

# Paradygmaty analizy i oceny ryzyka w systemach wodociągowych

## Paradigms of risk analysis and assessment in water supply systems

JANUSZ RAK, BARBARA TCHÓRZEWSKA-CIEŚLAK, DAWID SZPAK

DOI 10.36119/15.2019.10.8

W pracy przedstawiono główne definicje związane z bezpieczeństwem systemów zbiorowego zaopatrzenia w wodę (SZZW). Miarą utraty bezpieczeństwa jest ryzyko związane z funkcjonowaniem SZZW. Według podstawowej definicji ryzyko określane jest jako trójelementowy zbiór prawdopodobieństwa zajścia zdarzeń niepożądanych, konsekwencji tych zdarzeń oraz scenariusza zajścia zdarzeń niepożądanych. Obecnie coraz powszechniej stosowana jest rozbudowana definicja ryzyka, w której wprowadza się dodatkowo tzw. parametr ochrony (O), jako odwrotnie proporcjonalny do wielkości ryzyka, lub zamiennie parametr podatności na zagrożenie (V). W pracy scharakteryzowano proces zarządzania ryzykiem oraz wskazano korzyści płynące z zarządzania SZZW opartego na zarządzaniu ryzykiem. Przedstawiono fazy cyklu zarządzania ryzykiem, który przebiega w następujących etapach: projektowanie, wykonawstwo oraz eksploatacja.

Słowa kluczowe: ryzyko, zaopatrzenie w wodę, plan bezpieczeństwa wodnego

*The paper presents the main definitions related to the collective water supply systems (CWSS) safety. The measure of loss of safety is the risk associated with the functioning of SZZW. According to the basic definition, risk is defined as a three-element set of probabilities of adverse events occurrence, consequences of these events and a scenario of adverse events occurrence. The risk linked to the CWSS functioning is a measure of safety loss. According to the basic definition, risk is defined as a set of three elements: probability of undesirable events, the consequences of these events and the scenario of adverse events. Currently, an expanded definition of risk is being used increasingly, in which the protection parameter (O) is taken into account, as inversely proportional to the risk value, or alternatively, the vulnerability parameter (V). The work characterizes the risk management process and shows the benefits of CWSS managing based on risk management. The phases of the risk management cycle were presented, which take place in the following stages: design, construction and operation.*

Keywords: risk, water supply, water safety plan

### Wprowadzenie

Pojęcie bezpieczeństwa (ang. *safety*) systemu zbiorowego zaopatrzenia w wodę (SZZW) odnosi się do zdolności systemu do bezpiecznego wykonywania swoich funkcji w danym środowisku, zdolności do unikania zagrożeń i narażeń oraz minimalizacji ewentualnych strat z nimi związanych. Bezpieczeństwo SZZW można scharakteryzować za pomocą następujących cech systemu [2, 3, 21, 24-26, 29]:

- ochraniałość – cechy systemu opisujące jego przysposobienie do ochrony operatora i użytkowników (konsumentów wody) przed skutkami zewnętrznych i wewnętrznych narażeń, obejmującej system ostrzegawczo-monitorujący-blokujący uniemożliwiający działanie systemu w stanie zagrożenia dla jego użytkowników;
- podatność na zagrożenie (ang. *vulnerability*) to cecha systemu opisująca jego przysposobienie do unikania zagrożeń. Do głównych składowych podatności zalicza się:

- ekspozycję czyli narażenie (ang. *exposure*),
- wrażliwość (ang. *sensitivity, susceptibility*),
- zdolność radzenia sobie i adaptacji (ang. *coping, adaptive capacity, capacity*),
- elastyczność czyli sprężystość (ang. *resilience*),
- odporność (ang. *resistance*),
- nieszkodliwość (ang. *harmlessness*) – cecha systemu opisująca jego przysposobienie do ograniczania szkodliwego oddziaływania systemu na środowisko naturalne;
- funkcjonalność (ang. *functionality*) to cecha systemu opisująca jego prawidłowość zaprojektowania, w celu przysposobienia do wykonywania określonych zadań w normalnych i ekstremalnych (kryzysowych) warunkach użytkowania, obejmuje również kompatybilność czyli zdolność dostosowania do wymagań odbiorców oraz sterowność jako zdolność do sprawnego i ekonomicznego użytkowania.

Bezpieczeństwo może być zdefiniowane w ujęciu opisowym jako stan lub właściwość obiektu, systemu, charakteryzująca jego zdolność do przeciwstawiania się wypadkom [8, 19]. W pracy [11] zostało zdefiniowane pojęcie ryzyka w systemach technicznych. Można powiedzieć, że od tej pory paradygmatem w analizach funkcjonowania systemów technicznych pod kątem utraty bezpieczeństwa przyjęto za jego miarę ryzyko.

Pierwotnie ryzyko definiowane było jako trójelementowy zbiór prawdopodobieństwa zajścia zdarzeń niepożądanych, konsekwencji tych zdarzeń oraz scenariusza zajścia zdarzeń niepożądanych [5, 11]. Obecnie stosowana jest rozbudowana definicja ryzyka, w której wprowadza się dodatkowo tzw. parametr ochrony (O), jako odwrotnie proporcjonalny do wielkości ryzyka [20], lub zamiennie parametr podatności na zagrożenie (V) [21, 29].

Podatność na zagrożenie jest związana z [17, 29]:

- niezawodnością działania poszczególnych obiektów;

- efektywnością usuwania awarii;
- strukturą połączeń poszczególnych elementów sieci wodociągowej i urządzeń oraz metody rezerwowania;
- mobilnością technologii uzdatniania wody, a nawet okresowego wprowadzania alternatywnych jej wariantów;
- liczbą źródeł dostawy wody (np.: ujęcia wód powierzchniowych i podziemnych).

Ochrona (ang. *protection, security*) wiąże się z [14, 17]:

- monitoringiem jakości wody i sposobami reagowania na złą jej jakość, np.: wczesne ostrzeżenie – (stacje osłonowe ujęć wody);
- strefami ochrony ujęć wody;
- monitorowaniem i zarządzaniem parametrami hydraulicznymi pracy sieci wodociągowych;
- dysponowaniem objętością asekuracyjną w sieciowych zbiornikach wody czystej;
- alternatywnymi sposobami zaopatrzenia w wodę do spożycia w sytuacjach kryzysowych;
- profesjonalnym zarządzaniem ryzykiem.

Ryzyko ekologiczne może być określane za pomocą prawdopodobieństwa wystąpienia negatywnych skutków w ekosystemie. Ważną fazą w tym względzie jest oszacowanie czasu jaki jest potrzebny, aby ekosystem powrócił do równowagi po wyeliminowaniu czynnika szkodliwego [18, 29].

Ryzyko zagrożenia zdrowia człowieka może być określone za pomocą prawdopodobieństwa wystąpienia stanu utraty zdrowia lub życia [10, 18]. W tym aspekcie definiuje się tzw. ryzyko zdrowotne, dla którego standardy definiuje szczegółowo WHO [35]. W kontekście wody przeznaczonej do spożycia związane jest z zanieczyszczeniem wody czynnikami mikrobiologicznymi, chemicznymi i radiochemicznymi z uwzględnieniem wszystkich możliwych ścieżek narażenia konsumentów wody (w tym możliwość ataku terrorystycznego z użyciem broni biologicznej lub chemicznej na SZZW) [4, 9, 27, 28].

Ryzyko jakości życia jest definiowane odmiennie. Negatywny wpływ różnych czynników w tym względzie mierzony jest kosztami ekonomicznymi (koszty leczenia, koszty związane ze złą jakością produkcji – obniżenie dochodów w przypadku złej jakości wody np. przemysł spożywczy, koszty związane z przerwami dostawy gazu np. zakłady przemysłowe posiadające kotłownie gazowe) [18].

Ryzyko w działalności gospodarczej można zdefiniować jako prawdopodobieństwo wystąpienia strat finansowych w wyniku zajścia pewnych zdarzeń niepożądanych np. brak dostawy wody potrzebnej do produkcji, przerwy w dostawie gazu, prądu czy ciepła w wyniku czego występują przerwy produkcyjne, lub w wyniku podjęcia nieprawidłowej decyzji np. rozpoczęcie inwestycji, która później okazuje się niedochodowa [18].

## Zarządzanie ryzykiem w firmie wodociągowej

Analiza i ocena ryzyka w SZZW jest zagadnieniem złożonym, obejmującym swym zakresem analizę potencjalnych zagrożeń i ich skutków oraz tzw. systemów (barier) bezpieczeństwa. Analizę prowadzi się przede wszystkim pod kątem bezpieczeństwa zdrowotnego konsumentów wody, ale również zagrożeń wynikających z braku lub deficytu dostaw, a także zagrożeń dla środowiska [1]. Proces ten powinien zawierać elementy analizy stanu istniejącego, jak również możliwych potencjalnych zagrożeń oraz procedur zabezpieczających i naprawczych. Analiza ryzyka jest prowadzona w celu jego określenia poprzez estymację prawdopodobieństwa zajścia zdarzeń niepożądanych i ich skutków. W analizie ryzyka powinno się wykorzystywać historyczną wiedzę z eksploatacji danego systemu, metody analityczne i doświadczenie. W wielu przypadkach częścią analizy ryzyka jest analiza czynnika ludzkiego i analiza niezawodności człowieka – dyspozytora systemu [29].

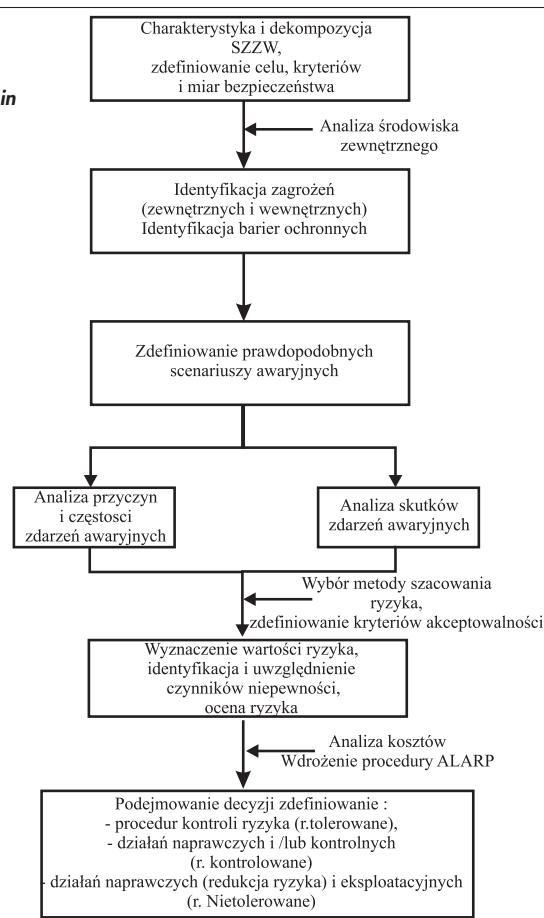
Celem analizy ryzyka jest wyznaczenie jego wartości z wykorzystaniem odpowiedniej metody. Wybór metody zależy przede wszystkim od celu analizy ryzyka, stopnia szczegółowości oraz liczebności danych z eksploatacji systemu. Niejednokrotnie dane pozyskuje się od ekspertów, stąd w analizach ryzyka konieczna jest również wiedza na temat systemów ekspertowych, a niejednokrotnie metod posybilistycznych. Przystępując do analizy

i oceny ryzyka należy poznać jego „naturę” oraz podstawowe jego własności.

Ocena ryzyka to porównanie wyznaczonych wartości z kryteriami akceptowalności ryzyka, co jest podstawą do analizy bezpieczeństwa. Na tym etapie bardzo istotne jest określenie kryteriów akceptowalności ryzyka, tak aby można je było wykorzystać w procesie podejmowania decyzji dotyczących eksploatacji systemu (np. prac remontowych czy modernizacji). Kryteria takie powinny uwzględniać wymogi związane z niezawodnością funkcjonowania systemu (zarówno pod względem ilościowym, jak i jakościowym, zgodnie z obowiązującymi unormowaniami prawnymi oraz uwarunkowaniami społecznymi i ekonomicznymi), a także aspekt ekonomiczny [15, 18, 29].

Przyjmując, że ryzyko jest miarą utraty bezpieczeństwa SZZW, zarządzanie bezpieczeństwem w firmie wodociągowej można zdefiniować jako techniczno-społeczno-ekonomiczny proces podejmowania decyzji, w celu redukcji zdefiniowanych ryzyk. Obowiązuje zasada, że nie da się wyeliminować ryzyka. Można jedynie podejmować różnego rodzaju działania, mające na celu 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) [18, 29]. Podstawowe etapy zarządzania bezpieczeństwem SZZW z uwzględnieniem zasad zarządzania ryzykiem przedstawiono poglądowo na rys. 1.

Rys. 1. Etapy zarządzania ryzykiem w SZZW [29]  
Fig. 1. Stages of risk management in CWSS [29]



W Rozporządzeniu Ministra Zdrowia w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia z 2017 roku [36], wprowadzono pojęcie oceny ryzyka jako proces polegający na identyfikacji zagrożeń i analizie ryzyka przeprowadzony na podstawie obowiązującej w czasie dokonywania tej oceny normy PN-EN 15975-2 Bezpieczeństwo zaopatrzenia w wodę do spożycia – Wytyczne dotyczące zarządzania kryzysowego i ryzyka – Część 2: Zarządzanie ryzykiem. W ocenie ryzyka uwzględnia się badania i oceny stanu wód powierzchniowych, stanu wód podziemnych oraz obszarów chronionych dokonane w ramach państwowego monitoringu środowiska. Ocena ryzyka powinna uzyskać zatwierdzenie przez właściwy organ nadzoru Państwowego Inspektora Sanitarnego w zakresie bezpieczeństwa konsumentów wody. Ocena ryzyka powinna podlegać stałej aktualizacji z uwzględnieniem aspektów ekonomicznych i środowiskowych.

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. Celem ewaluacji jest podjęcie decyzji, czy ryzyko mieści się w granicach toleralnych lub czy należy je zredukować przy pomocy trzech kroków [18]:

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

Warianty podejścia do analizy ryzyka [29, 30]:

- podejście podstawowe – zakłada wprowadzenie standardowych procedur zabezpieczających, bez względu na wynik analizy ryzyka;
- podejście nieformalne – zakłada wykorzystanie wiedzy ekspertów w celu zabezpieczenia tych elementów systemu, które są narażone na wysokie ryzyko;
- szczegółowa analiza ryzyka – zawiera identyfikację ryzyka, oszacowanie zagrożeń, ich przyczyn, prawdopodobnych skutków oraz podatności na zagro-

żenie w odniesieniu do wszystkich elementów systemu:

- podejście mieszane – w zależności od stopnia złożoności systemu wykorzystuje jedną lub więcej z wymienionych wcześniej metod.

W analizie kosztów redukcji ryzyka można zastosować następujące wskaźniki [2]:

- założony koszt zapobiegania zdarzeniom niepożądanym (ICAF – ang. *Implied Cost of Averting a Fatality*):

$$ICAF = \frac{\Delta Cost}{\Delta r} \quad (1)$$

gdzie:

$\Delta Cost$  – koszt ochrony, przeciwdziałanie zdarzeniom niepożądanym,

Stopień redukcji ryzyka:

$$\Delta r = r_p - r_k \quad (2)$$

gdzie:

$r_p$  – początkowa wartość ryzyka,

$r_k$  – wartość ryzyka po wprowadzeniu dodatkowych działań ochronnych, zapobiegawczych.

- wskaźnik zwany kosztem redukcji jednostki ryzyka (CURR – ang. *Cost of Unit Risk Reduction*) [2]:

$$ICAF = \frac{\Delta Cost - \Delta EB}{\Delta r} \quad (3)$$

gdzie:

$\Delta EB$  (ang. *Economic Benefits*) – zysk związany z redukcją ryzyka.

Analizę i ocenę bezpieczeństwa SZZW wykonuje się wg następującego algorytmu postępowania [5, 28]:

- rozpoznanie systemu (budowa, działanie, eksploatacja),
- identyfikacja celu, zakresu i stopnia szczegółowości wykonywanej analizy,
- identyfikacja zagrożeń,
- oszacowanie jakościowe zagrożeń (stopień ciężkości, uciążliwości),
- klasyfikacja zagrożeń ze względu na stopień uciążliwości,
- wytypowanie zagrożeń mających wpływ na utratę bezpieczeństwa systemu,
- wytypowanie zagrożeń krytycznych,
- wytypowanie awarii (zdarzeń niepożądanych) mogących spowodować efekt domina (tzw.uszkodzenia kaskadowe),
- oszacowanie możliwych strat dla każdej grupy zagrożeń,
- oszacowanie prawdopodobieństwa przekroczenia określonej wartości strat granicznych  $P(C > C_{gr})$ ,
- oszacowanie prawdopodobieństwa zajścia zdarzeń niepożądanych,
- identyfikacja barier bezpieczeństwa,
- oszacowanie podatności systemu na zagrożenia,
- określenie liczby mieszkańców korzystających z SZZW,

- wyznaczenie funkcji ryzyka wraz z charakterystyką jego parametrów,
- ocena wartości ryzyka, w przyjętej skali trój lub pięciostopniowej (ryzyko tolerowane, kontrolowane, nieakceptowane),
- ocena poniesionych kosztów,
- opracowanie planów reagowania w sytuacji kryzysowej,
- podejmowanie decyzji odnośnie do konieczności wprowadzenia działań naprawczych,
- wyznaczenie strategicznych „kamieni milowych” odnośnie do przyszłych celów modernizacji, rozbudowy SZZW, w celu zapewnienia bezpieczeństwa dostawy wody.

Identyfikacja zagrożeń jest zwykle wykonywana za pomocą metod eksperckich. Do najważniejszych metod szczegółowych analizy zagrożeń należą [7, 18, 21, 28]:

- HAZID – analiza zagrożeń (ang. *Hazard Identification*), jest to pierwszy etap analizy zagrożeń oraz możliwych konsekwencji, który często jest wstępem do analizy ryzyka w systemach technicznych,
- HAZOP – analiza zagrożeń i zdolności działania (ang. *Hazard and Operability Analysis*), jest to analiza wykonywana przez zespoły ekspertów pod kierownictwem lidera. Przeprowadza się ją za pomocą listy słów kluczowych i stosuje przede wszystkim w analizie bezpieczeństwa dużych systemów przemysłowych,
- FMEA – analiza rodzajów uszkodzeń i ich skutków (ang. *Failure Modes and Effect Analysis*), jest to metoda stosowana do analizy bezpieczeństwa systemów i instalacji technicznych. Bazuje na analizie niezawodności poszczególnych komponentów systemu,
- SWIFT – burza mózgów (ang. *Structured What-If Checklist Technique*), jest to sesja przeprowadzana przez zespół ekspertów. Podstawowe pytania zadawane podczas burzy mózgów to: „Co jeśli?”, „Jak to możliwe?” i „Czy to możliwe?”. W odpowiedzi na nie uzyskiwane są informacje dotyczące rodzajów zagrożeń i potencjalnych scenariuszy wypadków,
- ID – diagramy wpływu (ang. *Influence Diagram*), jest to metoda służąca do określania zależności statystycznych pomiędzy skutkami i przyczynami,
- HE – szacowanie zagrożeń (ang. *Hazard Evaluation*),
- HRA – analizy błędów ludzkich (ang. *Human Reliability Analysis*),
- CL – analizy list kontrolnych (ang. *Checklist Analysis*),
- PHA – metoda wstępnej analizy zagrożeń (ang. *Preliminary Hazard Analysis*),

- WI – analiza “co – jeśli” (ang. “What-if” Analysis);
- WI|CL – “Co jeśli” | Listy Kontrolne. Analiza zagrożeń wykonywana jest w oparciu o bazy danych i bazy wiedzy [23, 28]:
  - z poprzednich analiz bezpieczeństwa,
  - z wniosków z zaistniałych zdarzeń niepożądanych i ich przyczyn,
  - z doświadczeń ekspertów z eksploatacji istniejących systemów wodociagowych,
  - modeli symulacyjnych.
 Metody analizy ryzyka dzieli się na [6, 22, 28, 29]:
  - probabilistyczne metody analizy ryzyka zaliczane do metod ilościowych (ang. quantitative methods for risk analysis – QRA lub probabilistic risk analysis – PRA), które przetwarzają dane ilościowe (mieralne) i wyznaczają konkretną wartość ryzyka. Do tych metod zalicza się metody oparte na statystyce matematycznej oraz rachunku prawdopodobieństwa,
  - jakościowe metody oceny (szacowania) ryzyka (ang. qualitative methods of risk analysis – QLRA), w odróżnieniu od metod ilościowych nie uwzględniają one liczbowego wyznaczania ryzyka z wykorzystaniem metod probabilistycznych (np. rozkładów gęstości), np. FMEA – Failure mode and effects analysis | FMECA – Failure mode, effects and criticality analysis – FMEA to metoda analityczna dotycząca rodzajów i skutków możliwych błędów,
  - metody ilościowo-jakościowe analizy ryzyka (ang. quantitative-qualitative methods for risk analysis), do których zalicza się m.in.:
    - metody matrycowe (dwa lub wieloparametryczne),
    - metodę drzewa uszkodzeń (ang. Fault Tree Analysis – FTA),
    - metodę drzewa zdarzeń (ang. Event Tree Analysis – ETA),
    - metody z wykorzystaniem procesów markowa i semi – markowa (markov risk analysis – MRA),
    - metody posybilistyczne (possibilistic risk analysis – PRA),
    - metody z wykorzystaniem sieci Bayesa (Bayes risk analysis – BRA),
    - rozmytą analizę ryzyka (fuzzy risk analysis – FRA),
    - neuronowo – rozmytą analizę ryzyka (neuro – fuzzy risk analysis),
  - metody symulacyjne z zastosowaniem komputerowych modeli hydraulicznych oraz systemów sterowania, przetwarzania i rejestracji danych (np. typu SCADA), komputerowych baz danych np. typu GIS (ang. Geographic Information System), a także symulację metodą Monte Carlo, jak również algorytmy genetyczne. Sta-

nowią one narzędzie wspomagające proces analizy ryzyka.

W analizach ryzyka wykorzystuje się różnego rodzaju narzędzia informatyczne między innymi, takie jak [32, 34]:

- programy do symulacji komputerowych (np. bazujące na modelach hydraulicznych sieci wodociągowej jak EPANET, ISYDYW),
- programy umożliwiające analizę różnych scenariuszy awaryjnych np. oparte na analizach drzew zdarzeń, niezdatności, związkach przyczynowo – skutkowych powstawania zagrożeń oraz na zarządzaniu i raportowaniu danych (XFMEA 4, BlockSim 7, RCM++4, Javabayes),
- programy umożliwiające analizę rozkładów prawdopodobieństwa zdarzeń awaryjnych (np. Weibull++, STATISTICA),
- programy do statystycznej analizy danych (np. STATISTICA),
- programy dające możliwość prognozowania zdarzeń niepożądanych oraz ryzyka (np. MATLAB, RENO),
- programy umożliwiające wizualizację opracowanych modeli zdarzeń awaryjnych (np. SCADA (ang. Supervisory Control And Data Acquisition), GIS [16, 31].

### Fazy cyklu zarządzania ryzykiem

Proces analizy i oceny ryzyka SZZW przebiega w następujących fazach [28]: projektowanie, wykonawstwo i eksploatacja.

#### Projektowanie

Etap ten powinien uwzględniać następujące czynniki zwiększające bezpieczeństwo:

- profesjonalne zarządzanie projektem SZZW;
- wybór najlepszych dostępnych technologii i urządzeń do uzdatniania wody (BAT);
- pierścieniowa konfiguracja sieci wodociągowej;
- objętość awaryjna w zbiornikach wody czystej;

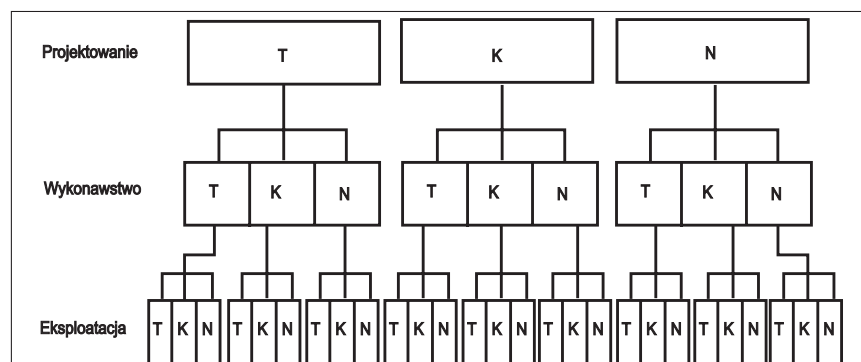
- monitoring i automatyczna regulacja pracy SZZW;
- zasilanie co najmniej z dwóch niezależnych źródeł (dywersyfikacja dostawy wody);
- stabilizacja ciśnienia roboczego sieci i przepompowni strefowych;
- stosowanie zaworów antyzażeniowych uniemożliwiających przepływy wsteczne;
- zaprojektowanie systemu zarządzania pracą całego SZZW z wykorzystaniem systemów SCADA i GIS.

#### Wykonawstwo

Czynniki zwiększające bezpieczeństwo to przede wszystkim realizacja inwestycji z zachowaniem zasad systemu jakości ISO w zakresie dostaw urządzeń i materiałów, jakości połączeń rurociągów i armatury, profesjonalnych procedur nadzoru i odbioru. Bardzo istotne jest również prowadzenie prac budowlanych z wykorzystaniem aktualnych planów uzbrojenia podziemnego z zachowaniem szczególnej ostrożności na terenach gęstej infrastruktury nad i podziemnej jak również zastosowanie materiałów, urządzeń oraz instalacji procesowych posiadających odpowiednie atesty m. innymi PZH czy UDT.

#### Eksploatacja

Operator SZZW i podległe mu służby powinny bezwzględnie przestrzegać wytycznych eksploatacji, które gwarantują niezawodne funkcjonowanie systemu. Szczególną uwagę w procesie eksploatacji należy zwrócić na możliwość wtórnego zanieczyszczenia wody w podsystemie dystrybucji [13, 33]. Należy wprowadzać metody zarządzania ryzykiem, które obejmują: identyfikację ryzyka, klasyfikację i jego ocenę, planowanie metod reagowania i przeciwdziałania na wypadek realizacji ryzyka. Eksploatacja SZZW powinna opierać się na bieżącej kontroli i monitoringu z wykorzystaniem nowoczesnych technik modelowania, prognozowania i symulacji uszkodzeń, a także metod



Rys. 2. Schemat analizy jakościowej ryzyka zintegrowanego (na podstawie pracy [28]); T – ryzyko tolerowane, K – ryzyko kontrolowane, N – ryzyko nieakceptowane  
Fig. 2. Diagram of qualitative analysis of integrated risk (based on [28]); T – tolerated risk, K – controlled risk, N – unacceptable risk

wizualizacji i nadzoru [12, 29]. Podmioty odpowiedzialne za eksploatację SZZW powinny posiadać wdrożone WSP z uwzględnieniem procedur szybkiego reagowania na wypadek sytuacji kryzysowej, w szczególności zaopatrzenie ludności w wodę z alternatywnych źródeł (studnie awaryjne, beczkowozu czy wodoerki) oraz możliwość szybkiej dodatkowej dezynfekcji wody. Plany takie powinny uwzględniać tzw. odbiorców priorytetowych takich, jak: szpitale, domy opieki.

Zintegrowane ryzyko jest wynikiem analizy ryzyka na etapie projektowania  $r_p$ , wykonawstwa  $r_w$  i eksploatacji  $r_e$  [28]. Na rysunku 2 przedstawiono schemat postępowania w jakościowej analizie ryzyka zintegrowanego na poszczególnych etapach cyklu życia SZZW, a w tab. 1 macierz ryzyka zintegrowanego.

**Tab. 1. Macierz ryzyka zintegrowanego**  
**Tab. 1. Integrated risk matrix**

|     |     | $r_z$ |     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| TTT | TKT | TNT   | KTT | KKT | KNT | NTT | NKT | NNT |
| TTK | TKK | TNK   | KTk | KKK | KNK | NTK | NKK | NNK |
| TTN | TKN | TNN   | KTN | KKN | KNN | NTN | NKN | NNN |

Poszczególne kategorie ryzyka zintegrowanego przedstawiają się następująco:

|                          |
|--------------------------|
| – ryzyko tolerowane      |
| – ryzyko kontrolowane    |
| – ryzyko nieakceptowalne |

## Podsumowanie

Podejście oparte na prewencji zagrożeń znacząco ogranicza prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzeń awaryjnych oraz pozwala na minimalizację zagrożeń zdrowotnych dla konsumentów wody i przygotowanie przedsiębiorstwa wodociągowego do odpowiedniej reakcji po wystąpieniu sytuacji kryzysowej. W pracy scharakteryzowano fazy cyklu zarządzania ryzykiem, które powinno być wieloaspektowe i wpisane w codzienne funkcjonowanie SZZW. Funkcjonowanie SZZW oparte na zarządzaniu ryzykiem pozwala na hierarchizację potencjalnych zagrożeń, opracowanie planów modernizacji systemu oraz weryfikację skuteczności prowadzonych działań.

Zarządzanie ryzykiem w systemach wodociągowych (od ujęcia aż do konsumenta) jest zgodne z aktualnymi standardami dotyczącymi bezpieczeństwa wody przeznaczonej do spożycia opracowanymi przez Światową Organizację Zdrowia i Unię Europejską. Niniejsza publikacja jest szczególnie istotna dla przedsiębiorstw wodociągowych, które planują wdrożenie planów bezpieczeństwa wodnego (PBW). Ankiety przeprowadzone wśród przedsiębiorstw wodociągowych przez Izbę Gospodarczą „Wodociągi Polskie” w 2018 roku wskazują, że istnieje

spore zainteresowanie PBW, barierą jest jednak brak wiedzy związanej z tworzeniem systemów zarządzania ryzykiem.

## LITERATURA

- [1] Aven T.: Conceptual framework for risk assessment and risk management, Summer Safety & Reliability Seminars (Journal of Polish Safety and Reliability Association), 2010, 1, s. 15-27.
- [2] Brandowski A.: Projektowanie bezpiecznej siłowni okretowej, Materiały XXIV międzynarodowego Sympozjum Siłowni Okretowych. 2003. 85-94.
- [3] Bukowski L.A., Majewski K.: Uogólniona teoria niezawodności – cele, możliwość, koncepcje, Mat. XXXIV Zimowej Szkoły Niezawodności PAN, Wyd. Wydziału Transportu Politechniki Warszawskiej, Szczyrk, 2006, 68-78.
- [4] Croddy E., Perez-Armenariz C., Hart J., Broń chemiczna i biologiczna, WNT, Warszawa, 2003.
- [5] Haines Y.Y.: Risk Modelling, Assessment and Management, Wiley, New York, 1998.
- [6] Hart K.M., Hart R.F., Quantitative methods for quality improvement, Milwaukee, WI: ASQC Quality Press, 1989.
- [7] Iwanejko R., Lubowiecka T.: Analiza ryzyka w systemie zaopatrzenia w wodę – studium zagrożeń. Czasopismo Techniczne, Wyd. Politechniki Krakowskiej, 9/2005, 153-168.
- [8] Jazwiński J., Ważyńska-Fiok K.: Bezpieczeństwo systemów, PWN, Warszawa, 1993.
- [9] Jelonek G., Bezpieczeństwo wody a terroryzm, Wodociągi – Kanalizacja, 3(157)/2017, 14-16.
- [10] Kaczmarek T.T.: Ryzyko i zarządzanie ryzykiem. Ujęcie interdyscyplinarne, Wyd. Wyższej Szkoły Zarządzania i Marketingu, Warszawa, 2005.
- [11] Kaplan S., Garrick B.J.: On the quantitative definition of risk, Risk Analysis, 1981, 1(1), s. 11-27.
- [12] Kulbik M.: Komputerowa symulacja i badania terenowe miejskich systemów wodociągowych. Wyd. Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 2004.
- [13] Łomotowski J.: Przyczyny zmian jakości wody w systemach wodociągowych, PAN, Warszawa, 2007.
- [14] Mays L.W.: Water Supply Systems Security, McGraw-Hill Professional Engineering, Texas, 2004.
- [15] Miłaszewski R. Ekonomia ochrony wód powierzchniowych. Wydaw. Ekonomia i Środowisko. 2003
- [16] Piegdoń I., Tchórzewska-Cieślak B., Szpak D.: The use of geographical information system in the analysis of risk of failure of water supply network. Environmental Engineering V, TAYLOR & FRANCIS GROUP, s.7-14, Londyn, 2016.
- [17] Rak J.R.: Bezpieczeństwo systemów zaopatrzenia w wodę, Polska Akademia Nauk, Instytut Badań Systemowych, Warszawa, 2009.
- [18] Rak J.R.: Problematyka ryzyka w wodociągach, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 2014.
- [19] Rak J.R., Kwietniewski M.: Bezpieczeństwo i zagrożenia systemów zbiorowego zaopatrzenia w wodę, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 2011.
- [20] Rak J.R., Tchórzewska-Cieślak B.: Metody analizy i oceny ryzyka w systemie zaopatrzenia w wodę, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 2005.
- [21] Rak J.R., Tchórzewska-Cieślak B.: Ryzyko w eksploatacji systemów zbiorowego zaopatrzenia w wodę, Wyd. Seidel-Przywecki Sp. z o.o., Rzeszów, 2013.
- [22] Rak J.R., Tchórzewska-Cieślak B., Żywiec J.: Nowy segment estymatorów wskaźników niezawodności operatora system wodociągowego. Instal, 4/2019, 40-43.
- [23] Rogers J.W., Garrick E., Louis G.E.: Risk and opportunity in upgrading the US drinking water infrastructure system, Journal of Environmental Management, 2008, 87, s. 26-36.
- [24] Smalko Z.: Charakterystyki spolegliwości układu człowiek – maszyna – otoczenie, Materiały Szkoły Niezawodności, PAN, 2007, 432-439.
- [25] Szopa T.: Bezpieczeństwo a niezawodność systemu, Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, PAN, 3, 4(71, 72), 1987, s. 297-308.
- [26] Szymanek A.: Bezpieczeństwo i ryzyko w technice, Wyd. Politechniki Radomskiej, Radom, 2006.
- [27] Świątczak J., Skotak K., Bratkowski J., Witczak S., Postawa A.: Metale i substancje towarzyszące w wodach przeznaczonych do spożycia w Polsce, Mat. konf. „Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód”, Wyd. PZiTS O/Wielkopolski, Poznań 2008, 1, s. 289-301.
- [28] Tchórzewska – Cieślak B.: Metody analizy i oceny ryzyka awarii podsystemu dystrybucji wody, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 2011.
- [29] Tchórzewska-Cieślak B.: Wieloaspektowa analiza bezpieczeństwa w eksploatacji systemów wodociągowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2018.
- [30] Tchórzewska-Cieślak B., Rak J.: Funkcja ryzyka jako miara utraty bezpieczeństwa systemów zbiorowego zaopatrzenia w wodę., Technologia Wody. 2017, z.1 (51), s.10-15
- [31] Tchórzewska-Cieślak B., Boryczko K., Piegdoń 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, s.1473-1480
- [32] Urbaniak A., Komputerowe wspomaganie eksploatacji obiektów i procesów w systemach zaopatrzenia w wodę i odprowadzania ścieków, Komitet Inżynierii Łądowej i Wodnej PAN, Warszawa 2016.
- [33] Zamorska J.: Biological Stability of Water after the Biofiltration Process. Journal of Ecological Engineering, 19 (5)/2018, 234-239.
- [34] Zimoch I., Zastosowanie modelowania komputerowego do wspomaganie procesu eksploatacji systemu wodociągowego, Ochrona Środowiska, 30(3)/2008, s. 31-35.
- [35] Guidelines for Drinking-water Quality. Fourth Edition. WHO, Geneva 2011.
- [36] Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 7 grudnia 2017 r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi (Dz. U. 2017 poz. 2294).