

Andrzej STUDZIŃSKI<sup>1</sup>  
Katarzyna PIETRUCHA-URBANIK<sup>2</sup>  
Artur MĘDRAŁA<sup>3</sup>

## ANALIZA STRAT WODY ORAZ AWARYJNOŚCI W WYBRANYCH SYSTEMACH ZAOPATRZENIA W WODĘ

W pracy omówiono zagadnienia związane z eksploatacją wybranych systemów zaopatrzenia w wodę, m.in. z analizą awaryjności sieci wodociągowej. Określono intensywność uszkodzeń dla przewodów magistralnych, rozdzielczych oraz przyłączy wodociągowych. Otrzymane wartości intensywności uszkodzeń przewodów magistralnych, rozdzielczych oraz przyłączy wodociągowych w przeważającej większości spełniają kryteria wymagań europejskich. Zakres pracy obejmuje również analizę strat wody w wybranych systemach zaopatrzenia w wodę. Przedstawiono podstawowe wielkości zużycia wody, a także ustalono podstawowe wskaźniki strat wody, które odniesiono do wartości wskaźników zalecanych przez International Water Association (IWA). We wszystkich porównywanych systemach zaopatrzenia w wodę zaobserwowano przyrost przewodów magistralnych, przewodów rozdzielczych oraz przyłączy wodociągowych. Zużycie wody na potrzeby własne wodociągu w rozpatrywanym przedziale czasu utrzymuje się na tym samym poziomie. Obliczenie jednostkowych wskaźników strat wody pozwoliło na uzyskanie szczegółowego obrazu sytuacji eksploatacyjnej wodociągu. Korzystny jest iloraz rzeczywistych strat rocznych oraz nieuniknionych strat rzeczywistych. Infrastrukturalny indeks wycieków w dwóch rozpatrywanych systemach zaopatrzenia w wodę wyniósł od 2,05 do 3,74, na co wpłynęła rozległa sieć wodociągowa w stosunku do liczby mieszkańców, rozproszona zabudowa oraz niekorzystna konfiguracja terenu. Jednostkowe wskaźniki objętościowe dotyczące strat wody wykazują tendencję malejącą w badanym okresie. Wskaźnik intensywności obciążenia sieci zbliżony do odnotowanego w innych miastach Polski waha się w przedziale od 12,9 do 46,9 m<sup>3</sup>/km-d.

**Słowa kluczowe:** sieć wodociągowa, awaryjność sieci, wskaźniki strat wody

---

<sup>1</sup> Autor do korespondencji/corresponding author: Andrzej Studziński, Politechnika Rzeszowska, al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów, tel. 17 8651703, astud@prz.edu.pl

<sup>2</sup> Katarzyna Pietrucha-Urbaniak, Politechnika Rzeszowska, al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów, tel. 17 8651703, kpriet@prz.edu.pl

<sup>3</sup> Artur Mędrała, Politechnika Rzeszowska

## 1. Wprowadzenie

Systemy zaopatrzenia w wodę (SZW) należą do infrastruktury krytycznej funkcjonowania aglomeracji miejsko-przemysłowych. SZW charakteryzuje się znaczącą przestrzenią terytorialną i wymaganiem ciągłego spełniania funkcji w czasie. Ponieważ ciągłość funkcjonowania jest podstawowym atrybutem niezawodności i bezpieczeństwa SZW, badania awaryjności oraz strat wody są przedmiotem wielu publikacji [1-3, 5, 7-9].

W pracy przedstawiono analizę awaryjności oraz strat wody w systemach zaopatrzenia w wodę w latach 2008-2010 na podstawie danych uzyskanych z przedsiębiorstw wodociągowych, a także Głównego Urzędu Statystycznego.

## 2. Analiza awaryjności, wskaźników zużycia oraz strat wody w wybranych wodociągach

W tabeli 1. zestawiono długości przewodów wodociągowych zależne od struktury funkcjonalnej dla poszczególnych wodociągów w latach 2008-2010.

Tabela 1. Długości przewodów poszczególnych wodociągów w latach 2008-2010

Table 1. Lengths of individual water supply in 2008-2010

Rok	Długość przewodów wodociągowych	Magistrale <i>M</i> [km]	Przewody rozdzielcze <i>R</i> [km]	Przyłącza wodociągowe <i>PW</i> [km]	<i>L</i> całkowite [km]
<b>Miejscowość A</b>					
2008		32,5	89,4	120,3	242,2
2009		32,5	90,4	123,1	246
2010		32,5	92,2	124,9	249,6
<b>Miejscowość B</b>					
2008		11,2	97,1	84,4	192,7
2009		11,2	97,5	84,4	193,1
2010		11,2	120,2	84,4	215,8
<b>Miejscowość C</b>					
2008		51,3	169,9	160,1	381,3
2009		51,3	170,7	163,1	385,1
2010		51,3	172,2	166,9	390,4
<b>Miejscowość D</b>					
2008		49,5	447,7	322,8	820
2009		49,5	460	323,2	832,7
2010		49,8	490,5	323,8	864,1

Łączna długość wodociągu w miejscowości A jest większa od długości tych sieci w wodociągu miejscowości B, mimo że wodociąg A zaopatruje w wodę o ponad połowę mniejszą liczbę ludności. Różnica ta jest spowodowana tym, że

sieć wodociągowa A jest znacznie bardziej rozproszona, ponieważ zaopatruje w wodę odbiorców na większym obszarze. W poszczególnych latach długość przewodów rozdzielczych oraz przyłączy systematycznie wzrastała w wodociągach A, C i D, natomiast w wodociągu B zwiększyła się jedynie długość przewodów rozdzielczych. W tabeli 2. zestawiono bilans wody dla porównanych wodociągów w latach 2008-2010.

Tabela 2. Bilans wody porównanych wodociągów w latach 2008-2010

Table 2. Water balance in compared waterworks in 2008-2010

<b>Wskaźnik</b> <b>Rok</b>	$V_{wt}$ [m <sup>3</sup> /rok]	$V_{SP}$ [m <sup>3</sup> /rok]	$V_{Wt}$ [m <sup>3</sup> /rok]	$V_{STR}$ [m <sup>3</sup> /rok]
<b>Miejscowość A</b>				
2008	1223400	780100	99500	343800
2009	1155900	789000	88300	278600
2010	1179600	799600	93400	286600
<b>Miejscowość B</b>				
2008	3186517	1639388	318652	1228477
2009	3303173	1554807	330317	1418049
2010	3166798	1528228	316680	1321890
<b>Miejscowość C</b>				
2008	5674066	3563497	248276	2110569
2009	5666727	3492163	259806	2174564
2010	5886826	3598195	264621	2288631
<b>Miejscowość D</b>				
2008	12967002	9478922	1525964	1962116
2009	12539547	9520591	1329615	1800558
2010	13041107	9413191	1651988	1975928

Przy ponaddwupółkrotnej objętości wody włączanej do wodociągu B w poszczególnych latach i przy stosunkowo nieznacznej objętości wody na potrzeby własne tegoż wodociągu (choć ponadtrzykrotnie większej niż potrzeby własne wodociągu A) różnica w objętości wody sprzedanej, czyli dostarczonej do odbiorców, jest już tylko dwukrotna. Objętość strat wody w tych latach pomiędzy wodociągami B i A jest średnio prawie czterypółkrotnie większa. Z tak dużą objętością strat wodociągu B wiąże się duża liczba awarii przypadających na jeden kilometr sieci wodociągowej w ciągu roku. W tabeli 3. przedstawiono intensywność obciążenia sieci  $q_{os}$  [m<sup>3</sup>/d·km] obliczoną na podstawie wzoru (1), współczynnik efektywnego wykorzystania  $W$  [%] obliczony według wzoru (2) oraz wskaźnik jednostkowych strat  $q_{sj}$  obliczony według wzoru (3).

$$q_{os} = Q_d/L \text{ [m}^3\text{/d}\cdot\text{km]} \quad (1)$$

gdzie:  $q_{os}$  – intensywność obciążenia sieci [m<sup>3</sup>/d·km],

$Q_d$  – średnie dobowe zapotrzebowanie na wodę [ $\text{m}^3/\text{d}$ ],  
 $L$  – długość sieci wodociągowej [km].

$$W = V_{SP}/V_{wt} \cdot 100 [\%] \quad (2)$$

gdzie:  $W$  – współczynnik efektywnego wykorzystania zdolności produkcyjnej wodociągu,

$V_{SP}$  – objętość wody sprzedanej w roku [tys.  $\text{m}^3$ ],

$V_{wt}$  – objętość wody wtłoczonej do sieci w ciągu roku [tys.  $\text{m}^3$ ].

$$q_{sj} = Q_s/L [\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{km}] \quad (3)$$

gdzie:  $q_{sj}$  – wskaźnik jednostkowych strat [ $\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{km}$ ],

$Q_s$  – straty wody [ $\text{m}^3/\text{h}$ ],

$L$  – długość sieci wodociągowej [km].

Tabela 3. Wartości współczynnika obciążenia sieci oraz współczynnika efektywnego wykorzystania zdolności produkcyjnej w latach 2008-2010

Table 3. The values of the network load and the coefficient of effective use of production capacity in 2008-2010

<b>Rok</b>	<b>Wskaźnik</b>	$q_{os}$ [ $\text{m}^3/\text{km}\cdot\text{d}$ ]	$W$ [%]	$q_{sj}$ [ $\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{km}$ ]
<b>Miejscowość A</b>				
2008		13,8	63,8	0,162
2009		12,9	68,3	0,129
2010		12,9	67,8	0,131
<b>Miejscowość B</b>				
2008		45,3	51,4	0,728
2009		46,9	47,1	0,838
2010		40,2	48,3	0,699
<b>Miejscowość C</b>				
2008		40,8	62,8	0,632
2009		40,3	61,6	0,645
2010		41,3	61,1	0,669
<b>Miejscowość D</b>				
2008		43,3	73,1	0,273
2009		41,3	75,9	0,247
2010		41,3	72,2	0,261

Przykładowo, w porównaniu z dopuszczalnym wskaźnikiem jednostkowym strat wody w Niemczech, który wynosi  $0,2 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{km}$ , tylko wskaźnik w miejscowości A jest mniejszy od dopuszczalnej wartości. W miejscowościach B i C wskaźnik ten ponadtrzykrotnie przewyższa tę wartość, miejscowości te wyróżniają się bowiem stosunkowo wysoką jednostkową stratą wody.

W tabeli 4. zestawiono intensywności uszkodzeń poszczególnych rodzajów sieci wodociągowej dla porównanych wodociągów w latach 2008-2010 wyznaczone na podstawie wzoru [6]:

$$\lambda = k/(L \cdot \Delta t) \text{ [uszk./km-rok]} \quad (4)$$

gdzie:  $k$  – całkowita liczba uszkodzeń na sieci danego rodzaju [-],  
 $L$  – długość danego rodzaju sieci [km],  
 $\Delta t$  – jednostka czasu równa rok.

Tabela 4. Intensywność uszkodzeń dla porównanych wodociągów w latach 2008-2010

Table 4. Failure intensity for compared water supply in 2008-2010

Rok	$\lambda_M$ [uszk./km-rok]	$\lambda_R$ [uszk./km-rok]	$\lambda_{PW}$ [uszk./km-rok]
<b>Miejscowość A</b>			
2008	0	0,3	0,47
2009	0,06	0,52	0,47
2010	0,06	0,66	0,54
<b>Miejscowość B</b>			
2008	1,61	0,49	1,01
2009	1,61	0,56	0,7
2010	1,88	0,35	0,85
<b>Miejscowość C</b>			
2008	0,87	0,14	0,54
2009	0,76	0,18	0,5
2010	0,64	0,21	0,48
<b>Miejscowość D</b>			
2008	0,59	0,24	0,26
2009	0,76	0,24	0,2
2010	0,78	0,23	0,32

Liczba awarii na kilometr magistrali wodociągu B znacznie przewyższa liczbę awarii na kilometr magistrali w wodociągu A pomimo ponadtrzykrotnie dłuższej magistrali w tej miejscowości. W porównaniu z zestawionymi systemami zaopatrzenia w wodę magistrala wodociągu A charakteryzuje się najmniejszą awaryjnością, choć jej długość nie odbiega od długości wodociągów zaopatrujących w wodę znacznie większą liczbę odbiorców. Zupełnie odwrotnie przedstawia się sytuacja awaryjności przewodów rozdzielczych w tym systemie zaopatrzenia w wodę. W przypadku wodociągu B można zaobserwować, że w 2009 roku awaryjność przewodów rozdzielczych była niewiele wyższa niż sieci A. Natomiast w 2010 roku liczba uszkodzeń na kilometr przewodów rozdzielczych w miejscowości A przewyższała prawie dwukrotnie wartość awaryjności dla tejże sieci wodociągu B. Wodociągi C oraz D pomimo dłuższych

przewodów rozdzielczych i zaopatrywania w wodę znacznie większej liczby mieszkańców wykazują mniejszą awaryjność przewodów rozdzielczych niż wodociąg A. W przypadku wodociągu C awaryjność przewodów rozdzielczych jest ponadtrzykrotnie niższa od awaryjności przewodów tego typu w miejscowości A. Awaryjność przyłączy wodociągowych wodociągu C jest mniejsza od awaryjności przyłączy wodociągowych B (szczególnie dużą różnicę odnotowano w 2008 roku). Najmniej awarii na przyłączach wodociągowych można zaobserwować w wodociągu D pomimo największej długości przewodów w porównaniu z pozostałymi wodociągami.

W tabeli 5. przedstawiono wartości wskaźników wyliczonych dla porównywanych wodociągów:

1. Wskaźnik jednostkowy strat rzeczywistych ( $RLB_2$ ) w przypadku liczby przyłączy wodociągowych przypadających na kilometr sieci wodociągowej równej co najmniej 20 oblicza się z zależności:

$$RLB_2 = (V_{STR} \cdot 1000) / (L_{pw} \cdot 365) \text{ [dm}^3/\text{d} \cdot \text{przyłącze wodociągowe]} \quad (5)$$

gdzie:  $V_{STR}$  – roczna objętość wody niesprzedanej [ $\text{m}^3/\text{rok}$ ],

$L_{pw}$  – liczba przyłączy wodociągowych.

2. Infrastrukturalny indeks wycieków ILI (ang. *Infrastructure Leakage Index*) to iloraz rocznej objętości strat do wskaźnika UARL obliczany z zależności:

$$ILI = V_{STR} / \text{UARL} [-] \quad (6)$$

gdzie:  $V_{STR}$  – roczna objętość wody niesprzedanej [ $\text{m}^3/\text{rok}$ ],

UARL – straty nieuniknione [ $\text{m}^3/\text{rok}$ ].

3. Straty nieuniknione UARL (ang. *Unavoidable Annual Real Losses*) to roczna objętość strat, które uważa się za nieuniknione i ekonomicznie opłacalne. Wskaźnik UARL jest wyznaczany z zależności:

$$\text{UARL} = [18 \cdot (M + R) + 25 \cdot PW + 0,8 \cdot L_{pw}] \cdot 0,365 \cdot p \text{ [m}^3/\text{rok]} \quad (7)$$

gdzie:  $M$  – długość sieci magistralnej [km],

$R$  – długość sieci rozdzielczej [km],

$PW$  – długość przyłączy wodociągowych [km],

$L_{pw}$  – liczba przyłączy wodociągowych [-],

$p$  – średnia wysokość ciśnienia w rozpatrywanej strefie pomiarowej [ $\text{mH}_2\text{O}$ ].

4. Wskaźnik objętości wody niedochodowej (NRWB) oblicza się ze wzoru:

$$\text{NRWB} = (V_{wtl} - V_{SP}) / V_{wtl} \cdot 100 [\%] \quad (8)$$

gdzie:  $V_{SP}$  – woda sprzedana [ $\text{m}^3/\text{M} \cdot \text{d}$ ],

$V_{wtl}$  – woda wtłoczona do sieci [ $\text{m}^3/\text{M} \cdot \text{d}$ ].

Tabela 5. Zestawienie wskaźników strat wody dla porównanych wodociągów w latach 2008-2010

Table 5. The list of indicators of water losses in compared waterworks in 2008-2010

<b>Wskaźnik</b> <b>Rok</b>	<b>RLB<sub>2</sub></b> <b>[dm<sup>3</sup>/pod.]</b>	<b>ILI</b> <b>[-]</b>	<b>NRWB</b> <b>[%]</b>
<b>Miejscowość A</b>			
2008	243,39	2,58	27,50
2009	193,97	2,05	25,80
2010	196,74	2,08	25,90
<b>Miejscowość B</b>			
2008	594,02	9,79	39,00
2009	670,53	11,16	43,00
2010	615,92	9,86	42,00
<b>Miejscowość C</b>			
2008	961,00	7,10	37,20
2009	832,00	6,20	38,40
2010	560,00	5,70	38,90
<b>Miejscowość D</b>			
2008	317,00	3,74	26,90
2009	291,00	3,40	24,10
2010	319,00	3,67	27,80

Wartość wskaźnika NRWB dla wodociągu A utrzymuje się średnio na wysokości ok. 26% i jest porównywalna ze średnią wartością tego wskaźnika dla wodociągu D, natomiast niższa jest od wartości dla wodociągu B. Wskaźnik ILI w wodociągu B określa jego stan jako niedopuszczalny według kategorii IWA (>3,5) oraz WBI (>8,0), natomiast wskaźnik ILI dla wodociągu A według IWA określa jego stan jako średni (2; 2,5), a według WBI jako dobry dla krajów rozwiniętych (2,0; 4,0).

Wskaźnik jednostkowych strat rzeczywistych dla wodociągu A jest najniższy, a jego wartość w latach 2008-2010 utrzymuje się średnio na poziomie 200 dm<sup>3</sup>/podłączenie wodociągowe. Dla wodociągu D wartość wskaźnika jednostkowego strat rzeczywistych wynosi średnio ok. 300 dm<sup>3</sup>/podłączenie. Na przedostatnim miejscu jest sklasyfikowany wodociąg B, dla którego RLB kształtuje się średnio na poziomie ponad 600 dm<sup>3</sup>/podłączenie. Zdecydowanie najgorzej w tym zestawieniu wypada wodociąg C, dla którego wartość wskaźnika RLB zbliża się średnio do 800 dm<sup>3</sup>/podłączenie, a w 2010 roku wynosiła aż 961 dm<sup>3</sup>/podłączenie wodociągowe.

### 3. Wnioski

Przedstawiona analiza wskazuje na lepszy stan wodociągu A w porównaniu z pozostałymi wodociągami, dla których wykonywano analizy. Z analizy przy-

rostu długości poszczególnych przewodów wodociągowych wynika, że wodociągi są stale rozbudowywane. Systematyczny wzrost długości przewodów rozdzielczych oraz przyłączy wodociągowych jest wynikiem rozwoju miast oraz wzrostu liczby odbiorców wody. Zarówno poziom strat, sprzedaży, jak i objętości wody zużytej na potrzeby własne w wodociągach utrzymują się na stałym poziomie. Wskaźnik objętości wody niedochodowej dla wodociągu A zawiera się w przedziale 25,80-27,50% i jest porównywalny ze średnią wartością tego wskaźnika dla wodociągu D. Dla pozostałych systemów wskaźnik ten jest wyższy i dla wodociągu B wynosi średnio ok. 40%, a dla wodociągu C 48%.

Infrastrukturalny wskaźnik wycieków dla wodociągu A utrzymywał się na stałym poziomie niewiele powyżej 2, co klasyfikuje stan wodociągu jako średni (na granicy dobrego) według kategorii International Water Association, natomiast według rankingu World Bank Institute Banding System dla krajów rozwiniętych stan wodociągu jest sklasyfikowany jako dobry [4, 10]. Wskaźnik ILI dla wodociągu B, C oraz D określa ich stan jako niedopuszczalny według kategorii IWA. Według WBI stan sieci wodociągowej dla wodociągu B jest określany jako niedopuszczalny, wodociągu C jako słaby, a wodociągu D jako dobry.

W porównaniu z innymi systemami zaopatrzenia w wodę w przypadku wodociągu A odnotowano najmniejszą liczbę awarii na magistrali i najlepszy wskaźnik ILI, co dobrze świadczy o tym systemie zaopatrzenia w wodę.

## Literatura

- [1] Dohnalik P.: Straty wody w miejskich sieciach wodociągowych. Wydawnictwo Polskiej Fundacji Ochrony Zasobów Wodnych, Bydgoszcz 2000.
- [2] Hirner W., Lambert A.: Losses from Water Supply Systems: Standard terminology and recommended performance measures. IWA, London 2000.
- [3] Koral W.: Metodyka obniżania poziomu przecieków w sieciach wodociągowych. Wodociągi – Kanalizacja, nr 6, 28, 2006, s. 26-29.
- [4] Mayer P. et al.: AWWA Leak Detection & Water Accountability Committee Report. Residential End Uses of Water. AWWA Research Foundation, 1999.
- [5] Pietrucha-Urbanik K., Studziński A.: Analiza strat wody wodociągu krośnieńskiego. Gaz, Woda i Technika Sanitarna, nr 10, 2012, s. 452-454.
- [6] Rak J.: Awaryjność sieci wodociągowych w miastach polskich. Wodociągi Polskie, z. 3, 27, 2003, s. 11-14.
- [7] Rak J.R., Tunia A.: Analiza i ocena strat wody w wodociągu Rzeszowa. Instal, Teoria i Praktyka w Instalacjach, nr 5, 2012, s. 42-45.
- [8] Studziński A., Pietrucha-Urbanik K.: Awaryjność sieci wodociągowej Tarnowa. Gaz, Woda i Technika Sanitarna, nr 10, 2012, s. 464-466.
- [9] Studziński A., Pietrucha-Urbanik K.: Water main failure risk assessment. Journal of KONBiN, no 4 (24), 2012, pp. 115-124.
- [10] World Bank Institute Performance. NRW Training Module 6, Performance Indicators, 2005.

## **FAILURE AND WATER LOSS ANALYSIS IN SELECTED WATER SUPPLY SYSTEMS**

### **S u m m a r y**

In the paper issues related to the operation of selected water supply systems, eg. failure analysis of the water supply system were presented. The failure intensity of mains, distributions and water supply connections were determined. The failure values of mains, distributions and water supply connections in the vast majority meet the criteria of European requirements. The scope of work also includes an analysis of water losses in selected water supply systems. Presents The basic indicators of water use were presented and the basic indicators of water losses were established and were referred to the values of the indicators recommended by the International Water Association (IWA). In all compared systems of water supply has been observed length increase of mains, distributions and water connections. Water consumption for own uses of water supply system in the considered period of time is maintained at the same level. Calculation of water loss unit rates allowed to obtain a detailed picture of the operational situation of water network. The ratio of actual losses and unavoidable annual real losses infrastructure leakage index in the two water supply systems id preferred and ranged from 2.05 to 3.74 on which influenced extensive water supply network in relation to population, scattered buildings and unfavorable terrain configuration. Separate volume indicators relating to water losses show a downward trend in the considered period. Network load intensity ratio is similar to the other cities in Poland and ranges from 12.9 to 46.9 m<sup>3</sup>/km·d.

**Keywords:** water network, network failure, the water losses indicators water supply network

*Przesłano do redakcji: 28.07.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 02.12.2014 r.*

DOI:10.7862/rb.2014.137

