

Jakub ŻYWIEC, Barbara TCHÓRZEWSKA-CIEŚLAK
Rzeszów University of Technology (Politechnika Rzeszowska)

WATER LOSS ANALYSIS AS AN ELEMENT OF OPERATION MANAGEMENT OF WATER SUPPLY SYSTEM

Analiza strat wody jako element zarządzania eksploatacją sieci wodociągowej

Abstract: *The aim of the study was an cause and effect analysis of water losses in the collective water supply system of the city located in south-eastern Poland. The exploitation data provided by the water supply company from 2012 - 2016 was used for the analysis. The study uses the recommendations of the IWA (International Water Association) for the water balance making and determination of water loss indicators. The values of water loss indicators were compared to international standards and the technical condition of the network was determined. In addition, failure rate analysis of the water supply network was performed based on the failure rate index λ . Based on the performed analysis, it was found that the water supply company should consider renovation or replacement of the main network pipelines to increase the safety level of water supply, reduce the amount of water losses and the company exploitation costs.*

Keywords: collective water supply system, failure rate, water losses

Streszczenie: *Celem pracy jest analiza przyczynowo-skutkowa strat wody w systemie zbiorowego zaopatrzenia w wodę na przykładzie miasta położonego w południowo-wschodniej Polsce. Analizę wykonano w oparciu o dane eksploatacyjne udostępnione przez przedsiębiorstwo wodociągowe z lat 2012–2016. W pracy wykorzystano zalecenia IWA (International Water Association) dotyczące określania bilansu wody oraz wyznaczania wskaźników strat wody. Otrzymane wartości wskaźników strat wody poddano ocenie wg kryteriów międzynarodowych i określono stan techniczny sieci. Ponadto przeprowadzono analizę awaryjności sieci wodociągowej w oparciu o wskaźnik intensywności uszkodzeń λ . Na podstawie analizy stwierdzono, że przedsiębiorstwo powinno rozważyć renowację lub wymianę przewodów sieci magistralnej w celu poprawy bezpieczeństwa dostaw wody, ograniczenia strat wody oraz kosztów funkcjonowania przedsiębiorstwa.*

Słowa kluczowe: system zbiorowego zaopatrzenia w wodę, awaryjność, straty wody

1. Introduction

The water supply network is a basic element of the water distribution subsystem, intended to provide consumers with water of appropriate quality, under the required pressure, at any time [9]. The collective water supply systems (CWSS) belong to the critical infrastructure and require specific control during their exploitation. Providing safe water for the consumers health is a main task for operators in every CWSS. Analysis of the exploitation of a water-supply network should thus extend to aspects relating to the safety and reliability of operations, as well as their economics. In this regard, the analysis and assessment of water losses is the key matter. Water losses are generally results of [4]:

- uncontrolled, hard-to-detect leakages from pipe connections and fittings, as well as those caused by pipeline failures,
- measurement errors reflecting inaccuracies at water meters, or else measurement inconsistencies,
- the unauthorised consumption (i.e. theft) of water.

Analysis and assessment of water loss over the last years has been the subject of many scientific publications [1, 4, 6, 8]. In order to obtain an acceptable water price, with constantly increasing operating costs, water supply companies were forced to seek sources of potential savings. The management of CWSS may take a number of technical actions to limit the loss of water, with the effect that operating costs fall, and a direct influence on the unit price for water is in this way exerted. The activity alluded to includes:

- monitoring of the water-supply network (e.g. as regards pressure, flow rate),
- installation of modern measuring devices,
- repair and replacement of failing system components (in particular where pipelines are in a poor technical condition).

During making decisions on the repair or replacement of network elements, an important aspect of managing the CWSS is the failure analysis. The research on failures of water supply system in Polish cities has been conducted for several decades. This issue has been widely discussed in many works [1, 2, 7, 8, 10]. Actions to limit loss of water must gain their economic justification, so that the impact on the final unit price for water proves acceptable to the consumer. Only a comprehensive approach to the analysis of failures and water losses can sustain appropriate operational decision making.

The main purpose of the work is the cause and effect analysis of water loss in a CWSS and their assessment according to international requirements and failure analysis of the water supply network, which are important elements of the

exploitation management process of the CWSS, belonging to the critical infrastructure.

2. Research methodology

Making the water balance according to IWA (International Water Association)

The water balance is the basic tool by which the amount of water in a CWSS is controlled. The simplest model encompasses:

- production, i.e. the volume of water pumped into the supply network,
- consumption, i.e. the volumes of water sold or used by a company for its own purposes,
- losses – i.e. the difference between amounts of water produced and consumed.

The water-balance scheme proposed by the IWA [3] in fact allows for a more detailed causal analysis of water losses, proceeding on the assumption that all water in a network can be categorised as either:

- consumed in the authorised way, as determined by measurement and settlement in the system,
- water lost, among which we can distinguish apparent losses (involving unauthorised consumption from the network or reflecting measuring-device inaccuracy) or real losses (from pipelines that fail, reservoirs or water connections).

Water balance should be made according to the fig. 1 [1, 3]. It should follow the steps [3]:

- determination of the volume of water produced V_{wtl} , as pumped into the network – by reference to the reading from the main meter,
- calculation of the volume of water sold V_{sp} , as the sum of the invoiced volumes based on measurement V_{spp} or else lump-sum settlements V_{spr} . The volume of water sold is also so-called volume of profitable water – V_d ,
- determination of a value for the volume of non-profitable water V_{nd} , as the difference between water produced V_{wtl} and profitable water V_d ,
- the volume of unsold water, used for company's own purposes V_{cw} , is defined as the sum of the water used for its own purposes volume, based on measurement – V_{cwz} and the water used for its own purposes volume unmeasured – V_{cwnz} ,

- calculation of the volume of water consumed in authorized way V_{ka} , as the sum of the volumes of water sold and water used for own purposes $V_{sp} + V_{cw}$,
- definition of the volume of water losses V_{str} , as the difference between what is produced and pumped into the network V_{wftl} and what is consumed in an authorised way V_{ka} ,
- assumption that water losses reflecting unauthorised consumption, e.g. theft V_{strkr} constitute around 10% of total losses V_{str} [1, 4, 6],
- assumption that water losses reflecting the inaccuracy of measuring devices V_{strbo} constitute around 3% of total losses V_{str} [1, 4, 6],
- calculation of the volume of apparent losses V_{pstr} , as a sum of the V_{strkr} and V_{strbo} ,
- determination of volume losses from mains and the distribution network V_{strmr} , from reservoirs V_{strzb} and from water connections V_{strpw} ,
- calculation of the volume of real losses V_{rstr} , as a sum of the V_{strmr} , V_{strzb} and V_{strpw} .

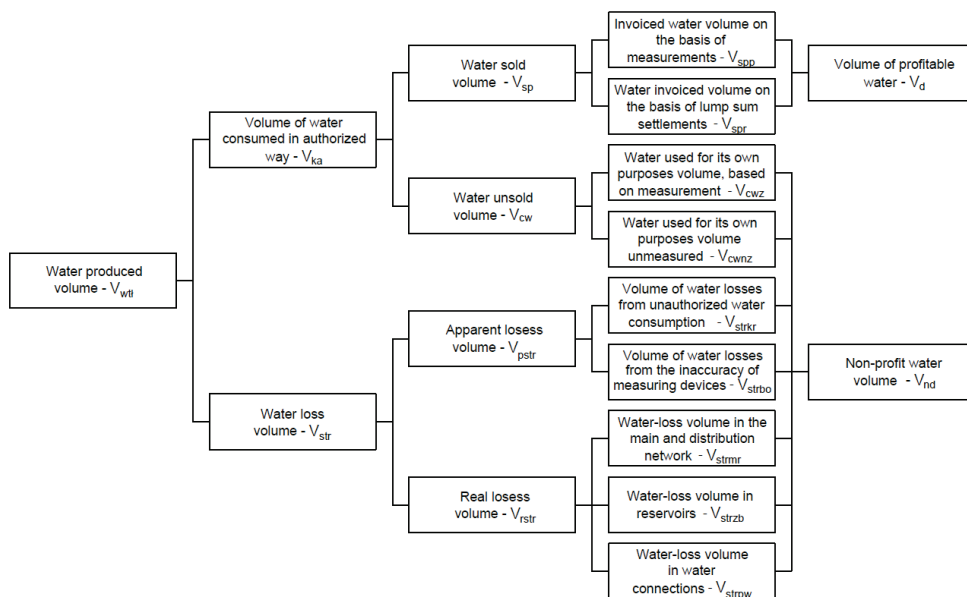


Fig. 1. Scheme of making the water balance according to IWA [1, 3]

Characteristics of water loss indicators according to the IWA

The above IWA methodology of making the water balance and the methodology of water losses calculation allows for objective and reliable assessment, using the following water loss indicators [3, 4, 6, 8]:

- the percentage index of water loss WS:

$$WS = \frac{V_{str}}{V_{wtl}} \cdot 100[\%] \quad (1)$$

- the real loss basic index RLB:

$$RLB_1 = \frac{V_{str}}{L_{M+R} \cdot 365} \left[\frac{m^3}{km \cdot d} \right] \quad (2)$$

$$RLB_2 = \frac{V_{str} \cdot 1000}{n_{PW} \cdot 365} \left[\frac{dm^3}{water\ connection \cdot d} \right] \quad (3)$$

where:

- n_{PW} – the number of water connections,
- L_{M+R} – the total length of main and distribution network [km].

The RLB_1 index is used when the number of water connections per km of the network (main and distribution) is under 20, while the RLB_2 index should be used where there are more than 20 connections per km.

- the non-revenue water basic index NRW:

$$NRWB = \frac{V_{wtl} - V_{sp}}{V_{wtl}} \cdot 100[\%] \quad (4)$$

- the unavoidable annual real losses index UARL:

$$UARL = [18 \cdot L_{M+R} + 25 \cdot L_{PW} + 0,8 \cdot n_{PW}] \cdot 0,365 \cdot p \left[\frac{m^3}{rok} \right] \quad (5)$$

where:

- 0,365 – the conversion factor on year and m^3 ,
- p – the average value of pressure in the analysed system [m H₂O].

Equation (5) makes use of values of unavoidable leakages:

- for the main and distribution network – $18 \left[\frac{dm^3}{km \cdot d \cdot 1\ mH_2O} \right]$,
- for water connections – $25 \left[\frac{dm^3}{km \cdot d \cdot 1\ mH_2O} \right]$,

- for 1 water connection – $0,8 \left[\frac{dm^3}{1 \text{ water connection} \cdot d \cdot 1 \text{ mH}_2\text{O}} \right]$.
- the infrastructure leakage Index ILI:

$$ILI = \frac{V_{str}}{U_{ARL}} [-] \quad (6)$$

This index shows how many times the real losses exceed the unavoidable losses.

Assessment of the water supply network failure rate

The failure rate index was used for analysis of the water supply networks failure rate [2, 7, 10] and is given by formula (7):

$$\lambda_i = \frac{k_i(\Delta t)}{L_i \Delta t} [failure/(km \cdot a)] \quad (7)$$

where:

λ_i – the failure rate index of the given type of network,

k_i – the number of failures of the given type of network over the time interval Δt ,

L_i – the length of a given type of network, [km],

Δt – the considered period of time, [years].

Values for this index are determined in relation to the total length of the network, and in relation to its type, as mains, distribution or water connections. The results are then compared with required values presented in the literature [2, 10]:

- $\lambda_{PW} = 0,30 \text{ fail.}/(\text{km} \cdot \text{year})$ for the main network,
- $\lambda_R = 0,50 \text{ fail.}/(\text{km} \cdot \text{year})$ for the distribution network,
- $\lambda_M = 1,00 \text{ fail.}/(\text{km} \cdot \text{year})$ for water connections.

3. Results

The analysis was performed for the CWSS of the city located in south-east Poland, whose population is of 200,000 inhabitants and whose area is 120.4 km². The average demand for water is of 36,000 m³/d. The research was based on data obtained from the water supply company for the period 2012-2016, including: volume of water production, volume of water sales and volume of water used for the company's own purposes, unit water prices and the information from the failure book. A water balance in line with IWA recommendations was drawn up in the manner detailed above prepared for each year of the aforementioned period. Table 1 presents the full water balance for 2016 as an example. Due to the lack of data

(BD) in regard to water losses from mains and the distribution network (V_{strmr}), water losses from reservoirs (V_{strzb}), and from supply connections (V_{strpw}) were determined together as real losses (V_{rstr}).

Table 1

The 2016 water balance calculated in line with IWA methodology

V_{wtl} [m ³]	V_{ka} [m ³]	V_{sp} [m ³]	V_{spp} [m ³]	V_d [m ³]	
13 160 958	12 013 574	10 115 934	10 115 934	10 115 934	
			V_{spr} [m ³]		
			0		
		V_{cw} [m ³]	V_{cwz} [m ³]	V_{nd} [m ³]	
		1 897 640	1 897 640	1 897 640	3 045 024
			V_{cwnz} [m ³]	0	
	0				
	V_{str} [m ³]	V_{pstr} [m ³]	V_{strkr} [m ³]		
	1 147 384	149 160	114 738	3 045 024	
			V_{strbo} [m ³]		
			34 422		
			V_{rstr} [m ³]		
		998 224	BD	3 045 024	
			V_{strzb} [m ³]		
BD					
V_{strpw} [m ³]					
BD					

Table 2 presents the shortened water balance for each year, and table 3 presents the calculation of water loss indicators in line with the IWA methodology.

Table 2

Number of inhabitants using the water supply network and characteristic water volumes

Year	LM	V_{wtl} [m ³]	V_{sp} [m ³]	V_{cw} [m ³]	V_{str} [m ³]
2012	167 155	13 123 532	9 719 587	1 589 406	1 814 539
2013	171 827	12 995 329	9 750 269	1 639 039	1 606 021
2014	180 839	13 079 211	9 861 071	1 734 834	1 483 306
2015	181 709	13 819 560	10 084 749	1 867 238	1 867 573
2016	183 310	13 160 958	10 115 934	1 897 640	1 147 384

Table 3

Water loss indicators according to IWA

Year	n_{pw}	L_{M+R} [km]	L_{PW} [km]	WS [%]	NRWB [%]	RLB_2 [dm ³ /pw · d]	UARL [m ³ /year]	ILI
2012	21 306	570.3	323.8	13.8	25.9	233.3	607 376	2.99
2013	21 845	574.6	324.0	12.4	25.0	201.4	616 187	2.61
2014	22 329	578.8	324.0	11.3	24.6	182.0	624 126	2.38
2015	22 936	590.2	324.3	13.5	27.0	223.1	636 106	2.94
2016	23 456	641.4	365.2	8.7	23.1	134.0	676 593	1.70

The values assumed by the ILI index in the analysed period were in the 1.70-2.99 range, albeit with the trend being downward. In line with the criteria for the assessment of network technical conditions based on the ILI index presented in Table 4, the condition in 2012 as the first analysed year is assessed as poor ($2.5 < ILI \leq 3.0$) under the most stringent IWA requirements [3], while the description for 2016 as the last year analysed equates to good ($1.5 < ILI \leq 2.0$). However, under AWWA (American Water Works Association) requirements [5], the technical condition in the entire examined period was very good ($ILI \leq 3.0$), while in accordance with WBI (World Bank Institute) requirements [11] for developed countries, the technical condition of the network improved from good ($2.0 < ILI \leq 4.0$) to very good ($ILI \leq 2.0$). All of the other calculated water-loss indicators manifested a downward trend over the analysed period, with only the UARL index increasing. The value of UARL depends mainly on the length of the network and the number of water connections, expansion and development of the network will result in an increase in value for this index.

Table 4

Categories of network technical condition in line with the ILI index [3, 5, 11]

Technical condition category:					
according to the AWWA and WBI	ILI range given by the AWWA:	ILI range given by the WBI:		according to IWA	ILI range given by the IWA:
		developing countries	developed countries		
very good	≤ 3.0	≤ 4.0	≤ 2.0	very good	≤ 1.5
				good	$(1.5;2.0>$
good	$(3.0;5.0>$	$(4.0;8.0>$	$(2.0;4.0>$	average	$(2.0;2.5>$
poor	$(5.0;8.0>$	$(8.0;16.0>$	$(4.0;8.0>$	poor	$(2.5;3.0>$
				very poor	$(3.0;3.5>$
inadmissible	> 8.0	> 16.0	> 8.0	inadmissible	> 3.5

The percentage index of water loss WS compares the water losses with the total volume of water produced. For the analysed period the average value of WS is 11.94%. Wasted water does not bring profit and generates additional exploitation costs whose size may affect the profitability of the company. However, reductions in water losses must be justified economically so that the costs of the rehabilitation or replacement of failing pipelines still leave the change in the unit water price acceptable from the point of view of the consumer. Table 5 presents the costs of water losses in the analysed CWSS per km of network length, per water connection and per inhabitant using the water supply system.

Table 5

Costs of water losses

Year	Water losses [m ³ /year] per:			Unit water price (netto) [zł/m ³]	Costs of water losses [zł/year] per:		
	1 km	1 pw	1 M		1 km	1 pw	1 M
2012	2 029.46	85.17	10.86	3.58	7 265.46	304.89	38.86
2013	1 787.25	73.52	9.35	3.86	6 898.78	283.78	36.08
2014	1 643.01	66.43	8.20	3.94	6 473.44	261.73	32.32
2015	2 042.18	81.43	10.28	3.96	8 087.03	322.44	40.70
2016	1 139.86	48.92	6.26	3.96	4 513.85	193.71	24.79

Total financial losses of the company related to the volume of non-profit water V_{nd} include the real and apparent water losses, and also the volume of water used by the company for its own purposes (e.g. the rinsing of network pipelines). Table 6 presents the annual financial costs based on the volume of non-profit water in the examined period.

Table 6

Annual costs of non-profit water V_{nd}

Year	Volume of non-profit water V_{nd} [m ³]	Unit water price (netto) [zł/m ³]	Annual costs of non-profit water [zł]
2012	3 403 945	3.58	12 186 123.10
2013	3 245 060	3.86	12 525 931.60
2014	3 218 140	3.94	12 679 471.60
2015	3 734 811	3.96	14 789 851.56
2016	3 045 024	3.96	12 058 295.04

The data presented in tables 2 and 3 support the idea of a decrease in losses of water over the examined period. The fact that water-loss indicators reflect a downward trend attests to the improved technical condition of the network, as related to a reduced number of failures and uncontrolled leakages. Table 7 presents the calculation of the failure rate index of the analysed network over the 2012–2016 period.

Table 7

Calculations of failure rate index

Year	2012	2013	2014	2015	2016	
Number of main network failures k_M	55	36	41	60	43	Avg:
Number of distribution network failures k_R	109	113	84	119	100	
Number of water connections failures k_{PW}	119	109	99	163	96	
Total number of network failures $\sum k$	283	258	224	342	239	
Length of main network L_M [km]	49,8	49,8	49,8	49,8	54,9	
Length of distribution network L_R [km]	520,5	524,8	529	540,4	586,5	
Length of water connections L_{PW} [km]	323,8	324,0	324,0	324,3	365,2	
Total length of network $\sum L$ [km]	894,1	898,6	902,8	914,5	1006,6	
Failure rate index of main network $\lambda_M \left[\frac{fail.}{km \cdot rok} \right]$	1,10	0,72	0,82	1,20	0,78	0,93
Failure rate index of distribution network $\lambda_R \left[\frac{fail.}{km \cdot rok} \right]$	0,21	0,22	0,16	0,22	0,17	0,19
Failure rate index of water connections network $\lambda_{PW} \left[\frac{fail.}{km \cdot rok} \right]$	0,37	0,34	0,31	0,50	0,26	0,35
Total failure rate index $\lambda_C \left[\frac{fail.}{km \cdot rok} \right]$	0,32	0,29	0,25	0,37	0,24	0,29

Over the analysed period, there were decreases in failure rate indexes for each type of water-supply network and for the network as a whole. Ongoing repair and replacement of failing pipelines in the years 2012-2016 thus had its impact in improving the technical condition of the network. The average value obtained for the failure rate index in respect of water connections was $\lambda_{PW} = 0.35$ fail./(km·year) – as set against a required value of 1.00 fail./(km·year) given in the literature [2, 10]. In the case of the distribution network, the average value obtained for the failure rate index was $\lambda_R = 0.19$ fail./(km·year), with the required value

being 0.50 fail./(km·year). Finally, for the main network, the average value for the failure rate index was $\lambda_M = 0.93$ fail./(km·year), as set against the required value of 0.30 fail./(km·year).

4. Conclusion

Volume of water-losses in the analysed period are characterised by a downward trend, and the assessment of the studied network's technical condition by reference to the ILI index confirmed an improvement in the condition of the network over the examined period from "poor" (ILI2012 = 2.99) to "good" (ILI2016 = 1.70), in line with the most stringent requirements set of the IWA. Reducing the size of losses and improvement in the network technical condition helped reduce the company's running costs.

However, to increase the safety level of water supply and further reduce losses of water, the company should consider renovating or replacing the main network pipelines for which the highest value for the failure rate index was obtained $\lambda_M = 0.93$ fail./(km·year) – as set against the required value for this type of network of just 0.30 fail./(km·year)).

5. References

1. Kowalski D., Kowalska B., Kwietniewski M., Sygacz-Adamska J.: Analiza bilansu wody oraz awaryjności wybranego systemu dystrybucji wody. Zaopatrzenie w Wodę, jakość i Ochrona Wód, tom II, 2012.
2. Kwietniewski M., Rak J.: Niezawodność infrastruktury wodociągowej i kanalizacyjnej w Polsce. Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, Warszawa 2010.
3. Lambert A., Hirner W.: Losses from Water Supply Systems: Standard Terminology and Recommended Performance Measures. International Water Association Blue Pages, 2000.
4. Merc K., Kedzia W., Ociepa E.: Analiza strat wody na podstawie wskaźników zalecanych przez International Water Association. Proceedings of ECOpole, vol. 11, 2017.
5. Meyer P. et al.: AWWA Leak Detection & Water Accountability Comitee Report. Residential End Uses of Water. AWWA Research Foundation, 1999.
6. Ociepa E., Mrowiec M., Deska I.: Straty wody w systemach dystrybucji – przyczyny, określanie, działanie na rzecz ograniczania. Proceedings of ECOpole, vol. 10, 2016.
7. Pietrucha-Urbanik K.: Failure analysis and assessment on the exemplary water supply network. Engineering failure analysis, vol. 57, 2015.

8. Rak J.R. et al.: Metody oceny niezawodności i bezpieczeństwa dostaw wody do odbiorców. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2013.
9. Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 7 grudnia 2017 r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi (Dz.U. 2017 poz. 2294).
10. Szpak D., Tchórzewska-Cieślak B.: Assessment of the failure rate of water supply system in terms of safety of critical infrastructure. *Chemicz*, vol. 6, 2014.
11. World Bank Institute Performance. NRW Training Module 6, Performance Indicators, 2005.

ANALIZA STRAT WODY JAKO ELEMENT ZARZĄDZANIA EKSPLOATACJĄ SIECI WODOCIĄGOWEJ

1. Wprowadzenie

Sieć wodociągowa stanowi podstawowy element podsystemu dystrybucji wody, a jej zadaniem jest dostarczenie do konsumentów wody o odpowiedniej jakości, pod wymaganym ciśnieniem, w dowolnej chwili czasu [9]. Systemy zbiorowego zaopatrzenia w wodę (SZZW) należące do infrastruktury krytycznej miast wymagają specyficznej kontroli w trakcie ich eksploatacji. Dostarczenie wody bezpiecznej dla zdrowia konsumentów jest kluczowym zadaniem operatorów SZZW. Analiza eksploatacji sieci wodociągowej powinna obejmować aspekty bezpieczeństwa i niezawodności jej funkcjonowania, jak również aspekt ekonomiczny. Pod tym względem kluczowa jest analiza i ocena strat wody, których przyczyną są najczęściej [4]:

- niekontrolowane, trudne do wykrycia wycieki z nieszczelności połączeń przewodów, armatury oraz wycieki towarzyszące awariom sieci wodociągowej,
- błędy pomiarowe wynikające z niedokładności wodomierzy czy niejednoczesności pomiarów,
- nieautoryzowana konsumpcja wody (kradzież).

Analiza i ocena strat wody na przestrzeni ostatnich lat była tematem wielu publikacji naukowych [1, 4, 6, 8]. By uzyskać akceptowalną cenę wody, przy stale rosnących kosztach eksploatacji, przedsiębiorstwa wodociągowe zmuszone zostały do poszukiwania źródeł potencjalnych oszczędności. Zarządzający SZZW może podjąć szereg działań technicznych ograniczających wielkość strat wody, co skutkuje zmniejszeniem się kosztów funkcjonowania przedsiębiorstwa, a to przekłada się bezpośrednio na cenę jednostkową wody. Wśród tych działań możemy wyróżnić:

- monitoring sieci wodociągowej (np. ciśnienia, natężenia przepływu, szczelności przewodów sieci),

- montaż nowoczesnych urządzeń pomiarowych (np. wodomierze z odczytem radiowym),
- remonty, naprawy i wymiany awaryjnych elementów systemu (w szczególności przewodów w złym stanie technicznym).

Podczas podejmowania decyzji dotyczących naprawy czy wymiany poszczególnych elementów sieci ważnym aspektem zarządzania SZZW jest analiza awaryjności. Badania awaryjności sieci wodociągowych w polskich miastach prowadzone są od kilkadziesiąt lat. Temat ten został szeroko omówiony w wielu pracach [1, 2, 7, 8, 10].

Działania mające na celu ograniczenie strat wody muszą być ekonomicznie uzasadnione, tak by ich wpływ na końcową cenę jednostkową wody był akceptowalny dla konsumenta. Jedynie kompleksowe podejście do analizy awaryjności oraz analizy strat wody pozwala podjąć odpowiednie decyzje eksploatacyjne.

Głównym celem pracy jest analiza przyczynowo-skutkowa strat wody w SZZW i ich ocena według wymagań międzynarodowych oraz analiza awaryjności sieci wodociągowej, stanowiące ważne elementy procesu zarządzania eksploatacją SZZW, przynależnych do infrastruktury krytycznej.

2. Metodyka badań

Sporządzanie bilansu wody wg IWA (International Water Association)

Podstawowym narzędziem kontroli ilości wody w SZZW jest tzw. bilans wody. Najprostszy model takiego bilansu składa się z następujących wielkości:

- produkcja wody – objętość wody, która została wtłoczona do sieci wodociągowej,
- zużycie wody – objętość wody sprzedanej odbiorcom oraz objętość wody zużyta na potrzeby własne przedsiębiorstwa,
- straty wody – objętość wody wynikająca z różnicy pomiędzy produkcją wody a jej zużyciem.

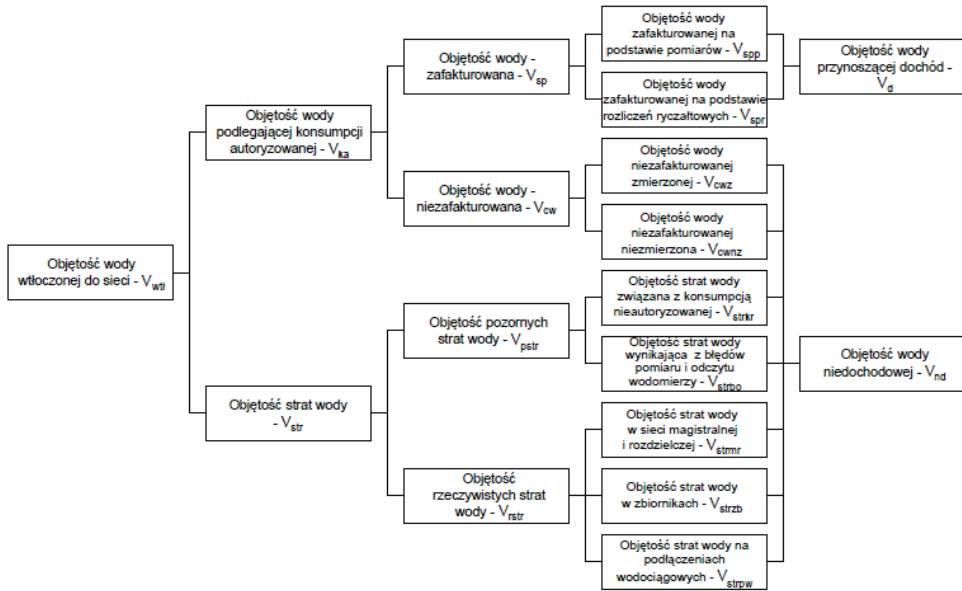
Szczegółowy schemat wykonywania bilansu wody zaproponowany przez IWA [3] pozwala na dokładniejszą analizę przyczynową strat wody. Schemat ten zakłada, że całkowita ilość wody w sieci dzieli się na dwie kategorie:

- wodę skonsumowaną przez odbiorców, pobieraną w sposób autoryzowany, określaną poprzez pomiar oraz obowiązujący w danym systemie sposób jej rozliczania,

- wodę straconą, w tym straty pozorne (wynikające z nielegalnego poboru wody z sieci oraz błędów związanych z niedokładnością urządzeń pomiarowych) i straty rzeczywiste, do których zalicza się straty wody związane z niekontrolowanymi wyciekami i awariami, straty wody w zbiornikach i podłączeniach wodociągowych.

Bilans wody należy wykonywać zgodnie z schematem przedstawionym na rys. 1 [1, 3]. Powinien on obejmować następujące kroki [3]:

- określenie objętości wody wtłoczonej do sieci $V_{wtł}$ – na podstawie odczytu z wodomierza głównego,
- obliczenie ilości wody sprzedanej V_{sp} jako sumy objętości wody zafakturowanej na podstawie pomiarów (V_{spp}) oraz objętości wody zafakturowanej na podstawie rozliczeń ryczałtowych (V_{spr}). Objętość wody sprzedanej, równa jest objętości wody przynoszącej dochód – V_d ,
- wyznaczenie objętości wody niedochodowej V_{nd} jako różnicy pomiędzy objętością wody wtłoczonej do sieci ($V_{wtł}$) a objętością wody przynoszącą dochód (V_d),
- objętość wody niesprzedanej, zużytej na cele własne V_{cw} , określa się jako sumę objętości wody zużytej przez przedsiębiorstwo zmierzonej – V_{cwz} oraz objętości wody zużytej przez przedsiębiorstwo niezmierzonej – V_{cwnz} ,
- obliczenie objętości wody podlegającej konsumpcji autoryzowanej V_{ka} jako sumy objętości wody sprzedanej V_{sp} oraz objętości wody zużytej na cele własne V_{cw} ,
- objętość strat wody V_{str} określa się jako różnicę pomiędzy objętością wody wtłoczonej do sieci $V_{wtł}$ a objętością wody podlegającej autoryzowanej konsumpcji V_{ka} ,
- objętość strat wody związanych z nieautoryzowaną konsumpcją (np. kradzieże) V_{strkr} przyjmuje się w wysokości ok. 10% całkowitych strat wody V_{str} [1, 4, 6],
- objętość strat wody wynikająca z błędów pomiaru i odczytu wodomierzy V_{strbo} przyjmuje się w wysokości ok. 3% całkowitych strat wody V_{str} [1, 4, 6],
- wyznaczenie objętości pozornych strat wody V_{pstr} jako sumy V_{strkr} oraz V_{strbo} ,
- określenie objętości strat wody w sieci magistralnej i rozdzielczej V_{strmr} , objętości strat wody w zbiornikach V_{strzb} oraz objętości strat wody na podłączeniach wodociągowych V_{strpw} ,
- obliczenie objętości rzeczywistych strat wody V_{rstr} jako sumy V_{strmr} , V_{strzb} i V_{strpw} .



Rys. 1. Schemat opracowywania bilansu wody wg IWA [1, 3]

Charakterystyka wskaźników strat wody wg IWA

Opracowana przez IWA metodyka sporządzania bilansu przedstawiona wcześniej oraz obliczania strat wody pozwala na obiektywną i miarodajną ich ocenę, przy zastosowaniu następujących wskaźników strat [1–3, 6]:

- procentowy wskaźnik start wody WS:

$$WS = \frac{V_{str}}{V_{wtł}} \cdot 100[\%] \quad (1)$$

- jednostkowy wskaźnik strat rzeczywistych RLB:

$$RLB_1 = \frac{V_{str}}{L_{M+R} \cdot 365} \left[\frac{m^3}{km \cdot d} \right] \quad (2)$$

$$RLB_2 = \frac{V_{str} \cdot 1000}{n_{PW} \cdot 365} \left[\frac{dm^3}{\text{podłączenie wodociągowe} \cdot d} \right] \quad (3)$$

gdzie:

n_{PW} – liczba podłączeń wodociągowych,

L_{M+R} – sumaryczna długość sieci magistralnej i rozdzielczej [km].

Wskaźnik RLB_1 stosuje się, gdy liczba połączeń wodociagowych w przeliczeniu na kilometr sieci (magistralnej i rozdzielczej) jest mniejsza od 20. W przypadku gdy liczba połączeń wodociagowych, w przeliczeniu na kilometr sieci, wynosi co najmniej 20, należy stosować wskaźnik RLB_2 .

- wskaźnik objętości wody niedochodowej NRWB:

$$NRWB = \frac{V_{wtł} - V_{sp}}{V_{wtł}} \cdot 100[\%] \quad (4)$$

- wskaźnik start nieuniknionych UARL:

$$UARL = [18 \cdot L_{M+R} + 25 \cdot L_{PW} + 0,8 \cdot n_{PW}] \cdot 0,365 \cdot p \left[\frac{m^3}{rok} \right] \quad (5)$$

gdzie:

0,365 – współczynnik przeliczeniowy na rok i m^3 ,

p – średnia wysokość ciśnienia w analizowanym systemie [m H_2O].

Zależność (5) uwzględnia przecieki nieuniknione w wysokości:

- dla przewodów magistralnych oraz rozdzielczych – $18 \left[\frac{dm^3}{km \cdot d \cdot 1 mH_2O} \right]$,
- dla przewodów połączeń wodociagowych – $25 \left[\frac{dm^3}{km \cdot d \cdot 1 mH_2O} \right]$,
- dla 1 połączenia wodociagowego – $0,8 \left[\frac{dm^3}{1 \text{ połączenie} \cdot d \cdot 1 mH_2O} \right]$.
- infrastrukturalny indeks wycieków ILI:

$$ILI = \frac{V_{str}}{UARL} [-] \quad (6)$$

Wskaźnik ten pokazuje, ile razy straty rzeczywiste przewyższają starty nieuniknione.

Ocena awaryjności sieci wodociągowej

Do analizy awaryjności wykorzystano wskaźnik intensywności uszkodzeń [2, 7, 10]:

$$\lambda_i = \frac{k_i(\Delta t)}{L_i \Delta t} [usk./ (km \cdot a)] \quad (7)$$

gdzie:

λ_i – intensywność uszkodzeń danego rodzaju sieci,

k_i – liczba awarii danego rodzaju sieci, w analizowanym przedziale Δt ,

L_i – długość danego rodzaju sieci wodociągowej [km],

Δt – analizowany przedział czasu [lata].

Wartości tego wskaźnika określono w odniesieniu do całkowitej długości sieci oraz w zależności od jej rodzaju – magistralnej, rozdzielczej i dla połączeń

wodociągowych. Wyniki następnie porównano z wartościami wymaganymi wg literatury [2, 10], które wynoszą:

- $\lambda_{PW} = 0,30$ uszk./km·rok dla sieci magistralnej,
- $\lambda_R = 0,50$ uszk./km·rok dla sieci rozdzielczej,
- $\lambda_M = 1,00$ uszk./km·rok dla połączeń wodociągowych.

3. Wyniki badań

Analizą objęto SZZW miasta położonego w południowo-wschodniej Polsce, o liczbie mieszkańców ok. 200 tys., zajmującego powierzchnię 120,4 km², dla którego dobowe zapotrzebowanie na wodę wynosi ok. 36 tys. m³/d. Badania przeprowadzono w oparciu o dane uzyskane od przedsiębiorstwa wodociągowego za okres 2012–2016, obejmujące wielkość produkcji, sprzedaży i zużycia wody na cele własne, ceny jednostkowe wody oraz dziennik awarii. W pierwszym kroku wykonano dla każdego roku bilans wody wg zaleceń IWA. W tabeli 1 przedstawiono przykładowy bilans wody za rok 2016. Ze względu na brak danych (BD) dotyczących wielkości strat wody w sieci magistralnej i rozdzielczej V_{strmr} , strat wody w zbiornikach V_{strzb} oraz strat wody w połączeniach wodociągowych V_{strpw} określono je łącznie jako wielkość strat rzeczywistych V_{rstr} .

Tabela 1

Bilans wody wg IWA dla roku 2016

V_{wtl} [m ³]	V_{ka} [m ³]	V_{sp} [m ³]	V_{spp} [m ³]	V_d [m ³]	
13 160 958	12 013 574	10 115 934	10 115 934	10 115 934	
			V_{spr} [m ³]		
			0		
		V_{cw} [m ³]	V_{cwz} [m ³]	V_{nd} [m ³]	
		1 897 640	1 897 640		
			V_{cwnz} [m ³]		0
	V_{str} [m ³]	V_{pstr} [m ³]	V_{strkr} [m ³]	3 045 024	
	1 147 384	149 160	114 738		
			V_{strbo} [m ³]		34 422
			V_{rstr} [m ³]		V_{strmr} [m ³]
		998 224	BD		
			V_{strzb} [m ³]		BD
V_{strpw} [m ³]	BD				
		BD			

W tabeli 2 zestawiono skrócony bilans wody dla każdego roku, a w tabeli 3 przedstawiono obliczenia wskaźników strat wody wg IWA.

Tabela 2

Zestawienie liczby mieszkańców korzystających z sieci wodociągowej oraz charakterystycznych objętości wody

Rok	LM	V _{wtt} [m ³]	V _{sp} [m ³]	V _{cw} [m ³]	V _{str} [m ³]
2012	167 155	13 123 532	9 719 587	1 589 406	1 814 539
2013	171 827	12 995 329	9 750 269	1 639 039	1 606 021
2014	180 839	13 079 211	9 861 071	1 734 834	1 483 306
2015	181 709	13 819 560	10 084 749	1 867 238	1 867 573
2016	183 310	13 160 958	10 115 934	1 897 640	1 147 384

Tabela 3

Wskaźniki strat wody w sieci wodociągowej wg IWA

Rok	n _{pw}	L _{M+R} [km]	L _{pw} [km]	WS [%]	NRWB [%]	RLB ₂ [dm ³ /pw · d]	UARL [m ³ /rok]	ILI
2012	21 306	570,3	323,8	13,8	25,9	233,3	607 376	2,99
2013	21 845	574,6	324,0	12,4	25,0	201,4	616 187	2,61
2014	22 329	578,8	324,0	11,3	24,6	182,0	624 126	2,38
2015	22 936	590,2	324,3	13,5	27,0	223,1	636 106	2,94
2016	23 456	641,4	365,2	8,7	23,1	134,0	676 593	1,70

Wskaźnik ILI w badanym okresie zmienia swoją wartość w zakresie do 1,70 do 2,99, wykazując tendencję spadkową. Wg kryteriów oceny stanu technicznego sieci na podstawie tego wskaźnika przedstawionych w tabeli 4, stan techniczny sieci w pierwszym analizowanym roku 2012 ocenia się jako słaby ($2,5 < ILI \leq 3,0$) wg najbardziej rygorystycznych wymagań IWA [3], a w ostatnim analizowanym roku 2016 jako dobry ($1,5 < ILI \leq 2,0$). Wg wymagań AWWA (American Water Works Association) [5] stan techniczny w całym badanym okresie był bardzo dobry ($ILI \leq 3,0$), a wg wymagań WBI (World Bank Institute) [11] dla krajów rozwiniętych stan techniczny sieci uległ zmianie z dobrego ($2,0 < ILI \leq 4,0$) na bardzo dobry ($ILI \leq 2,0$). Wszystkie pozostałe obliczone wskaźniki strat wody maleją w analizowanym okresie, jedynie wskaźnik strat nieuniknionych UARL rośnie. Wielkość tego wskaźnika zależna jest przede wszystkim od długości sieci oraz liczby połączeń wodociągowych, dlatego wraz z rozbudową i rozwojem sieci wskaźnik ten będzie wzrastał.

Tabela 4

Kategorie oceny stanu technicznego sieci wg wskaźnika ILI [3, 5, 11]

Kategoria stanu technicznego:					
wg AWWA oraz WBI	Zakres ILI wg AWWA:	Zakres ILI wg WBI:		wg IWA	Zakres ILI wg IWA:
		kraje rozwijające się	kraje rozwinęte		
bardzo dobry	≤ 3,0	≤ 4,0	≤ 2,0	bardzo dobry	≤ 1,5
				dobry	(1,5;2,0>
dobry	(3,0;5,0>	(4,0;8,0>	(2,0;4,0>	średni	(2,0;2,5>
slaby	(5,0;8,0>	(8,0;16,0>	(4,0;8,0>	slaby	(2,5;3,0>
				bardzo slaby	(3,0;3,5>
niedopuszczalny	> 8,0	> 16,0	> 8,0	niedopuszczalny	> 3,5

Procentowy wskaźnik strat wody WS porównuje objętość strat wody, do całkowitej objętości wody wtłoczonej do sieci. W badanym okresie wynosił on średnio 11,94 %. Woda tracona nie przynosi zysku dla przedsiębiorstwa i generuje dodatkowe koszty eksploatacyjne, których wielkość może wpłynąć na rentowność przedsiębiorstwa. Zmniejszanie wielkości strat wody musi być jednak uzasadnione ekonomicznie, tak by koszty związane z rehabilitacją czy wymianą awaryjnych odcinków sieci wpłynęły na ceny jednostkowe wody w sposób akceptowalny przez odbiorców wody. W tabeli 5 zestawiono koszty występowania strat wody w analizowanym SZZW w przeliczeniu na 1 km długości sieci, na 1 podłączenie wodociągowe oraz na 1 mieszkańca korzystającego z wodociągu.

Tabela 5

Zestawienie jednostkowych kosztów występowania strat wody w sieci

Rok	Straty wody [m ³ /rok] w przeliczeniu na:			Cena jed. wody netto [zł/m ³]	Koszty strat [zł/rok] w przeliczeniu na:		
	1 km	1 pw	1 M		1 km	1 pw	1 M
2012	2 029,46	85,17	10,86	3,58	7 265,46	304,89	38,86
2013	1 787,25	73,52	9,35	3,86	6 898,78	283,78	36,08
2014	1 643,01	66,43	8,20	3,94	6 473,44	261,73	32,32
2015	2 042,18	81,43	10,28	3,96	8 087,03	322,44	40,70
2016	1 139,86	48,92	6,26	3,96	4 513,85	193,71	24,79

Całkowite straty finansowe przedsiębiorstwa wynikające z objętości wody nieprzynoszącej dochodu V_{nd} , oprócz strat rzeczywistych i pozornych wody uwzględniają również wodę zużytą przez przedsiębiorstwo wodociągowe na cele własne (np. płukanie sieci). W tabeli 6 przedstawiono roczne koszty finansowe przedsiębiorstwa na podstawie objętości wody niedochodowej w badanym okresie.

Tabela 6

Zestawienie rocznych kosztów wody niedochodowej V_{nd}

Rok	Objętość wody niedochodowej V_{nd} [m ³]	Cena jedn. wody netto [zł/m ³]	Roczne koszty wody niedochodowej [zł]
2012	3 403 945	3,58	12 186 123,10
2013	3 245 060	3,86	12 525 931,60
2014	3 218 140	3,94	12 679 471,60
2015	3 734 811	3,96	14 789 851,56
2016	3 045 024	3,96	12 058 295,04

Na podstawie danych przedstawionych w tabelach 2 oraz 3 należy stwierdzić, że wielkość strat wody w badanym okresie maleje. Wskaźniki strat wody również mają tendencję spadkową. Świadczy to o poprawie stanu technicznego sieci, co bezpośrednio przekłada się na zmniejszenie liczby awarii i niekontrolowanych wycieków. W tabeli 7 zestawiono obliczenia wskaźnika intensywności uszkodzeń analizowanej sieci w okresie 2012–2016 z rozróżnieniem jej rodzaju.

Tabela 7

Zestawienie obliczeń współczynnika intensywności uszkodzeń

Rok	2012	2013	2014	2015	2016	
Liczba awarii sieci magistralnej k_M	55	36	41	60	43	Średnia
Liczba awarii sieci rozdzielczej k_R	109	113	84	119	100	
Liczba awarii połączeń wodociagowych k_{PW}	119	109	99	163	96	
Całkowita liczba awarii sieci $\sum k$	283	258	224	342	239	
Długość sieci magistralnej L_M [km]	49,8	49,8	49,8	49,8	54,9	
Długość sieci rozdzielczej L_R [km]	520,5	524,8	529	540,4	586,5	
Długość połączeń wodociagowych L_{PW} [km]	323,8	324,0	324,0	324,3	365,2	
Całkowita długość sieci $\sum L$ [km]	894,1	898,6	902,8	914,5	1006,6	
Intensywność uszkodzeń sieci magistrala $\lambda_M \left[\frac{usk.}{km \cdot rok} \right]$	1,10	0,72	0,82	1,20	0,78	0,93
Intensywność uszkodzeń sieci rozdzielczej $\lambda_R \left[\frac{usk.}{km \cdot rok} \right]$	0,21	0,22	0,16	0,22	0,17	0,19
Intensywność uszkodzeń połączeń wod. $\lambda_{PW} \left[\frac{usk.}{km \cdot rok} \right]$	0,37	0,34	0,31	0,50	0,26	0,35
Intensywność uszkodzeń całkowita $\lambda_C \left[\frac{usk.}{km \cdot rok} \right]$	0,32	0,29	0,25	0,37	0,24	0,29

Wskaźniki intensywności uszkodzeń dla każdego rodzaju sieci wodociągowej oraz dla sieci jako całości maleją w badanym okresie. Bieżące naprawy i wymiana awaryjnych przewodów sieci w latach 2012–2016 wpłynę na poprawę stanu technicznego sieci. Wyznaczono średnią wartość wskaźnika intensywności uszkodzeń $\lambda_{PW} = 0,35$ uszk./(km·rok) przy wymaganej wg literatury [2, 10] wartości równej 1,00 uszk./(km·rok) dla połączeń wodociągowych, dla sieci rozdzielczej uzyskano średni wynik $\lambda_R = 0,19$ uszk./(km·rok) przy wartości wymaganej 0,50 uszk./(km·rok), a dla sieci magistralnej $\lambda_M = 0,93$ uszk./(km·rok) przy wartości wymaganej 0,30 uszk./(km·rok).

4. Wnioski

Wielkość strat wody w badanym okresie ma tendencję spadkową. Ocena stanu technicznego sieci na podstawie wskaźnika ILI wykazała, że w badanym okresie stan sieci uległ znacznej poprawie od słabego ($ILI_{2012} = 2,99$) do dobrego ($ILI_{2016} = 1,70$), wg najbardziej rygorystycznych wymagań IWA. Zmniejszanie wielkości strat i poprawa stanu technicznego sieci spowodowały spadek kosztów finansowych przedsiębiorstwa.

W celu poprawy bezpieczeństwa dostaw wody oraz dalszego ograniczania wielkości strat wody przedsiębiorstwo powinno rozważyć kwestie renowacji lub wymiany awaryjnych odcinków sieci magistralnej, dla której uzyskano najwyższą wartość wskaźnika intensywności uszkodzeń $\lambda_M = 0,93$ uszk./(km·rok) przy wartości wymaganej 0,30 uszk./(km·rok).

5. Literatura

1. Kowalski D., Kowalska B., Kwietniewski M., Sygacz-Adamska J.: Analiza bilansu wody oraz awaryjności wybranego systemu dystrybucji wody. Zaopatrzenie w Wodę, jakość i Ochrona Wód, tom II, 2012.
2. Kwietniewski M., Rak J.: Niezawodność infrastruktury wodociągowej i kanalizacyjnej w Polsce. Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, Warszawa 2010.
3. Lambert A., Hirner W.: Losses from Water Supply Systems: Standard Terminology and Recommended Performance Measures. International Water Association Blue Pages, 2000.
4. Merc K., Kedzia W., Ociepa E.: Analiza strat wody na podstawie wskaźników zalecanych przez International Water Association. Proceedings of ECOpole, vol. 11, 2017.

5. Meyer P. et al.: AWWA Leak Detection & Water Accountability Comitee Report. Residential End Uses of Water. AWWA Research Foundation, 1999.
6. Ociepa E., Mrowiec M., Deska I.: Straty wody w systemach dystrybucji – przyczyny, określanie, działanie na rzecz ograniczania. Proceedings of ECOpole, vol. 10, 2016.
7. Pietrucha-Urbanik K.: Failure analysis and assessment on the exemplary water supply network. Engineering failure analysis, vol. 57, 2015.
8. Rak J.R. et al.: Metody oceny niezawodności i bezpieczeństwa dostaw wody do odbiorców. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2013.
9. Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 7 grudnia 2017 r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi (Dz.U. 2017 poz. 2294).
10. Szpak D., Tchórzewska-Cieślak B.: Assessment of the failure rate of water supply system in terms of safety of critical infrastructure. Chemik, vol. 6, 2014.
11. World Bank Institute Performance. NRW Training Module 6, Performance Indicators, 2005.

