



## **Zastosowanie metody PHA do oceny ryzyka uszkodzeń sieci kanalizacyjnej na przykładzie systemu kanalizacyjnego miasta Krakowa**

*Jadwiga Królikowska  
Politechnika Krakowska*

### **1. Wstęp**

Systemy kanalizacyjne mogą stanowić potencjalne niebezpieczeństwo, zagrażać środowisku, użytkownikom systemu oraz najbliższemu jego otoczeniu. W analizie tych systemów powinno się więc uwzględniać zarówno ocenę niezawodności funkcjonowania, jak również niezawodność bezpieczeństwa. Zwiększająca się liczba awarii, nierzadko ich katastrofalne skutki, uwarunkowania zewnętrzne pracy systemu narzucają takie właśnie podejście w ocenie i zarządzaniu tymi systemami.

Ocena niezawodności funkcjonowania najczęściej sprowadza się do zagadnienia określania częstotliwości awarii i usuwania jej przyczyn. Niezawodność generuje bezpieczeństwo systemu, ale bezpośrednio nie określa jego wartości. Rozszerzając badania niezawodności funkcjonowania o badania procesów oddziaływania awarii na środowisko oraz otoczenie, w tym także na społeczność dochodzi się do bezpieczeństwa [1, 13]. Bezpieczeństwo w ujęciu technicznym, czyli bezpieczeństwo techniczne zastępuje więc niezawodność. Bezpieczeństwo (stan niezawodno-

ści bezpieczeństwa NB) w skali makro w zakresie systemu kanalizacyjnego można zdefiniować przez analogię do systemów zaopatrzenia w wodę [12] jako stan gospodarki ściekowej umożliwiający zebranie, odprowadzenie oraz oczyszczenie bieżącej i perspektywicznej ilości ścieków sanitarnych (komunalnych) oraz deszczowych, przy zachowaniu wymagań sanitarnych, ochrony środowiska i utrzymania porządku publicznego.

Z bezpieczeństwem związane są bezpośrednio:

- zdarzenia niepożądane,
- zagrożenia,
- straty.

Zdarzenia niepożądane utożsamiane są ze stanem zawodności bezpieczeństwa systemu, wywołującym zagrożenia dla chronionych dóbr, które przekłada się na straty, jako jego negatywne skutki. Mogą to być straty finansowe, straty ludzkie, straty ekologiczne czy straty emocjonalne. Przyjmując, że awarie w obrębie systemów kanalizacyjnych grawitacyjnych są słabo wykrywalne straty, które ponosi środowisko przyrodnicze (straty ekologiczne) mogą być znaczne i w analizie bezpieczeństwa nie należy ich pomijać. Zdarzenia niepożądane z reguły dotyczą poszczególnych, pojedynczych elementów systemu kanalizacyjnego, czyli kanału, pompy, studzienki itp., ale mogą również dotyczyć całych podsystemów np. podsystemu usuwania ścieków czy podsystemu oczyszczania ścieków. Nakładanie się tych awarii na siebie tzw. efekt domina, skutkować może awarią całego systemu.

Jako miarę charakteryzującą bezpieczeństwo (jego poziom) najczęściej wykorzystuje się ryzyko. Intuicyjnie rozumiane jest ono, jako zaprzeczenie bezpieczeństwa i określa jakie jest prawdopodobieństwo wystąpienia zagrożenia i wielkości z nim związanych strat.

Awarii w systemach kanalizacyjnych nie można całkowicie wyeliminować. Są to systemy rozległe, składające się z wielu oddzielnych fragmentów tworzących podsystemy i układy. Pomiędzy urządzeniami oraz obiektami wchodzącymi w skład systemu zachodzą związki wynikające z ich zdolności przekształcania ilościowego i jakościowego odprowadzanych ścieków w czasie i przestrzeni, uwarunkowane względami zdrowotnymi, ochrony środowiska i ekonomicznymi. W procesie eksploatacji systemy kanalizacyjne znajdują się pod działaniem szeregu nieko-

rzystnych czynników, których znaczna większość ma charakter przypadkowy, praktycznie niemożliwy do planowych kontroli, ale statystyczny. Dlatego jest rzeczą niemożliwą dokładnie przewidzieć, a tym bardziej w pełni wykluczyć ich niekorzystny wpływ. Ryzyko ich wystąpienia jest zjawiskiem normalnym, a w nauce o bezpieczeństwie nie ma „warunku bezpieczeństwa”. Jednak znajomość tego ryzyka i zarządzanie nim pozwala w znacznym stopniu zmniejszyć częstotliwość wystąpienia zdarzeń niepożądanych i ograniczyć niepożądane skutki z nimi związane, czyli jest istotnym działaniem na rzecz poprawy bezpieczeństwa, narzędziem zarządzania bezpieczeństwem.

## 2. Ocena ryzyka

Ocena ryzyka (nadanie mu probabilistycznej miary) stanowi element procesu zarządzania ryzykiem i jest poprzedzona analizą ryzyka, czyli działaniem polegającym na pozyskiwaniu dostępnych informacji o zagrożeniach dotyczących danego systemu będących podstawą szacowania ryzyka (rys. 1). Zgodnie z podaną wyżej definicją ryzyko jest funkcją:

- zmiennych charakteryzujących prawdopodobieństwo zaistnienia straty (miar zawodności) oraz
- zmiennych charakteryzujących wielkość straty (miar zagrożeń).

Związek między miarami ryzyka a miarami zawodności i zagrożeń przedstawia ogólna postać [1, 9, 11÷13]:

$$\left( \begin{array}{c} \text{miara} \\ \text{ryzyka} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{miara} \\ \text{zawodności} \end{array} \right) \cdot \left( \begin{array}{c} \text{miara} \\ \text{zagrożeń} \end{array} \right) \quad (1)$$

Miara (poziom) zawodności jest zwykle wyrażana przez prawdopodobieństwo (względnie intensywność) występowania zdarzenia niepożądanego, natomiast poziom zagrożeń jest wyrażany za pomocą oczekiwanych strat, czyli skutków tego zdarzenia, stąd:

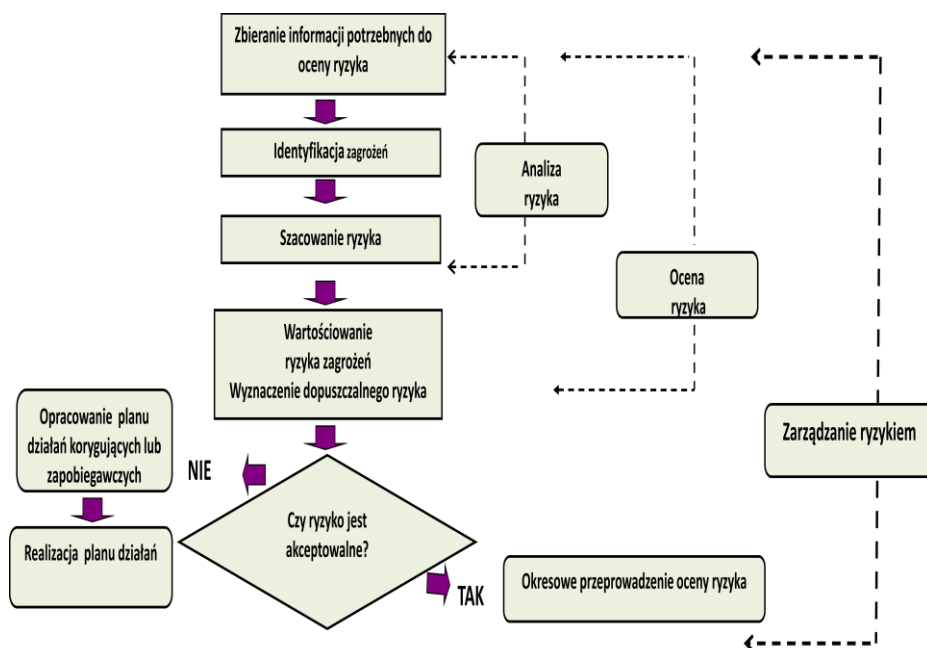
$$\text{Ryzyko} = P(Z) \times S(Z) \quad (2)$$

gdzie:

$P(Z)$  – prawdopodobieństwo zajścia zdarzenia niepożądanego  $Z$ ,

$S(Z)$  – skutki (strata) wywołana zajściem zdarzenia  $Z$ .

Z relacji (2) należy wnioskować, że ryzyko można więc zmniejszyć, zmniejszając prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia niepożądanego lub/i zmniejszając skutki tego zdarzenia, jeżeli w ogóle wystąpi, czyli zmniejszając zagrożenie.



**Rys. 1.** Algorytm procesu modelowania (zarządzania) ryzykiem  
**Fig. 1.** Risk management algorithm

Ocenę ryzyka należy przeprowadzić niezależnie dla każdego z zidentyfikowanych zagrożeń. Analiza ryzyka może być przeprowadzona bądź za pomocą metody ilościowej bądź za pomocą metody jakościowej przy wykorzystaniu macryc, grafów oraz kalkulacji. Metody ilościowe pozwalają na bardziej racjonalną ocenę, porównanie i działanie na rzecz bezpieczeństwa niż metody jakościowe. Są jednak znacznie trudniejsze w stosowaniu i wymagają znacznie większej liczby informacji wejściowych. Do prowadzenia ilościowej analizy ryzyka konieczne jest posiadanie odpowiedniego modelu – probabilistycznego modelu ryzyka, który powinien się składać z:

- modelu zagrożeń, umożliwiającego wyznaczenie miar zagrożeń,

- modelu niezawodności, umożliwiającego wyznaczenie odpowiedniego prawdopodobieństwa zdarzeń niepożądanych, w tym prawdopodobieństwa pierwotnych zdarzeń niebezpiecznych,
- relacji między tymi modelami [1].

Metody jakościowe należą do zgrubnych metod analizy ryzyka. Jakościowe szacowanie ryzyka jest najczęściej subiektywną oceną opartą na dobrych praktykach i doświadczeniu. Wynikiem takiego szacowania są listy zagrożeń wraz z relatywnym rankingiem ryzyka. W metodach jakościowych ryzyko i potencjalne skutki jego wystąpienia są prezentowane opisowo. Przykładem jakościowej metody oceny ryzyka jest metoda wstępnej analizy zagrożeń PHA, która zostanie scharakteryzowana w dalszej części pracy. Może ona być z powodzeniem wykorzystywana w szacowaniu ryzyka jako wstępna analiza stanowiąca przygotowanie do szczegółowych ocen ryzyka. Przy zastosowaniu tej metody podjęto próbę oszacowania i oceny ryzyka uszkodzeń sieci kanalizacyjnej na konkretnym przykładzie sieci kanalizacyjnej miasta Krakowa.

### **3. Ogólne informacje o przyczynach i skutkach awarii sieci kanalizacyjnych**

Rozważania dotyczą sieci kanalizacyjnej grawitacyjnej, dla której w procesie eksploatacji cechą charakterystyczną jest brak możliwości wyróżnienia stanu postoju, a stan oczekiwania na naprawę jest przeważnie stanem dyskretnym, ponieważ przeglądy sieci przeprowadza się z określoną częstotliwością [6]. To powoduje, że przyjmowana uszkodzalność (awaryjność) w obrębie sieci kanalizacyjnych jako wskaźnik jej stanu technicznego nie zawsze oddaje stan rzeczywisty. Istnieją sytuacje, w których awaryjność danej sieci jest znikoma, ale jej stan techniczny budzi wiele zastrzeżeń.

Awarię można opisać podając zespół warunków i przyczyn jej powstawania, siły powodujące zniszczenie elementów podsystemu i zapadnięcie się gruntu w kierunku kanału oraz skutki poawaryjne [8]. Wśród czynników, przyczyn wpływających na przebieg naturalnego procesu starzenia się kanału oraz możliwość wystąpienia uszkodzenia sieci kanalizacyjnej należy wymienić:

- czynniki związane z technologią budowy kanału (np. źle dobrany i zagęszczony grunt otaczający kanał),
- ewentualne przeciążenie hydrauliczne kanału (np. powódź, nieplanowany rozwój jednostki),
- globalny zanik dostawy energii elektrycznej,
- niekontrolowane zrzuty do kanalizacji ścieków o działaniu szkodliwym,
- zjawiska reologiczne w gruncie (np. tąpnięcia górnicze, trzęsienia ziemi),
- korozyjne oddziaływanie środowiska gruntowo-wodnego,
- agresywność substancji znajdujących się w ściekach lub tworzących się podczas transportu ścieków (np. korozja siarczanowa),
- ścieralność kanału,
- obciążenia zewnętrzne (ruch uliczny).
- przypadkowe działania nieodpowiedzialne (wandalizm, terroryzm).

Najczęstszym zjawiskiem występującym w obrębie sieci kanalizacji grawitacyjnej jest nieuszczelnienie kanału i występowanie infiltracji wód gruntowych wraz z cząstkami gruntu [4, 5]. Powstają wówczas pustki powietrzne mogące powodować zapadanie się gruntu bezpośrednio nad kanałem. Infiltracja wód gruntowych wraz z cząsteczkami gruntu przedostającego się do kanalizacji może doprowadzić nawet do katastrofy kanalizacyjnej. O skali tego zjawiska decydują rozmiary nieuszczelnionych miejsc, rodzaj gruntu, krzywa jego uziarnienia i stopień zagęszczenia gruntu w strefie ułożenia kanału. Przy występowaniu tego problemu drobniejsze cząstki gruntu są wypłukiwane tak długo, dopóki nad miejscem nieuszczelnienia nie utworzy się filtr z pozostałych cząstek gruntu. W przypadku wystąpienia cofki w kanale lub podczas pracy kanału pod ciśnieniem filtr zostaje uszkodzony. Proces ten prowadzi z czasem do zapadania się gruntu znajdującego się bezpośrednio nad kanałem. W rezultacie dochodzi do osiadania powierzchni terenu i nawierzchni oraz fundamentów zlokalizowanych bezpośrednio nad kanałem. W przypadku występowania sztywnych nawierzchni (np. drogowych) w gruntach niespoistych dochodzi do tworzenia się lokalnych pustek bezpośrednio pod powierzchnią uliczną. Kiedy pustki te osiągną duże rozmiary, występuje wówczas osiadanie lub pęknięcie gruntu, a następnie zapadanie się powierzchni ulicznych.

W gruntach spoistych obserwuje się często występowanie pustek powietrznych nad brakującymi fragmentami konstrukcji kanałowej w jej górnej części. Przestrzenie te są niekiedy dużych rozmiarów, a ich wysokość sięga kilku metrów. Najczęściej wykrywane są puste przestrzenie powietrzne nad kanałami betonowymi budowanymi w latach 50. i 60. ub. stulecia. Jakość betonu w tych kanałach była bardzo niska. Badania pracowników Politechniki Świętokrzyskiej [7] wykazały, że beton miał często klasę niższą niż B10.

Największy, najczęstszy problem eksploatacyjny kanalizacji grawitacyjnej to zatkanie kanału lub jego zamulenie (nieodróżnienie kanałów i przykanalików oraz studzienek). Kanał wymaga udrożnienia. Zatkanie ulegają częściej przykanaliki (niewłaściwie użytkowane). Zjawisko zamulania i odkładania się osadów w kanałach dotyczy odcinków, w których prędkość przepływu ścieków jest niewystarczająca do transportu zawartych w nich zawiesin (nie jest samooczyszczająca). Zawieszona osadzająca się w kanałach zwiększa opory przepływu powodując zanieczyszczanie kanałów. W tych warunkach zmniejszenie prędkości przepływu może dochodzić nawet do 70% normalnej prędkości w kanałach. Zanieczyszczenie kanałów może również powodować niejednorodny ich spadek oraz specyficzny skład ścieków (np. ścieki z mleczarni zawierają dużo tłuszczów).

Nierzadkim zjawiskiem są przerosty korzeni. Ścieki ze względu na wyższą temperaturę i dużą zawartość związków mineralnych stanowią doskonałą pożywkę dla korzeni drzew i dlatego po przedostaniu się do wnętrza kanału korzenie rozrastają się, a z czasem zarastają cały przekrój poprzeczny kanału i wstrzymują przepływ.

Znaczący odsetek uszkodzeń kanałów przypada na pęknięcia, deformacje, zawały, przemieszczanie się rur na połączeniach, kołyski (przeciwspadki), korozję i ścieralność, spowodowane szeregiem przyczyn, m.in. osiadaniem gruntu, zbyt dużymi obciążeniami zewnętrznymi, wewnętrznymi, nieostrożnie prowadzonymi pracami budowlanymi czy też przywołanymi już tu korzeniami drzew. Korozję natomiast wywołują substancje agresywne znajdujące się w ściekach lub substancje agresywne tworzące się podczas transportu ścieków kanałem, wchodzące w reakcje chemiczne lub biologiczne. Najczęściej ma miejsce korozja siarczanowa spowodowana siarkowodorem tworzącym się w warunkach beztlenowego rozkładu zanieczyszczeń w ściekach przy względnie wy-

sokiej temperaturze oraz małej prędkości przepływu ścieków. W ostatnich latach zauważa się, że problem ten dotyczy zarówno starych kanałów jak i względnie nowych odcinków sieci kanalizacyjnej.

W tabeli 1 zestawiono awaryjność sieci kanalizacyjnych w warunkach polskich, opracowaną na podstawie wieloletnich badań ankietowych licznych autorów [10].

**Tabela 1.** Ogólna awaryjność sieci w zależności od wielkości miasta [10]

**Table 1.** General unreliability of sewage network depending of size of city [10]

Liczba mieszkańców	< 10 000	10 000-20 000	20 000-50 000	50 000-100 000	100 000-200 000	200 000 i więcej	Całość
Wartość średnia wszystkich awarii [liczba/km rok]	0,51	2,11	3,53	2,29	3,26	2,00	2,6
Mediana wszystkich awarii [liczba/km rok]	0,37	1,42	2,14	2,14	3,10	0,82	1,56
Liczba analizowanych przedsiębiorstw wod-kan	11	21	40	40	14	9	135

Przedstawione uszkodzenia i awarie, biorąc pod uwagę ich skutki, mogą być dwójakiego rodzaju. Pierwsze widoczne na powierzchni terenu, najczęściej w postaci zalania nieruchomości, zapadnięcia jezdni, nie działającego urządzenia (np. pompy), braku dopływu ścieków do oczyszczalni (system podciśnieniowy), są usuwane na bieżąco. Drugie, niewidoczne na powierzchni terenu, często nie zostają wykryte przez długi okres czasu. To właśnie te awarie stanowią większe zagrożenie dla środowiska i mogą być przyczyną katastrof kanalizacyjnych. Powodują one zanieczyszczenie wód gruntowych i podziemnych poprzez wyciek nieczystości przez nieszczelne kanały. Proces ten nie jest kontrolowany i może być długotrwały. Mogą powodować również przenikanie do przewodów kanalizacyjnych wody, przyczyniając się do obniżenia poziomu wód gruntowych i zwiększając tym samym koszt oczyszczania ścieków. Straty (skutki) wywołane zdarzeniami niepożądanymi można



rozpatrywać w trzech płaszczyznach: technicznej, ekonomicznej oraz środowiskowo-społecznej i mogą to być np.:

- skażenie środowiska,
- obniżenie standardu życia,
- podtopienie budowli,
- zalanie terenów,
- zachorowalność na choroby związane z zanieczyszczeniem otoczenia,
- opłaty z tytułu odszkodowań,
- opłaty środowiskowe.

W odniesieniu do kanalizacji grawitacyjnej wykrywalność uszkodzeń jest bardzo mała z uwagi na brak na ogół ciągłego monitorowania tych sieci. Najczęściej skutki tych uszkodzeń dotyczą środowiska i są trudne do oszacowania. W rozważaniach niezawodnościowych uwzględnia się uszkodzenia głównych kolektorów, kanałów zbiorczych, newralgicznych obiektów na sieci np. pompowni, zbiorników retencyjnych syfonów kanalizacyjnych, które generują znaczące skutki.

#### 4. Opis procedury metody cena ryzyka PHA

Metoda wstępnej analizy zagrożeń PHA nie uwzględnia liczbowego wyznaczania poziomu ryzyka z zastosowaniem probabilistyki, lecz pozwala określić wyłącznie względny jego poziom oraz ustalić kategorię akceptacji, najczęściej stosując matryce ryzyka (matematyczną interpretację ryzyka.) Konstruowanie matrycy ryzyka jest doskonałym i bardzo wygodnym narzędziem ilustrowania jego hierarchii. Samo zaś zhierarchizowanie ryzyka jest ważnym elementem jego analizy [1, 2, 13]. Matryca ryzyka jest to mapa ryzyka podzielona na 9, 16, 25 lub więcej pól, w zależności od przyjętej skali szacowania ryzyka. Łączy skalę prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia niepożądanego np. uszkodzenia kanału ze skalą konsekwencji (skutków), według wzoru (2). Poszczególnym kategoriom prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzeń niepożądanych przypisuje się wagi częstości ( $W_1$ ), natomiast kategorii konsekwencji tych zdarzeń opisuje się liczbową skalą wag skutków ( $W_2$ ) [11].

$$r = W_1 \cdot W_2 \quad (3)$$

W ten sposób każdemu ryzyku przyporządkowuje się współrzędne (kombinacje przyjętych poziomów prawdopodobieństwa zdarzeń nie-

pożądanych i skutków tych zdarzeń). Podział mapy ryzyka na konkretne pola jest bardziej związany ze wskaźnikami ryzyka wyrażonymi w punktach (przedziałach wartości) niż liczbach (skale ciągłe). Szacowanie ryzyka może być w skali trój- i więcej stopniowej. Matrycę można konstruować w dowolny sposób, najczęściej przybiera ona formę wykresu lub tabeli. Skale odnoszące się zarówno do poziomu skutków scenariuszy sytuacji awaryjnych (zdarzeń niepożądanych) jak i prawdopodobieństwa (częstości) ich wystąpienia przypisując je do odpowiedniej kategorii definiuje się na podstawie opinii ekspertów. Przez przypisanie prawdopodobieństwa wystąpienia każdemu określonym zdarzeniu dokonuje się hierarchizacji zagrożeń. Kategorie (poziomy) przedstawia się jako jakościowy opis, można by powiedzieć dość mało precyzyjnie. Liczba kategorii jest dobierana w każdej analizie i dopasowywana do potencjalnych wielkości skutków. Dla prawdopodobieństwa scenariuszy sytuacji awaryjnych (zdarzeń występujących losowo) przypisuje się określenia; przykładowo: bardzo mało prawdopodobne, dość prawdopodobne, prawdopodobne, a pojęcia odniesione do konsekwencji skutków to np. zaniedbywalne, marginalne, poważne czy katastroficzne albo małe, średnie i duże. Tabela 2 przedstawia przykładową matrycę sytuacji awaryjnych (zdarzeń niepożądanych), związanych z określonym zagrożeniem.

**Tabela 2.** Wartości liczbowe ryzyka wystąpienia danego scenariusza sytuacji awaryjnej – dwuparametryczna matryca ryzyka (opracowanie własne)

**Table 2.** Numeric values for risk of failure scenario – two-parameter risk matrix

Zajście zdarzenia	Konsekwencje (Skutki następstw)		
	małe $w_2 = 1$	średnie $w_2 = 2$	duże $w_2 = 3$
Bardzo mało prawdopodobne, $w_1 = 1$	1	2	3
Dość prawdopodobne, $w_1 = 2$	2	4	6
Prawdopodobne $w_1 = 3$	3	6	9

Oszacowane ryzyko należy odnieść do przyjętej w metodzie kategoryzacji akceptacji ryzyka. Jest to tzw. wartościowanie ryzyka zaj-

ścia niekorzystnych zdarzeń. W przypadku, gdy poziom nie mieści się w zakresie ryzyka akceptowalnego wymagane jest określenie działań związanych z prewencją, gotowością, a w szczególności z przygotowaniem sił i środków pozwalających na zmniejszenie ryzyka mogących zaistnieć zdarzeń.

Z reguły małe straty pojawiają się z względnie dużym prawdopodobieństwem, a duże z małym prawdopodobieństwem.

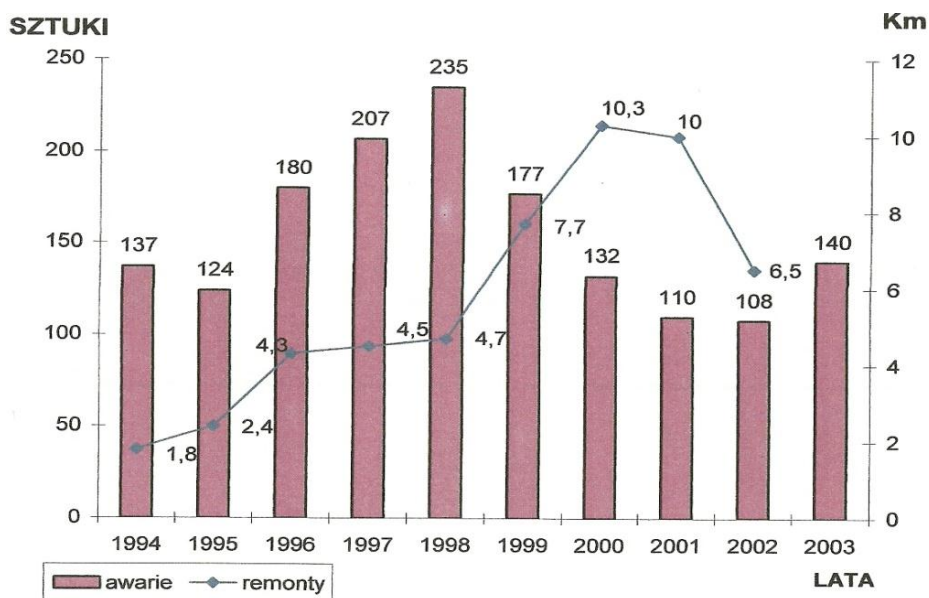
## **5. Oszacowanie ryzyka wystąpienia danego rodzaju uszkodzenia sieci kanalizacyjnej miasta Krakowa**

System kanalizacyjny miasta Krakowa składa się z dwóch oddzielnych systemów posiadających własne oczyszczalnie ścieków. System krakowski z oczyszczalnią ścieków w Płaszowie obsługuje około 500 tys. mieszkańców, a system nowohucki – z oczyszczalnią Kujawy – około 250 tys. mieszkańców. Od stycznia 2010 roku funkcjonuje kolektor Dolnej Terasy Wisły (DTW), kanał międzysystemowy, którego rolą jest odciążenie systemu krakowskiego poprzez skierowanie części ścieków do systemu Nowej Huty i umożliwia dalszą rozbudowę osiedli mieszkaniowych w lewobrzeżnej części Krakowa. Obydwa systemy pracują grawitacyjnie, natomiast w rejonach, w których grawitacyjne odprowadzenie ścieków do systemu centralnego jest ze względów wysokościowych niemożliwe, funkcjonują lokalne sieci kanalizacyjne z lokalnymi oczyszczalniami ścieków. Kanalizacja Krakowa i Nowej Huty rozwiązana jest w systemie ogólnospławnym w centralnych rejonach miasta, a na jego obrzeżach w systemie rozdzielczym, za pomocą którego ścieki sanitarne odprowadzane są do układu centralnego, a ścieki deszczowe do lokalnych cieków wodnych. Główne kolektory kanalizacyjne Krakowa – mimo, iż powstały na początku dwudziestego wieku – posiadają pewną rezerwę przepustowości i są w stanie nadal sprawnie funkcjonować bez konieczności wprowadzania istotnych zmian. Pozwala to na podłączanie do centralnego układu kanalizacyjnego miasta urbanizowanych obszarów Krakowa, które znajdują się w bezpośrednim sąsiedztwie istniejących końcówek kanałów.

Łączna długość sieci (przykanaliki wraz z siecią zewnętrzną) wynosi 1 780 km, wykonana jest z betonu, kamionki, żelbetu, żeliwa, PCV, stali i PE.

W okresie niekiedy nawet ponad 100-letniej eksploatacji systemu kanalizacyjnego zmieniały się warunki eksploatacyjne, wzrastała ilość ścieków, zmniejszała się nośność konstrukcji kanałów w wyniku pogarszania się stanu technicznego, oraz pojawiania się coraz większego obciążenia dynamicznego od taboru samochodowego. Następowало więc, sukcesywne niszczenie konstrukcji rurociągów, zmieniały się, głównie z powodu odkładania się osadów, przy źle ułożonych kanałach, warunki przepływu, powstawały potencjalne warunki do tworzenia się siarkowodoru i korozji siarczanowej.

Na rysunku 2 pokazano jak zmieniała się na przestrzeni 10-cio letniego okresu liczba awarii.



**Rys. 2.** Awarie i remonty na sieci kanalizacyjnej miasta Krakowa [3]

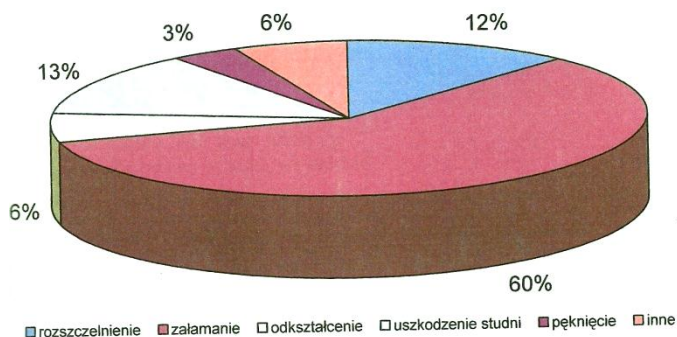
**Fig. 2.** Failures and repairs of the sewage network of Krakow [3]

Przez awarię uważano zdarzenia, których zajście powodowało, że pewna ilość ścieków (lub całkowita) nie została odprowadzona do oczyszczalni ścieków, trafiła w głąb gruntu lub bezpośrednio do odbiornika. Te zdarzenia to rozszczelnienie na sieci, załamanie, odkształcenie, pęknięcie kanału, uszkodzenie studni oraz inne.

Od roku 2003 liczba awarii utrzymuje się średnio na poziomie 150. Jest to możliwe dzięki sukcesywnemu prowadzeniu renowacji lub wymiany uszkodzonych przewodów kanalizacyjnych – rocznie remontom kapitalnym poddawane jest około 10 km kanałów. Jeśli jest to tylko możliwe – remonty przeprowadza się z zastosowaniem metod bezwykopalowych. W ostatnich latach, dzięki pojawieniu się nowoczesnych technologii w podobny sposób realizuje się również budowę nowych kanałów.

Ocenę ryzyka wystąpienia danego rodzaju uszkodzenia sieci kanalizacyjnej miasta Krakowa przeprowadzono opierając się na szczegółowych informacjach o tych awariach występujących w roku 2003 (rysunek 3).

Za kryterium prawdopodobieństwa uszkodzenia kanału przyjęto wartość wskaźnika jednostkowej intensywności uszkodzeń kanałów –  $\lambda$  [ $a^{-1} \cdot km^{-1}$ ]. Wybór tego wskaźnika jako kryterium prawdopodobieństwa powoduje, że ocena ryzyka uszkodzeń przewodów kanalizacyjnych nie jest zbyt trudna, choć dostępność do danych o liczbie awarii sieci kanalizacyjnych jest znacznie trudniejsza niż np. sieci wodociągowych. Wynika to z faktu, że uszkodzenie kanału ujawnia się znacznie później względem momentu jego zaistnienia, nierzadko wykrywane jest przypadkowo.



**Rys. 3.** Procentowy udział poszczególnych awarii na sieci kanalizacyjnej miasta Krakowa w roku 2003 [3]

**Fig. 3.** Percentage share of failure types on sewage network of Krakow in 2003 [3]

Przyjęcie kategorii prawdopodobieństwa (poziom szacowania prawdopodobieństwa) nie jest już tak jednoznaczne. Decydować tu będzie wielkość sieci, liczba brygad remontowych, zaplecze techniczne. Po anali-

zie analogicznego wskaźnika dla sieci wodociągowej charakterystykę poszczególnych poziomów szacowania prawdopodobieństwa (kategorie prawdopodobieństwa) scenariuszy sytuacji awaryjnych odniesiono do założonej, granicznej wartości intensywności uszkodzeń  $\lambda = 0,03 [a^{-1} \cdot km^{-1}]$ . Jest to graniczny poziom prawidłowo funkcjonującej sieci kanalizacyjnej. Przy trójstopniowej skali przyjęto następujące kategorie prawdopodobieństwa:

- małe (mało prawdopodobne) –  $\lambda \leq 0,03 [a^{-1} \cdot km^{-1}]$ ,  $W_1 = 1$
- średnie (dość prawdopodobne) –  $0,03 [a^{-1} \cdot km^{-1}] < \lambda \leq 0,3 [a^{-1} \cdot km^{-1}]$ ,  $W_1 = 2$
- duże (prawdopodobne) –  $\lambda > 0,3 [a^{-1} \cdot km^{-1}]$ ,  $W_1 = 3$

Wartość globalnego wskaźnika jednostkowej intensywności uszkodzeń kanałów wyniosła  $\lambda = 0,102436 [a^{-1} \cdot km^{-1}]$  (dla długości sieci 1367 km i liczby uszkodzeń 140). Wartości wskaźnika jednostkowej intensywności (częstości) uszkodzeń z podziałem na rodzaj zdarzenia oraz kategorie prawdopodobieństwa tych uszkodzenia określone w tabeli 3.

Każde z tych zdarzeń niosło ze sobą konkretny skutek. Rozszczelnienie, pęknięcie kanału, uszkodzenie studzienki przyczyniało się do zmniejszenia nośności konstrukcji kanału, a następnie zapadanie się terenu wokół kanału, studzienki (uszkodzenia samochodów), skażenie wód gruntowych. Odnotowano również uciążliwości związane z odorem z uszkodzonego kanału. Odształcenia kanału, zamulony kanał, zatkana studzienka skutkowały wylewaniem ścieków na ulicę teren posesji.

Przypisanie wagi skutków danemu uszkodzeniu jest bardzo trudne. Rozmiary skutków danego uszkodzenia zależą choćby od miejsca jego wystąpienia, skuteczności służb naprawczych, dostępności do miejsca awarii, czasu zlokalizowania awarii, wielkości uszkodzenia kanału (np. pęknięcia).

Charakterystykę poszczególnych poziomów szacowania skutków niepożądanych zdarzeń w systemie kanalizacyjnym, w trójstopniowej skali przedstawiono poniżej.

- małe; awarie o małej złożoności jej usuwania, występujące na przykanalnikach i kanałach bocznych, nie występują utrudnienia w ruchu (odształcenie, małe rozszczelnienie, pęknięcie),  $W_2 = 1$ ,
- średnie; awarie dotyczące przewodów zbierających i kolektorów, mogą wystąpić utrudnienia w ruchu ulicznym, pojawiają się również

koszty środowiskowe, kanały ściekowe, kanały ogólnospławne (załamanie kanałów, obiektów, pęknięcia kanałów, zapadanie się studzienek)  $W_2 = 2$ ,

- duże; awarie dotyczące kolektorów i głównych kolektorów, bardzo odczuwalne utrudnienia w ruchu ulicznym, uszkodzenie ciągów komunikacyjnych, duże koszty środowiskowe, kanały ogólnospławne (znaczące ubytki kanału, naruszony grunt, zrzut do kanalizacji środków trujących np. amoniaku)  $W_2 = 3$ .

**Tabela 3.** Zestawienie wskaźników częstości uszkodzeń, kategorie prawdopodobieństwa oraz kategorii skutków występujących uszkodzeń (opracowanie własne)

**Table 3.** Set of frequency parameters, probability categories and effect categories for possible failures (own work)

L.p.	Zdarzenie	Wskaźnik częstości uszkodzenia C	Kategoria prawdopodobieństwa	Kategoria skutku
1.	Rozszczelnienie kanału	0,012292 [ $a^{-1} \cdot km^{-1}$ ]	1	1
2.	Załamanie kanału	0,061461 [ $a^{-1} \cdot km^{-1}$ ]	2	2
3.	Odkształcenie kanału	0,006146 [ $a^{-1} \cdot km^{-1}$ ]	1	1
4.	Uszkodzenie studni	0,013316 [ $a^{-1} \cdot szt^{-1}$ ]	1	2
5.	Pęknięcie kanału	0,003073 [ $a^{-1} \cdot km^{-1}$ ]	1	2
6.	Inne	0,006146 [ $a^{-1} \cdot km^{-1}$ ]	1	1

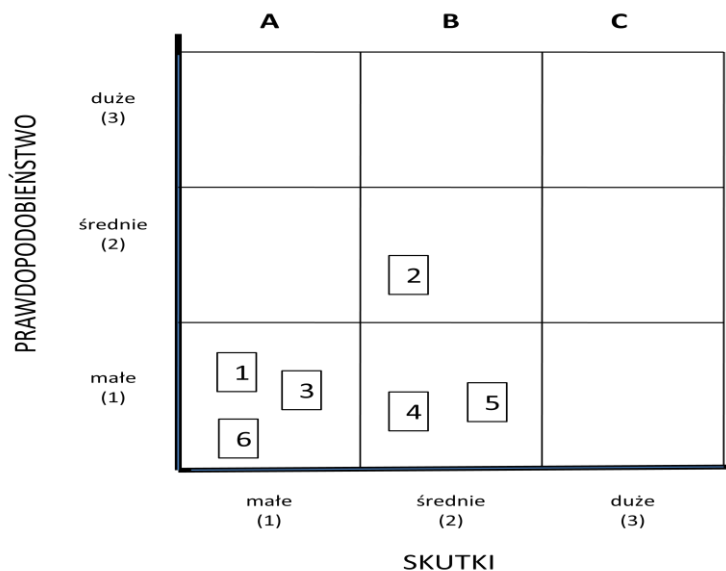
Do wartościowania ryzyka, dla większej dokładności, założono 5 poziomów ryzyka (tab. 4).

**Tabela 4.** Kategorie i wartości liczbowe ryzyka (opracowanie własne)

**Table 1.** Risk categories and values of risk (own work)

Opis ryzyka	Wartość liczbową	Kategoria akceptacji ryzyka
Bardzo małe	1	Tolerowane
Małe	2	
Średnie	3 i 4	Kontrolowane
Duże	6	Nieakceptowalne
Bardzo duże	9	

Ryzyko wystąpienia awarii sieci kanalizacyjnej miasta Krakowa z uwzględnieniem rodzaju awarii przedstawiono w postaci mapy ryzyka na rys. 4.



**Rys. 4.** Mapa ryzyka uszkodzeń sieci kanalizacyjnej miasta Krakowa (opracowanie własne)

**Fig. 4.** Risk map for the sewage network of Krakow (own work)

## 6. Podsumowanie

Zaprezentowana w pracy ocena ryzyka uszkodzeń sieci kanalizacyjnej miasta Krakowa, wykorzystująca metodę wstępnej analizy zagrożeń PHA ma charakter dyskusyjny. Ocenę tą poprzedzono charakterystyką oceny niezawodności i bezpieczeństwa omawianego systemu, jako działań niezbędnych do oceny ryzyka oraz niezbędnymi informacjami o przyczynach i skutkach awarii sieci kanalizacyjnych. Po scharakteryzowaniu procedury metody PHA, wykorzystując matrycę ryzyka, oszacowano ryzyko wystąpienia stwierdzonych rodzajów uszkodzeń (rozszczelnienie kanału, załamanie kanału, odkształcenie kanału, uszkodzenie studni, pęknięcie kanału i inne) przy pomocy wskaźnika częstości uszkodzeń, na podstawie zaproponowanych wartości kategorii prawdopodobieństwa i kategorii skutku. Niemożność porównania wyników tej



oceny z danymi literaturowymi wynika z braku takich danych w literaturze, odnoszących się do sieci kanalizacyjnych.

## Literatura

1. **Biedugnis S., Smolarkiewicz M.:** *Bezpieczeństwo i niezawodność układów wodociągowych*. Wydawnictwa Przemysłowe WEMA Sp. z o.o. Warszawa 2004.
2. **Biedugnis S., Smolarkiewicz M, Podwójci P., Czapczuk A.:** *Mapy ryzyka funkcjonowania rozległych systemów technicznych*. Ochrona Środowiska Nr 9, 2007, str. 303÷312.
3. **Drozdowski Ł.:** *Opis funkcjonowania sieci kanalizacyjnej miasta Krakowa*. Praca dyplomowa pod kierunkiem J. Kapcia. Kraków 2004.
4. **Kapcia J.:** *Awarie w systemach kanalizacyjnych*. Rynek Instalacyjny Nr 5, 2006. str. 50÷52.
5. **Królikowska J., Królikowski A.:** *Analiza porównawcza metod oceny niezawodności systemów usuwania i unieszkodliwiania ścieków*. INSTAL Nr 10, 2008. str. 74÷77.
6. **Królikowska J., Królikowski A.:** *Podnoszenie poziomu niezawodności działania podsystemów usuwania ścieków w świetle doświadczeń eksploatacyjnych*. Materiały V Ogólnopolskiej Konferencji Naukowo-Technicznej nt. „Aktualne zagadnienia w uzdatnianiu i dystrybucji wody”. Wydawnictwo P. Śl. Szczyrk 2009. str. 347÷358.
7. **Kuliczkowski A.:** *Wybrane problemy przebudowy układów kanalizacyjnych w dużych miastach*. Gaz, Woda i Technika Sanitarna. Nr 6. 1986.
8. **Kuliczkowski A.:** *Katastrofy kanalizacyjne*. Gaz, Woda i Technika Sanitarna. Nr 2. 1995.
9. **Opyrchał L., Fiedler K., Jankowski W., Mazurczyk A.:** *Analiza ryzyka budowli piętrzącej metodą „drzewa zdarzeń” na przykładzie zapory Klimkówka*. XIV Konferencja Naukowo-Techniczna – Korbielów 2002. Metody Komputerowe w Projektowaniu i Analizie Konstrukcji Hydrotechnicznych. str. 147÷159.
10. **Praca zbiorowa pod redakcją Marka M. Sozańskiego** *Wodociągi i Kanalizacja w Polsce, tradycja i współczesność*. Polska Fundacja Ochrony Zasobów Wodnych. Poznań-Bydgoszcz 2002.
11. **Rak J.:** *Metoda szacowania ryzyka zagrożenia systemu zaopatrzenia w wodę*. Ochrona Środowiska Nr 2, 2003. str. 33÷36.
12. **Rak J.:** *Wybrane zagadnienia niezawodności i bezpieczeństwa w zaopatrzeniu w wodę*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2008.
13. **Wolanin J.:** *Zarys teorii bezpieczeństwa obywateli*. Wydawnictwo DAN-MAR Warszawa 2005.

## **Application of PHA Method for Assessing Risk of Failure on the Example of Sewage System in the city of Krakow**

### **Abstract**

Sewage systems may pose a potential danger, threatening the environment, users of the system and its nearest surroundings. The analysis of these systems should therefore take into account both assessment of reliability of functioning, as well as the reliability of safety. Increasing number of failures, often their disastrous consequences, external conditions of the system dictate this approach in assessing and managing those systems.

Evaluation of reliability of functioning is mostly simplified to the issue of determining the frequency of failures and removing its causes. Reliability generates safety of system, but does not directly determine its value. Extending tests of reliability of functioning with research on process of failures impact on the environment and surroundings, including the community, leads to safety. Therefore safety in terms of technology, that is technical safety replaces reliability. Safety (the state of safety reliability) at the macro level in the area of sewage system can be defined by analogy to water supply systems as a condition of sewage management enabling collection, transportation treatment of current and prospective quantity of sewage (municipal) and rainwater, at maintaining sanitary, environmental protection and maintenance of public order requirements.

The paper evaluates the technical risk for the sewage network of the city of Krakow. The basis for calculations are field studies concerning operation of the said network, with the focus on technical data (network type, length, materials, size) and the failure rate information (type and duration of failure, unwanted event frequency). A two-dimensional matrix for failure risk in the pipelines was prepared with consideration to the type of pipeline and the material, as well as a risk map for pipeline malfunction. Obviously, the number of factors may be extended. In order to perform such analyses and add new factors, an appropriate database is needed, while in the case of sewage systems there is still little data collected.

The evaluated risk of failure for the studied network was discovered to be in the tolerated and controlled-risk groups. The matrices and technical risk maps can be useful in the process of optimizing the operation of the sewage network, e.g. in planning and executing repair works.