

**RISK ANALYSIS AS A MANAGEMENT INSTRUMENTS  
OF WATER SUPPLY SYSTEM OPERATION**

**ANALIZA RYZYKA JAKO NARZĘDZIE W PROCESIE  
ZARZĄDZANIA EKSPLOATACJĄ SYSTEMÓW  
WODOCIĄGOWYCH**

**Zimoch Izabela**

Silesian University of Technology, Institute of Water and Sewage Engineering  
Politechnika Śląska, Instytut Inżynierii Wody i Ścieków  
44-100 Gliwice, Konarskiego St. 18, Poland

e-mails: [izabela.zimoch@polsl.pl](mailto:izabela.zimoch@polsl.pl)

**Abstract.** In this paper the calculations procedure of the *Safety Reliability* computer program is presented. Basing on seven simulation scenarios the risk analysis results of Water Supply System (WSS) exploitation were determined. The safety reliability of the system operation as a detection probability of secondary contamination of water at any water pipe network area has been estimated by the effect of these computer simulations. Risk analysis on acceptable level takes into consideration setting the quantity and localisation of monitoring water quality points too.

**Keywords:** reliability analysis, water supply system, failure, water contamination

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono procedury obliczeniowe modelu komputerowego *Niezawodność bezpieczeństwa*. Zaprezentowano wyniki analizy ryzyka eksploatacji systemu zaopatrzenia w wodę (SZW) siedmiu scenariuszy. Efektem przeprowadzonych symulacji komputerowych było oszacowanie niezawodności bezpieczeństwa wyrażonej prawdopodobieństwem wykrycia zanieczyszczenia w dowolnym obszarze eksploatacji sieci wodociągowej oraz określenie liczby i lokalizacji odcinków pomiarowych identyfikujących pojawienie się zanieczyszczenia w SZW, na zadanym poziomie akceptowanego ryzyka.

**Słowa kluczowe:** analizy niezawodnościowe, system zaopatrzenia w wodę, uszkodzenie, zanieczyszczenie wody

## **RISK ANALYSIS AS A MANAGEMENT INSTRUMENTS OF WATER SUPPLY SYSTEM OPERATION**

### **1. Introduction**

Rational operation of modern water supply systems (WSS) should base on realization of three fundamental operation processes i.e. management, control and estimation. The management composes a set of taken actions aimed on ensuring optimal connections between exploitation assumptions of water pipeline systems and high expectations of water consumers for water pipe enterprises' quality of service. The mass delivery of drinking water and mass sewage drain act signed into law on June 7, 2001, imposes enterprises which operate WSS on "obligation of ensuring capacity of owned water pipe installations for delivery realization of water of required amount and under proper pressure and continuous water delivery with ensured appropriate quality".

For current operation conditions of WSS, shaped among others by constant fall in water demand, widely interpreted operation management of a water pipe system gets significant meaning. On the one hand ensuring high quality of the product, on the other hand establishing acceptable price level. Recently, ensuring of high system reliability, concerning amount as well as quality of delivered water to a consumer, become a significant factor determining the product price. Quality aspect results from a fact that water as a fundamental life element cannot constitute any harm for a consumer health. Currently possessing a certificate of quality management system in accordance with ISO 9001:2000 standards is treated by water pipeline enterprises as a priority which ensures control over intake, treat and distribution of water process that guarantee delivering water of high quality value to a customer. The above standard as well as notations of article 8 of Council Directive 98/83/EC lay upon water pipe enterprises a duty of analysis of widely understood risk concerned to both water consumer and water producer. Producer risk is shaped by random events causing a disruption of regular system exploitation conditions resulting in financial losses. These losses can be caused by income decline because of not sold water or because of a discount system to price of water that does not meet quality standard requirements (ordinance of the Ministry of Health from March 29, 2007, Dz.U. 61 poz. 471), increase of production costs in case of

necessity of intensification of a technological discipline of water treatment process resulting from sudden deterioration of water at the source (flood, flash rains) and increasing maintenance costs of overestimated distribution systems. Water consumer risk is caused by delivery stoppage in case of a breakdown in any technological group of WSS. Furthermore the risk results from potential possibilities of delivering water that does not fulfill quality criterion as effect of changes in secondary contamination process either by a result of numerous water pipeline breakdowns of a water distribution system, or as a result of purposeful terrorizing actions.

Risk management of water pipeline systems requires identification of the most important factors shaping possibilities of not meeting the task charged water pipeline enterprises by local societies to water delivery. This management requires continuous solving of complex WSS operation problems, where supporting decisions making tool are computer simulations. Nowadays computer science technology level allows using it for determining up-to-date water pipeline system operation as a part of operation monitoring of any technological elements in aspect of technological processes as well as engineering solutions. What is more, they allows for performing various simulations of hypothetical random events of different probabilities of occurrence. Use of computer analysis results gives possibilities of making purposeful decisions, which minimizes results of these incidents and what is next it allows designing operation strategy to diminish consequences of occurrences. The whole of the above actions tend to reduce risk taken by water pipeline enterprises and, as a consequence, to increase of WSS users' safety.

## **2. Computer program - *Safety Reliability***

A water pipeline network is a dynamic system of variable exploitation parameters and its high level of operation reliability ensures proper process of its monitoring. The monitoring composes of a set of actions that include planning, way of measures, analysis and estimation of functionality of the water distribution system within hydraulic, quality and technical scope. The rules of proper and economical management of monitoring processes should base on rational planning of number of control points and range of preformed there measurements. The monitoring strategy should results from present exploitation conditions of WSS, shaped by current source efficiency and water demand as well as aspiration for minimizing water pollution risk in a water distribution subsystem (WDS).

The essential decision tool used to determine range of water pipeline network monitoring is a computer program – *Safety Reliability* [1] developed as a part of a research project PB nr 5T07E 044 25. This program allows determining probability of water pollution/contamination  $P_w$  at any point of WDS, for fixed level of substance concentration in transported water. Moreover, the program traces localization, for a given number of measurement points and basing on simulation procedures, of optimal links for quality monitoring, for which detection probability function achieves maximal value. The fundamental analytical tool of the reliability model is a hydraulic model of a WDS water pipeline network. The model allows performing space-time simulations of contamination spread in a water pipeline network that is a base for calculation of three-dimensional range matrix  $RM(i,j,t)$  of contamination interaction. Computer package Safety reliability, in a process of space-time programming of range level, refers to simulation procedures of the mathematical hydraulic model EpaNet2. The next step of computation procedures is determining two-dimensional objective matrix  $OM(i,j)$ . It is a square, binary matrix defined in a function of a fixed water contamination level in water distribution system and number of links in hydraulic model of WDS. An integral element of Safety reliability algorithm is determining, for given boundary probability, acceptable detection time  $c_{tzt}$  of contamination at any link of a water pipeline network. This time is a basis for determining a binary rate of propagation matrix  $RPM(i,t)$ . The above matrices are a basis for solving a defined  $OF$  (objective function), which defines probability of contamination detection at any area of water pipeline network operation initiated at any junction of a hydraulic model of WDS. Objective function  $OF$  (1) appears as complex mathematical relation, which takes into consideration impact on safety reliability of 5 arguments stated in absolute values: hydraulic load of a  $j^{th}$  link  $Q_{jw}$ , link susceptibility to lowering of water quality stated as retention time at a  $j^{th}$  link  $T_{jw}$  and amount of water pipeline diameter  $D_{jw}$ , link susceptibility to failure occurrence as relative failure intensity  $\lambda_{jw}$ , and consumer complaint number against quality of delivered water  $S_{jw}$ .

$$OF = \sum_{j=1}^n (\alpha \cdot Q_{jw} + \beta \cdot T_{jw} + \gamma \cdot D_{jw} + \delta \cdot \lambda_{jw} + \varepsilon \cdot S_{jw}) \cdot y_j \quad (1).$$

Participation of individual link features as values of the objective function  $OF$  are described by weights  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  and  $\varepsilon$ . Variable  $y_j$ , which occurs in functional form (1), is a binary variable describing a detection event (value

1) or fail of detection event (value 0) of given concentration of contamination at any  $j^{th}$  link of the hydraulic model of WDS.

Defined objective function *OF* in optimization task of Safety reliability program (determining maximal value), because of large number of junctions of the analyzed hydraulic model of water pipeline network, is solved with use of a genetic algorithm. Genetic algorithms are used to find approximate solutions when quantity of solution space is too big to be able analyzing each case that meets functional relation of contamination detection probability. The algorithm is a stochastic method of searching among solution space basing on biological evolution mechanisms.

Therefore the solution of optimization task is determining number and localization of monitored measurement links identifying occurrence of contamination at any area of WSS operation, initiated at any node of hydraulic model, considering limitations the objective function *OF*. Moreover, the solution of optimization task is determining safety reliability expressed as probability of contamination detection at any field of water pipeline operation.

The presented computer program – Safety reliability allows performing analysis of various computation scenarios which are basis of determining optimal number of measurement links in a process of quality, hydraulic and technical monitoring.

### **3. Water supply system of Wrocław city and its hydraulic model**

Water supply system of Wrocław city is being operated for over 135 years. At present it is a source of drinking water for over 680 000 customers. Water is delivered to Wrocław by three independent water supply structures (table 1): Water Treatment Plant Mokry Dwór (WTP Mokry Dwór), Water Treatment Plant Na Grobli (WTP Na Grobli) and Water Treatment Plant Leśnica (WTP Leśnica). The city is divided into four water supply zones. WTP Na Grobli supplies water to about 350 000 inhabitants of so called “inner zone”, i.e. populous city center. WTP Mokry Dwór supplies “outer zone” of the city, which encircles inner zone and, through the Bystrzycka pump-station, northeastern suburban (about 265.000 inhabitants). Between these zones there is located so called mixed zone, whereas fourth water supply zone covers settlements placed in Leśnica. This zone is supplied by deep water delivered to about 5.000 inhabitants form WTP Leśnica.

Table 1. Water supply structures of Wrocław

Water supply structure	Mean production [m <sup>3</sup> /d]	Production capacity [m <sup>3</sup> /d]
ZUW Mokry Dwór	58 000	98 000
ZUW Na Grobli	61 000	120 000
ZUW Leśnica	1 000	1 1000

The water pipeline network of Wrocław is widespread ringed system of water pipelines of differential diameters of range Ø1400- Ø25 mm (table 2). Total length of the water pipeline network is 1 790.41 km.

Table 2. Water pipeline profile of Wrocław

Network type	Diameter [mm]	Length[km]
Trunk water main network	Ø400 - Ø1400	200.99
Distribution network	Ø80 - Ø300	1 192.19
Pipeline terminals	Ø25 - Ø250	397.23

The water pipeline network of the city typifies also high diversification of materials and high variety of exploitation periods of its elements. Fundamental materials being used for construction during 130-years of operation of the WSS were cast iron, steel, PVC as well as lead.

Essential element of the Wrocław distribution subsystem is central pump station – Bystrzycka, placed in western part of the system. The station ensures operation of high pressure zone, which delivers water to inhabitants of settlements: Nowy Dwór, Kozanów, Gądów, Muchobór Mały. Moreover, in the subsystem of Wrocław, there are working two zone hydrophone stations - Orzechowa and Krynicka which are to locally elevate water pressure at area of Gaj settlement. Besides technical structures that stabilize hydraulic operation of the water pipeline network are tanks with treated water placed in the area of water treatment stations. There are placed two central tanks and two tanks accumulating water which total capacity is 45 000 m<sup>3</sup> [2, 3].

Mathematical hydraulic model of the Wrocław WDS was done with use of computer program - EpaNet 2. The model takes into account only most fundamental water intakes of the system. Nodes of the model were unambiguously defined by defining its space coordinates  $x$ ,  $y$  and  $z$ , amount of daily water demand and demand category. In the process of schematizing topography of the water pipeline network there were taken into consideration all main and distribution pipelines and network terminals of diameter above 100 mm. Complete identification of links of the model were

achieved by defining its diameter, length, start and end nodes, material of the link pipe, its age and roughness factor. It was taken into consideration, in the spatial structure of the hydraulic model of Wrocław, three supply structures: ZUW Na Grobli waterworks, ZUW Mokry Dwór waterworks and ZUW Leśnica waterworks. Next elements of the model structure are central pumping station - Bystrzycka and hydrophone stations - Orzechowa and Krynicka. Mathematical model of the Wrocław WSS defines patterns of hourly water demand variety, basing on real operation parameters of the system from exploitation period 2004-2006. The above model of Wrocław WSS composes of 781 nodes, 1053 links, 3 supply sources, 25 pumps and 24 valves [1].

The above mathematical model developed during realization of research project PB nr 5T07E 44 25 in 2005-2006 was subjected to calibration. Compliance evaluation was done with use of the Thiel's inconsistency statistic, through compliance evaluation of simulated time series and real values of pressure at nodes and flow values of links. Fit inconsistency of simulated and real values can result from model weakness or large number of random variables. Taking into consideration the above things, Thiel has divided mean-square error of modeling process into systematic part (mean value and variance) resulting from incorrectly verified dynamic model and into random part shaped by random operation conditions of real dynamic systems (covariance). Values of obtained Thiel's inconsistency characteristics indicate a nonsystematic error. The obtained, as a part of a calibration process, average value of mean-square error equals 1.05 m of water (variation range 0.0355 – 5.4234) and corresponds to conventional standards of fitting of hydraulic models of water pipeline networks (absolute error < 2.5 meters of water) of pressure function. Calibrated in such way hydraulic model of Wrocław WSS became integral element of computational procedures of the Safety reliability computer program.

#### **4. Safety reliability of Wrocław WSS**

Estimation of safety reliability of water delivery system of Wrocław was conducted with use of computational procedures of *Safety Reliability* program. The analysis of crossings of boundary value of contamination in the water pipeline network was performed for 7 computational scenarios corresponding to changing number of measurement links in process of WDS monitoring. There were considered 10, 20, 30, 50, 80, 150 and 300 controls links, in reliability simulations. For each of them there was traced value of objective function  $OF$  and probability  $P_w$  of detecting of contamination over

30  $\mu\text{g}/\text{dm}^3$  of critical THM concentration in pipeline water. During researches, THM – by-product of chloride water disinfection – was assumed to be proper indicator of secondary water pollution process in a distribution network. Moreover, this parameter choice in the analysis is justified by its carcinogenic impact on people's health. In such aspect increased THM concentration in drinking water increases customer's health risk. For considered simulation it was assumed minimal 30% level of nodes coverage, where detection time of contamination in water pipeline network is equal 11 hours. The obtained simulation results of 7 computational scenarios are presented in table 3. There is shown in figure 1 optimal localization of 30 monitoring points generated by *Safety Reliability* model.

Table 3. Simulations results of the computation scenarios for WSS of Wrocław

Scenario	Measurement link quantity	THM concentration 30 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$	
		Objective function $OF$	$P_w$
1	10	0.32974014	0.244101633
2	20	0.4416084	0.376588022
3	30	0.52085227	0.470054446
4	50	0.61817071	0.570780399
5	80	0.70546875	0.675136116
6	150	0.77395954	0.803085299
7	300	0.77425157	0.813067151



Fig. 1. Localization of the 30 most optimal measurement links for WSS of Wrocław



## **5. Conclusions**

The performed analysis of obtained results allowed for unambiguous statement that both objective function and detection probability achieve constant value for set maximal number of measurement links corresponding to value of 150, above which increase of safety reliability indicators (detection probability and objective function) can be assumed as zero (0,07%).

The effect of performed reliability analysis is determining risk level of not detecting contamination in WDS, for set number of measurement links in function of THM concentration. For risk level 0.1 of not detecting contamination in system, number of needed measurement links of water quality in Wrocław WSS is 80.

Elaborated model makes up valuable analytical tool in process of WSS operation management. The model can support adopting optimal, economically proven number of control points in monitoring procedures of water pipeline network operation. Ability of conducting numerous computational scenarios allows adopting solution which ensures minimization of water pollution risk in system and increases safety of WSS customers.

## **References**

1. Zimoch I. *Opracowanie modelu niezawodności funkcjonowania systemu zaopatrzenia w wodę (SZW) w aspekcie wtórnego zanieczyszczenia wody w sieci wodociągowej*. Final realization report of the research project PB nr 5 T07E 044 25, Gliwice, 2007.
2. Zimoch I. *The reliability assessment of water treatment subsystem of Wrocław city*. 9<sup>th</sup> International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering. Ottenstein, 2005.
3. Zimoch I., Jamer M., Binda B. *Eksploatacja systemu dystrybucji wody we Wrocławiu w aspekcie awaryjności sieci wodociągowej*. *Ochrona Środowiska* nr 3, 2005.

---

## ANALIZA RYZYKA JAKO NARZĘDZIE W PROCESIE ZARZĄDZANIA EKSPLOATACJA SYSTEMÓW WODOCIĄGOWYCH

### 1. Wprowadzenie

Racjonalne funkcjonowanie współczesnych systemów zaopatrzenia w wodę (SZW) powinno opierać się na realizacji trzech podstawowych procesów eksploatacyjnych to jest: zarządzanie, kontrola i ocena. Zarządzanie stanowi zespół podejmowanych działań, mających na celu zapewnienie optymalnych powiązań założeń eksploatacyjnych systemów wodociągowych z wysokimi oczekiwaniami odbiorcy wody, co do poziomu usług świadczonych przez przedsiębiorstwa wodociągowe. Ustawa o zbiorowym zaopatrzeniu w wodę i zbiorowym odprowadzeniu ścieków z 7 czerwca 2001r, narzuca na przedsiębiorstwa eksploatujące SZW „obowiązek zapewnienia zdolności posiadanych urządzeń wodociągowych do realizacji dostawy wody w wymaganej ilości i pod odpowiednim ciśnieniem, oraz dostawy wody w sposób ciągły i niezawodny przy zapewnieniu jej należytej jakości”.

W aktualnych warunkach eksploatacji SZW, kształtowanych między innymi ciągłym spadkiem zapotrzebowania na wodę, szeroko pojęte zarządzanie pracą systemu wodociągowego nabiera bardzo istotnego znaczenia. Z jednej strony jest to zapewnienie wysokiej jakości produktu, a z drugiej zaś ustalenie akceptowanego poziomu cen. Ostatnio coraz częściej istotnym czynnikiem cenotwórczym staje się zapewnienie wysokiej niezawodności systemu, odniesionej nie tylko do ilości ale również i jakości dostarczanej odbiorcy wody. Aspekt jakościowy wynika z faktu, iż woda jako podstawowy element życia nie może stanowić zagrożenia dla zdrowia konsumenta. Obecnie posiadanie certyfikatu zarządzania jakością zgodnie z wymaganiami międzynarodowej normy ISO 9001:2000, traktowane jest przez przedsiębiorstwa wodociągowe jako priorytet zapewniający kontrolę procesu ujmowania, uzdatniania i dystrybucji, gwarantującą dostarczenie konsumentowi wody o wysokich walorach jakościowych. Zarówno powyższa norma jak i zapisy w artykule 8 Dyrektywy Rady Unii Europejskiej 98/83/EC nakładają na przedsiębiorstwa wodociągowe obowiązek analizy szeroko pojętego ryzyka odniesionego zarówno do producenta jak i konsumenta wody. Ryzyko producenta wody kształtowane

jest losowymi zdarzeniami powodującymi zakłócenie w normalnych warunkach eksploatacji systemu, konsekwencją których jest powstanie strat finansowych. Straty te powodowane mogą być zmniejszeniem wpływów z tytułu: nie sprzedania wody lub systemu bonifikat do ceny wody niespełniającej normowych wymagań jakości (Rozporządzenie Ministra Zdrowia z 29.03.2007r, Dz.U. 61 poz. 471), wzrostu kosztów produkcji w sytuacjach konieczności zaostreżenia reżimu technologicznego uzdatniania powodowanych nagłym pogorszenia wody w źródle (powódzie, nawalne deszcze), oraz rosnących kosztów utrzymania przewymiarowanych systemów dystrybucji. Ryzyko konsumenta wody do spożycia związane jest z możliwością przerwania jej dostawy, na skutek awarii w dowolnym ugrupowaniu technicznym SZW. Ponadto ryzyko to wynika z potencjalnych możliwości dostarczenia wody niespełniającej obowiązujące normatywy jakości w efekcie jej zmian w procesie wtórnego zanieczyszczenia wody czy też w skutek licznych awarii rurociągów w systemie dystrybucji bądź celowych działań terrorystycznych.

Zarządzanie ryzykiem w systemach wodociągowych wymaga więc rozpoznania najistotniejszych czynników kształtujących możliwości niespełnienia przez przedsiębiorstwa wodociągowe, powierzonego im przez społeczność lokalne zadania zaopatrzenia w wodę. Zarządzanie to wymaga więc ciągłego rozwiązywania złożonych problemów eksploatacyjnych SZW, w którym wspomagającym narzędziem decyzyjnym stają się symulacje komputerowe. Obecny poziom rozwoju technik informatycznych pozwala na wykorzystanie ich w ocenie bieżącego funkcjonowania systemów wodociągowych w procesie monitoringu pracy dowolnych elementów technicznych w aspekcie procesów technologicznych, jaki i rozwiązań technicznych. Ponadto, pozwalają one na prowadzenie symulacji różnorodnych wariantów hipotetycznych zdarzeń losowych, o różnym prawdopodobieństwie ich występowania. Wykorzystanie wyników analiz komputerowych daje możliwość podejmowania celowych kroków, minimalizujących skutki tych zdarzeń, a co za tym idzie pozwala opracować strategię działań zmniejszających następstwa ich zaistnienia. Ogół powyższych przedsięwzięć zmierza do zmniejszenia ryzyka, jakie ponoszą firmy wodociągowe a tym samym zwiększa bezpieczeństwo użytkowników.

## **2. Program komputerowy *Niezawodność Bezpieczeństwa***

Sieć wodociągowa stanowi dynamiczny układ o zmiennych parametrach eksploatacyjnych, którego wysoki poziom niezawodności funkcjonowania zapewnia właściwy proces jej monitoringu. Monitoring ten stanowi zespół

działań obejmujących planowanie, sposób pomiarów, analiz i ocen funkcjonowania systemu dystrybucji wody w zakresie hydraulicznym, jakościowym i technicznym. Zasady prawidłowego oraz ekonomicznego uzasadnionego zarządzania procesami monitoringu powinny opierać się na racjonalnym planowaniu zarówno liczby punktów kontrolnych jak i zakresu dokonywanych w nich pomiarów. Strategia monitoringu winna wynikać z bieżących warunków eksploatacji SZW, kształtowanych aktualną wydajnością źródeł zasilania oraz rozbiorem wody w sieci jak również dążenia do minimalizacji ryzyka zanieczyszczenia wody w podsystemie dystrybucji wody (PsDyW).

Niezbędnym narzędziem decyzyjnym w określaniu zakresu monitoringu sieci wodociągowej jest opracowany w ramach realizacji projektu badawczego PB nr 5T07E 044 25, program komputerowy Niezawodność bezpieczeństwa [1]. Program ten pozwala na określenie wielkości prawdopodobieństwa zanieczyszczenia/skażenia wody  $P_w$  w dowolnym punkcie PsDyW, dla ustalonego poziomu stężenia substancji w transportowanej wodzie. Ponadto program, dla przyjętej liczby punktów pomiarowych, w oparciu o procedury symulacyjne, wyznacza lokalizację optymalnych odcinków monitoringu jakościowego, dla których funkcja prawdopodobieństwa wykrycia osiąga wartość maksymalną. Podstawowym narzędziem analitycznym modelu niezawodności jest model hydrauliczny sieci wodociągowej PsDyW. Model ten pozwala na przeprowadzenie czasoprzestrzennych symulacji rozprzestrzeniania się w sieci wodociągowej zanieczyszczenia/skażenia, będących podstawą określenia trójwymiarowej macierzy zasięgu oddziaływania zanieczyszczenia  $RM(i,j,t)$  (range matrix). Pakiet komputerowy Niezawodność bezpieczeństwa w programowaniu czasoprzestrzennego poziomu pokrycia odwołuje się do procedur symulacyjnych matematycznego modelu hydraulicznego EpaNet2. Kolejnym krokiem procedur obliczeniowych jest określenie dwuwymiarowej macierzy celu  $OM((i,j))$  (objective matrix). Jest to kwadratowa, zerojedynkowa macierz zdefiniowana w funkcji przyjętego poziomu zanieczyszczenia wody w systemie dystrybucji oraz liczby odcinków w modelu hydraulicznym PsDyW. Nieodzownym elementem algorytmu Niezawodność bezpieczeństwa jest wyznaczenie, z zadaniem prawdopodobieństwem granicznym, akceptowanego czasu  $c_{tzt}$  wykrycia zanieczyszczenia/skażenia w dowolnym odcinku sieci wodociągowej. Czas ten jest podstawą określenia zerojedynkowej macierzy tempa wykrycia  $RPM(i,t)$  (rate of propagation matrix). Powyższe macierze są podstawą rozwiązania zdefiniowanej funkcji celu  $OF$  (objective function), która określa prawdopodobieństwa wykrycia w dowolnym obszarze eksploatacji

sieci wodociągowej zanieczyszczenia/skażenia wprowadzonego w jakimkolwiek węźle modelu hydraulicznego PsDyW. Funkcja celu  $OF$  (1) występuje w postaci złożonej zależności matematycznej, uwzględniającej wpływ na niezawodność bezpieczeństwa SZW następujących 5 argumentów wyrażonych w wartościach względnych: obciążenie hydrauliczne  $j$ -tego odcinka  $Q_{jw}$ , podatność odcinka na obniżenie jakości wody wyrażona czasem retencji w  $j$ -tym odcinku  $T_{jw}$  i wielkością średnicy przewodu wodociągowego  $D_{jw}$ , podatność odcinka na wystąpienie na nim awarii w postaci względnej intensywności uszkodzeń  $\lambda_{jw}$ , oraz liczba skarg konsumentów na jakość dostarczanej wody  $S_{jw}$ .

$$OF = \sum_{j=1}^n (\alpha \cdot Q_{jw} + \beta \cdot T_{jw} + \gamma \cdot D_{jw} + \delta \cdot \lambda_{jw} + \varepsilon \cdot S_{jw}) \cdot y_j \quad (1).$$

Udziały poszczególnych cech odcinka w wartości funkcji celu  $OF$  określają wagi  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  oraz  $\varepsilon$ . Występująca w postaci funkcyjnej (1) zmienna  $y_j$  jest zmienna zerojedynkowa, określająca zdarzenie wykrycia (wartość 1) lub niewykrycia (wartość 0) zadanego stężenia zanieczyszczenia/skażenia w dowolnym  $j$ -tym odcinku modelu hydraulicznego PsDyW.

Zdefiniowana funkcja celu  $OF$  w zadaniu optymalizacyjnym programu Niezawodność bezpieczeństwa (wyznaczenie wartości maksymalnej), ze względu na dużą liczbę węzłów w analizowanym modelu hydraulicznym sieci wodociągowej, rozwiązywana jest przy użyciu algorytmu genetycznego. Algorytm genetyczny służy do znajdowania przybliżonych rozwiązań zadań optymalizacyjnych, gdy liczebność przestrzeni rozwiązań jest zbyt duża, aby można było dokonać analizy każdego przypadku realizującego związek funkcyjny prawdopodobieństwa wykrycia zanieczyszczenia/skażenia. Algorytm ten jest stochastyczna metoda przeglądu przestrzeni rozwiązań, która oparta jest na mechanizmach ewolucji biologicznej.

Rozwiązaniem zadania optymalizacyjnego jest więc określenie liczby i lokalizacji monitorowanych odcinków pomiarowych identyfikujących pojawienie się zanieczyszczenia w dowolnym obszarze eksploatacji SZW, wprowadzonego do systemu wodociągowego w jakimkolwiek węźle modelu hydraulicznego, przy uwzględnieniu ograniczeń funkcji celu  $OF$ . Ponadto rozwiązaniem zadania optymalizacyjnego jest wyznaczenie niezawodności bezpieczeństwa wyrażonej prawdopodobieństwem wykrycia zanieczyszczenia w dowolnym obszarze eksploatacji sieci wodociągowej.

Przedstawiony program komputerowy Niezawodność bezpieczeństwa pozwala na przeprowadzenie analizy różnorodnych scenariuszy obliczeniowych, będących podstawą wyznaczenia optymalnej liczby

odcinków pomiarowych w procesie monitoringu jakościowego, hydraulicznego i technicznego.

### 3. System zaopatrzenia w wodę Wrocławia i jego model hydrauliczny

System zaopatrzenia w wodę Wrocławia eksploatowany jest od ponad 135 lat. Obecnie system ten stanowi źródło wody spożywczej dla ponad 680 tysięcy jej odbiorców. Woda do Wrocławia dostarczana jest z trzech niezależnych układów zasilania (tabela 1): ZUW Mokry Dwór, ZUW Na Grobli i ZUW Leśnica. Miasto podzielone jest na cztery strefy zaopatrzenia w wodę. Zakład Na Grobli dostarcza wodę do około 350 tys. mieszkańców tak zwanej „strefy wewnętrznej”, czyli gęsto zaludnionego centrum. Zakład Mokry Dwór zaopatruje „strefę zewnętrzną” miasta, która okala strefę wewnętrzną oraz – poprzez pompownię wody Bystrzycka – północno-zachodnie przedmieścia (około 265 tys. mieszkańców). Pomiędzy powyższymi strefami znajduje się tzw. strefa mieszana, natomiast czwarta strefa zaopatrzenia w wodę obejmuje osiedla położone w Leśnicy. Strefa ta zasilana jest wodą głębinową dostarczaną do około 5 tys. mieszkańców z Zakładu Uzdatniania Wody Leśnica

Tabela 1. Wrocławskie układy zasilania w wodę

Układ zasilania	Średnia produkcja [m <sup>3</sup> /d]	Moc produkcyjna [m <sup>3</sup> /d]
ZUW Mokry Dwór	58 000	98 000
ZUW Na Grobli	61 000	120 000
ZUW Leśnica	1 000	1 1000

Sieć wodociągowa Wrocławia to rozległy pierścieniowy układ przewodów wodociągowych o zróżnicowanej wielkości średnic z zakresu Ø1400- Ø25 mm (tabela 2). Łączna długość sieci wodociągowej wynosi 1790,41 km.

Tabela 2. Charakterystyka sieci wodociągowej Wrocławia

Typ sieci	Średnica [mm]	Długość [km]
Sieć magistralna	Ø400 - Ø1400	200,99
Sieć rozdzielcza	Ø80 - Ø300	1192,19
Przyłącza wodociągowe	Ø25 - Ø250	397,23

Sieć wodociągowa miasta cechuje się również dużym zróżnicowaniem pod względem materiałowym oraz charakteryzuje się dużą różnorodnością okresów eksploatacji poszczególnych jej elementów. Podstawowe materiały

do budowy sieci w okresie ponad 130-letniej eksploatacji stanowiły głównie żeliwo, stal, PVC, jak również ołów.

Nieodłącznym elementem wrocławskiego podsystemu dystrybucji wody jest centralna pompownia Bystrzycka zlokalizowana w zachodniej jego części. Pompownia ta zapewnia pracę strefy wysokiego ciśnienia, dostarczając wodę do mieszkańców osiedli Nowy Dwór, Kozańów, Gądów, Muchobór Mały. Ponadto we wrocławskim podsystemie pracują dwie strefowe hydrofornie Orzechowa i Krynicka, których celem jest lokalne podnoszenie ciśnienia wody na terenie osiedla Gaj. Ponadto obiektami technicznymi stabilizującymi hydrauliczną pracę sieci wodociągowej są zbiorniki wody uzdatnionej zlokalizowane na obszarze zakładów uzdatniania w wodę. Znajdują się tam dwa zbiorniki centralne oraz dwa zbiorniki magazynujące wodę, których łączna pojemność wynosi 45 tys m<sup>3</sup> [2, 3].

Matematyczny model hydrauliczny wrocławskiego PsDyW wykonano wykorzystując program komputerowy EpaNet 2. W modelu uwzględniono jedynie kluczowe miejsca poboru wody w systemie. Węzły modelu zostały jednoznacznie zdefiniowane poprzez określenie współrzędnych położenia przestrzennego  $x$ ,  $y$  i  $z$ , wielkości dobowego rozbioru wody oraz kategorii rozbioru. W procesie schematyzacji topografii sieci wodociągowej uwzględniono wszystkie przewody magistralne, rozdzielcze oraz podłączenia wodociągowe obejmujące zakres średnic powyżej 100 mm. Pełną identyfikację odcinków modelu uzyskano poprzez określenie ich: średnicy, długości, numeru węzła początkowego i końcowego, materiału, z którego przewód został wykonany, jego wieku oraz współczynnika chropowatości. W strukturze przestrzennej modelu hydraulicznego Wrocławia uwzględniono 3 układy zasilania: ZUW Na Grobli, ZUW Mokry Dwór oraz ZUW Leśnica. Kolejnymi elementami struktury modelu są przepompownia centralna Bystrzycka oraz hydrofornie Orzechowa i Krynicka. W modelu matematycznego SZW Wrocławia zdefiniowano krzywe zmienności rozbioru godzinowego wody, w oparciu o rzeczywiste parametry funkcjonowania systemu z okres eksploatacji 2004-2006. Powyższy model SZW Wrocławia składa się z: 781 węzłów, 1053 odcinków, 3 układów zasilania, 25 pomp i 24 zasuw [1].

Tak opracowany model matematyczny sieci w okresie realizacji PB nr 5T07E 44 25 w latach 2005-2006 poddany został kalibracji. Oceny zgodności dopasowania dokonano za pomocą statystyki niezgodności Thiela, poprzez ocenę zgodności symulowanych szeregów czasowych z rzeczywistymi wartościami ciśnienia w węzłach i wartościami przepływów na odcinkach. Niezgodność dopasowania wielkości symulowanych z rzeczywistymi może być efektem słabości modelu lub

dużej losowości zmiennych rzeczywistych. Uwzględniając powyższe Thiel dokonał podziału błędu średniokwadratowego procesu modelowania na część systematyczna (wartości średnie i wariancje) wynikającą ze źle zweryfikowanego modelu dynamicznego oraz część losową, kształtowaną zmiennymi warunkami eksploatacji rzeczywistych układów dynamicznych (kowariancja). Wielkość uzyskanych charakterystyk niezgodności Thiela wskazują na występowanie błędu niesystematycznego. Uzyskana w procesie kalibracji przeciętna wartość błędu średniokwadratowego na poziomie 1,05 m słupa wody (zakres zmienności 0,0355 – 5,4234) odpowiada ogólnie obowiązującym standardom dopasowania modeli hydraulicznych sieci wodociągowej (błąd bezwzględny pomiaru ciśnienia < 2,5 m słupa wody) w funkcji ciśnienia. Tak skalibrowany model hydrauliczny SZW Wrocławia stał się integralnym elementem procedur obliczeniowych programu Niezawodność bezpieczeństwa.

#### 4. Niezawodność bezpieczeństwa SZW Wrocławia

Ocenę niezawodności bezpieczeństwa eksploatacji wrocławskiego systemu zaopatrzenia w wodę przeprowadzono wykorzystując procedury obliczeniowe programu *Niezawodność Bezpieczeństwa*. Analizę przekroczeń wartości granicznej zanieczyszczenia w sieci wodociągowej przeprowadzono dla 7 scenariuszy obliczeniowych, odnoszących się do zmiennej liczby odcinków pomiarowych w procesie monitoringu PsDyW. W symulacjach niezawodnościowych rozpatrzono kolejno 10, 20, 30, 50, 80, 150 oraz 300 odcinków kontrolnych, dla których każdorazowo wyznaczano wartość funkcji celu  $OF$  oraz prawdopodobieństwo  $P_w$  wykrycia zanieczyszczenia/skażenia przy przyjętym  $30 \mu\text{g}/\text{dm}^3$  stężeniu krytycznego THM (trichlorometan) w wodzie wodociągowej.

Tabela 3 Niezawodności bezpieczeństwa SZW Wrocławia wyniki symulacji

Scenariusz	Liczba odcinków pomiarowych	Stężenie THM $30 \mu\text{g}/\text{dm}^3$	
		Funkcja celu $OF$	$P_w$
1	10	0.32974014	0.244101633
2	20	0.4416084	0.376588022
3	30	0.52085227	0.470054446
4	50	0.61817071	0.570780399
5	80	0.70546875	0.675136116
6	150	0.77395954	0.803085299
7	300	0.77425157	0.813067151





Rys.1. Lokalizacja 30 optymalnych odcinków pomiarowych SZW Wrocławia

W badaniach przyjęto THM, będące ubocznymi produktami dezynfekcji wody chlorem, jako wskaźnik dobrze reprezentujący proces wtórnego zanieczyszczenia wody w sieci dystrybucji. Ponadto wybór tego parametru w analizach, uzasadnia kancerogenne jego oddziaływanie na zdrowie człowieka. W takim aspekcie podwyższone stężenie THM w wodzie spożywanej przez człowieka zwiększa jego ryzyko zdrowotne. W rozważanych symulacjach przyjęto minimalny 30% poziom pokrycia węzłów, dla którego czas wykrycia zanieczyszczenia w sieci wodociągowej wynosi 11godzin. Uzyskane wyniki symulacji 7 scenariuszy obliczeniowych przedstawiono w tabeli 3 oraz na rysunku 1 przedstawiono optymalną lokalizację 30 punktów monitoringu wygenerowanych modelem *Niezawodność Bezpieczeństwa* .

## **5.Wnioski**

Przeprowadzona analiza uzyskanych wyników pozwoliła jednoznacznie stwierdzić, iż zarówno funkcja celu jak i prawdopodobieństwo wykrycia osiągają stałą wartość, dla określonej maksymalnej liczby odcinków pomiarowych odpowiadającej wielkości 150, powyżej której przyrost wskaźników niezawodności bezpieczeństwa (prawdopodobieństwo wykrycia i funkcja celu) można uznać za zerowe (0,07%).

Efektom przeprowadzonej analizy niezawodnościowej jest określenie poziomu ryzyka niewykrycia zanieczyszczenia w PsDyW, dla zadanej liczby odcinków pomiarowych w funkcji stężenia THM. Dla poziomu

---

ryzyka niewykrycia zanieczyszczenia w systemie 0,1 liczba niezbędnych odcinków pomiarowych jakości wody we wrocławskim SZW wynosi 80. Opracowany model stanowi cenne narzędzie analityczne w procesie zarządzania eksploatacją SZW. Model ten może być wykładnią przyjęcia optymalnej, ekonomicznie uzasadnionej liczby punktów kontrolnych w procedurach monitoringu pracy sieci wodociągowej. Możliwość przeprowadzenia analizy licznych scenariuszy obliczeniowych, pozwala na przyjęcie rozwiązania, gwarantującego minimalizację ryzyka zanieczyszczenia/skażenia wody w systemie a tym samym zwiększa bezpieczeństwo użytkowników SZW.



PhD Eng ZIMOCH Izabela – the doctor on Silesian University of Technology in Gliwice, Institute of Water and Sewage Engineering. Specialist in Research and Technology Development at Department of Water Technology Upper Silesian Waterpipe Company. Specialization: civil engineering, water treatment, reliability and risk analysis of water supply system.

---

---