehensive management of water supply safety in the context of human – technical system – environment, as well as safety – health – environment [13]. This approach meets the recommendations of the World Health Organization (WHO) in the context of the so-called water safety plans (WSP), as well as European guidelines for health safety of water intended for human consumption. A modification of the WSP is the approach including the so-called water cycle safety plan (WCSP) in the municipal catchment. In CWSS, the basic parameters of the risk function include: likelihood of undesirable events (threats), a parameter specifying possible losses (consequences, damages) that may occur as a result of an undesirable event, and a parameter determining the system's vulnerability (its resistance) to threats [5,6,8–13]. The standard PN-EN 15975-2 "Safety of drinking water supply - Guidelines for crisis and risk management - Part 2: Risk management" is recommended for water supply systems.

The main purpose of the work is to present a method of analysing the risk of lack water supply for the city using the expected shortage value. The paper presents basic issues related to the operation of water supply systems in the context of their safety, describes the

proposed proprietary method of analysing the risk of lack\water supply lack and presents the results of own research on an application example.

## **2. Safety in the operation of water supply systems**

The proper operation of CWSS requires continuous investment and the priority is to provide residents with drinking water. The operation of CWSS consists in conducting constant control of all subsystems and their elements, including risk analysis and assessment, in particular includes the processes of [4,7,12,13]:

- water quality monitoring in the water intakes,
- constant control of water quality parameters after treatment, including monitoring of tap water stability,
- monitoring the quality of water in the treated water tanks and at selected points in the water supply network,
- work control of technical devices in the water pumping stations and technological devices in the water treatment stations,
- modernization of water treatment technology in accordance with applicable standards,
- measurement of pressure and flow rate in the water supply network,
- monitoring of the condition of pipes including the analysis of biofilm,
- conducting inspection of water supply network fittings (maintenance, replacement),
- construction of new sections of water supply networks and connections and removal of water supply network failures,
- current repairs of the water supply network,
- renovation, reconstruction of pipes, replacement of pipes,
- introduction of modern technologies of comprehensive CWSS control and monitoring, including hydraulic control of the system operation (SCADA, GIS software) and control and supervision systems (e.g. camera system for constant control of CWSS objects such as the water intakes, the water tanks, the water treatment plants).

The risk management process in the operation of water supply systems should include elements of the analysis of the existing condition, as well as possible potential threats and protective and repair procedures. Risk analysis is conducted to determine risk by estimating the likelihood of undesirable events and their consequences [2,13]. The risk analysis should use historical knowledge from the operation of the system, analytical methods and experience [3]. In many cases, part of the risk analysis is the analysis of the human factor and analysis of human reliability of the system dispatcher. safety management in a water supply company can be defined as a technical-socio-economic decision-making process to reduce defined risks. There is a rule that risk cannot be eliminated. One can only take various types of actions to minimize it to a level that is acceptable from a safety point of view and necessary costs, what is said in the so-called ALARP principle (As Low As

Reasonably Practicable). The basic stages of CWSS safety management, taking into account the principles of risk management. The risk assessment of CWSS consists of risk analysis and risk evaluation [1,2,6,8,9,12–14]. The risk analysis should also include defining the functional limitations of individual CWSS subsystems. The results of the risk analysis are input to the risk evaluation. The purpose of the evaluation is to decide whether the risk is within tolerable limits or whether it should be reduced using three steps [8,13]:

- system solutions (e.g. modernization of the system, alternative water sources kept in constant readiness, emergency capacity in the water tanks, correction of water treatment technology, redesign of the water supply network, alternative energy sources, reserving strategic network objects, introduction of remote supervision and control system with the use of GIS systems),
- technical and complementary protective measures (introduction of a multi-barrier system, i.e. an early, delayed and late warning system),
- information for water consumers.

The CWSS safety analysis and assessment is carried out according to the following algorithm of conduct [4,6,8,12,13]:

- system recognition (construction, operation, exploitation),
- identification of the purpose, scope and level of detail of the performed analysis,
- hazard identification,
- qualitative assessment of threats (severity, nuisance),
- threats classification according to the degree of nuisance,
- estimation of possible effects for each hazard group,
- identification of failure threats (probable consequences of threats) critical for the system operation, e.g. pumping station failure as a result of power failure,
- selecting critical threats,
- selection of undesirable events (failures) that may cause a domino effect (the so-called cascade damage), e.g. pollution of incidental water sources (consequent floods),
- estimation of the probability of exceeding a specified limit loss value  $P(C > C_{gr})$ ,
- estimating the probability of undesirable events (failures) resulting from selected threats,
- identification of safety barriers,
- estimating the vulnerability of the system,
- determining the number of inhabitants using CWSS,
- determining the risk function along with characteristics of its parameters,
- assessment of risk value, in the assumed three or five-point scale (tolerated, controlled, unacceptable risk),
- cost assessment for risk reduction,
- development of emergency response plans,
- making decisions about the need for corrective action,
- setting strategic “milestones” regarding the future goals of modernization, expansion of CWSS, in order to ensure the safety of water supply.

### 3. Method of analysing the risk of lack of water supply

One of the basic elements of the CWSS safety analysis is the risk analysis of water supply lack. The proposed method is based on the so-called the shortage method used in CWSS [5,12,13]. The factor determining the risk of lack of water supply may be a shortage of water production during damage to individual water supply subsystems. It is assumed that the absolute risk of lack of water supply can be determined on the basis of the expected value according to formula (1). Assuming that the amount of losses  $C$  is interpreted as a water supply shortage  $\Delta Q$ , then [1,2,12,13]:

$$r_b = E(C = \Delta Q) = \sum_{i=1}^n \Delta Q_i \cdot p_i \quad (1)$$

where:

$r_b$  – absolute risk of lack of water supply,

$E(C=\Delta Q)$  – the expected value of water supply shortage,

$i$  – number of operating state of water supply subsystem,

$n$  – maximum number of possible reliability states,

$\Delta Q_i$  – water supply shortage in a given state of unreliability,

$p_i$  – probability of the  $i$ -th state of operation of the water supply subsystem.

The amount of water supply shortage  $\Delta Q$  is calculated as the difference between required production of water sources and production of sources in the  $i$ -th state, according to the formula [5,12,13]:

$$\Delta Q = Q_n - \sum_{k_i}^{k_i} Q_{ik} \quad (2)$$

where:

$Q_n$  – required water demand, required system performance during normal operation (most often the  $Q_n$  value is the maximum daily water demand  $Q_{maxd}$  or the design value of water production),

$k_i$  – the number of damaged water supply sources in the  $i$ -th state,

$Q_{ik}$  – production of individual water sources in the  $i$ -th state with  $k_i$  damages,  $m^3/d$ .

The probability value  $p_i$  is determined by the formula: [5,12,13]:

$$p_i = \prod_{j \in S} K_{ij} \cdot \prod_{j \in N} (1 - K_{ij}) \quad (3)$$

where:

$K_{ij}$  – the readiness index of the  $j$ -th water supply subsystem,

$j \in S$  – a set of those water supply subsystems (or their elements) that in  $i$ -th state are efficient, marked with the symbol (+),

$j \in N$  – a set of those water supply subsystems (or their elements), which in the  $i$ -th state are inefficient, marked with the symbol (-).

In the paper [12], in order to assess the risk of lack of water supply, the relative risk of lack of water supply  $r_w$  was defined, referring the expected value of water supply shortage to the nominal value of water demand, which is expressed in % of water shortage. If the sum of the efficiency of all sources is greater than the required efficiency, then there is the so-called water supply reserve (shortage is zero). The proposed criteria for assessing the level of safety of water supply based on the relative risk are presented in tab.1 based on work [12,13].

**Table 1**

**The criteria values for water supply safety levels, based on the relative risk values, depending on the size of the city (based on [12, 13])**

Water supply system category	$r_w$ [%]	Water supply safety level
I – very large water supply systems, number of residents > 500 000	$\leq 2$	tolerated
	(2÷3)	controlled
	$\geq 3$	unacceptable
II – large water supply systems, number of residents 200 000÷500 000	$\leq 3$	tolerated
	(3÷4)	controlled
	$\geq 4$	unacceptable
III – medium water supply systems, number of residents 100 000÷199 999	$\leq 3$	tolerated
	(3÷6)	controlled
	$\geq 6$	unacceptable
IV – small water supply systems, number of residents 40 000÷99 999	$\leq 4$	tolerated
	(4÷6)	controlled
	$\geq 6$	unacceptable
V – very small water supply systems, number of residents < 40 000	$\leq 6$	tolerated
	(6÷9)	controlled
	$\geq 9$	unacceptable

## 4. Application example

Based on the operating data for the city of south-eastern Poland with about 200 thousand residents and the determined value of water supply shortage, the risk of lack of water supply to consumers was calculated. Table 2 summarizes the operational values of water production for the two water treatment plants - (ZI) and (ZII) and the corresponding readiness indicators K (according to calculations in [10]).

**Table 2**

**Water production values and reliability ratios K for ZI and ZII [10]**

Water treatment plants	Q [m <sup>3</sup> /d]	K
ZI	37 000	0,966
ZII	47 000	0,987

Table 3 summarizes the results of calculations of the expected values of water shortage. The source efficiency state was marked as “1”, the state of inefficiency “0”. Calculations were made on the basis of formulas (1) to (3).

The nominal value of water demand was adopted as the value of the maximum daily demand in the city, based on the operational data from years 2015–2018 for  $Q_{\max d} = 50000 \text{ m}^3/\text{d}$ .

**Table 3**

**The results of the analysis of the risk of absolute lack of water supply to the city**

i	Characteristics of operational states		Productivity [m <sup>3</sup> /d]		Sum [m <sup>3</sup> /d]	Shortage [m <sup>3</sup> /d]	K indicators		Probability of i state	P <sub>i</sub> · ΔQ
	ZI	ZII	Q <sub>ZI</sub>	Q <sub>ZII</sub>	Q	ΔQ	K <sub>ZI</sub>	K <sub>ZII</sub>	P <sub>i</sub>	
1	1	1	37000	47000	84000	0	0,9659	0,987	0,953343	0
2	1	0	37000	0	37000	13000	0,9659	0,013	0,012557	163,241
3	0	1	0	47000	47000	3000	0,0341	0,987	0,033657	100,971
4	0	0	0	0	0	50000	0,0341	0,013	0,000443	22,15
Σ									1	286,36

The expected value of water supply shortage ( $E(C)=r$ ) in absolute terms is  $286,36 \text{ m}^3/\text{d}$  (according to (1)), while the relative risk of lack of water supply in % is:

$$r_w = E(C) / Q_{\max d} \cdot 100\% = 286,36 / 50000 \cdot 100\% = 0.57\%$$

The value of  $r_w = 0.57\%$ , compared with the criterion values, which according to tab. 1, for a city with a population of 200,000, the value of the relative risk of non-supply is determined as water is the tolerated value. The presented analysis showed that the city is characterized by a high level of water supply safety.

## 5. Conclusions

- The CWSS operator and subordinated to him staff should strictly comply with the operational guidelines that guarantee the reliable and safe functioning of the system.
- Risk management methods that include: risk identification, classification and assessment, planning of response and counteraction methods in case of risk implementation, should be introduced.
- Entities responsible for the operation of CWSS should have water safety plans implemented, including quick response procedures in case of a crisis situation, in particular supplying people with water from alternative sources (emergency wells, barrel water carts or special water bags) and the possibility of fast additional water disinfection.
- The method of analyzing the risk of water supply lack presented in the work based on the analysis using the expected value of probable losses should be an element of the water intake risk analysis, which is currently required as the first stage of the so-called water safety plans. The method clearly shows the relationship between the risk of water supply lack and the number of water intakes in relation to their productivity. In this way, it also indicates the degree of intake diversification and, consequently, the security of water supply for the city.
- An application example based on the authors' operational tests for a real water supply system presented in the paper. It is a fragment of the risk analysis for the water intake of the analyzed system in terms of quantitative risk analysis of water supply lack for the city. Research has shown that in this aspect the risk is at a tolerable level, which indicates a sufficient degree of diversification of water sources for the city.
- The method presented should be part of the risk analysis for water intakes as well as in the comprehensive development of the WSP (recommended in the Water Framework Directive).

## 6. References

1. Ezell B., Farr J., Wiese I.: Infrastructure risk analysis of municipal water distribution system. *Journal of Infrastructure Systems*, ASCE, 6(3), 2000.
2. Haimes Y.Y.: *Risk Modelling, Assessment and Management*, Wiley, New York 1998.
3. Jaźwiński J., Szpytko J.: Zasady wyznaczania zespołu ekspertów w badaniach niezawodności i bezpieczeństwa urządzeń technicznych. *Mat. XXXIV Zimowej Szkoły Niezawodności PAN „Niekonwencjonalne metody oceny trwałości i niezawodności”*, Wyd. Wydziału Transportu Politechniki Warszawskiej, Szczyrk 2006.



4. Młyńczak M.: *Metodyka badań eksploatacyjnych. obiektów mechanicznych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2012.
5. Kwietniewski M., Roman M.: Reliability assessment of water supply systems. *Journal of Water Supply Research and Technology, AQUA*, 46(5), 1997.
6. Pietrucha-Urbanik K., Rak J., Tchórzewska-Cieślak B.: Safety analysis of water supply systems including protection barriers. *Journal of Polish Safety and Reliability Association, Summer Safety and Reliability Seminars*, 3(2)/2013, 2013.
7. Pilch R., Szybka J., Tuszyńska A.: Zastosowanie metod faktoryzacji oraz symulacji czasowo-przestrzennej do oceny niezawodności sieci wodociągowych. *Eksplatacja i Niezawodność*, vol. 16, iss. 2, 2014.
8. Rak J. R.: *Bezpieczeństwo systemów zaopatrzenia w wodę*. Polska Akademia Nauk, Instytut Badań Systemowych, Warszawa 2009.
9. Rak J., Tchórzewska-Cieślak B.: Review of matrix methods for risk assessment in water supply system. *Journal of Konbin*, vol.1(1), 2006.
10. Rak J.R.: *Niezawodność systemu uzdatniania wód powierzchniowych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Inżynieria Środowiska, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, z. 20, Rzeszów 1993.
11. Szpak D., Tchórzewska-Cieślak B.: Źródła zdarzeń incydentalnych w systemie zbiorowego zaopatrzenia w wodę. *Journal of Konbin*, 3(35), 2015, DOI10.1515/jok-2015-0046
12. Tchórzewska-Cieślak B.: *Metody analizy i oceny ryzyka awarii podsystemu dystrybucji wody*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2011.
13. Tchórzewska-Cieślak B.: *Wieloaspektowa analiza bezpieczeństwa w eksploatacji systemów wodociągowych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2018.
14. Tchórzewska-Cieślak B.: Security management of water supply. *Journal of Konbin*. Vol. 41, 2017, DOI 10.1515jok-2017-0009.
15. Tchórzewska-Cieślak B., Boryczko K., Piegoń I.: Possibilistic risk analysis of failure in water supply network. *Safety and reliability: methodology and applications: proceedings of The European Safety and Reliability Conference, Esrel 2014*, Wrocław, Poland, CRC PRESS/BALKEMA.

# ANALIZA BEZPIECZEŃSTWA W EKSPLOATACJI SYSTEMÓW WODOCIĄGOWYCH

## 1. Wprowadzenie

Gospodarowanie zasobami wodnymi powinno być prowadzone w taki sposób, by działając zgodnie z interesem publicznym, nie dopuścić do możliwego wystąpienia pogorszenia ekologicznych funkcji wód. Zaopatrzenie w wodę zgodnie z zasadą zrównoważonego rozwoju należy rozpatrywać w oparciu o pojęcia:

- potrzeb, w szczególności związanych z zaopatrzeniem ludności w wodę bezpieczną dla zdrowia,
- ograniczeń zasobów wód do zaspokojenia potrzeb obecnych i przyszłych pokoleń z uwzględnieniem ochrony zasobów, w dobie obserwowanych zmian klimatycznych [13].

Zgodnie z Ustawą o zbiorowym zaopatrzeniu w wodę i odprowadzaniu ścieków: „(...) Przedsiębiorstwo wodociągowo-kanalizacyjne ma obowiązek zapewnić zdolność posiadanych urządzeń wodociągowych do realizacji dostaw wody w wymaganej ilości i pod odpowiednim ciśnieniem oraz dostaw wody w sposób ciągły i niezawodny (...)”.

Od lat obowiązująca definicja niezawodności (ang. dependability) systemów zbiorowego zaopatrzenia w wodę (SZZW) mówi, że jest to cecha systemu opisująca jego zdolność do wykonywania przynależnych mu funkcji, tj. dostarczania do odbiorców wody w wymaganej ilości, pod odpowiednim ciśnieniem, o parametrach jakościowych zgodnych z obowiązującym normatywem i o akceptowalnej cenie, w dowolnej chwili czasu oraz w danych warunkach eksploatacyjnych [5,6,10,12].

Bezpieczeństwo jest pojęciem, odnoszącym się do braku zagrożenia, gwarancji likwidacji lub minimalizacji zagrożeń, pewności, że nic złego się nie stanie, a jego zapewnienie powinno być priorytetem w eksploatacji systemów wodociągowych. W odniesieniu do konsumentów wody do spożycia, rozumiane jest jako prawdopodobieństwo uniknięcia zagrożenia zdrowotnego, wynikającego ze spożycia wody o jakości niezgodnej z obowiązującym normatywem lub jej brakiem. Paradygmatem jest przyjęcie jako miary utraty bezpieczeństwa w SZZW tzw. funkcji ryzyka, która opisuje zależność pomiędzy przyjętymi parametrami ryzyka. Ogólne i wieloaspektowe podejście do problemu, obejmuje kompleksowe zarządzanie bezpieczeństwem dostaw wody w kontekście człowiek – system

techniczny – środowisko, a także bezpieczeństwo – zdrowie – środowisko [13]. Takie podejście wychodzi naprzeciw zaleceniom Światowej Organizacji Zdrowia (WHO) w odniesieniu do tzw. planów bezpieczeństwa wody (WSP – Water Safety Plans), a także wytycznym europejskim w ramach bezpieczeństwa zdrowotnego wody przeznaczonej do spożycia. Modyfikacją WSP jest podejście obejmujące tzw. cykl obiegu wody w zlewni miejskiej (WCSP – Water Cycle Safety Plans). W SZZW do podstawowych parametrów funkcji ryzyka należą: prawdopodobieństwo (ang. likelihood) zajścia zdarzeń niepożądanych, parametr określający możliwe straty (skutki, szkody), mogących wystąpić w wyniku zajścia tych zdarzeń oraz parametr określający podatność systemu (jego odporność) na zagrożenia (ang. vulnerability) [5,6,8–13]. Dla systemów wodociągowych zalecane są normy PN-EN 15975-2 „Bezpieczeństwo zaopatrzenia w wodę do spożycia–Wytyczne dotyczące zarządzania kryzysowego i ryzyka – Część 2: Zarządzanie ryzykiem”.

Głównym celem pracy jest przedstawienie metody analizy ryzyka braku dostawy wody dla miasta z wykorzystaniem wartości oczekiwanej niedoboru. W pracy przedstawiono podstawowe zagadnienia związane z eksploatacją systemów wodociągowych w kontekście ich bezpieczeństwa, opisano proponowaną autorską metodę analizy ryzyka braku dostawy wody oraz przedstawiono wyniki badań własnych na przykładzie aplikacyjnym.

## **2. Bezpieczeństwo w eksploatacji systemów wodociągowych**

Prawidłowa eksploatacja SZZW wymaga ciągłych inwestycji, a priorytetem jest dostarczenie mieszkańcom wody zadnej do spożycia. Polega ona na prowadzeniu stałej kontroli wszystkich podsystemów i ich elementów z uwzględnieniem analizy oraz oceny ryzyka, w szczególności obejmuje procesy [4,7,12,13]:

- monitoringu jakości wody na ujęciach wody,
- stałej kontroli parametrów jakości wody po jej uzdatnieniu z uwzględnieniem monitoringu stabilności wody wodociągowej,
- monitoringu jakości wody w zbiornikach wody uzdatnionej oraz w wybranych punktach na sieci wodociągowej,
- kontroli pracy urządzeń technicznych w pompowniach wodociągowych oraz urządzeń technologicznych na stacjach uzdatniania wody,
- modernizacji technologii uzdatniania wody zgodnie z obowiązującymi standardami,
- pomiarze ciśnienia i natężenia przepływu w sieci wodociągowej,
- monitoringu stanu przewodów z uwzględnieniem analizy obrostów i biofilmu,
- prowadzeniu przeglądów uzbrojenia sieci wodociągowej (konserwacja, wymiana),
- budowie nowych odcinków sieci wodociągowych i podłączeń oraz usuwaniu awarii sieci wodociągowej,
- remontów bieżących sieci wodociągowej,
- renowacji, rekonstrukcji przewodów, wymianie przewodu,

- wprowadzeniu nowoczesnych technologii kompleksowego sterowania i monitoringu SZZW w tym kontroli hydraulicznej pracy systemu (oprogramowanie SCADA, GIS) oraz systemów kontroli i nadzoru (np. system kamer do stałej kontroli obiektów SZZW takich jak ujęcia wody, zbiorniki wodociągowe, stacje uzdatniania wody).

Proces zarządzania ryzykiem w eksploatacji systemów wodociągowych powinien zawierać elementy analizy stanu istniejącego, jak również możliwych potencjalnych zagrożeń i prawdopodobnych ich skutków, a także procedur zabezpieczających oraz naprawczych. Podejście takie wymaga powołania zespołu ekspertów [3], aby zebrał i zweryfikował dane z różnych źródeł. Analiza ryzyka jest prowadzona w celu jego określenia poprzez estymację prawdopodobieństwa zajścia zdarzeń niepożądanych i ich skutków [2,13]. W analizie ryzyka powinno się wykorzystywać historyczną wiedzę z eksploatacji systemu, metody analityczne, a także doświadczenie.

W wielu przypadkach częścią analizy ryzyka są analizy czynnika ludzkiego i niezawodności człowieka – dyspozytora systemu. Zarządzanie bezpieczeństwem w firmie wodociągowej można zdefiniować jako techniczno-społeczno-ekonomiczny proces podejmowania decyzji, w celu redukcji zdefiniowanych ryzyk [12,13]. Obowiązuje zasada, że nie da się wyeliminować ryzyka. Można jedynie podejmować różnego rodzaju działania, które mają na uwadze jego minimalizację do poziomu akceptowalnego z punktu widzenia bezpieczeństwa oraz koniecznych do poniesienia kosztów, o czym mówi tzw. zasada ALARP (ang. As Low As Reasonably Practicable). Na ocenę ryzyka SZZW składa się analiza ryzyka oraz ewaluacja ryzyka. W skład analizy ryzyka powinno również wchodzić zdefiniowanie ograniczeń funkcjonowania poszczególnych podsystemów SZZW. Wyniki analizy ryzyka stanowią dane wejściowe do ewaluacji ryzyka [1,2,6,8,9, 12–14] Celem ewaluacji jest podjęcie decyzji, czy ryzyko mieści się w granicach tolerowalnych lub czy należy je zredukować przy pomocy trzech kroków [8,13]:

- rozwiązań systemowych (np. modernizacja systemu, alternatywne źródło wody utrzymywane w stałej gotowości, pojemności awaryjne w zbiornikach wodociągowych, korekta technologii uzdatniania wody, przeprojektowanie sieci wodociągowej, alternatywne źródła energii, rezerwowanie strategicznych obiektów sieciowych, wprowadzanie zdalnego nadzoru i sterowania systemem z wykorzystaniem systemów GIS),
- technicznych i uzupełniających środków ochronnych (wprowadzenie systemu multibarier, tj. systemu wczesnego, opóźnionego i późnego ostrzegania),
- informacji dla konsumentów wody.

Analizę i ocenę bezpieczeństwa SZZW wykonuje się wg następującego algorytmu postępowania [4,6,8,12,13]:

- rozpoznanie systemu (budowa, działanie, eksploatacja),
- identyfikacja celu, zakresu i stopnia szczegółowości wykonywanej analizy,
- identyfikacja zagrożeń dla systemu,
- oszacowanie jakościowe zagrożeń (stopień ciężkości, uciążliwości),
- klasyfikacja zagrożeń ze względu na stopień uciążliwości,

- oszacowanie możliwych skutków dla każdej grupy zagrożeń,
- wytypowanie awarii (prawdopodobnych skutków zagrożeń) krytycznych dla funkcjonowania systemu np. awaria pompowni w wyniku zaniku zasilania,
- wytypowanie zdarzeń niepożądanych (awarii) w systemie mogących spowodować efekt domina (tzw. uszkodzenia kaskadowe), np. zanieczyszczenie incydentalne źródła wody (w konsekwencji powodzi),
- oszacowanie prawdopodobieństwa przekroczenia określonej wartości strat granicznych  $P(C > C_{gr})$ ,
- oszacowanie prawdopodobieństwa zajścia zdarzeń niepożądanych (awarii) będących skutkiem wytypowanych zagrożeń,
- identyfikacja barier bezpieczeństwa,
- oszacowanie podatności systemu na zagrożenia,
- określenie liczby mieszkańców korzystających z SZZW,
- wyznaczenie funkcji ryzyka wraz z charakterystyka jego parametrów,
- ocena wartości ryzyka, w przyjętej skali trój lub pięciostopniowej (ryzyko tolerowane, kontrolowane, nieakceptowane),
- ocena poniesionych kosztów na redukcję ryzyka,
- opracowanie planów reagowania w sytuacji kryzysowej,
- podejmowanie decyzji odnośnie konieczności wprowadzenia działań naprawczych,
- wyznaczenie strategicznych „kamieni milowych” odnośnie przyszłych celów modernizacji, rozbudowy SZZW, w celu zapewnienia bezpieczeństwa dostawy wody.

### **3. Metoda analizy ryzyka braku dostawy wody**

Jednym z podstawowych elementów analizy bezpieczeństwa SZZW jest analiza ryzyka braku dostawy wody do konsumentów. Zaproponowana metoda opiera się na tzw. metodzie niedoborów stosowanej w SZZW [5,12,13]. Czynnikiem, określającym ryzyko braku dostawy wody może być niedobór produkcji wody w czasie uszkodzenia poszczególnych podsystemów zasilania wody. Zakłada się, że ryzyko bezwzględne braku dostawy wody, można wyznaczyć na podstawie wartości oczekiwanej wg wzoru (1). Zakładając, że wielkość strat  $C$  interpretowana jest jako niedobór zasilania  $\Delta Q$ , wtedy otrzymujemy wzór [1,2,12,13]:

$$r_b = E(C = \Delta Q) = \sum_{i=1}^n \Delta Q_i \cdot p_i \quad (1)$$

gdzie:

$r_b$  – ryzyko bezwzględne braku dostawy wody,

$E(C=\Delta Q)$  – wartość oczekiwana niedoboru zasilania,

$i$  – numer stanu funkcjonowania podsystemu dostawy wody (PsDoW),

$n$  – maksymalna liczba możliwych stanów niezawodnościowych,  $n = 2m$  ( $m$  – liczba wszystkich źródeł zasilania PsDoW),

$\Delta Q_i$  – niedobór zasilania w danym stanie zawodności,

$p_i$  – prawdopodobieństwo zajścia  $i$ -tego stanu funkcjonowania podsystemu dostawy wody.

Wielkość tzw. niedoboru zasilania  $\Delta Q$  oblicza się jako różnicę wymaganej produkcji źródeł zasilania i produkcji źródeł w  $i$ -tym stanie według wzoru [5,12,13]:

$$\Delta Q = Q_n - \sum_{k_i}^{k_i} Q_{ik} \quad (2)$$

gdzie:

$Q_n$  – wymagane zapotrzebowanie na wodę, wymagana wydajność systemu w czasie pracy normalnej (najczęściej za wartość  $Q_n$  przyjmuje się maksymalne dobowe zapotrzebowanie na wodę  $Q_{\max,d}$  lub wartość projektową produkcji wody),  $m^3/d$

$k_i$  – liczba uszkodzonych źródeł zasilania w  $i$ -tym stanie,

$Q_{ik}$  – produkcja poszczególnych źródeł zasilania w  $i$ -tym stanie przy uszkodzeniach  $k_i$ ,  $m^3/d$ .

Wartość prawdopodobieństwa  $p_i$  wyznacza się według wzoru [5,12,13]:

$$p_i = \prod_{j \in S} K_{ij} \cdot \prod_{j \in N} (1 - K_{ij}) \quad (3)$$

gdzie:

$K_{ij}$  – wskaźnik gotowości  $j$ -tego podsystemu dostawy wody,

$j \in S$  – zbiór tych podsystemów dostawy (lub ich elementów), które w  $i$ -tym stanie są sprawne, oznaczone symbolem (+),

$j \in N$  – zbiór tych podsystemów dostawy (lub ich elementów), które w  $i$ -tym stanie są niesprawne, oznaczone symbolem (-).

W celu oceny ryzyka braku dostawy wody w pracy [12] zdefiniowano pojęcie tzw. ryzyka względnego braku dostawy wody  $r_w$ , odnosząc wartość oczekiwaną niedoboru wody ( $r_b$ ) do wartości nominalnej zapotrzebowania na wodę, które wyraża się w % niedoboru. Jeżeli suma wydajności wszystkich źródeł jest większa od wydajności wymaganej, to występuje tzw. rezerwa zasilania (niedobór jest równy zero). Propozycje kryteriów dla oceny poziomu bezpieczeństwa dostawy wody na podstawie ryzyka względnego przedstawiono w tab. 1 na podstawie pracy [12,13].

Tabela 1

**Wartości kryterialne dla poziomów bezpieczeństwa dostaw wody, podstawie wartości ryzyka względnego w zależności od wielkości miasta (na podstawie [12,13])**

Kategoria wodociągu	$r_w$ [%]	Poziom bezpieczeństwa dostawy wody
I – wodociągi b. duże, liczba mieszkańców > 500 000	$\leq 2$	tolerowany
	(2÷3)	kontrolowany
	$\geq 3$	nieakceptowany
II – wodociągi duże, liczba mieszkańców 200 000÷500 000	$\leq 3$	tolerowany
	(3÷4)	kontrolowany
	$\geq 4$	nieakceptowany
III – wodociągi średnie, liczba mieszkańców 100 000÷199 999	$\leq 3$	tolerowany
	(3÷6)	kontrolowany
	$\geq 6$	nieakceptowany
IV – wodociągi małe, liczba mieszkańców 40 000÷99 999	$\leq 4$	tolerowany
	(4÷6)	kontrolowany
	$\geq 6$	nieakceptowany
V – wodociągi b. małe i gminne liczba mieszkańców < 40 000	$\leq 6$	tolerowany
	(6÷9)	kontrolowany
	$\geq 9$	nieakceptowany

#### 4. Przykład aplikacyjny

Na podstawie danych eksploatacyjnych dla miasta południowo-wschodniej Polski liczącego około 200 tys. mieszkańców oraz wyznaczonej wartości niedoboru zasilania obliczono ryzyko braku dostawy wody do odbiorców. W tabeli 2 zestawiono eksploatacyjne wartości produkcji wody dla dwóch zakładów uzdatniania wody – (ZI) i (ZII), a także odpowiadające im wskaźniki gotowości K (obliczone w pracy [10]).

Tabela 2

**Wartości produkcji wody oraz wskaźniki niezawodności K dla ZI i ZII [10]**

Zakład Uzdatniania Wody	Q [m <sup>3</sup> /d]	K
ZI	37 000	0,966
ZII	47 000	0,987

W tabeli 3 zestawiono wyniki obliczeń wartości oczekiwanej niedoboru zasilania: Stan sprawności źródła oznaczono jako „1”, stan niesprawności „0”. Obliczenia wykonano na podstawie wzorów od (1) do (3).

Wartość nominalną zapotrzebowania na wodę przyjęto jako wartość maksymalnego zapotrzebowania dobowego w miesiącu, na podstawie danych eksploatacyjnych z lat 2015–2018. Przyjęto  $Q_{\max d} = 50\,000\text{ m}^3/\text{d}$ .

Tabela 3

## Wyniki analizy ryzyka bezwzględne braku dostawy wody do miasta

i	Charakterystyka stanów eksploatacyjnych		Wydajność m <sup>3</sup> /d		Suma m <sup>3</sup> /d	Niedobór m <sup>3</sup> /d	Wskaźniki K		Prawdopodobieństwo zajścia stanu i	P <sub>i</sub> ·ΔQ
	ZI	ZII	Q <sub>ZI</sub>	Q <sub>ZII</sub>	Q	ΔQ	K <sub>ZI</sub>	K <sub>ZII</sub>	P <sub>i</sub>	
1	1	1	37000	47000	84000	0	0,9659	0,987	0,953343	0
2	1	0	37000	0	37000	13000	0,9659	0,013	0,012557	163,241
3	0	1	0	47000	47000	3000	0,0341	0,987	0,033657	100,971
4	0	0	0	0	0	50000	0,0341	0,013	0,000443	22,15
Σ									1	286,36

Wartość oczekiwana niedoboru zasilania ( $E(C)=r$ ) w wartościach bezwzględnych wynosi 286,36 m<sup>3</sup>/d (obliczona wg wzoru (1)), natomiast ryzyko względne braku dostawy wody wyrażone w % wynosi:

$$r_w = E(C) / Q_{\max d} \cdot 100\% = 286,36 / 50000 \cdot 100\% = 0,57\%$$

Wartość  $r_w=0,57\%$ , porównano z wartościami kryterialnymi, Zgodnie z tab. 1, dla miasta o liczbie mieszkańców 200 tys. wyznaczona wartość względnego ryzyka braku dostawy wody jest wartością tolerowaną. Przedstawiona analiza wykazała, że miasto cechuje wysoki poziom bezpieczeństwa zasilania w wodę.

## 5. Podsumowanie

- Operator SZZW i podległe mu służby powinny bezwzględnie przestrzegać wytycznych eksploatacji, które gwarantują niezawodne oraz bezpieczne funkcjonowanie systemu.
- W SZZW należy wprowadzać metody zarządzania ryzykiem, które obejmują: identyfikację ryzyka, klasyfikację i jego ocenę, planowanie metod reagowania, a także przeciwdziałania na wypadek realizacji ryzyka.
- Podmioty odpowiedzialne za eksploatację SZZW powinny posiadać wdrożone plany bezpieczeństwa wody z uwzględnieniem procedur szybkiego reagowania na wypadek sytuacji kryzysowej, w szczególności zaopatrzenie ludności w wodę z alternatywnych źródeł (studnie awaryjne, beczkowozy czy wodoerki) oraz możliwość szybkiej dodatkowej dezynfekcji wody.
- Zaprezentowana w pracy metoda analizy ryzyka braku dostawy wody oparta na analizie wykorzystującej wartość oczekiwaną prawdopodobnych strat powinna stanowić element tzw. analizy ryzyka ujęcia wody, które są obecnie wymagane jako



pierwszy etap tzw. planów bezpieczeństwa wody. Metoda w jasny sposób pokazuje zależność pomiędzy ryzykiem braku dostawy wody a liczbą źródeł zasilania w powiązaniu z ich wydajnością. W ten sposób wskazuje również na stopień dywersyfikacji źródeł a co za tym idzie bezpieczeństwo dostawy wody dla miasta.

- Przedstawiony w pracy przykład aplikacyjny oparty na badaniach eksploatacyjnych autorów dla rzeczywistego systemu wodociągowego stanowi fragment analizy ryzyka dla ujęcia wody analizowanego systemu, w aspekcie ilościowej analizy ryzyka braku dostawy wody dla miasta. Badania wykazały, że w tym aspekcie ryzyko jest na poziomie tolerowanym, co świadczy o wystarczającym stopniu dywersyfikacji źródeł wody dla miasta.
- Zaprezentowana metoda powinna być częścią analiz ryzyka dla ujęć wody jak również w opracowaniu planów bezpieczeństwa wody (PBW), rekomendowanych w Ramowej Dyrektywie Wodnej.

## 6. Literatura

1. Ezell B., Farr J., Wiese I.: Infrastructure risk analysis of municipal water distribution system. *Journal of Infrastructure Systems*, ASCE, 6(3), 2000.
2. Haimes Y.Y.: Risk Modelling, Assessment and Management, Wiley, New York 1998.
3. Jaźwiński J., Szpytko J.: Zasady wyznaczania zespołu ekspertów w badaniach niezawodności i bezpieczeństwa urządzeń technicznych. *Mat. XXXIV Zimowej Szkoły Niezawodności PAN „Niekonwencjonalne metody oceny trwałości i niezawodności”*, Wyd. Wydziału Transportu Politechniki Warszawskiej, Szczyrk 2006.
4. Młyńczak M.: *Metodyka badań eksploatacyjnych. obiektów mechanicznych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2012.
5. Kwietniewski M., Roman M.: Reliability assessment of water supply systems. *Journal of Water Supply Research and Technology, AQUA*, 46(5), 1997.
6. Pietrucha-Urbanik K., Rak J., Tchórzewska-Cieślak B.: Safety analysis of water supply systems including protection barriers. *Journal of Polish Safety and Reliability Association, Summer Safety and Reliability Seminars*, 3(2), 2013.
7. Pilch R., Szybka J., Tuszyńska A.: Zastosowanie metod faktoryzacji oraz symulacji czasowo-przestrzennej do oceny niezawodności sieci wodociągowych. *Eksplatacja i Niezawodność*, vol. 16, iss. 2, 2014.
8. Rak J.R.: *Bezpieczeństwo systemów zaopatrzenia w wodę*. Polska Akademia Nauk, Instytut Badań Systemowych, Warszawa 2009.
9. Rak J., Tchórzewska-Cieślak B.: Review of matrix methods for risk assessment in water supply system. *Journal of Konbin*, vol. 1(1), 2006.

10. Rak J.R.: Niezawodność systemu uzdatniania wód powierzchniowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Inżynieria Środowiska, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, z. 20, Rzeszów 1993.
11. Szpak D., Tchórzewska-Cieślak B.: Źródła zdarzeń incydentalnych w systemie zbiorowego zaopatrzenia w wodę. *Journal of Konbin*, 3(35), 2015. DOI 10.1515/jok-2015-0046.
12. Tchórzewska-Cieślak B.: Metody analizy i oceny ryzyka awarii podsystemu dystrybucji wody. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2011.
13. Tchórzewska-Cieślak B.: Wieloaspektowa analiza bezpieczeństwa w eksploatacji systemów wodociągowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2018.
14. Tchórzewska-Cieślak B.: Security management of water supply. *Journal of Konbin*, Vol. 41, 2017, DOI 10.1515/jok-2017-0009.
15. Tchórzewska-Cieślak B., Boryczko K., Piegoń I.: Possibilistic risk analysis of failure in water supply network. *Safety and reliability: methodology and applications: proceedings of The European Safety and Reliability Conference, Esrel 2014*, Wrocław, Poland, CRC PRESS/BALKEMA.