

# Ilościowa ocena ryzyka w systemach zbiorowego zaopatrzenia w wodę

Quantitative risk assessment in collective water supply systems

JANUSZ R. RAK

DOI: 10.17512/INSTAL.2026.04.01

Ocena ryzyka stanowi podstawę zarządzania systemami technicznymi w aspekcie bezpieczeństwa. Klasyczna ilościowa definicja ryzyka opiera się na iloczynie prawdopodobieństwa zajścia zdarzenia niepożądanego  $P$  oraz związanych z nim strat  $C$ . Przyjmując, że  $C = 1$  dla zejść śmiertelnych, ryzyko można rozpatrywać w kategoriach prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia niepożądanego. Celem pracy była analiza wartości liczbowych ryzyka z uwzględnieniem miliryzyka ( $mr = 10^{-3}$ ), mikroryzyka ( $\mu r = 10^{-6}$ ) i nanoryzyka ( $nr = 10^{-9}$ ). W pracy odniesiono się do ryzyka zdrowotnego związanego z korzystaniem z wodociągu, z uwzględnieniem zejść śmiertelnych, przewlekłego uszczerbku na zdrowiu oraz dolegliwości gastrycznych. Przedstawiono także wartości ryzyka indywidualnego i grupowego. Praca ma charakter przeglądowy i obejmuje standardy w ilościowym zakresie oceny ryzyka związanego z zaopatrzeniem w wodę przeznaczoną do spożycia przez ludzi. Analiza ryzyka zdrowotnego może zostać wykorzystana podczas realizacji Planu Bezpieczeństwa Wody.

Słowa kluczowe: miliryzyka, mikroryzyka, nanoryzyka, ryzyko zdrowotne, zaopatrzenie w wodę

Risk assessment is the basis for managing technical systems from a safety perspective. The classical quantitative definition of risk is based on the probability of an undesirable event  $P$  multiplied by the associated losses  $C$ . Assuming  $C = 1$  for fatalities, risk can be expressed as the probability of an undesirable event occurring. The aim of the study was to analyze the numerical values of risk, taking into account milli-risk ( $mr = 10^{-3}$ ), micro-risk ( $\mu r = 10^{-6}$ ), and nano-risk ( $nr = 10^{-9}$ ). The health risk associated with water supply use is addressed, including fatalities, chronic health impairment, and gastrointestinal complaints. Values for both individual and group risk are also presented. This paper is a review and covers standards for quantitative risk assessment related to water intended for human consumption. Health risk analysis can be used during the implementation of the Water Safety Plan.

Keywords: milli-risk, micro-risk, nano-risk, health risk, water supply

## Wstęp

Pojęcie bezpieczeństwa ma różnorodne interdyscyplinarne znaczenie w terminologii naukowej i technicznej. Według Słownika języka polskiego [1] bezpieczeństwo oznacza stan niezagrożenia, spokoju, pewności, braku narażenia na niebezpieczeństwo; bezpieczny, tzn. niczym niezagrożony, chroniony przed niebezpieczeństwem. Termin ten wywodzi się z teorii niezawodności. Teoria bezpieczeństwa jako nowa dyscyplina nauki odnosi się przede wszystkim do bezpieczeństwa systemów. Nauka o bezpieczeństwie (ang. safety science) ogłoszona została pod koniec XX w. na First World Congress on Safety Science, który odbył się we wrześniu 1990 r. w Kolonii [2]. W latach 60. ubiegłego wieku powstała w USA agencja Technology Assessment (TA), która zajmowała się wpływem nowych wytworów techniki na ludzi i śro-

dowisko, która następnie przekształciła się w Probabilistic Risk Assessment (PRA) [3].

Z utratą bezpieczeństwa wiąże się bezpośrednio pojęcie ryzyka, które ogólnie definiuje się jako możliwość wystąpienia zdarzenia niepożądanego powodującego straty lub szkody. Obecnie niebezpieczeństwo jest identyfikowane z terminem zawodność bezpieczeństwa (ZB). W Wielkiej Brytanii w drugiej połowie lat 70. ubiegłego wieku powstały instytucje Health and Safety Commission zajmujące się rozwojem metod projektowania i eksploatacji systemów oraz obiektów technicznych w aspekcie bezpieczeństwa. Ryzyko i bezpieczeństwo stały się przedmiotem badań naukowych [4] oraz unormowań prawnych także w Polsce [5, 6]. Obecnie analizuje się nie tylko rozmiary awarii, lecz także prawdopodobieństwo ich wystąpienia. Zarządzanie ryzykiem i powiązane z nim środki ograniczające ryzyko w systemach zbiorowego zaopa-

trzenia w wodę (SZZW) są wymagane na mocy Dyrektywy 2020/2184 [7], która jest wprowadzana do polskiego porządku prawnego. Coraz powszechniejsze jest wdrażanie w polskich miastach Planów Bezpieczeństwa Wody (ang. Water Safety Plans) rekomendowanych przez Światową Organizację Zdrowia (ang. World Health Organization, WHO) [8]. Ryzyko można wiązać z zagrożeniami (aspekt negatywny) i szansami (aspekt pozytywny).

W ocenie ryzyka w SZZW wykorzystuje się dwa główne podejścia metodologiczne. Podejście systemowe opiera się na identyfikacji zagrożeń oraz analizie ryzyka w całym łańcuchu zaopatrzenia w wodę, zgodnie z ideą Planów Bezpieczeństwa Wody (PBW). W tym celu najczęściej wykorzystuje się metody matrycowe, a sama analiza ma charakter jakościowo-ilościowy [8]. Drugie podejście opiera się na ilościowej analizie ryzyka zdrowotnego i określeniu wpływu poszczególnych

czynników na wartość ryzyka [9]. Podejście to pozwala na wyznaczenie wartości ryzyka, jednak wymaga szczegółowej i rozległej bazy danych wejściowych. Możliwe jest połączenie podejścia probabilistycznego oraz systemowego poprzez wykorzystanie wyników analizy ryzyka zdrowotnego przy opracowywaniu i wdrażaniu PBW [10].

Badania naukowe w zakresie analizy ryzyka zdrowotnego koncentrują się na prowadzeniu ilościowych analiz w odniesieniu do wpływu obecnych w wodzie patogenów oraz substancji chemicznych na zdrowie ludzi. Wytyczne WHO określają akceptowalny poziom ryzyka zdrowotnego w związku ze spożyciem skażonej wody na  $10^{-6}$  [8, 9]. Podejście QMRA (ang. Quantitative Microbial Risk Assessment) pozwala na szacowanie ryzyka zdrowotnego w oparciu o stężenie patogenów, czas ekspozycji oraz zależność dawka-odpowiedź [11, 12]. Analiza QMRA może być wykorzystana jako narzędzie uzupełniające do priorytetyzacji zagrożeń dla ujęć wody przeznaczonych do spożycia przez ludzi [13]. Przeprowadzony przegląd międzynarodowych publikacji z ostatnich lat potwierdza, że QMRA jest istotnym narzędziem poprawy bezpieczeństwa dostawy wody i identyfikacji źródeł ryzyka [10, 14, 15]. Praca [10] wskazuje, że znaczna większość badanych stacji uzdatniania wody spełnia wymagania dotyczące ryzyka mikrobiologicznego, tj. osiąga wartość ryzyka zdrowotnego poniżej  $10^{-6}$ . Awaryjne technologiczne duże, właściwie zarządzane stacje uzdatniania wody zwykle nie są związane z wysokim ryzykiem zdrowotnym, ze względu na nadmiarowość oraz rozbudowany monitoring. Eksploatacja niewielkich, indywidualnych ujęć wody jest związana z wyższym ryzykiem zdrowotnym niż eksploatacja zbiorowych systemów [15]. Ryzyko zdrowotne wiąże się z obecnością w wodzie patogenów, głównie bakterii wskaźnikowych (*E. coli*) oraz patogenów jeliitowych (*Campylobacter*, *Cryptosporidium*). Zagrożenie mikrobiologiczne jest związane również z niedostateczną zawartością środka dezynfekcyjnego w wodzie oraz możliwością wtórnego zanieczyszczenia wody w sieci wodociągowej. W pracy [16] przedstawiono analizę wpływu wieku wody transportowanej do konsumenta oraz wieku rurociągów na utratę stabilności mikrobiologicznej wody. Obok zagrożeń mikrobiologicznych istotnym czynnikiem ryzyka w SZZW są zagrożenia chemiczne, w tym produkty uboczne dezynfekcji oraz metale ciężkie. W pracy [17] przeprowadzono identyfikację głównych zanieczyszczeń chemicznych, ocenę globalnej jakości wody przeznaczonych do

spożycia przez ludzi oraz ocenę wpływu na zdrowie w oparciu o kompleksowy przegląd literatury. Wskazano, że największe zagrożenie dla konsumentów jest związane z obecnością w wodzie arsenu, głównie w rejonach Azji Południowej, azotanów oraz produktów ubocznych dezynfekcji. Długotrwała ekspozycja na produkty uboczne dezynfekcji jest związana ze zwiększonym ryzykiem zachorowania na raka, na poziomie od  $10^{-6}$  do  $10^{-4}$  [18]. Badany jest również wpływ obecności metali ciężkich w wodzie przeznaczonej do spożycia przez ludzi na ryzyko zdrowotne na obszarach dotkniętych działalnością górniczą [19]. W pracy [20] analizie poddano wpływ stabilności mikrobiologicznej oraz chemicznej na bezpieczeństwo zdrowotne, co pozwoliło na określenie optymalnych warunków eksploatacji sieci wodociągowej. Ograniczeniem stosowania metod analizy ryzyka zdrowotnego jest fakt, że ryzyko mikrobiologiczne i chemiczne szacuje się odmiennymi metodami, z wykorzystaniem różnych modeli ekspozycji, horyzontów czasowych oraz miar skutków zdrowotnych, co utrudnia ich bezpośrednią integrację w systemowej analizie ryzyka. Przeprowadzony przegląd literatury wskazuje, że metody oceny ryzyka zdrowotnego są szeroko wykorzystywane w odniesieniu do zaopatrzenia w wodę przeznaczoną do spożycia przez ludzi oraz mogą zostać wykorzystane podczas realizacji PBW [11]. Wykorzystanie metod analizy ryzyka zdrowotnego pozwala na ilościową ocenę ryzyka, co może być podstawą do identyfikacji słabych punktów SZZW, takich jak strefy stagnacji czy miejsca utraty dezynfektanta, oraz do wskazania i wdrożenia barier ograniczających ryzyko. Kryteria akceptowalności ryzyka określone przez wytyczne WHO ustalono na niskim poziomie  $10^{-6}$ , jednak ich wartości powinny być interpretowane w odniesieniu do specyfiki danego systemu wodociągowego oraz lokalnych warunków środowiskowych i społecznych. Należy podkreślić, że osiągnięcie odpowiedniego poziomu ryzyka nie zwalnia z obowiązku jego dalszej minimalizacji, zgodnie z zasadą ciągłego doskonalenia SZZW.

Głównym celem pracy jest analiza i ocena wartości liczbowych ryzyka zdrowotnego związanego z korzystaniem z SZZW, z uwzględnieniem mili-, mikro- i nanoryzyka, co odpowiada poziomom  $10^{-3}$ ,  $10^{-6}$  i  $10^{-9}$ . Praca ma charakter przeglądowy i obejmuje standardy oraz zalecenia międzynarodowe w odniesieniu do poziomów ryzyka indywidualnego i grupowego uznawanych za akceptowalne. Analiza obejmowała głównie ryzyko związane z zejściami śmiertelnymi oraz przewlekłym uszczerbkiem na zdrowiu.

Celem pracy jest także wsparcie praktyki inżynierskiej w aspekcie opracowywania i wdrażania Planów Bezpieczeństwa Wody w przedsiębiorstwach wodociągowych.

## Definicja ryzyka

Analiza ryzyka w SZZW stanowi istotne narzędzie decyzyjne umożliwiające podejmowanie racjonalnych decyzji eksploatacyjnych oraz modernizacyjnych. W analizach bezpieczeństwa systemów technicznych przyjmuje się występowanie zdarzeń niepożądanych w sposób losowy i zgodny z rozkładem wykładniczym czasu pracy bezuszkodzeniowej. Prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia niepożądanego w czasie  $t$  wyznacza się ze wzoru [4, 21]:

$$P = 1 - \exp(-\lambda t) \quad (1)$$

gdzie:

$\exp(-\lambda t)$  – funkcja wykładnicza opisująca prawdopodobieństwo pracy bezuszkodzeniowej w czasie  $t$ .

W zagadnieniach oceny ryzyka wyrażenie  $\lambda \cdot t \ll 1$ . Wówczas prawdopodobieństwo  $P$  można przybliżyć wartością [4, 21]:

$$P = \lambda \cdot t \quad (2)$$

Pozwala to wnioskować, że niezależnie od wartości intensywności uszkodzeń  $\lambda = \text{const}$ , wzrost ekspozycji na ryzyko związany z czasem  $t$  zawsze skutkuje wzrostem ryzyka.

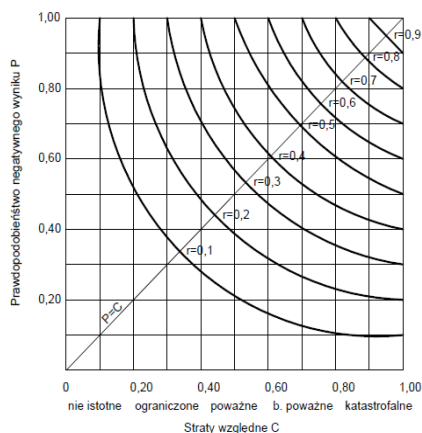
Klasyczną definicją ilościową ryzyka jest iloczyn prawdopodobieństwa zajścia zdarzenia  $P$  i negatywnych skutków z nim związanych  $C$  [2, 22]:

$$r = P \cdot C \quad (3)$$

gdzie:

$P$  – parametr związany z prawdopodobieństwem wystąpienia zdarzenia niebezpiecznego,  
 $C$  – parametr związany z konsekwencjami (stratami) związanymi z danym zdarzeniem.

Na rysunku 1 przedstawiono zależność ryzyka od prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia niepożądanego i konsekwencji tego zdarzenia. W tym ujęciu ryzyko jest rozumiane jako prawdopodobieństwo wystąpienia negatywnych skutków wypadków, awarii i katastrof, które przynoszą różnego rodzaju straty. Z zależności przedstawionych na rysunku 1 wynika, że im wyższe jest prawdopodobieństwo otrzymania negatywnego wyniku oraz im poważniejsze są jego skutki, tym wyższy jest poziom ryzyka [2].



Rys. 1. Wpływ wartości prawdopodobieństwa otrzymania negatywnego wyniku oraz związanych z tym strat względnych na ryzyko – opracowano na podstawie [2]

Fig. 1. Impact of the probability of obtaining a negative outcome and the associated relative losses on risk - developed on the basis of [2]

Skutki określa się w przedziale od zera do jedności, przy czym wartość  $C = 1$  jest przypisywana zejściom śmiertelnym. W ten sposób ograniczając się do rozpatrywania takiego przypadku otrzymuje się równość  $r = P$ , tj. ryzyko odpowiada wartości prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia ze skutkiem śmiertelnym.

W przypadku zdarzeń katastroficznych, które występują stosunkowo rzadko, problem decyzyjny wymaga oszacowania ich prawdopodobieństw. W ocenie bezpieczeństwa, szczególnie infrastruktury krytycznej, wiele zdarzeń niepożądanych nie można opisać deterministycznymi zależnościami funkcyjnymi, ze względu na losowy charakter towarzyszących im zjawisk. Klasyczne podejście do oceny prawdopodobieństwa zdarzeń bardzo rzadkich jest w większości niemożliwe. Wynika to z faktu, że liczba dostępnych obserwacji jest niewystarczająca, by dokładnie oszacować bardzo małe prawdopodobieństwa. Wyjściem z tego rodzaju trudności jest zastosowanie prostej w użyciu metody szacowania prawdopodobieństwa rzadkich zdarzeń bezpośrednio z obserwacji czasu do ich wystąpienia. Wymaga to założenia, że występowanie danego rodzaju zdarzenia ma rozkład Bernoulliego. Czas do wystąpienia zagrożenia ma rozkład geometryczny.

Dla rozkładu geometrycznego prawdopodobieństwo pojawienia się rzadkiego zdarzenia i odchylenie standardowe czasu do jego wystąpienia szacuje się na podstawie wzorów [23]:

$$P = \frac{1}{1+T} \tag{4}$$

$$s = \sqrt{(1+T) \cdot T} \tag{5}$$

gdzie:  
 $T$  - średni czas do wystąpienia zdarzenia niepożądanego [doba].

Do przeprowadzenia obliczeń konieczne jest ustalenie dat występowania rozpatrywanego rodzaju zdarzenia w określonym czasie obserwacji. W tabeli 1 przedstawiono przykładowe oszacowania prawdopodobieństw zdarzeń niepożądanych i odchyłeń standardowych wyznaczone w oparciu o średni czas do wystąpienia zdarzenia niepożądanego  $T$ , wyrażony w dobach.

Tabela 1. Zestawienie prawdopodobieństw i odchyłeń standardowych  
 Table 1. Summary of probabilities and standard deviations

Częstość zdarzenia	Opis lingwistyczny	p	s [d]
raz na 100 lat	bardzo znikome	$2,74 \cdot 10^{-5}$	36500
raz na 50 lat	znikome	$5,48 \cdot 10^{-5}$	18250
raz na 10 lat	niskie	$2,74 \cdot 10^{-4}$	3650
raz na 5 lat	średnie	$5,48 \cdot 10^{-4}$	1825
raz na rok	wysokie	$2,74 \cdot 10^{-3}$	365
raz na miesiąc	bardzo wysokie	0,032	30

**Przykład obliczeniowy**

W hipotetycznym 10-letnim okresie obserwacji stwierdzono dwukrotne globalne skażenie wody wodociągowej w mieście, odpowiednio w 2 i 8 roku obserwacji. Oznacza to, że średnio raz na 5 lat występuje tego rodzaju zdarzenie niepożądane, co odpowiada prawdopodobieństwu  $5,48 \cdot 10^{-4}$ .

**Ryzyko w ujęciu ilościowym**

**Pojęcie miliryzyka, mikroryzyka i nanoryzyka**

Pojęcie mikroryzyka związanego z czynnościami człowieka wprowadził G. Marx. Zdefiniował je jako ryzyko jednego zejścia śmiertelnego na milion osób. Przez analogię miliryzyko oznacza ryzyko jednego zejścia śmiertelnego na tysiąc osób. Z kolei nanoryzyko to ryzyko jednego zejścia śmiertelnego na miliard osób. W ten sposób wielkość ryzyka można podawać w jednostkach opartych na przedrostkach dziesiętnych, tj. mili-, mikro- i nanoryzyku. Zastosowanie takich jednostek umożliwia prowadzenie analiz porównawczych w różnych rodzajach działalności człowieka. Poniższe wielkości ryzyka zawodowego w wybranych branżach mają charakter orientacyjny i bazują na informacjach przedstawionych w literaturze [24]:

- pracy w zakładzie elektromechanicznym 100  $\mu$ r/rok (0,1 mr/rok),
- pracy w kopalni węgla kamiennego 800  $\mu$ r/rok (0,8 mr/rok),

- praca przy linii wysokiego napięcia 1200  $\mu$ r/rok (1,2 mr/rok),
- praca na platformie wydobywania ropy naftowej 1800  $\mu$ r/rok (1,8 mr/rok).

Wartości mikroryzyka wybranych czynności dnia codziennego zostały określone w sposób orientacyjny i bazują na literaturze dotyczącej analizy ryzyka [25]:

- oddychanie zanieczyszczonym powietrzem miejskim podczas smogu w czasie 10 d,
- jazda pociągami na dystansie 2500 km,
- przelot samolotem na odległości 2000 km,
- jazda samochodem na dystansie 100 km,
- praca przez 5 tygodni w zakładzie przemysłowym.

Z przytoczonych danych wynika, że podróże samolotem są bezpieczniejsze niż jazda samochodem:

- podróż samolotem: 1  $\mu$ r = 2000 km, co odpowiada 1 zgonowi na  $2 \cdot 10^9$  km,
- jazda samochodem: 1  $\mu$ r = 100 km, co odpowiada 1 zgonowi na 108 km.

Prawdopodobieństwo wystąpienia poważnej awarii w SZZW można wstępnie oszacować w oparciu o dane statystyczne według następujących zasad:

- brak dostawy wody powyżej 1 doby raz na rok lub częściej – duże,
- brak dostawy wody powyżej 1 doby raz na 5 lat – średnie,
- brak dostawy wody powyżej 1 doby raz na 10 lat – małe.

**Kryteria akceptowalności**

Ilościowa ocena ryzyka w SZZW opiera się na porównaniu wartości ryzyka dla różnych zagrożeń z wartościami kryterialnymi. W praktyce międzynarodowej określono maksymalne akceptowalne ryzyko indywidualne na poziomie  $10^{-6}$  na rok, co odpowiada jednemu zejściu śmiertelnemu na milion mieszkańców w skali roku. W przypadku ryzyka grupowego poziom ten ustalono na  $10^{-5}$  na rok, tj. jedno zejście śmiertelne na 100 000 mieszkańców rocznie [26]. Zakłada się, że poziom ryzyka indywidualnego w zakresie  $10^{-4}$ - $10^{-6}$  na rok wymaga przeprowadzenia analizy zysków i strat (ang. RCBA, risk-cost-benefit analysis) zgodnie z zasadą ALARP (ang. As Low As Reasonably Practicable), czyli ryzyka tak niskiego, jak jest to praktycznie uzasadnione [27]. Brytyjskie przepisy HSE (ang. Health and Safety Executive) [26] przyjmują maksymalne akceptowalne ryzyko dozwolone na poziomie  $10^{-3}$  na rok, natomiast narzucone ryzyko grupowe odnoszone do zagrożeń przemysłowych na poziomie  $10^{-4}$  na rok przez co najmniej 10 lat.

Zasada ALARP stosowana jest w wielu dziedzinach analizy ryzyka związanego z działalnością przemysłową. Przyjmuje się, w oparciu o przepisy HSE [26]:

- górną granicę obszaru ALARP,
- dla pracowników  $10^{-3}$  zgonów/rok,
- dla ludności  $10^{-4}$  zgonów/rok,
- dolną granicę obszaru ALARP,
- dla pracowników i ludności  $10^{-6}$  zgonów/rok.

Obowiązuje także pojęcie ekwiwalentu nieszczęśliwego wypadku (ang. equivalent fatality): 1 zgon = 10 poważnych obrażeń = 200 lekkich obrażeń.

Orientacyjne wartości akceptacji ryzyka według odczucia społecznego przedstawia się następująco [25, 26]:

- 10 nr ( $10^{-8}$ ) – jeden zgon w skali rocznej na 100 milionów osób – zagrożenie jest odczuwalne w sposób incydentalny,
- 1  $\mu$ r ( $10^{-6}$ ) – jeden zgon rocznie na 1 milion osób – wypadki takie są odnotowywane, ale nie wymagają wdrażania specjalnych procedur ochronnych,
- 0,1 mr ( $10^{-4}$ ) – jeden zgon rocznie na 10 tysięcy osób – wymagane zorganizowane działania ochronne,
- 10 mr ( $10^{-2}$ ) – jeden zgon rocznie na 100 osób – ryzyko tego rodzaju powinno być zredukowane indywidualnie.

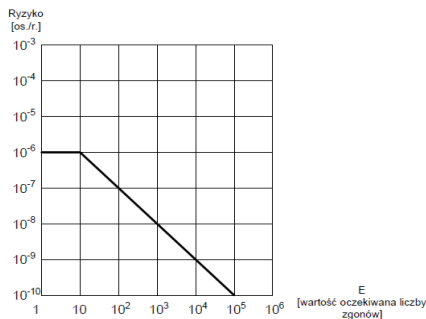
Analizy historyczne zdarzeń niepożądanych typu katastroficznego w systemach technicznych wskazują, że wywołuje je od 3 do 5 zdarzeń awaryjnych występujących w tym samym czasie, jednocześnie lub w niewielkim odstępie czasu [2].

### Ryzyko zdrowotne korzystania z SZWZ

Ryzyko zdrowotne definiuje się jako prawdopodobieństwo wystąpienia określonego skutku zdrowotnego w danym przedziale czasu, najczęściej w roku. Wyróżniono trzy kategorie skutków zdrowotnych, którym przypisano odmiennie poziomy akceptowalności ryzyka: zejścia śmiertelne, przewlekły uszczerbek na zdrowiu oraz dolegliwości gastryczne.

### Ryzyko zejścia śmiertelnego

Akceptowalny poziom ryzyka indywidualnego w krajach wysokorozwiniętych nie powinien przekraczać wartości  $10^{-5}$ - $10^{-6}$  na rok. W pracy przyjęto liczbę 10 zgonów i ryzyko indywidualne na poziomie  $10^{-5}$  jako wartość progową dla krajów wysokorozwiniętych, co jest spójne z wytycznymi WHO [8]. W przypadku przekroczenia tej wartości progowej dla danego wodociągu publicznego ryzyko zgonu powinno być zredukowane odwrotnie proporcjonalnie do liczby poszkodowanych osób. Zależność ryzyka od oczekiwanej liczby poszkodowanych przedstawiono na rysunku 2.



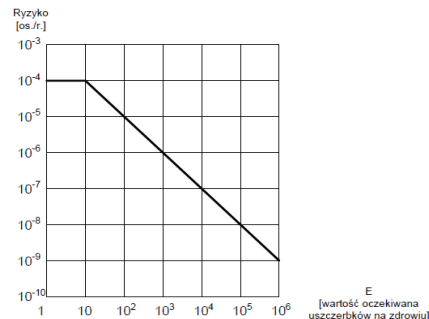
Rys. 2. Dopuszczalne ryzyko zejść śmiertelnych – opracowano na podstawie [28]  
Fig. 2. Acceptable risk of fatalities – developed on the basis of [28]

### Ryzyko przewlekłego uszczerbku na zdrowiu

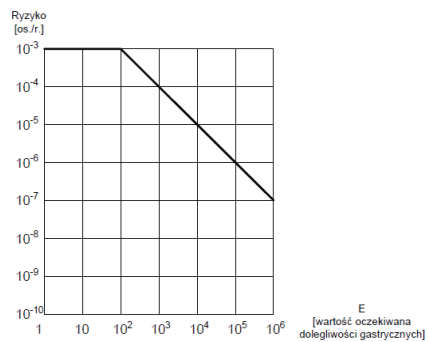
Ryzyko wystąpienia przewlekłego uszczerbku na zdrowiu obejmuje długotrwałe oraz nieodwracalne skutki zdrowotne nieprowadzące bezpośrednio do śmierci. Przyjęto liczbę 10 przewlekłych skutków zdrowotnych i ryzyko indywidualne na poziomie  $10^{-4}$  jako wartość progową, co odzwierciedla wartości akceptowalne w krajach wysokorozwiniętych i jest spójne z wytycznymi WHO [8]. Zależność ryzyka od oczekiwanej liczby poszkodowanych pokazano na rysunku 3.

### Ryzyko dolegliwości gastrycznych

Ryzyko dolegliwości gastrycznych obejmuje zdarzenia związane ze spożyciem zanieczyszczonej wody, takie jak biegunka, nudności czy ból brzucha. Przyjęto liczbę 100 przypadków dolegliwości gastrycznych i ryzyko indywidualne na poziomie  $10^{-3}$  jako wartość progową, ze względu na to, że zdarzenia tego typu nie prowadzą do śmierci ani trwałego uszczerbku na zdrowiu. Zależność ryzyka od oczekiwanej liczby poszkodowanych pokazano na rysunku 4.



Rys. 3. Dopuszczalne ryzyko przewlekłego uszczerbku na zdrowiu – opracowano na podstawie [28]  
Fig. 3. Acceptable risk of chronic health impairment – developed on the basis of [28]



Rys. 4. Dopuszczalne ryzyko dolegliwości gastrycznych – opracowano na podstawie [28]  
Fig. 4. Acceptable risk of gastrointestinal ailments – developed on the basis of [28]

W tabeli 2 przedstawiono kategorie ilościowo-jakościowe konsekwencji związanych z nieodpowiednią jakością wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi. Problematyka zarządzania ryzykiem rozwija się bardzo dynamicznie, powstało wiele definicji i metod, jednak niezbędne jest ustalenie poziomów powodujących wdrożenie działań ograniczających ryzyko. Konieczne stało się więc opracowanie standardowego wzorca w tym zakresie.

Tabela 2. Ilościowo-jakościowe granice ryzyka związanego z nieodpowiednią jakością wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi dla konsumentów korzystających z wodociągu publicznego, w odniesieniu do 1 roku

Table 2. Quantitative – qualitative risk boundaries associated with poor drinking-water quality for consumers using a public water supply system, referenced to one year

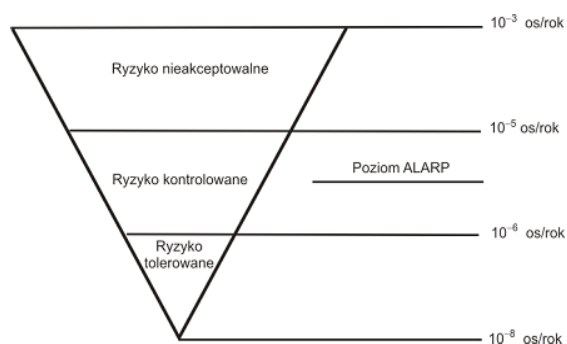
Kategoria konsekwencji	Opis konsekwencji	Ryzyko tolerowane	Ryzyko kontrolowane	Ryzyko nieakceptowalne
Nieistotne	incydentalne uciążliwości niezagrażające zdrowiu brak skarg konsumentów	$<10^{-3}$ ( $<1$ mr)	$10^{-3} - 10^{-1}$ (1 – 100 mr)	$>10^{-1}$ ( $>100$ mr)
Marginalne	dostrzegalne zmiany organoleptyczne pojedyncze skargi konsumentów	$<10^{-4}$ ( $<0,1$ mr)	$10^{-4} - 10^{-2}$ (0,1 - 10 mr)	$>10^{-2}$ ( $>10$ mr)
Znaczące	znacząca, ciągła uciążliwość zmian organoleptycznych liczne skargi konsumentów komunikaty w mediach lokalnych	$<10^{-5}$ ( $<10$ $\mu$ r)	$10^{-5} - 10^{-3}$ (10 $\mu$ r - 1 mr)	$>10^{-3}$ ( $>1$ mr)
Poważne	masowe niedospożycie gastryczne zamknięcie wodociągu przez właściwego inspektora sanitarnego efekty toksyczne wśród organizmów wskaźnikowych szerokie informowanie w mediach lokalnych oraz ogólne w mediach ogólnokrajowych	$<10^{-6}$ ( $<1$ $\mu$ r)	$10^{-6} - 10^{-4}$ (1 - 100 $\mu$ r)	$>10^{-4}$ ( $>100$ $\mu$ r)
Katastrofalne	masowe hospitalizacje wskutek powikłań zdrowotnych zejścia śmiertelne czołówki wiadomości ogólnokrajowych	$<10^{-7}$ ( $<100$ nr)	$10^{-7} - 10^{-5}$ (0,1 $\mu$ r - 10 $\mu$ r)	$>10^{-5}$ ( $>10$ $\mu$ r)

mr - miliryziko,  $\mu$ r - mikroryziko, nr - nanoryziko

## Ryzyko indywidualne i grupowe

Ryzyko indywidualne definiuje się jako prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku śmiertelnego lub poważnego uszczerbku na zdrowiu człowieka spowodowanego poważną awarią, w odniesieniu do jednego roku. Poziom ryzyka tolerowanego stanowi granica  $10^{-6}$ , czyli jeden przypadek na milion [8]. Na rysunku 5 przedstawiono wymagane poziomy ryzyka indywidualnego.

Dla ryzyka grupowego dolną granicę ryzyka nieakceptowanego przyjęto na poziomie  $10^{-3}/N_2$ , gdzie N – liczba zejść śmiertelnych.

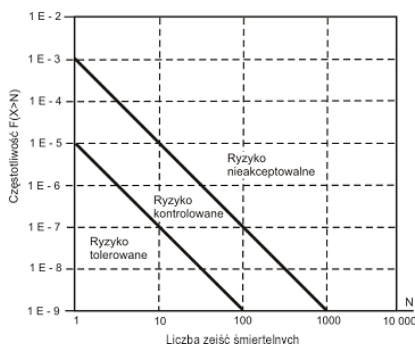


Rys. 5. Kryteria ryzyka indywidualnego – opracowano na podstawie [3]  
Fig. 5. Individual risk criteria – developed on the basis of [3]

W procedurze ALARP analiza zysków wynikających z redukcji ryzyka oraz związanych z tym kosztów posiada górną granicę dysproporcji. Stanowi ona granicę, przy której dalsza redukcja ryzyka wymaga nieproporcjonalnie wysokich kosztów. Kryteria brytyjskiego HSE wprowadzają pojęcie statystycznego kosztu uniknięcia ofiary śmiertelnej, szacowanego na poziomie 106 GBP, czyli około 5 mln PLN. Pozwala to na wprowadzenie współczynnika proporcjonalności kosztów do zysków, PF. Obowiązuje przy tym zasada, że im wyższy poziom ryzyka, tym większe koszty należy ponosić na jego redukcję.

Wartości współczynnika PF, w zależności od uwzględnienia rozległości strat towarzyszących wypadkowi śmiertelnemu, przyjmują wartości od 1:10 do 1:15. Najniższy, równy jedności, współczynnik PF występuje w obszarze ryzyka tolerowanego. Na rysunku 6 przedstawiono przykładowy przebieg zmian wartości współczynnika PF dla szacowania ryzyka grupowego.

Kryterium podziału stanowią tutaj źródło ryzyka, wielkość jego oddziaływania oraz rozmiary następstw. Ryzyko indywidualne powoduje straty jednostkowe, np. w wyniku awarii przyłącza wodociągowego. Ryzyko grupowe oddziałuje na całą społeczność, np. w przypadku braku dostawy wody do



Rys. 6. Kryterium ryzyka grupowego – opracowano na podstawie [3]  
Fig. 6. Societal (group) risk criterion – developed on the basis of [3]

miasta spowodowanego brakiem energii elektrycznej lub wtórnym zanieczyszczeniem wody w podsystemie dystrybucji.

Przyjmuje się, że straty zbiorowe są równe odpowiednim sumom strat indywidualnych. Sumowanie należy jednak prowadzić oddzielnie dla każdej kategorii strat, np. strat produkcyjnych, uszkodzonych z uszczerbkiem na zdrowiu oraz ofiar śmiertelnych. Jeżeli ryzyko odnosi się do pojedynczej osoby, ma się do czynienia z ryzykiem indywidualnym, natomiast gdy odnosi się do grupy ludzi, czyli społeczności, mówi się o ryzyku zbiorowym.

Ryzyko grupowe  $r_g$  przy czasie ekspozycji t wyznacza się z zależności [4]:

$$r_g = \frac{E(C)}{\Delta t} \quad (6)$$

gdzie:  
 $E(C)$  – wartość oczekiwana strat.

Ryzyko indywidualne  $r_i$  w obszarze zagrożenia dla m osób opisuje relacja [4]:

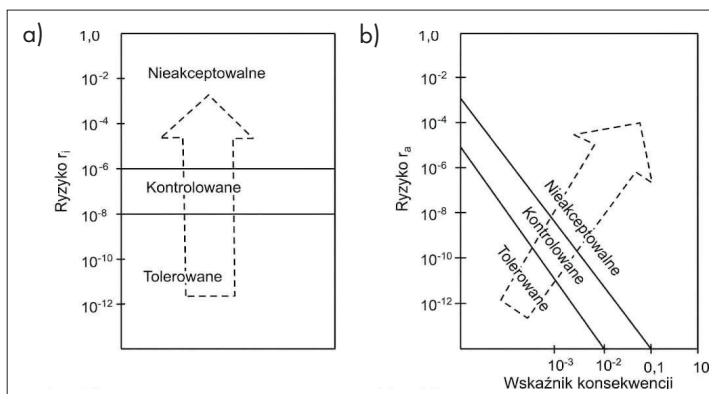
$$r_i = \frac{E(C)}{m \cdot \Delta t} \quad (7)$$

gdzie:  
m – liczba osób znajdujących się w obszarze zagrożenia.

Definicje te pozwalają na rozgraniczenie ryzyka indywidualnego konsumenta wody od ryzyka grupowego. Przepisy

holenderskie rozróżniają pojęcie ryzyka indywidualnego i grupowego, a rysunek 7 pokazuje istotę tego rozróżnienia: w części a przedstawiono granice ryzyka odnoszone do pojedynczej osoby, natomiast w części b zaprezentowano zależność między częstością zdarzeń a liczbą potencjalnych ofiar w ujęciu grupowym.

W Szwajcarii obowiązują krajowe zalecenia dotyczące ryzyka grupowego. Przy niskiej częstotliwości i małej wartości wskaźnika konsekwencji ryzyko nie jest definiowane. Dotyczy to przypadków, w których częstotliwość zdarzeń jest niższa niż  $10^{-10}$ , a względny wskaźnik konsekwencji jest mniejszy niż 0,1.



Rys. 7. Kryteria bezpieczeństwa według zaleceń holenderskich: a) ryzyko indywidualne, b) ryzyko grupowe – opracowano na podstawie [8]  
Fig. 7. Safety criteria according to Dutch recommendations: a) individual risk, b) societal (group) risk – developed based on [8]

## Podsumowanie

- Zarządzanie ryzykiem, zarówno w ujęciu "security", jak i "safety", wiąże się z ponoszeniem nakładów finansowych. W przypadku materializacji ryzyka w postaci wystąpienia zdarzenia niepożądanego należy to uwzględnić przy szacowaniu ewentualnych szkód i ich następstw. Brak procedur zarządzania ryzykiem przynosi jedynie pozorne korzyści finansowe, które w razie wystąpienia scenariusza awaryjnego powodują znaczący wzrost kosztów strat.
- Ryzyko jest zjawiskiem realnym i często identyfikowanym w badaniach naukowych. Możliwość prawidłowej kwantyfikacji ryzyka w ujęciu brutto i netto pozwala na jego porównywanie w obu tych perspektywach.
- Wartościowania ryzyka można dokonywać z wykorzystaniem przedrostków mili ( $10^{-3}$ ), mikro ( $10^{-6}$ ) oraz nano ( $10^{-9}$ ). Szczególnie przydatne jest pojęcie mikrorzyzyka, czyli ryzyka wystąpienia zdarzenia jeden raz na milion przypadków.
- Zaleca się przyjmowanie następujących poziomów ryzyka zdrowotnego:

- zejścia śmiertelne  $\leq 10^{-6}$  / rok,
  - przewlekły uszczerbek na zdrowiu  $\leq 10^{-4}$  / rok,
  - dolegliwości gastryczne  $\leq 10^{-3}$  / rok.
- W analizach rozróżnia się ryzyko indywidualne i grupowe, co ma podstawowe znaczenie przy ocenie bezpieczeństwa systemów technicznych, w tym także SZZW.
  - Przedstawione kryteria oceny ryzyka mogą stanowić wsparcie dla operatorów SZZW podczas opracowywania i wdrażania Planów Bezpieczeństwa Wody (PBW).

## Literatura

- [1] Słownik języka polskiego. Wydawnictwo PWN. Warszawa 2005.
- [2] Rak J.R.: Istota ryzyka w funkcjonowaniu systemów zaopatrzenia w wodę. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej. Rzeszów 2004.
- [3] Rak J.R.: Podstawy bezpieczeństwa systemów zaopatrzenia w wodę. Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska Polskiej Akademii Nauk. vol.28. Lublin 2005.
- [4] Wieczysty A. i inni: Metody oceny i podnoszenia niezawodności działania komunalnych systemów zaopatrzenia w wodę. Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN. Kraków 2001.
- [5] EN 15975-1:2011+A1:2016; Security of Drinking Water Supply—Guidelines for Risk and Crisis Management—Part 1: Crisis Management. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2016.
- [6] EN 15975-2:2013; Security of Drinking Water Supply. Guidelines for Risk and Crisis Management Risk Management. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2013.
- [7] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2020/2184 z dnia 16 grudnia 2020 r.
- [8] w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi. Dz.U. UE L 435 z 23.12.2020.
- [9] World Health Organization (WHO). 2022. Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first and second addenda, Geneva: World Health Organization.
- [10] Haas Ch.N., Rose J.B., Gerba Ch.P.: Quantitative microbial risk assessment. John Wiley & Sons, 2014. DOI:10.1002/9781118910030.
- [11] Elliott J.G., Taylor-Edmonds L., Andrews R.C.: Quantitative microbial risk assessments for drinking water facilities: evaluation of a range of treatment strategies. Environmental Science: Water Research & Technology, 2019, 5, 1943-1955. <https://doi.org/10.1039/C9EW00348G>.
- [12] Smeets P.W., Rietveld L.C., van Dijk J.C., Medema G.J.: Practical applications of quantitative microbial risk assessment (QMRA) for water safety plans. Water Science and Technology, 2010, 61(6), 1561-1568. doi: 10.2166/wst.2010.839.
- [13] Petterson S.R., Ashbolt N.J.: QMRA and water safety management: review of application in drinking water systems. Journal of Water and Health, 2016, 14(4), 571-589. doi: 10.2166/wh.2016.262.
- [14] Taghipour M., Sylvestre É., Shakibaeinia A., Tolouei S., Kammoun R., Prévost M., Dörner S.: Quantitative microbial risk assessment for drinking water intake threat prioritization: a comparison of vulnerability and threat assessment according to source water protection regulations of two Canadian provinces. Environmental Challenges, 20, 2025, 101193, <https://doi.org/10.1016/j.envc.2025.101193>.
- [15] Hamouda M.A., Jin X., Xu H., Chen F.: Quantitative microbial risk assessment and its applications in small water systems: A review. Science of the Total Environment, 2018, 645, 993-1002. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.228>
- [16] Cheng Y., Wei-di W., Rui-ning W., Tian-nuo L., Wajid A., Shan-shan H., Sai L., Xiang L., Zaher Ahmad N., Frederic C.: Quantitative health risk assessment of microbial hazards from water sources for community and self-supply drinking water systems, Journal of Hazardous Materials, 465, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.133324>.
- [17] Zimoch I.: Hazardous event analysis of microbiological contamination in risk management of large water supply systems, Desalination and Water Treatment, 247, 2022, 72-81, <https://doi.org/10.5004/dwt.2022.27879>.
- [18] Jurczynski Y., Passos R., Campos L.C.: A Review of the Most Concerning Chemical Contaminants in Drinking Water for Human Health. Sustainability 2024, 16, 7107. <https://doi.org/10.3390/su16167107>.
- [19] Wang L., Fang Z., Zhou X., Cheng K., Ren Y., Li C., Gao B., Lv Y., Xu S., Xu H.: Health risk assessment via ingestion of disinfection by-products in drinking water. Scientific Reports, 2025, 15(1), 1793. doi: 10.1038/s41598-024-84094-9.
- [20] Santos A.M., Coutinho J.J., Soares S.A.R., Oliveira O.M.C.d., Queiroz A.F.S., Lemos V.A., Ferreira S.L.C.: Health Risk Assessment of Chemical Elements in Drinking Water Consumed in a Brazilian City Impacted by Mining Activities. Water 2026, 18, 230. <https://doi.org/10.3390/w18020230>.
- [21] Domoń A., Kowalska B., Papciak D., Wojtaś E., Kamińska I.: Safety of Tap Water in Terms of Changes in Physical, Chemical, and Biological Stability. Water 2024, 16, 1221. <https://doi.org/10.3390/w16091221>.
- [22] Zio E.: An Introduction to the Basics of Reliability and Risk Analysis. World Scientific Publishing, Singapore, 2007.
- [23] Aven T.: On how to define, understand and describe risk. Reliability Engineering & System Safety, 2010, 95(6), 623-631. <https://doi.org/10.1016/j.res.2010.01.011>.
- [24] Ross S. M.: Introduction to Probability Models. Academic Press, Amsterdam—Boston, 2014.
- [25] Aven T.: Risk analysis. John Wiley & Sons, 2015.
- [26] Howard, R.A.: On Making Life and Death Decisions. In: Schwing, R.C., Albers, W.A. (eds) Societal Risk Assessment. General Motors Research Laboratories. Springer 1980, Boston, MA. [https://doi.org/10.1007/978-1-4899-0445-4\\_5](https://doi.org/10.1007/978-1-4899-0445-4_5)
- [27] Health and Safety Executive (HSE): Reducing Risks, Protecting People. HSE's Decision-Making Process. HSE Books, Norwich, 2001.
- [28] ISO 31000:2018. Zarządzanie ryzykiem - Wytyczne (Risk management - Guidelines). International Organization for Standardization, Geneva, 2018.
- [29] Rak J. Tchórzewska-Cieślak B., Studziński A., Pietrucha-Urbanik K., Boryczko K. Niezawodność i bezpieczeństwo systemów zbiorowego zaopatrzenia w wodę. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2012.

