



## **Wybrane aspekty kosztów oraz awaryjności przewodów przykładowego systemu wodociągowego**

*Katarzyna Pietrucha-Urbanik, Andrzej Studziński*  
*Politechnika Rzeszowska*

### **1. Wstęp**

Zagadnienia awaryjności są szczególnie istotne w systemach zaopatrzenia w wodę, gdzie możliwe konsekwencje zdarzeń awaryjnych mogą dotyczyć zdrowia i życia tysięcy osób. Szczególnie ważny dla konsumentów wody jest aspekt dostawy wody w odpowiedniej ilości oraz jakości (Kwietniewski & Rak 2010, Rak 2007). Analiza kosztów ponoszonych na usuwanie awarii oraz utrzymanie niezawodności na określonym poziomie ma bardzo ważne znaczenie podczas planowania rozbudowy lub naprawy sieci wodociągowych (Tchórzewska-Cieślak i in. 2016). Projektując nowe lub modernizując stare sieci wodociągowe należy wziąć pod uwagę koszty, przy których inwestowanie w zapobieganie zdarzeniom awaryjnym będzie ekonomicznie opłacalne (Czapczuk i in. 2015, Rajani & Makar 2000, Rak 2009).

Dotychczasowe badania eksploatacyjne przeprowadzone w różnych systemach wodociągowych zwracają uwagę na znaczne koszty i skutki ewentualnej utraty bezpieczeństwa powstałej w wyniku awarii (Królikowska 2011, Zimoch & Łobos 2010). Do czynników determinujących występowanie awarii na sieci wodociągowej należą wiek, średnica oraz materiał przewodu wodociągowego, warunki gruntowe, ciśnienie robocze, temperatura, możliwe zewnętrzne obciążenia oraz przebieg awaryjności (Pietrucha-Urbanik 2015, Rak 2009, Tchórzewska-Cieślak & Szpak 2015, Vloerbergh & Blokker 2010). Identyfikacja zależności pomiędzy uszkodzeniami a czynnikami ryzyka awarii jest ważnym

aspektem w codziennej eksploatacji systemu wodociągowego, przykłady takich opracowań uwzględniających analizę parametrów awaryjności to min. (Gould i in. 2011, Hotło 2007, Iwanek i in. 2015). W pracy przedstawiono analizę awaryjności i kosztów usuwania awarii, biorąc pod uwagę siedmioletni okres eksploatacji w przykładowym systemie wodociągowym.

## **2. Opis obiektu badań**

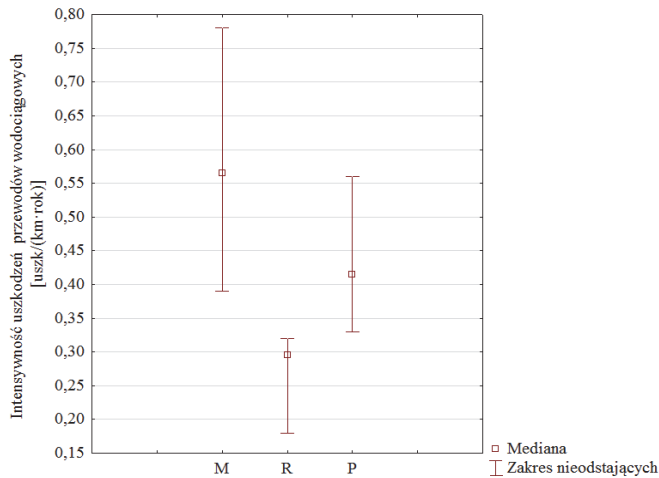
Analizę wykonano w oparciu o dane eksploatacyjne i zebrane informacje dotyczące funkcjonowania sieci wodociągowej. Badana sieć wodociągowa zaopatruje w wodę 57 tys. osób. Rozprowadzenie wody do odbiorców odbywa się za pośrednictwem systemu wodociągowego w układzie pierścieniowo-promienistym, co korzystnie wpływa na niezawodność funkcjonowania systemu dostawy wody. Długość przewodów magistralnych oraz przewodów rozdzielczych w ostatnim roku analizy wyniosła 240 km i wzrosła w porównaniu do pierwszego roku analizy o ok. 10%. Okres eksploatacji sieci wodociągowej jest zróżnicowany, ponad połowa przewodów ma powyżej 30 lat, co stwarza konieczność przeprowadzania systematycznych prac modernizacyjnych oraz stopniowej wymiany przewodów, które często ulegają awariom. Najstarsze przewody wodociągowe mające powyżej 50 lat stanowią jedynie 6% całej sieci wodociągowej. Sieć wodociągowa w rozpatrywanym systemie wodociągowym jest zróżnicowana pod względem materiałowym. Struktura materiałowa wodociągu przedstawia się następująco: żeliwo szare (16%), stal (36%), polietylen (27%) oraz PCV (21%).

## **3. Analiza awaryjności sieci wodociągowej**

### **3.1. Intensywność uszkodzeń przewodów wodociągowych**

Intensywność uszkodzeń przewodów wodociągowych wyznaczono jako iloraz liczby uszkodzeń do długości danego rodzaju przewodów w ciągu jednego roku (Kwietniewski i in. 1993). Na rysunku 1 zestawiono wskaźniki intensywności uszkodzeń wodociągu.

Mediana wartości wskaźnika intensywności uszkodzeń przewodów wodociągowych wynosi 0,57 uszk/(km·rok) dla magistral, dla przewodów rozdzielczych 0,30 uszk/(km·rok) oraz przyłączy wodociągowych 0,42 uszk/(km·rok).



**Rys. 1.** Intensywność uszkodzeń przewodów wodociągowych:  $\lambda_M$  – przewodów magistralnych,  $\lambda_R$  – przewodów rozdzielczych oraz  $\lambda_P$  – przyłączy wodociągowych

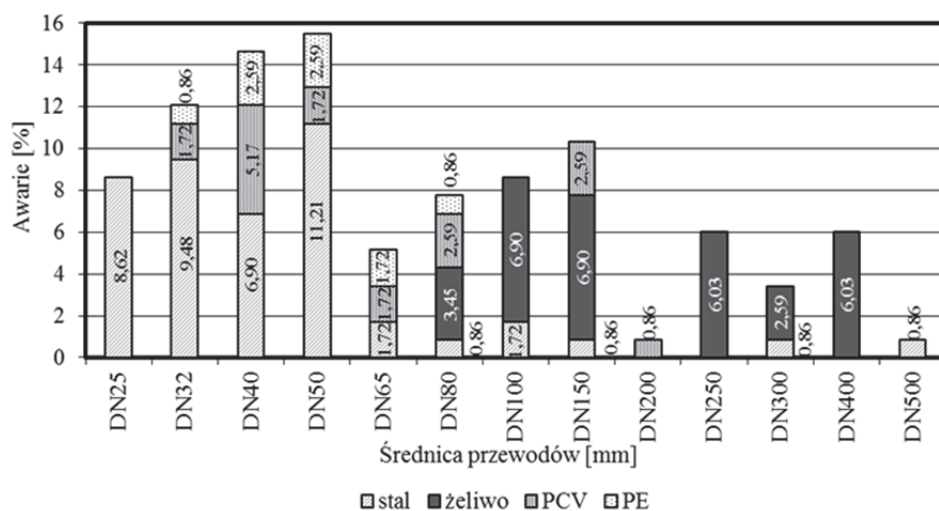
**Fig. 1.** Failure rate for water pipes:  $\lambda_M$  – mains,  $\lambda_R$  – distributional and  $\lambda_P$  – water supply connections

Przewody magistralne wykazują wyższe wskaźniki intensywności niż zalecane  $\lambda_{M_{gr}} = 0,3$  uszk/(km·rok) (PN-EN 60300-3-4 2008, Rak 2007). Na wysoką awaryjność przewodów magistralnych wpływa wiek oraz rodzaj materiału, z którego zostały wykonane. Wskaźniki dla przewodów rozdzielczych oraz przyłączy wodociągowych spełniają kryteria europejskie  $\lambda_{R_{gr}} = 0,5$  uszk/(km·rok) oraz  $\lambda_{P_{gr}} = 1,0$  uszk/(km·rok). Podobną sytuację zaobserwowano dla porównywalnych systemów wodociągowych pod względem wieku oraz liczby zaopatrywanych odbiorców.

### 3.2. Analiza awaryjności sieci wodociągowej ze względu na przyczynę, rodzaj materiału oraz średnicę

Na rysunku 2 przedstawiono procentowe występowanie awarii przewodów wodociągowych w zależności od średnicy i materiału.

Biorąc pod uwagę wszystkie zarejestrowane awarie najwięcej awarii zlokalizowano i usunięto na przewodach stalowych (44,6%), kolejno awarie pojawiające się na przewodach żeliwnych stanowiły 32,9%, najmniej wystąpiło na przewodach z polietylenu oraz PVC odpowiednio 15,1% i 7,4%.



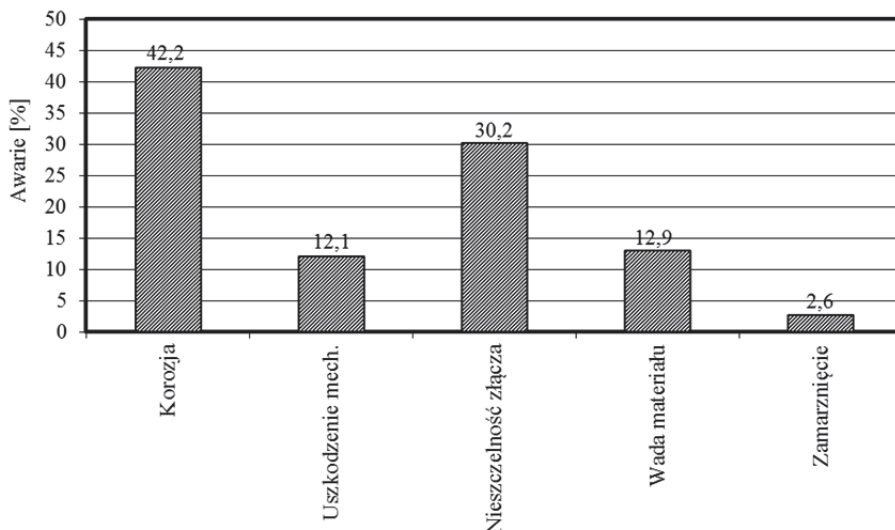
**Rys. 2.** Występowanie awarii na przewodach stalowych, żeliwnych, PCV oraz PE w zależności od średnicy przewodu wodociągowego

**Fig. 2.** Occurrence of a failures on the pipes of steel, cast iron, PVC and PE, depending on the diameter of water pipe

W przypadku żeliwnych przewodów najczęstszą przyczyną awarii była nieszczelność złączy. Najwięcej awarii wystąpiło na przewodach żeliwnych o średnicach DN100 oraz DN150. Najczęstszą przyczyną awarii na przewodach stalowych była korozja. W podziale na rodzaj przewodów wodociągowych najwięcej awarii wystąpiło na przyłączach wodociągowych około 49,5% wszystkich uszkodzeń, na przewodach rozdzielczych 27,3% ogółu awarii, na przewodach magistralnych 19,7% oraz pozostałe 3,5% na uzbrojeniu.

W przypadku przewodów wykonanych z tworzyw sztucznych awarie pojawiały się głównie w wyniku wad materiałowych, nieszczelności złączy oraz nieodpowiedniego prowadzenia prac budowlanych na terenie przebiegu wodociągu. W przypadku przewodów wykonanych z polietyleny najwięcej awarii pojawiło się na średnicach DN40 oraz DN50. W przypadku przewodów z żeliwa szarego intensywność uszkodzeń wyniosła 0,54 uszk/(km·rok), dla stali 0,33 uszk/(km·rok), przewody wykonane z PCV oraz PE charakteryzują się niską wartością intensywności uszkodzeń, odpowiednio 0,21 uszk/(km·rok) oraz 0,087 uszk/(km·rok).

Procentowy podział przyczyn powstawania awarii dla wszystkich przewodów przedstawiono na rysunku 3.



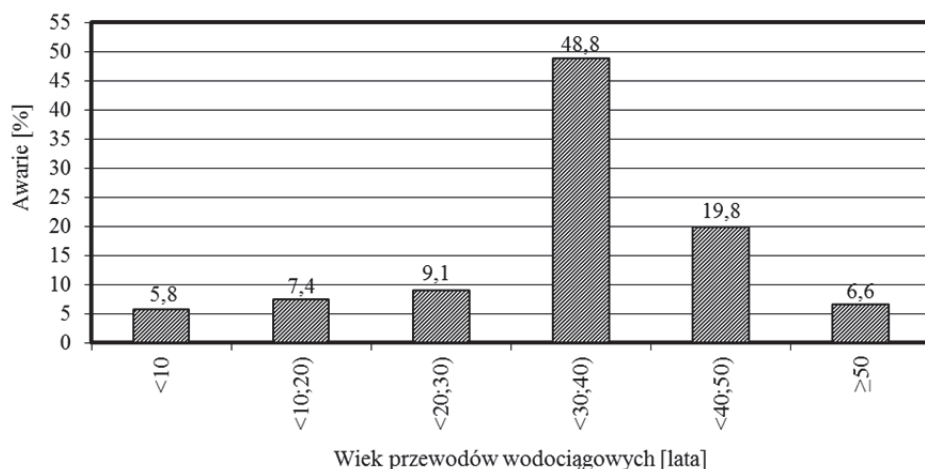
**Rys. 3.** Awaryjność przewodów wodociągowych ze względu na przyczynę  
**Fig. 3.** Failure of water pipes depending on the cause

Najczęstszą przyczyną awarii sieci wodociągowej była korozja, na co wpływa fakt, iż znaczna część przewodów wykonana jest ze stali, które równocześnie należą do najstarszych przewodów w badanym systemie wodociągowym. Znaczny udział w występowaniu awarii miały również nieszczelności złącza, które stanowiły 30,2% przyczyn ogółu uszkodzeń.

### 3.3. Analiza awaryjności ze względu na wiek przewodów

Długotrwałe zużycie materiału związane z działaniem czynników fizycznych i chemicznych oraz wewnętrznych i zewnętrznych wpływa na zwiększenie ryzyka pojawienia się awarii rurociągu. Na rysunku 4 zobrazowano zależność awaryjności od wieku wodociągu.

Na przewodach eksploatowanych od 30 do 40 lat liczba awarii stanowiła 48,8%. Przewody wodociągowe w tym przedziale wiekowym stanowią 40% długości sieci wodociągowej, co znalazło swoje odzwierciedlenie w wyznaczonym wskaźniku intensywności uszkodzeń.



**Rys. 4.** Awaryjność ze względu na wiek przewodów wodociągowych w rozpatrywanym okresie badań

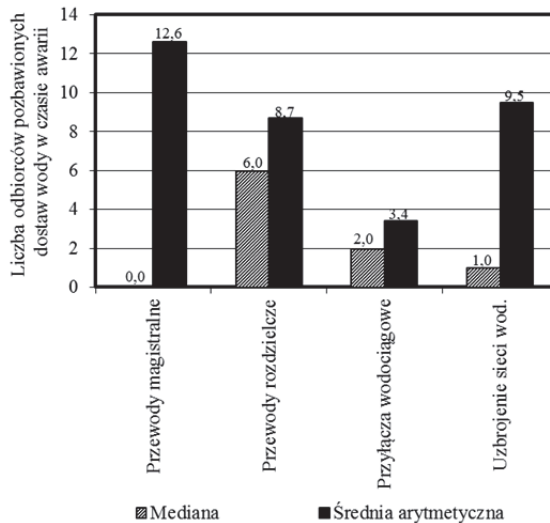
**Fig. 4.** Failure due to the age of water pipes in the examined period of research

Intensywność uszkodzeń z uwzględnieniem wieku przewodów wodociągowych przedstawia się następująco:  $\lambda_{10 \text{ lat}} = 0,24$  uszk/(km·rok),  $\lambda_{<10;20)} = 0,092$  uszk/(km·rok),  $\lambda_{<20;30)} = 0,14$  uszk/(km·rok),  $\lambda_{<30;40)} = 0,35$  uszk/(km·rok),  $\lambda_{<40;50)} = 0,94$  uszk/(km·rok) oraz  $\lambda_{>50} = 0,31$  uszk/(km·rok).

### 3.4. Analiza liczby odbiorców pozbawionych wody w czasie awarii

Odbiorcą wody według Ustawy o zbiorowym zaopatrzeniu w wodę i zbiorowym odprowadzaniu ścieków jest każdy, kto korzysta z usług wodociągowych z zakresu zbiorowego zaopatrzenia w wodę na podstawie umowy z przedsiębiorstwem wodociągowym.

Liczba odbiorców pozbawionych dostawy wody zależy od skali i rodzaju awarii. Największa liczba odbiorców pozbawiona jest dostaw wody w przypadku awarii magistral oraz przewodów rozdzielczych, kiedy konieczne jest zamknięcie wody dla większego obszaru oraz występuje dłuższy czas naprawy, niż w przypadku awarii występujących na przyłączach wodociągowych. Do analizy wzięto pod uwagę zarówno awarie skutkujące brakiem dostawy wody do odbiorców, jak i te, podczas których nie zamykano zasuw. Wyniki analizy statystycznej przedstawiono na rysunku 5.



**Rys. 5.** Mediana oraz średnia arytmetyczna z grupy odbiorców odciętych od dostaw wody w czasie awarii

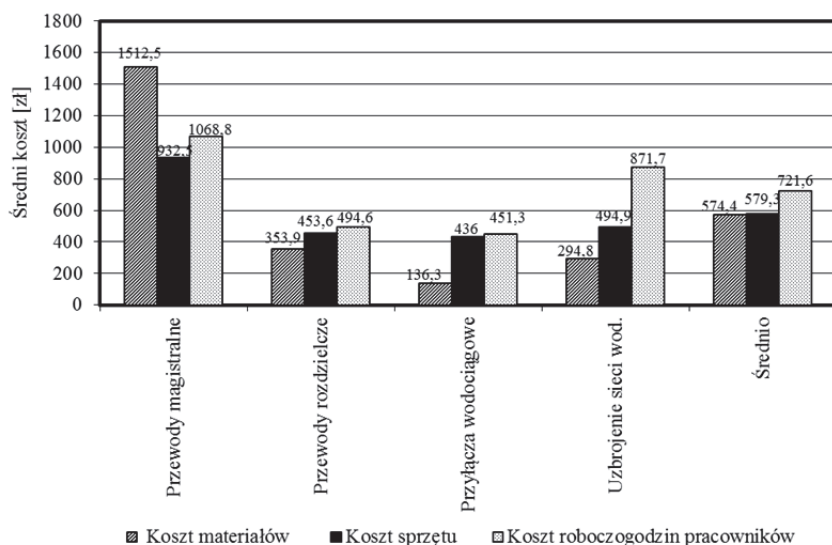
**Fig. 5.** Median and arithmetic mean of the group of recipients cut off from water supply during failure

Wartość średniej arytmetycznej dla poszczególnych przewodów wodociągowych oraz uzbrojenia sieci wodociągowej przewyższa wartość mediany, co wskazuje na incydentalne występowanie zdarzeń awaryjnych skutkujących zamknięciem wody do większej liczby odbiorców. Awarie występujące na przyłączach wodociągowych i przewodach rozdzielczych nie charakteryzują się dużą rozbieżnością statystyczną charakteryzującą liczbę odbiorców pozbawionych wody podczas awarii, tak jak jest to w przypadku uszkodzeń na przewodach magistralnych, bądź na uzbrojeniu sieci wodociągowej. Szczegółowa analiza wykazała, że wyznaczone wartości odchylenia standardowego są większe od wartości średnich, co świadczy o znacznym rozrzuceniu wyników wokół tej wartości.

### 3.5. Analiza kosztów poniesionych w celu usunięcia awarii

Koszty naprawy uszkodzeń uzależnione są od cen użytych materiałów oraz sprzętu, jak również kosztu roboczogodzin pracowników zaangażowanych w usunięcie awarii. Na sumę ponoszonych kosztów wpływa rozmiar i miejsce występowania awarii, jak również warunki terenowe i pogodowe, średnica i materiał przewodu wodociągowego, który uległ awarii. Na

rysunku 6 przedstawiono średni koszt materiałów eksploatacyjnych zakupionych i użytych w celu naprawy awarii występujących na sieci wodociągowej, średni koszt użytego sprzętu oraz średni koszt roboczogodzin pracowników podczas usuwania awarii. Przedstawioną zależność odniesiono do poszczególnych przewodów wodociągowych oraz uzbrojenia sieci wodociągowej.



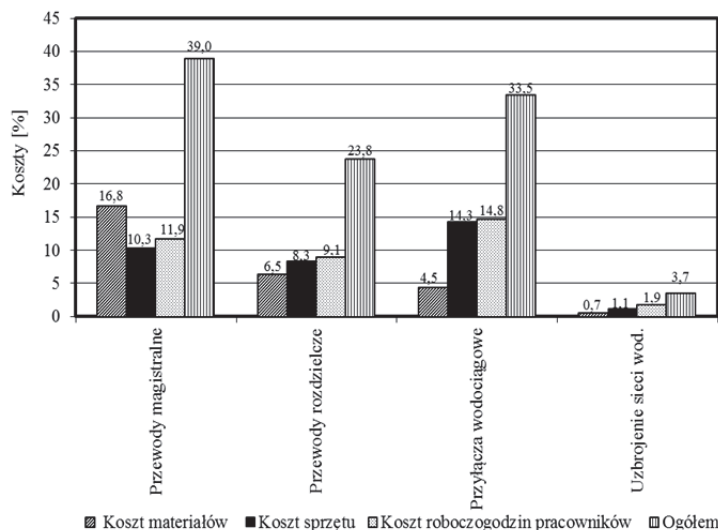
**Rys. 6.** Średni koszt materiałów zużytych do naprawy, średni koszt sprzętu użytego do usunięcia awarii oraz średni koszt roboczogodzin pracowników

**Fig. 6.** The average cost of materials used for failure removal, the average cost of the equipment used to remove a failure and the average cost of working hours of employees

Koszty usuwania awarii wodociągowych wykazują zróżnicowanie między innymi ze względu na rodzaj sieci wodociągowej, na której występują (rys. 7). Naprawa przewodów magistralnych stanowi 39% wszystkich kosztów z uwagi na dużą średnicę przewodów oraz związany z tym wysoki koszt materiału. Awarie występujące na przyłączach wodociągowych generują koszty w wysokości 33,5% wszystkich poniesionych wydatków, o 9917 zł mniej niż w przypadku magistral. Najniższe koszty występują w przypadku usuwania awarii na przewodach rozdzielczych (23,8%) oraz uzbrojeniu sieci wodociągowej (3,7%).



Przedsiębiorstwo wodociągowe koszty sprzętu używanego w celu usunięcia awarii oraz koszty robocizogodzin pracowników wyznacza w oparciu o wewnętrzny cennik usług dodatkowych, który poddawany jest corocznie aktualizacji.



**Rys. 7.** Wartość procentowa kosztów materiałów zużytych na likwidację awarii, kosztów sprzętu użytego do usunięcia awarii oraz kosztu robocizogodzin pracowników

**Fig. 7.** The percentage value cost of materials used for failures removal, the cost of the equipment used to remove the failures and the cost of working hours of employees

Koszty robocizogodzin pracowników stanowią 37,6% wszystkich kosztów, są wyższe od pozostałych kosztów, od kosztów sprzętu o 3,6% (6491,4 zł), a w przypadku kosztów poniesionych na materiały o 9,2% (16589,2 zł). Na wysokie koszty wynagrodzeń pracowników wpływa rozmiar prac związanych z usuwaniem awarii, jak również często zaangażowanie osób o różnych specjalnościach do usuwania uszkodzeń, min. operatorów koparek i kierowców. Łączne koszty napraw wyniosły 180317,1 zł, z czego 70288,8 zł przeznaczono na usuwanie awarii na magistralach.

## 4. Podsumowanie

Analiza danych pozwoliła na stwierdzenie, że awaryjność sieci wodociągowej jest akceptowalna, jedynie intensywność uszkodzeń przewodów magistralnych przekroczyła wartość zalecaną i wyniosła 0,57 uszk/(km·rok). Dla przewodów rozdzielczych wyniosła 0,30 uszk/(km·rok) oraz dla przyłączy wodociągowych 0,42 uszk/(km·rok), co oznacza spełnienie zaleceń normy (PN-EN 60300-3-4 2008).

W przypadku przyłączy wodociągowych, na których odnotowano prawie połowę awarii (49,5%), dominują uszkodzenia korozyjne przewodów stalowych. Z kolei przewody rozdzielcze w zakresie średnic DN80-250 wykazują przewagę nieszczelności złączy kielichowych rurociągów wykonanych z żeliwa szarego. Dotyczy to również magistral o średnicach DN300 i DN400.

Zauważa się dziesięciokrotny wzrost intensywności uszkodzeń wraz ze wzrostem wieku przewodu w zakresie 10-50 lat, od  $\lambda_{<10;20} = 0,092$  uszk/(km·rok) do  $\lambda_{<40;50} = 0,94$  uszk/(km·rok), najmłodsze przewody wykazują intensywność uszkodzeń  $\lambda_{10 \text{ lat}} = 0,24$  uszk/(km·rok) związaną z wadami materiałowymi i błędami wykonawstwa, natomiast przewody najstarsze cechują się intensywnością  $\lambda_{>50} = 0,31$  uszk/(km·rok) i można to tłumaczyć wysoką jakością wykonania oraz użytego materiału.

Średnie koszty usuwania awarii wyniosły 1024 zł dla przyłączy wodociągowych, 1302 zł dla przewodów rozdzielczych oraz 3514 zł dla magistral. Awaria armatury kosztowała przeciętnie 1661 zł. Łączne koszty usuwania awarii przekroczyły 180 tys. zł, z czego 39% stanowią koszty usuwania awarii na magistralach, co łącznie z wysoką wartością intensywności uszkodzeń wskazuje na główny kierunek działań modernizacyjnych.

## Literatura

- Czapczuk, A., Dawidowicz, J., Piekarski, J. (2015). Artificial Intelligence Methods in the Design and Operation of Water Supply Systems. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 17(2), 1527-1544.
- Gould, S.J.F., Boulaire, F.A., Burn, S., Zhao, X.L., Kodikara, J.K. (2011). Seasonal factors influencing the failure of buried water reticulation pipes. *Water Science Technology*, 63, 2692-2699.
- Hotłoś, H. (2007). *Ilościowa ocena wpływu wybranych czynników na parametry i koszty eksploatacji sieci wodociągowych*. Wrocław: Politechnika Wroclawska.

- Iwanek M., Kowalska B., Kowalski D., Kwietniewski M., Miszta-Kruk K., Mikołajuk P. (2015). Wpływ różnych czynników na awaryjność sieci wodociągowej w układzie przestrzennym – studium przypadku, *Czasopismo Inżynierii Łądowej, Środowiska i Architektury*, 62(1), 167-183.
- Królikowska, J. (2011). Application of PHA Method for Assessing Risk of Failure on the Example of Sewage System in the City of Krakow. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 13(1), 693-710.
- Kwietniewski, M., & Rak, J. (2010). *Niezawodność infrastruktury wodociągowej i kanalizacyjnej w Polsce*. Warszawa: Polska Akademia Nauk.
- Kwietniewski, M., Roman, M., Kłoss-Trębaczewicz, H. (1993). *Niezawodność wodociągów i kanalizacji*. Warszawa: Arkady.
- Pietrucha-Urbanik, K. (2015). Failure Prediction in Water Supply System - Current Issues. *Theory and Engineering of Complex Systems and Dependability, Advances in Intelligent Systems and Computing*, 365, 351-358.
- PN-EN 60300-3-4 (2008). Zarządzanie niezawodnością. Część 3-4. Przewodnik zastosowań. Przewodnik dotyczący specyfikowania wymagań niezawodnościowych.
- Rajani, B., & Makar, J. (2000). A methodology to estimate remaining service life of grey cast iron water mains. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27, 1259-1272.
- Rak, J. (2009). Selected Problems of Water Supply Safety. *Environmental Protection Engineering*, 35, 23-28.
- Rak, J.R. (2007). Some aspects of risk management in waterworks. *Ochrona Środowiska*, 29, 61-64.
- Tchórzewska-Cieslak, B., Szpak, D. (2015). Proposal of a Method for Water Supply Safety Analysis and Assessment. *Ochrona Środowiska*, 37, 43-47.
- Tchórzewska-Cieślak, B., Pietrucha-Urbanik M. 2015. Analysis of the gas network failure and failure prediction using the Monte Carlo simulation method. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 18, 254-259.
- Vloerbergh, I., Blokker, M. (2010). Sharing failure data to gain insight into network deterioration. *Water Asset Management International*, 6, 9-14.
- Zimoch, I., Łobos, E. (2010). Application of the theil statistics to the calibration of a dynamic water supply model. *Environment Protection Engineering*, 36, 105-115.

## **Selected Issues of Costs and Failure of Pipes in an Exemplary Water Supply System**

### **Abstract**

The aim of the study is to analyze cost and failures of water pipes. The analysis was conducted on the basis of operational data of the failure of the water supply network pipes, obtained from the water supply company. In the analysis, the indicator of failure rate for different types of water pipes (mains, distributional pipes and water supply connections) was accounted for. The analysis of the failure of water supply pipes in connection to the diameter, age and material was presented in the paper.

The analysis can be applied in operational practice in water companies, particularly in the analysis related to the costs of pipe repairs, which consists in estimating the cost of repair work. Material composition of water supply system constitutes mainly PE and steel pipes. The new pipes are built mainly of PE. The regular replacement of cast iron pipes is noted, because of their high failure rate, which indicates that these pipes have reached the end of life technology.

The obtained failure rate values were referred to the ones recommended by European criteria, as it should not exceed 0,3 failure/km·a for mains, 0,5 failure/km·a for distributional pipes and 1,0 failure/km·a for water supply connections. In the case of distributional pipes, the failure rate exceeds the criteria and in the case of water supply connections and distributional pipes, the observed values are lower than the limit value. Repair of mains constitute 39% of all costs due to the large diameter pipes and the associated higher cost of the material. Lower total cost is related to failures, which occur on distributional pipes (23.8%) and fittings of water supply network (3.7%). The total cost of operating employees constitutes the highest of all costs. The costs incurred for materials are lower of 9.2%. Labour costs are higher than the costs of equipment by 3.6%. The data can be complementary to the national database in this area and allow to carry out a satisfactory assessment of the water supply network, taking into account both the network failure rate, as well as the tendency of changes in material supply network pipes. Despite numerous studies in the field of water supply system failure, there is still a need of conducting further study, such situation is affected by the ongoing changes in the age and structure of water supply networks. The collected data and conducted analysis can be one of the decisive indicators for the policy of operation of water supply systems.

### **Słowa kluczowe:**

sieć wodociągowa, awaryjność, koszty, intensywność uszkodzeń

### **Keywords:**

water network, failure, cost, failure rate