*dr inż. Andrzej Studziński*[1)*)]
ORCID: 0000-0002-6551-9490
*dr hab. inż. Jacek Dawidowicz*[2)]
ORCID: 0000-0003-1742-9463
*dr inż. Tomasz Pytlowany*[3)]
ORCID: 0000-0001-5545-5465
*dr inż. Grzegorz Oleniacz*[1)]
ORCID: 0000-0003-3318-0928
*dr inż. Krzysztof Topolski*[3)]
ORCID: 0000-0001-6843-5527

# Reliability of water pipelines and operating costs

## *Niezawodność rurociągów wodociągowych a koszty eksploatacyjne*

*DOI: 10.15199/33.2024.07.20*

**Abstract.** In order to determine the impact of the reliability class of water pipes on the operating costs of water supply networks, probabilistic calculations were carried out using Monte Carlo simulations. The model was based on the assumption that repair costs are subject to a log-normal distribution. Three reliability classes were assumed, differentiating the level of acceptable risk depending on the rank and function of a given network section. The analysis performed clearly showed that the pipe reliability class and the assumed variability of operating parameters have a significant impact on the forecasted repair costs in water supply systems. The use of the Monte Carlo method and the log-normal distribution allowed for taking into account asymmetry and determining the occurrence of extreme costs.
**Keywords:** water pipes; repair costs; reliability class; Monte Carlo method.

**Streszczenie.** W celu określenia wpływu klasy niezawodności przewodów wodociągowych na koszty eksploatacyjne sieci wodociągowych, przeprowadzono obliczenia probabilistyczne z zastosowaniem symulacji Monte Carlo. Model bazuje na założeniu, że koszty naprawy podlegają rozkładowi log-normalnemu. Przyjęto trzy klasy niezawodności, różnicujące poziom ryzyka dopuszczalnego w zależności od rangi i funkcji danego odcinka sieci. Przeprowadzona analiza jednoznacznie wykazała, że klasa niezawodności rur oraz przyjęta zmienność parametrów eksploatacyjnych mają istotny wpływ na prognozowane koszty naprawy w systemach wodociągowych. Wykorzystanie metody Monte Carlo i rozkładu log-normalnego pozwoliło na uwzględnienie asymetrii i określenia wystąpienia kosztów ekstremalnych.
**Słowa kluczowe:** przewody wodociągowe; koszty naprawy; klasa niezawodności; metoda Monte Carlo.

Water networks are an element of critical infrastructure, which determines the continuity of the supply of high-quality water to the population. Ensuring high reliability of transmission and distribution pipes is crucial due to the consequences of failures (social, economic), they determine both sanitary and fire safety [1]. Water supply networks are complex hydraulic systems built from three types of pipes – water mains, distribution pipelines and house service lines. The water mains distribute the water throughout the supply area, they supply water to distribution pipes. The diameters of these pipes are usually not smaller than 250 mm. Distribution pipes have diameters from 80 to 300 mm, they carry water to network sub-areas, supply buildings through house service lines with diameters smaller than 80 mm. In existing water networks, the largest diameter pipes – water mains and main distribution pipes – are usually key to supplying water to the supply area, their importance is determined by the flow distribution in the water supply network resulting from hydraulic dependencies [2].

Water supply pipes are subject to aging and various operational loads, which is why the analysis of their failure rate and durability is an engineering challenge [3]. Numerous studies indicate that water supply failures cause not only interruptions in water supply, but also significant financial losses (re-

Sieci wodociągowe stanowią element infrastruktury krytycznej, od której zależy ciągłość zaopatrzenia ludności w wodę wysokiej jakości. Zapewnienie wysokiej niezawodności przewodów przesyłowych i rozdzielczych jest kluczowe ze względu na konsekwencje awarii (społeczne, ekonomiczne), które stanowią o bezpieczeństwie zarówno sanitarnym, jak i przeciwpożarowym [1]. Sieci wodociągowe to złożone układy hydrauliczne zbudowane z trzech rodzajów przewodów – magistralnych, rozdzielczych i przyłączy wodociągowych. Przewody magistralne rozprowadzają wodę po obszarze zasilania i zaopatrują w nią przewody rozdzielcze. Ich średnica zwykle jest nie mniejsza niż 250 mm. Rurociągi rozdzielcze mają średnicę 80÷300 mm i prowadzą wodę do podobszarów sieci oraz zasilają budynki przez przyłącza wodociągowe o średnicy mniejszej niż 80 mm. W istniejących sieciach wodociągowych kluczowe dla dostawy wody do obszaru zasilania są zwykle przewody o największej średnicy – magistralne i główne rozdzielcze. O ich znaczeniu decyduje rozkład przepływu w sieci wodociągowej wynikający z zależności hydraulicznych [2].

Przewody wodociągowe podlegają starzeniu oraz różnym obciążeniom eksploatacyjnym i dlatego analiza ich awaryjności oraz trwałości jest wyzwaniem inżynierskim [3]. Liczne badania wskazują, że awarie wodociągów są przyczyną przerw w dostawach wody oraz strat finansowych (koszty napraw, wody i szkody u odbiorców) [1, 4÷6]. W wielu regionach świata znaczna część wody jest tracona na skutek wycieków. W niektórych przypadkach szacuje

[1)] Politechnika Rzeszowska, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury
[2)] Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku
[3)] Państwowa Akademia Nauk Stosowanych, Instytut Politechniczny
[*)] Correspondence address: astud@prz.edu.pl

pair costs, water losses and damages to recipients) [1, 4÷6]. In many regions of the world, a significant part of water is lost due to leaks – in some cases it is estimated that even over 50% of the transmitted water does not reach recipients [7], which clearly highlights the scale and significance of the network reliability problem.

A commonly used measure of water supply network reliability is the **failure rate**, defined as the number of failures per 1 km of pipe per year [2, 8]. Based on operational tests of the network in 126 Polish cities, it was found that the average failure rate in 2008 was approximately 0.37 failures/km•year, which means a more than two-fold decrease over the previous decade. This improvement is mainly attributed to replacing old pipes with new ones made of plastics (PE, PVC) and ductile iron [9]. Studies conducted in 2014–2018 indicate a further slow decrease in the intensity of pipe failures, which amounted to 0.24 failures/km·year for water mains and distribution pipes [10]. On the other hand, in North America, a 27% increase in the frequency of water pipe ruptures was noted in 2012–2018 [11, 12]. In water supply networks, the highest failure rate is usually observed in grey cast iron pipes, while modern materials (including polyethylene) are much less susceptible to damage [8, 9, 12]. In [13], the current state of knowledge on the causes and effects of water supply pipe failures is summarized.

The repair costs of water pipes have been presented in numerous publications [14÷16]. According to [15], the repair costs are mainly a function of the diameter and type of damage – the highest costs are the result of longitudinal cracks. In [16], the influence of the following variables on the cost of repairing failures was considered: diameter, type of pipe, material and repair time. At the assumed significance level of 0.05, it was found that the cost of repairing failures is significantly influenced by 2 of these variables, i.e. pipe diameter and repair time. The repair costs of water pipelines in the USA in the coming decades will exceed $ 1 billion [17]. The costs of repairing failures are most often a component of predictive analyses of pipeline replacement [5, 18÷21].

The analysis of the reliability of water supply infrastructure requires taking into account the variability and uncertainty of many parameters. The deterministic approach is sometimes insufficient, which is why probabilistic methods are increasingly used to assess the durability of pipes [22, 23]. They allow for estimating the distribution of the probability of failure as a function of time, taking into account the dispersion of material properties, loads and operating conditions. Two modeling trends dominate the literature: statistical empirical models and mechanistic reliability models, and in recent years also approaches using artificial intelligence [24]. Traditional statistical models (e.g. failure intensity models, survival analysis, Cox models) are commonly used to identify factors influencing network failure rate [25]. In turn, the probabilistic approach, taken from the reliability of structures, uses the concept of the reliability index $\beta$, which assesses the risk of failure based on the distribution of loads and load capacity [22, 23, 26]. Engineering standards (e.g. EN 1990) define minimum values of the $\beta$ index for individ-

się, że nawet ponad 50% przesyłanej wody nie dociera do odbiorców [7], co podkreśla skalę i znaczenie problemu niezawodności sieci.

Powszechnie stosowaną miarą niezawodności sieci wodociągowej jest **współczynnik awaryjności** definiowany jako liczba awarii przypadająca na 1 km przewodu w ciągu roku [2, 8]. Na podstawie badań eksploatacyjnych sieci w 126 miastach Polski stwierdzono, że średnia awaryjność w 2008 r. wynosiła ok. 0,37 uszkodzenia/km·rok, co oznacza ponaddwukrotny spadek w ciągu poprzedniej dekady. Poprawę tę przypisuje się głównie zastępowaniu starych przewodów nowymi z tworzywa sztucznego (PE, PVC) oraz żeliwa sferoidalnego [9].

Badania prowadzone w latach 2014–2018 wskazują na spadek intensywności uszkodzeń przewodów, która w przypadku przewodów magistralnych i rozdzielczych wyniosła 0,24 uszk./km·rok [10]. Natomiast w Ameryce Północnej odnotowano 27% wzrost częstotliwości pęknięć wodociągów w latach 2012–2018 [11, 12]. Największą awaryjnością cechują się zwykle rury z żeliwa szarego, podczas gdy nowoczesne materiały (m.in. polietylen) są mniej podatne na uszkodzenia [8, 9, 12]. W [13] zestawiono bieżący stan wiedzy dotyczącej przyczyn i skutków awarii przewodów wodociągowych.

Koszty naprawy przewodów wodociągowych zostały przedstawione w licznych publikacjach [14÷16]. Zgodnie z [15] są one głównie funkcją średnicy oraz rodzaju uszkodzeń – największe koszty to wynik pęknięć podłużnych. W [16] rozpatrywano wpływ następujących zmiennych na koszt usuwania awarii: średnicy; rodzaju przewodu; materiału oraz czasu naprawy. W przypadku poziomu istotności 0,05 stwierdzono, że na koszt usuwania awarii istotny wpływ mają dwie zmienne, tj. średnica przewodu oraz czas usuwania awarii. Koszty naprawy rurociągów wodociągowych w USA przekroczą w najbliższej dekadzie miliard $ [17]. Najczęściej koszty usuwania awarii są składową analiz predykcji wymiany rurociągów [5, 18÷21].

Analiza niezawodności infrastruktury wodociągowej wymaga uwzględnienia zmienności i niepewności wielu parametrów. Podejście deterministyczne bywa niewystarczające, dlatego coraz częściej stosuje się metody probabilistyczne do oceny trwałości przewodów [22, 23]. Pozwalają one oszacować rozkład prawdopodobieństwa awarii w funkcji czasu, uwzględniając rozrzut właściwości materiału, obciążeń i warunków eksploatacyjnych. Dominują dwa nurty modelowania: statystyczne modele empiryczne oraz mechanistyczne modele niezawodności, a w ostatnich latach także podejścia wykorzystujące sztuczną inteligencję [24]. Tradycyjne modele statystyczne (np. modele intensywności uszkodzeń, analiza przeżycia, modele Coxa) są powszechnie wykorzystywane do identyfikacji czynników wpływających na awaryjność sieci [25]. Z kolei podejście probabilistyczne, zaczerpnięte z niezawodności konstrukcji, posługuje się pojęciem wskaźnika niezawodności $\beta$, który ocenia ryzyko awarii na podstawie rozkładu obciążeń i nośności [22, 23, 26]. Normy inżynierskie (np. EN 1990) definiują minimalne wartości wskaźnika $\beta$ w przypadku poszczególnych klas niezawodności (RC1–RC3), które można odnieść także do systemów wodociągowych [22].

**Metoda Monte Carlo** jest z powodzeniem stosowana do oceny niezawodności zarówno pojedynczych rur, jak i całych

ual reliability classes (RC1–RC3), which can also be applied to water supply systems [22].

The **Monte Carlo method** has been successfully used to assess the reliability of both individual pipes and entire water supply systems. For example, when analyzing the effect of the variation of the PE100 wall thickness on $\beta$, it was found that with a variation coefficient above 7%, the reliability index may fall below the critical value for the RC2 class [26]. In turn, studies of the availability of the water supply system based on random failure sequences have shown which components are most critical for the continuity of supply [4].

The reliability of the network is directly related to its operating costs. Failures generate not only direct costs (materials, labor), but also indirect costs (water losses, compensation, penalties) [26]. The literature emphasizes that above a certain age of the pipe, further repairs become economically ineffective, repair costs increase exponentially, exceeding the profitability of replacement. Therefore, the concept of life cycle cost analysis allows for the integration of investment aspects with long-term operating costs [19÷21]. The literature emphasizes the need to use an integrated approach that combines reliability analysis (e.g. Monte Carlo method, statistical models) with the assessment of economic aspects of network operation [23, 24].

## Research methodology

From the point of view of designing and assessing the reliability of water supply systems, the classification according to the PN-EN 1990 standard [22] is used, in which **reliability** is defined as the ability of the structure to fulfill specific functions during the designed period of use. In this analysis, **three reliability classes** were adopted, differentiating the level of permissible risk depending on the rank and function of a given section of the network:

- **RC1 (low reliability)** – refers to local distribution networks and group and individual house service lines, in which any failures have a limited impact on the operation of the entire system; a higher risk of mechanical damage and greater variability of repair costs are allowed here;
- **RC2 (standard/typical reliability)** – refers to transmission networks within cities and municipalities, where it is necessary to ensure continuity of supply and reduce repair costs; the RC2 class is a compromise between reliability requirements and economic efficiency;
- **RC3 (high reliability)** – assigned to water mains, which are key links in the system, they require the highest reliability, because failures can result in serious technical and financial consequences; in this class the risk of damage should be the lowest, as well as long-term operating costs.

In order to determine the impact of the pipe reliability class on the operating costs of water pipelines, **probabilistic calculations were performed using Monte Carlo simulation**. The model was based on the assumption that repair costs are subject to a log-normal distribution, which results from following premises:

systemów zaopatrzenia w wodę. Analizując wpływ zmienności grubości ścianki PE100 na wskaźnik $\beta$, stwierdzono, że przy współczynniku zmienności powyżej 7% wskaźnik niezawodności może spaść poniżej wartości krytycznej w przypadku klasy RC2 [26]. Z kolei badania dyspozycyjności systemu wodociągowego na podstawie losowych ciągów awarii pokazały, które komponenty są najbardziej krytyczne dla ciągłości dostaw [4].

Niezawodność sieci jest bezpośrednio powiązana z kosztami jej eksploatacji. Awarie generują nie tylko koszty bezpośrednie (materiały, robocizna), ale także pośrednie (straty wody, odszkodowania, kary) [26]. W literaturze podkreśla się, że powyżej pewnego wieku rury, dalsze naprawy stają się nieefektywne ekonomicznie, koszty napraw zwiększają się wykładniczo, przekraczając opłacalność wymiany. W związku z tym koncepcja analizy kosztu cyklu życia pozwala zintegrować aspekty inwestycyjne z długoterminowymi kosztami eksploatacyjnymi [19÷21]. Literatura podkreśla konieczność stosowania zintegrowanego podejścia, które łączy analizę niezawodności (np. metodą Monte Carlo, modele statystyczne) z oceną aspektów ekonomicznych funkcjonowania sieci [23, 24].

## Metoda badań

Z punktu widzenia projektowania i oceny niezawodności systemów wodociągowych, zastosowanie znajduje klasyfikacja zgodna z normą PN-EN 1990 [22], w której **niezawodność** definiuje się jako zdolność konstrukcji do spełniania określonych funkcji w projektowanym okresie użytkowania. W analizie przyjęto **trzy klasy niezawodności**, różnicujące poziom ryzyka dopuszczalnego w zależności od rangi i funkcji danego odcinka sieci:

- **RC1 (mała niezawodność)** – odnosi się do sieci rozdzielczych o lokalnym zasięgu oraz grupowych i indywidualnych podłączeń wodociągowych, w których ewentualne awarie mają ograniczony wpływ na pracę całego systemu; dopuszcza się większe ryzyko uszkodzeń mechanicznych oraz większą zmienność kosztów napraw;
- **RC2 (standardowa/typowa niezawodność)** – dotyczy sieci przesyłowych w obrębie miast i gmin, gdzie konieczne jest zapewnienie ciągłości dostaw oraz ograniczenie kosztów związanych z naprawami; klasa RC2 stanowi kompromis pomiędzy wymaganiami niezawodności a efektywnością ekonomiczną;
- **RC3 (wysoka niezawodność)** – przypisana magistralom wodociągowym, które stanowią kluczowe ogniwa systemu, wymagają one najwyższej niezawodności, ponieważ awarie mogą skutkować poważnymi konsekwencjami technicznymi i finansowymi; w tej klasie ryzyko uszkodzeń powinno być najmniejsze, podobnie jak długoterminowe koszty eksploatacyjne.

W celu określenia wpływu klasy niezawodności rur na koszty eksploatacyjne sieci wodociągowych, **przeprowadzono obliczenia probabilistyczne z zastosowaniem symulacji Monte Carlo**. Model bazuje na założeniu, że koszty naprawy podlegają rozkładowi log-normalnemu, co wynika z następujących przesłanek:

- rozkład ten zapewnia wyłącznie wartości dodatnie, co jest zgodne z rzeczywistym charakterem danych ekonomicznych, bowiem koszty nie mogą być ujemne;

● this distribution provides only positive values, which is consistent with the actual nature of economic data, because costs cannot be negative;

● the log-normal shape of the distribution well reflects the empirically observed skewness; in practice there are single very expensive failures that significantly overstate the averages [16], but are not representative of most cases;

● the log-normal distribution is resistant to extreme values and allows for reliable modeling of cost variability in the long term.

In each of the reliability classes analyzed (RC1, RC2, RC3), 10000 repair cost scenarios were simulated, generated using the Monte Carlo method. The median cost corresponding to a given class and the logarithmic standard deviation $\sigma$ were assumed as input parameters. In order to examine the impact of cost variability on the dispersion of results, three values of the standard deviation on a logarithmic scale were considered:

● $\sigma = 0.1$ (low variability);

● $\sigma = 0.2$ (standard/typical variability);

● $\sigma = 0.3$ (high variability).

The value of $\sigma = 0.2$ was adopted as a reference value based on:

● data from the regression of repair costs of actual water supply networks;

● values typical for water and sewage infrastructure adopted in the literature (range 0.15–0.3);

● engineering practice related to cost planning.

This assumption means that about 95% of repair costs should be within ±40% of the median, which is consistent with empirical observations, as most costs are predictable, but expensive, rare failures are also possible.

For comparison:

● **$\sigma = 0.1$ – low variability** – the range of 95% of costs is between −18% and +22% relative to the median, the model in this case underestimates the risk of extremely expensive repairs and may be too optimistic in estimating costs for classes RC1 and RC2;

● **$\sigma = 0.3$ – high uncertainty** – the range of 95% of costs is between −44% and +80% relative to the median, the model in this variant may overestimate the risk of very expensive failures, but it better reflects conditions in an environment with unstable technical and financial parameters.

The variability of $\sigma$ is also linked to the reliability class, the lower the class (RC1), the greater the susceptibility to cost changes and the unpredictability of repairs. In turn, in class RC3, due to the higher quality of materials and better technical supervision, the cost distribution is much more stable and predictable.

Table 1 shows the adopted input parameters for Monte Carlo simulation for the repair costs of pipes in three reliability classes RC1–RC3.

● log-normalny kształt rozkładu dobrze odwzorowuje empirycznie obserwowaną skośność; w praktyce występują pojedyncze bardzo kosztowne awarie, które znacznie zawyżają średnie [16], ale nie są reprezentatywne dla większości przypadków;

● rozkład log-normalny jest odporny na wartości skrajne i pozwala wiarygodnie modelować zmienność kosztów w długim horyzoncie czasowym.

W każdej z analizowanych klas niezawodności (RC1, RC2, RC3) przeprowadzono symulację 10 tys. scenariuszy kosztów naprawy, generowanych metodą Monte Carlo. Jako parametry wejściowe przyjęto medianę kosztów odpowiadającą danej klasie oraz logarytmiczne odchylenie standardowe $\sigma$. W celu zbadania wpływu zmienności kosztów na rozrzut wyników, rozważono trzy wartości odchylenia standardowego w skali logarytmicznej:

● $\sigma = 0{,}1$ (mała zmienność);

● $\sigma = 0{,}2$ (standardowa/typowa zmienność);

● $\sigma = 0{,}3$ (duża zmienność).

Wartość $\sigma = 0{,}2$ została przyjęta jako referencyjna na podstawie:

● danych z regresji kosztów napraw rzeczywistych sieci wodociągowych;

● wartości typowych w przypadku infrastruktury wodno-kanalizacyjnej przyjmowanej w literaturze (zakres 0,15–0,3);

● praktyki inżynierskiej związanej z planowaniem kosztów.

Założenie to oznaczało, że ok. 95% kosztów naprawy powinno mieścić się w przedziale ±40% wokół mediany, co jest zgodne z obserwacjami empirycznymi, bowiem większość kosztów jest przewidywalna, ale możliwe jest także wystąpienia kosztownych, rzadkich awarii.

Dla porównania:

● **$\sigma = 0{,}1$ – mała zmienność** – zakres 95% kosztów mieści się w przedziale −18%÷+22% względem mediany; model w tym przypadku zaniża ryzyko ekstremalnie drogich napraw i może być zbyt optymistyczny w ocenie kosztów w przypadku klas RC1 i RC2;

● **$\sigma = 0{,}3$ – duża zmienność** – zakres 95% kosztów mieści się w przedziale −44%÷+80% względem mediany; model w tym wariancie może przeszacowywać ryzyko bardzo kosztownych awarii, ale lepiej odwzorowuje warunki w środowisku o niestabilnych parametrach technicznych i finansowych.

Zmienność $\sigma$ powiązana jest z klasą niezawodności, im niższa klasa (RC1), tym większa podatność na zmianę kosztów i nieprzewidywalność napraw. Z kolei w klasie RC3, dzięki wyższej jakości materiałów i lepszemu nadzorowi technicznemu, rozkład kosztów jest znacznie bardziej stabilny i przewidywalny.

Tabela 1 przedstawia przyjęte parametry wejściowe do symulacji Monte Carlo w przypadku kosztów naprawy rur w trzech klasach niezawodności RC1–RC3. Założono rozkład log-normalny (LN), w którym mediana kosztów pochodzi z danych empirycznych, natomiast parametr $\mu$ (logarytm naturalny mediany)

**Table 1. Input parameters of the LN distribution for Monte Carlo simulation**

*Tabela 1. Parametry wejściowe rozkładu LN do symulacji Monte Carlo*

| Reliability class / Klasa niezawodności | Median cost [zł] / Mediana kosztów [zł] | $\mu$ (ln(median)) / $\mu$ (ln(mediana)) | $\sigma$ (log) |
|---|---|---|---|
| RC3 | 6011.98 | 8.70151 | 0.1; 0.2; 0.3 |
| RC2 | 5216.85 | 8.55965 | 0.1; 0.2; 0.3 |
| RC1 | 4603.26 | 8.43452 | 0.1; 0.2; 0.3 |

A log-normal distribution was assumed, in which the median of costs comes from empirical data, while the parameter $\mu$ (natural logarithm of the median) and the standard deviation $\sigma$ on a logarithmic scale serve as parameters of the LN ($\mu$, $\sigma^2$) distribution. The standard typical variability variant assumes the value of $\sigma = 0.2$.

## Analysis of Monte Carlo simulation results of water pipe repair costs

The aim of the analysis was to determine the impact of the reliability class of water pipes on the long-term costs of their repair and to estimate the risk of extreme expenses in the operation of water supply systems. The study used the Monte Carlo method with a log-normal distribution, generating 10,000 scenarios for three RC classes. The selection of the log-normal distribution allowed for a realistic representation of positive costs and taking into account the right-side asymmetry characteristic of this type of data.

The obtained results show significant differences in repair costs between individual reliability classes. RC1 pipes, which are characterized by the lowest reliability, generate the lowest repair costs, both in average values and in extreme cases. This is due to their greater susceptibility to damage and a higher frequency of failures, which leads to the need for more frequent and costly interventions. In the case of RC2 pipes, repair costs are higher than in RC1 and characterized by a wider level of variability. **The RC3 class**, considered the **most reliable, has the highest repair costs and cost spread, meaning they are the most unpredictable and economical in long-term operation**.

The analysis of the median repair costs (Figure 1) confirms that the highest cost values occur in class RC3 and the lowest in RC1. The median repair costs for RC3 is about PLN 6012, which means that half of the cases cost more and half less. In class RC2, the median is about PLN 5216, while in RC1 it is only PLN 4603. This means that in the long-term operation of the water supply network, choosing pipes with higher reliability can lead to significant savings, both in terms of repair costs and unforeseen expenses related to failures.

The **analysis of quantiles of the order of 0.95** plays an important role, which allows determining the risk of extreme repair costs. In the case of RC3 pipes, the quantile of the order of 0.95 is approximately PLN 8353.87, which means that in 5% of cases the costs may exceed this value. This means a high risk of very expensive repairs, which may affect the maintenance budget of the water supply network. In the RC2 class, the 0.95 quantile is PLN 7249.02, which indicates a lower, but still significant risk

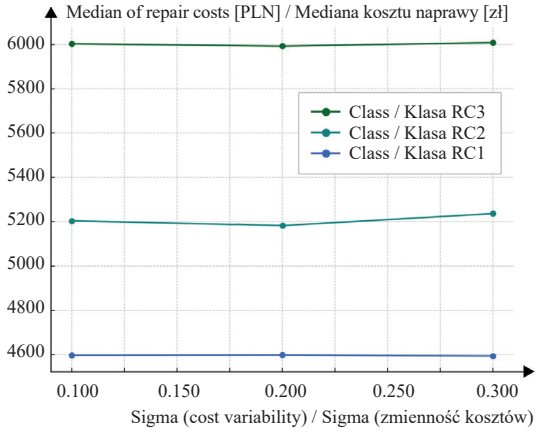


**Fig. 1. Comparison of median repair costs for different sigma values**

*Rys. 1. Porównanie median kosztów naprawy w przypadkach różnych wartości sigma*

oraz odchylenie standardowe $\sigma$ w skali logarytmicznej służą jako parametry rozkładu LN ($\mu$, $\sigma^2$). Wariant standardowy typowej zmienności zakłada wartość $\sigma = 0{,}2$.

## Analiza wyników symulacji Monte Carlo kosztów naprawy rur wodociągowych

Celem przeprowadzonej analizy było określenie wpływu klasy niezawodności rur wodociągowych na długoterminowe koszty ich naprawy oraz oszacowanie ryzyka występowania ekstremalnych wydatków w eksploatacji systemów wodociągowych. W badaniu zastosowano metodę Monte Carlo z rozkładem log-normalnym, generując 10 000 scenariuszy w przypadkach trzech klas RC. Dobór log-normalnego rozkładu pozwolił na realistyczne odwzorowanie dodatnich kosztów oraz uwzględnienie prawostronnej asymetrii charakterystycznej w przypadkach tego typu danych.

Uzyskane wyniki wskazują istotne różnice w kosztach naprawy pomiędzy poszczególnymi klasami niezawodności. Rury klasy RC1, które charakteryzują się najmniejszą niezawodnością, generują najmniejsze koszty naprawy, zarówno w wartościach średnich, jak i w przypadkach ekstremalnych. Wynika to z ich większej podatności na uszkodzenia oraz większej częstotliwości awarii, co prowadzi do konieczności częstszych i bardziej kosztownych interwencji. W przypadku rur klasy RC2, koszty naprawy są wyższe niż w przypadku RC1, charakteryzują się wyższym poziomem zmienności. **Klasa RC3**, uznawana za **najbardziej niezawodną, cechuje się największymi kosztami naprawy i rozpiętością kosztów, co oznacza, że są one najbardziej nieprzewidywalne i ekonomiczne w długoterminowej eksploatacji**.

Analiza mediany kosztów naprawy (rysunek 1) potwierdza, że największe wartości kosztów uzyskano w przypadku klasy RC3, a najmniejsze w RC1. Mediana kosztów naprawy dla RC3 wynosi ok. 6012 zł, co oznacza, że połowa przypadków kosztuje więcej, a połowa mniej. W klasie RC2 mediana wynosi ok. 5216 zł, natomiast w RC1 zaledwie 4603 zł. Oznacza to, że w długoterminowej eksploatacji sieci wodociągowej wybór rur o większej niezawodności może prowadzić do znacznych oszczędności, zarówno pod względem kosztów naprawy, jak i nieprzewidzianych wydatków związanych z awariami.

Istotną rolę odgrywa również **analiza kwantyli rzędu 0,95**, które pozwalają na określenie ryzyka wystąpienia skrajnych kosztów naprawy. W przypadku rur RC3, kwantyl rzędu 0,95 wynosi ok. 8353,87 zł, a więc w 5% przypadków koszty mogą przekroczyć tę wartość. Oznacza to duże ryzyko występowania bardzo kosztownych napraw, co może wpłynąć na budżet utrzymania sieci wodociągowej. W klasie RC2, kwantyl 0,95 wynosi 7249,02 zł, co wska-

of high repair costs. In the RC1 class, the value of the quantile of the order of 0.95 is PLN 6396.37, which means that even in the most expensive cases, repairs do not significantly exceed this value. It should be noted that the differences in the values of quantiles of the order of 0.95 between the reliability classes indicate that choosing the appropriate reliability class of pipes reduces the risk of unpredictable expenses related to failures.

Analysis of the probability density distributions indicates that RC3 has the widest and most rightward distribution, reflecting a higher risk of extreme costs. RC1, on the contrary, has the most concentrated distribution, indicating predictability and lower risk. Figure 2 confirms these differences, showing that with increasing reliability, the spread and level of costs decrease.

The simulation results show that the reliability class has a significant impact on repair costs. RC3 pipes are characterized by the highest variability and the highest repair costs, which is visible in the wide probability distribution. The 0.95 quantile for RC3 reaches the highest values, which means that in this class there is a significant risk of very expensive repairs. In RC2 class, the cost variability is moderate – costs are more predictable, and extreme values occur less often. The lowest costs were recorded for RC1, where the cost distribution is the most compact, which suggests greater financial stability and predictability of repair expenses.

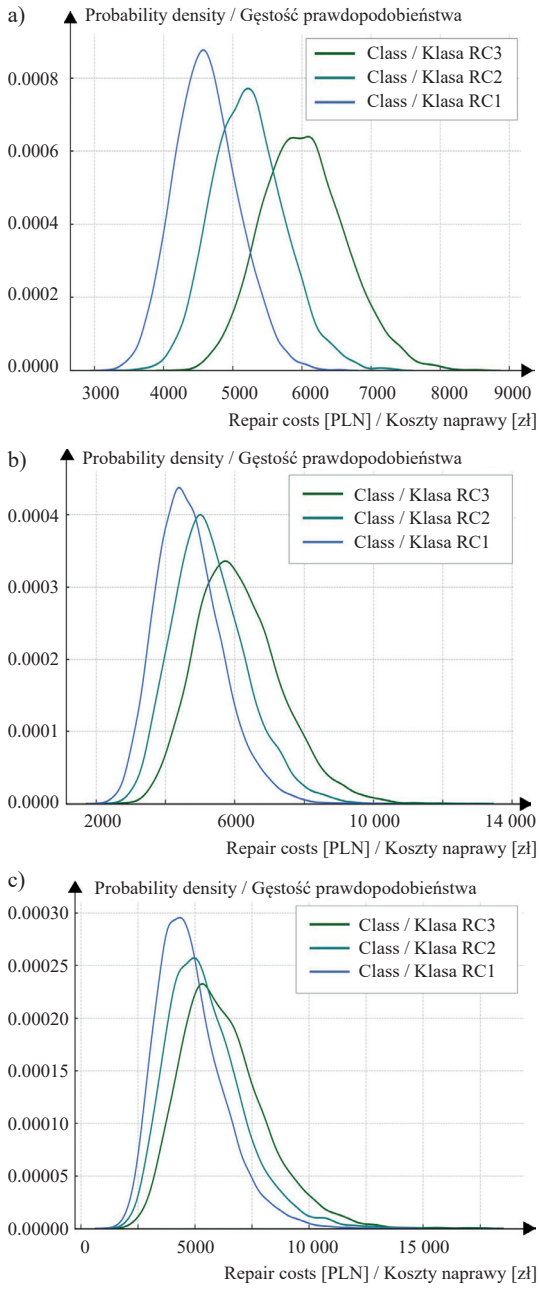


**Fig. 2. Monte Carlo cost simulations of parameters consistent with table 1: a) in the case of $\sigma$ = 0,1 (LN distribution); b) in the case of $\sigma$ = 0,2 (LN distribution); c) in the case of $\sigma$ = 0,3 (LN distribution)**

*Rys. 2. Symulacje kosztów naprawy metodą Monte Carlo wg parametrów zgodnych z tabelą 1: a) w przypadku $\sigma$ = 0,1 (LN rozkład); b) w przypadku $\sigma$ = 0,2 (LN rozkład); c) w przypadku $\sigma$ = 0,3 (LN rozkład)*

Analysis of Figure 2 shows that at $\sigma$ = 0.1 the costs are predictable and concentrated around the median, while for $\sigma$ = 0.3 the distribution is wide and contains many extreme values. These results suggest that for estimating repair costs it is best to use a moderate value of $\sigma$ = 0.2, which takes into account both typical costs and possible extreme cases. The value of $\sigma$ = 0.3 may be useful in risk analysis for cases where the infrastructure is in poor condition or when there is a high risk of unexpected failures.

zuje na mniejsze, lecz nadal istotne ryzyko dużych kosztów napraw. Natomiast w klasie RC1, wartość kwantyla rzędu 0,95 to 6396,37 zł, a więc nawet w szczególnych przypadkach naprawa nie przekracza istotnie tej wartości. Różnice w wartościach kwantyli rzędu 0,95 między klasami niezawodności wskazują, że wybór odpowiedniej klasy niezawodności rur zmniejsza ryzyko nieprzewidywalnych wydatków związanych z awariami.

Analiza rozkładu gęstości prawdopodobieństwa wskazuje, że RC3 charakteryzuje się najszerszym i najbardziej przesuniętym w prawo rozkładem, co odzwierciedla większe ryzyko skrajnych kosztów. Natomiast RC1 ma najbardziej skoncentrowany rozkład, wskazując na przewidywalność i mniejsze ryzyko. Rysunek 2 potwierdza te różnice, pokazując, że przy zwiększającej się niezawodności zmniejsza się rozrzut i poziom kosztów.

Wyniki symulacji wskazują, że klasa niezawodności ma istotny wpływ na koszty naprawy. Rury klasy RC3 charakteryzują się największą zmiennością i największymi kosztami napraw, co jest widoczne w szerokim rozkładzie prawdopodobieństwa. Kwantyl 0,95 w przypadku RC3 osiąga najwyższe wartości, co oznacza, że w tej klasie istnieje istotne ryzyko bardzo drogich napraw. W klasie RC2 zmienność kosztów jest umiarkowana – koszty są bardziej przewidywalne, a ekstremalne wartości występują rzadziej. Najmniejsze koszty odnotowano w przypadku RC1, gdzie ich rozkład jest najbardziej zwarty, co sugeruje większą stabilność finansową i przewidywalność wydatków na naprawy.

Analiza rysunku 2 pokazuje, że w przypadku $\sigma$ = 0,1 koszty są przewidywalne i skoncentrowane wokół mediany, podczas gdy w przypadku $\sigma$ = 0,3 rozkład jest szeroki i zawiera wiele wartości ekstremalnych. Wyniki te sugerują, że w celu oszacowania kosztów naprawy najlepiej jest stosować umiarkowaną wartość $\sigma$ = 0,2, która uwzględnia zarówno typowe koszty, jak i możliwe skrajne przypadki. Wartość $\sigma$ = 0,3 może być użyteczna w analizie ryzyka przypadków, w których infrastruktura jest w złym stanie technicznym lub gdy istnieje duże zagrożenie niespodziewanymi awariami.

In economic terms, the results of the analysis are of significant importance for managing the repair budget of water supply networks. If the σ value is underestimated, it can lead to unpreparedness for extreme cases of expensive repairs, which in practice means a lack of budget reserves. In turn, overestimating the σ value can result in an unnecessary increase in the repair budget, which burdens the finances of the water supply company. Optimizing the σ value allows for better planning of expenses.

The choice of the σ value has a significant impact on the predicted repair costs of the pipelines. For infrastructure with stable repair costs and systematic maintenance, a value of $\sigma = 0.1$ may be sufficient, while for more complex systems, a better choice is $\sigma = 0.2$. Ultimately, it is crucial to find a balance between accurate cost estimation and the inclusion of uncertainty and risk in the long-term management of the water infrastructure.

The simulation results show that the reliability class has a significant impact on repair costs.The log-normal distribution perfectly reflects the real phenomenon, where most costs are within a certain range, but there is also a small probability of very expensive failures. Therefore, it is recommended to apply RC3 with DSL3 and IL3 classes [22] of maintenance for pipes in key areas of the water infrastructure, especially where the costs of failures can be extremely high.

In terms of failure risk, the greatest risk is posed by RC3 class pipes, where cost instability and repair frequency are the highest. It is worth adding that the analysis indicates that applying proper reliability classes pipes in water supply systems can effectively reduce failures. The choice of RC3 class in mains and RC2 in distribution pipes is recommended for long-term management of operating costs.

Currently used pipes in water supply networks are characterized by a low failure rate compared to traditional materials such as steel or grey cast iron. However, adopting the recommendation according to PN-EN 1990 [22] regarding the appropriate pipeline reliability class, can reduce long-term operating costs, therefore the use of class RC3 is the optimal choice for critical infrastructure, and RC2 for standard transmission networks. The application of the recommendation according to PN-EN 1990 regarding different reliability classes (RC1, RC2, RC3) suggests that reliability classes can also be assigned to individual types of water supply networks, such as mains, transmission lines and distribution networks. Assigning appropriate reliability classes to individual types of pipes and networks allows for cost optimization and minimization of the risk of failure in key infrastructure elements.

## Summary and conclusions

The analysis showed that the reliability class of water pipes and the assumed variability of operating parameters have a significant impact on the forecasted repair costs in water supply systems. The use of the Monte Carlo method and the log-normal distribution allowed for the asymmetry to be

Pod względem ekonomicznym wyniki analizy mają istotne znaczenie dla zarządzania budżetem naprawczym sieci wodociągowych. Jeżeli wartość $\sigma$ jest niedoszacowana, może to prowadzić do nieprzygotowania na ekstremalne przypadki kosztownych napraw, co w praktyce oznacza brak rezerw budżetowych. Z kolei przeszacowanie wartości $\sigma$ może skutkować niepotrzebnym zwiększeniem budżetu na naprawy, co obciąża finanse przedsiębiorstwa wodociągowego. Optymalizacja wartości $\sigma$ pozwala na lepsze planowanie wydatków.

Wybór wartości $\sigma$ ma istotny wpływ na przewidywane koszty naprawy rurociągów. W przypadku infrastruktury o stabilnych kosztach naprawy i systematycznej konserwacji wartość $\sigma = 0{,}1$ może być wystarczająca, natomiast w przypadku bardziej złożonych systemów lepszym wyborem jest $\sigma = 0{,}2$. W ostatecznym rozrachunku kluczowe jest znalezienie balansu między dokładnym oszacowaniem kosztów a uwzględnieniem niepewności i ryzyka w długoterminowym zarządzaniu infrastrukturą wodociągową.

Wyniki symulacji wskazują, że wybór bardziej niezawodnych rur zmniejsza ryzyko wystąpienia ekstremalnie wysokich kosztów napraw. Rozkład log-normalny doskonale oddaje rzeczywiste zjawisko, w którym większość kosztów mieści się w określonym zakresie, ale istnieje niewielkie prawdopodobieństwo bardzo drogich awarii. W związku z tym proponuje się dostosować poziom nadzoru nad pracami projektowymi i wykonawczymi według klasy RC3 oraz DSL3 i IL3 [22] w kluczowych obszarach infrastruktury wodociągowej, szczególnie tam, gdzie koszty awarii mogą być wyjątkowo duże.

Pod względem ryzyka awarii, największe zagrożenie stanowią rurociągi przypisane do klasy RC3, gdzie niestabilność kosztów jest największa. Warto dodać, że analiza wskazuje, że stosowanie rur o wysokiej niezawodności w systemach wodociągowych może skutecznie ograniczać awaryjność. Wybór klasy RC3 w magistralach i RC2 w przewodach rozdzielczych jest rekomendowany w przypadkach długoterminowego zarządzania kosztami eksploatacyjnymi.

Obecnie stosowane rury w sieciach wodociągowych charakteryzują się niskim wskaźnikiem awaryjności w porównaniu z tradycyjnymi materiałami, takimi jak stal czy żeliwo szare. Niemniej jednak, dzięki zastosowaniu zalecenia wg PN-EN 1990 dotyczącego odpowiedniej klasy niezawodności [22] rurociągu można ograniczyć długoterminowe koszty eksploatacyjne, a zatem stosowanie klasy RC3 jest optymalnym wyborem w przypadku przewodów najważniejszych dla systemu, a RC2 dla standardowych sieci przesyłowych.

Zastosowanie zalecenia wg PN-EN 1990 dotyczącego różnych klas niezawodności (RC1, RC2, RC3) sugeruje, że można przypisać klasy niezawodności również do poszczególnych rodzajów sieci wodociągowych, takich jak magistrale, przewody przesyłowe i sieci rozdzielcze. Przypisanie odpowiednich klas niezawodności do poszczególnych rodzajów rur oraz sieci pozwala na optymalizację kosztów oraz minimalizację ryzyka awarii w kluczowych elementach infrastruktury.

taken into account and the occurrence of extreme costs to be determined. The research results are as follows:

- an increase in variability ($\sigma$) leads to a decrease in the predictability of costs, increasing the risk of very expensive repairs;
- RC3 class pipes generate the highest costs, both average and extreme – median: PLN 6012, quantiles 0.95: PLN 8354;
- RC2 provides a compromise between reliability and costs (median: PLN 5217, quantile 0.95: PLN 7249);
- RC1 is characterized by the greatest cost stability and the lowest financial risk (median: PLN 4603, quantile 0.95: PLN 6396);
- wider distribution of RC3 at higher σ values (e.g. 0.3) indicate significant unpredictability of repair costs, while RC1 shows a compact and stable character even with increased variability.

It is recommended to assign reliability classes according to the network function:

- RC1 – distribution pipes of local importance and house service lines, where a higher level of risk is acceptable;
- RC2 – distribution pipes, where a balance between reliability and costs is required;
- RC3 – water mains, where maximum reliability and durability are required.

The value of $\sigma = 0.2$ was considered optimal for forecasting the actual repair costs. Too low value of σ may result in a lack of budget reserves, while too high value may result in excessive financial security. Selection of appropriate risk analysis parameters allows for effective infrastructure management and expenditure planning.

It is planned to continue research on the impact of long-term aging of pipelines, as well as to conduct field analyses in order to empirically verify the obtained simulation results.

*Received: 04.03.2025*
*Revised: 30.04.2025*
*Published: 23.07.2025*

## Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzona analiza wykazała, że klasa niezawodności rur wodociągowych oraz przyjęta zmienność parametrów eksploatacyjnych mają istotny wpływ na prognozowane koszty naprawy w systemach wodociągowych. Wykorzystanie metody Monte Carlo i rozkładu log-normalnego pozwoliło na uwzględnienie asymetrii i określenia wystąpienia kosztów ekstremalnych. Wyniki badań są następujące:

- wzrost zmienności ($\sigma$) prowadzi do obniżenia przewidywalności kosztów, zwiększając ryzyko wystąpienia bardzo drogich napraw;
- rury klasy RC3 generują największe koszty, zarówno przeciętne, jak i skrajne – mediana: 6012 zł, kwantyl 0,95: 8354 zł;
- RC2 zapewnia kompromis między niezawodnością a kosztami (mediana: 5217 zł, kwantyl 0,95: 7249 zł);
- RC1 charakteryzuje się największą stabilnością kosztową i najmniejszym ryzykiem finansowym (mediana: 4603 zł, kwantyl 0,95: 6396 zł);
- szerszy rozkład RC3 przy większej wartości $\sigma$ (np. 0,3) wskazuje na znaczną nieprzewidywalność kosztów napraw, natomiast RC1 wykazuje zwarty i stabilny charakter nawet przy zwiększonej zmienności.

Rekomenduje się przypisanie klas niezawodności zgodnie z funkcją sieci:

- RC1 – przewody rozdzielcze o znaczeniu lokalnym i przyłącza wodociągowe, gdzie dopuszczalny jest wyższy poziom ryzyka;
- RC2 – przewody rozdzielcze, gdzie wymagane jest wyważenie niezawodności i kosztów;
- RC3 – magistrale wodociągowe, gdzie konieczna jest maksymalna niezawodność i trwałość.

Wartość $\sigma$ = 0,2 uznano za optymalną do prognozowania rzeczywistych kosztów napraw. Zbyt mała wartość $\sigma$ może skutkować brakiem rezerw budżetowych, natomiast zbyt duża – nadmiernym zabezpieczeniem finansowym. Dobór odpowiednich parametrów analizy ryzyka pozwala na skuteczne zarządzanie infrastrukturą i planowanie wydatków.

Przewiduje się kontynuację badań w zakresie wpływu długoterminowego starzenia się rurociągów oraz przeprowadzenie analiz terenowych w celu empirycznej weryfikacji uzyskanych wyników symulacyjnych.

*Artykuł wpłynął do redakcji: 04.03.2025 r.*
*Otrzymano poprawiony po recenzjach: 30.04.2025 r.*
*Opublikowano: 23.07.2025 r.*

### Literature

**[1]** Rak JR. Bezpieczeństwo systemów zaopatrzenia w wodę. Warszawa: Wyd. PAN; 2009.

**[2]** Hisham A. Reliability of Water Distribution Networks. International Journal of Engineering Research & Technology. 2019; DOI:10.17577/IJERTV8IS080137.

**[3]** Ostfeld A. Reliability analysis of regional water distribution systems. Urban Water. 2001; https://doi.org/10.1016/S1462-0758(01)00035-8

**[4]** Alegre H, Baptista JM, Cabrera Jr E, Cubillo F, Duarte P, Hirner W, Merkel W, Parena, R. Performance Indicators for Water Supply Services. (2nd ed.). IWA Publishing; 2016.

**[5]** Romaniuk M, Hryniewicz O. Estimation of maintenance costs of a pipeline for a u-shaped hazard rate function in the imprecise setting. Eksploatacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability 2020; http://dx.doi.org/10.17531/ein.2020.2.18.

**[6]** Piratla KR, Yerri SR, Yazdekhasti S, Cho J, Koo D, Matthews JC. Empirical Analysis of Water-Main Failure Consequences. Procedia Engineering. 2015; https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.507

**[7]** Adedei KB, Hamam Y, Abe BT, Abu-Muhfouz AM. Leakage Detection and Estimation Algorithm for Loss Reduction in Water Piping Networks. Water. 2017; https://doi.org/10.3390/w9100773.

**[8]** Kwietniewski M, Rak J. Niezawodność infrastruktury wodociągowej i kanalizacyjnej w Polsce. Warszawa: Wyd. PAN; 2010.

**[9]** Hotloś H. Wskaźniki awaryjności sieci wodociągowych jako kryteri-

um oceny niezawodności eksploatacyjnej. Gaz, Woda i Technika Sanitarna. 2008;4, 16–20.

**[10]** Benchmarking – wybrane wyniki przedsiębiorstw wodociągowo-kanalizacyjnych w Polsce za lata 2014-2018. Izba Gospodarcza Wodociągi Polskie, Bydgoszcz 2020.

**[11]** American Water Works Association. Buried No Longer: Confronting America's Water Infrastructure Challenge. Denver: AWWA; 2012.

**[12]** Barfuss SL. Water Main Break Rates in the USA and Canada: A Comprehensive Study. Utah State University; 2023.

**[13]** Taiwo R. Shaban IA. Zayed T, Development of sustainable water infrastructure: A proper understanding of water pipe failure. Journal of Cleaner Production. 2023; https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136653.

**[14]** Pietrucha-Urbanik K, Tchórzewska-Cieślak B. Cost Analysis of Water Pipe Failure. Engineering in Dependability of Computer Systems and Networks. DepCoS-RELCOMEX 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing; 2020; Springer https://doi.org/10.1007/978-3-030-19501-4_41

**[15]** Hotloś H. Quantitative assessment of the effect of some factors on the parameters and operating costs of water-pipe networks. Wrocław: Wrocław University of Technology Publishing House; 2007.

**[16]** Studziński A. Koszty naprawy awarii przewodów wodociągowych. Materiały Budowlane. 2022; DOI: 10.15199/33.2022.11.46.

**[17]** Fan X. Wang X. Zhang X, Yu X, Machine learning based water pipe failure prediction: the effects of engineering, geology, climate and socio-economic factors. Reliability Engineering & System Safety 2022, https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.108185.

**[18]** Ghobadi F. Jeong G. Kang D. Water Pipe Replacement Scheduling Based on Life Cycle Cost Assessment and Optimization Algorithm. Water. 2021; https://doi.org/ 10.3390/w13050605.

**[19]** Kleiner Y. Nafi A. Rajani B, Planning renewal of water mains while considering deterioration, economies of scale and adjacent infrastucture. Water Supply. 2010; https://doi.org/10.2166/ws.2010.571.

**[20]** Ahopelto S. Vahala R, Cost–Benefit Analysis of Leakage Reduction Methods in Water Supply Networks. Water. 2020; https://doi.org/10.3390/w12010195.

**[21]** Kim K. Seo J Hyung J. Kim T Kim J Koo J, Economic-based approach for predicting optimal water pipe renewal period based on risk and failure rate. Environmental Engineering Research. 2019; https://doi.org/10.4491/eer.2017.188.

**[22]** EN 1990: Eurocode – Basis of Structural Design (np. CEN EN 1990:2002+A1:2005)

**[23]** Yamijala S. Guikema SD. Brumbelow K, Statistical models for the analysis of water distribution system pipe break data. Reliability Engineering & System Safety. 2009; https://doi.org/10.1016/j.ress.2008.03.011.

**[24]** Maier HR. Kapelan Z. Kasprzyk JR. Kollat JB. Matott LS. Cunha MC. Dandy GC. Ostfeld A, Evolutionary algorithms and other metaheuristics in water resources: Current status, research challenges and future directions. Environmental Modelling & Software. 2014; https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.09.013.

**[25]** Le Gat, Y. Eisenbeis P, Using maintenance records to forecast failures in water networks. Urban Water. 2000; https://doi.org/10.1016/S1462-0758(00)00057-1.

**[26]** Studziński A. Harbulakova VO. Skrzypczak I, The influence of the properties of water pipes made of PE on their durability and reliability. Archives of Civil Engineering. 2022; https://doi.org/10.24425/ace.2022.140160.