

MAŁGORZATA NIEDZIOŁEK*, WOJCIECH DĄBROWSKI*, TADEUSZ ŻABA**,
MICAJAH McGARITY***, KRZYSZTOF GŁÓD*

CHARAKTERYSTYKA AWARII RUROCIĄGÓW TRANZYTOWYCH NA PRZYKŁADZIE PRZEWODÓW BIEGNĄCYCH Z UJĘCIA W DOBCZYCACH DO KRAKOWA

CHARACTERISTICS OF TRANSIT PIPES FAILURES BASED ON PIPELINES BETWEEN INTAKE IN DOBCZYCE AND KRAKOW

Streszczenie

Problematyka awaryjności przewodów wodociagowych jest obiektem wielu badań naukowych, jako że dla przedsiębiorstw świadczących usługi zaopatrzenia w wodę wydatki na renowację stanowią znaczący procent kosztów eksploatacji. Niniejszy artykuł prezentuje wyniki analiz dokonanych dla dwóch przewodów tranzytowych prowadzących wodę do Krakowa z ujęcia „Raba” w Dobczycach, na podstawie danych z lat 2003–2009. Dokonano podsumowania charakterystyki wody prowadzonej tymi przewodami oceniając szczególnie jej korozyjność. Woda transportowana z Zakładu Uzdatniania Wody „Raba” do Krakowa charakteryzuje się małą pojemnością buforową, co niekorzystnie wpływa na jej właściwości korozyjne. Niekorzystna jest pod tym względem wartość indeksu Ryznera, ale małe stężenia chlorków i siarczanów decydują o tym, że wskaźniki S_1 i S_2 przyjmują wartości świadczące o niezbyt wysokiej korozyjności. Porównano awaryjności przewodów starszego o średnicy 1000 mm i młodszego o średnicy 1400 mm, wykazując, że problem korozyjności węższej dotyczy głównie przewodu starszego, a dopiero zaczyna objawiać się w młodszym. Przeanalizowano rozkład liczby awarii na przestrzeni roku, a także odniesiono ją do średniorocznej wysokości opadów atmosferycznych. Stwierdzono zwiększoną awaryjność przewodu tranzytowego w miesiącach kwietniu, lipcu i październiku.

Słowa kluczowe: awaryjność przewodów wodociagowych, korozyjność wód, system zaopatrzenia w wodę, przewody tranzytowe

Abstract

The issue of water pipes failure is an object of many scientific studies, as for the companies providing water supply services, the renovation expenses are significant percentage of operating cost. This article presents the results of the analysis performed for the two transit lines carrying water to Krakow from the “Raba” Water Treatment Plant in Dobczyce, based on data from the years 2003–2009. Summarizes the characteristics of the water carried especially when assessing its corrosiveness. Water transported from “Raba” Water Treatment Plant to the city of Krakow is characterized by low buffering capacity, which adversely affects its corrosion properties. Unfavorable in this respect is the Ryzner’s index value, however small concentrations of chloride and sulphate determined that the S_1 and S_2 indices take the values showing not very high corrosivity. Failure rate was compared between the older transit pipe of 1000 mm diameter and a newer transit pipe of 1400 mm diameter, showing that the problem of pitting corrosion affects mainly the older pipe, and only begins to reveal on the newer. The distribution of the number of failures over the years was analyzed in reference to the average yearly amount of precipitation. There was an increased failure rate of the pipeline in the months of April, July and October.

Keywords: corrosivity of water, transit pipeline, pipeline failure, water supply system

* Mgr inż. Małgorzata Niedziołek, doktorantka, prof. dr hab. inż. Wojciech Dąbrowski, dr. inż. Krzysztof Głód, Instytut Zaopatrzenia w Wodę i Usuwania Ścieków, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Krakowska.

** Dr inż. Tadeusz Żaba, Miejskie Przedsiębiorstwo Wodociągów i Kanalizacji S.A. w Krakowie.

*** Micajah McGarity, John Hopkins University, USA.

1. Wstęp

Zadaniem, jakie stoi przed każdym systemem zaopatrzenia w wodę, jest dostarczenie do odbiorców określonej ilości wody o odpowiedniej jakości i pod wymaganym ciśnieniem [1, 11]. Zatem każde z przedsiębiorstw, przez swoich konsumentów jest oceniane na podstawie spełnienia wymienionych wymagań. Występujące w systemach zaopatrzenia w wodę uszkodzenia przewodów są częstą przyczyną wadliwego funkcjonowania systemu, co pociąga za sobą znaczące wydatki na naprawy, a niekiedy nawet odszkodowania [8].

Można wyróżnić dwie drogi podejścia przedsiębiorstw wodociągowych do problemu zapewnienia niezawodnego działania systemu. Jedno z nich to postawa *pasywna*, czyli rozwiązywanie problemów, które już zaistniały, i podejmowanie działań mających na celu ich usunięcie i przywrócenie sprawności elementu. Lokalizowanie istniejących przecieków i remonty przewodów zaliczyć należy do tej grupy działań. Podejściem konkurencyjnym jest postawa *aktywna*, czyli zastosowanie dostępnych narzędzi, które pomogą prognozować, ile awarii rurociągów może wystąpić, i reagować zawczasu, minimalizując potencjalne nakłady finansowe przez planowanie zabiegów renowacyjnych lub przez wymianę przewodów [14].

Działania aktywne są oparte na wcześniejszych badaniach dotyczących przede wszystkim stanu przewodów. Planowanie zabiegów wspomagane jest przez programy komputerowe, które na podstawie analiz układu wielu zmiennych odpowiedzialnych za występowanie awarii pozwalają wyróżnić zależności między licznymi przyczynami i awariami oraz podejmować stosowne decyzje [9, 13].

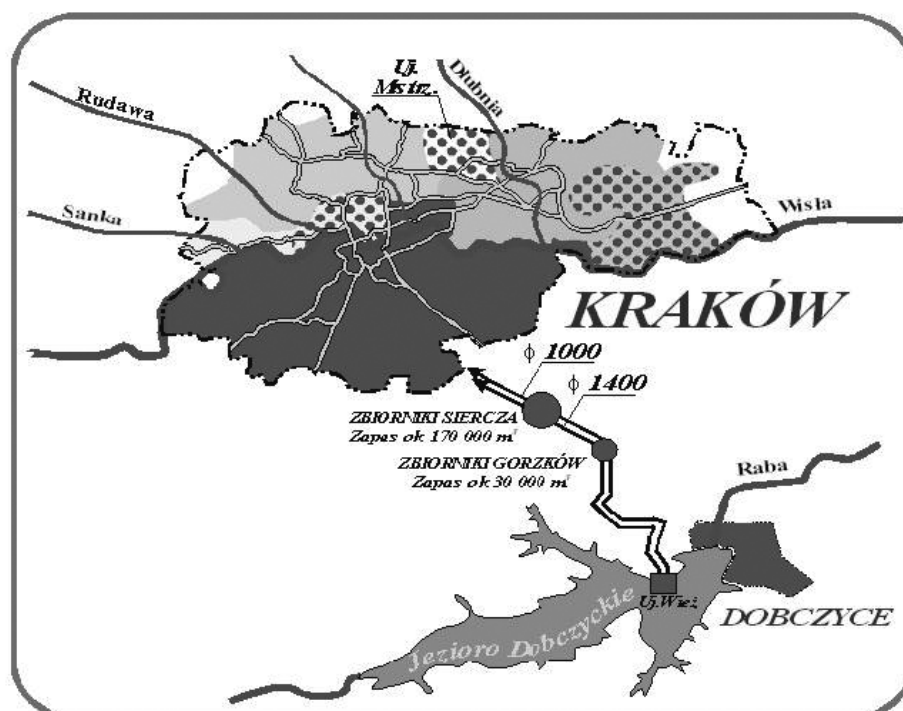
Niezwykle zatem cenne jest dla przedsiębiorstw i badaczy gromadzenie możliwie największej liczby danych dotyczących systemu ze szczególnym uwzględnieniem historii wcześniejszych awarii i napraw. Niestety ta praktyka znajduje zastosowanie od niedawna i dostęp do kompleksowych danych ogranicza się zazwyczaj do niezbyt długiego odcinka czasowego, od kiedy wymagane jest to przez regulacje prawne [15].

2. Badane przewody magistralne

Przebieg przewodów magistralnych przedstawiono schematycznie na rys. 1, zaczerpniętym z materiałów informacyjnych MPWiK Kraków [17]. Przewody o średnicach 1000 mm i 1400 mm wykonane są z rur kielichowych stalowych i z szarego żeliwa, łączonych kielichowo w starej technologii, a więc za pomocą sznura konopnego, i zalane ołowiem. Rurociąg 1000 mm o długości 22,6 km został oddany do użytku w 1974 roku, a 1400 mm w roku 1987. Woda pompowana jest z ujęcia szybowego zlokalizowanego na brzegu zbiornika Dobczyce do Zakładu Uzdatniania „Raba”. Zakład uzdatniania zawiera dwa odrębne ciągi technologiczne, każdy przypisany do jednego z przewodów tranzytowych. Woda jest pompowana dalej do zbiorników zapasowo-wyrównawczych Gorzków, a następnie płynie grawitacyjnie do zbiorników Sierca i dalej do zbiorników Kosocice, z których doprowadzana jest do Krakowa.

Przewody będą przez grunty korozyjne, ale zostały posadowione w obsypce piaskowej. Wewnętrzna ochronę stanowiła wyprawa bitumiczna. Jednakże oględziny rurociągu 1000 mm [10] wskazują na to, że okazała się ona nietrwała. Zewnętrznie rury chronione są warstwą bitumiczną. Nad przewodem 1000 mm biegnie kabel teleinformatyczny, co w miejscach ewentualnych uszkodzeń izolacji może być przyczyną korozji wżerowej przewodu wodociągowego.

Z uwagi na konieczność przekraczania pasma górskiego woda pompowana jest wysoko, a później niezbędne jest dławienie przepływu grawitacyjnego ze zbiorników Siercza w celu obniżenia ciśnienia wody o około 6 barów. Tak więc ciśnienia robocze na długości rurociągów znacznie różnią się między sobą od niecałego 1 bara poniżej zbiorników, do około 12 barów w najniższych położonych fragmentach grawitacyjnych rurociągów łączących zbiorniki Siercza ze zbiornikami Kosocice.



Rys. 1. Przebieg rurociągów tranzytowych z Dobczyc do Krakowa wraz z lokalizacją zbiorników wody pitnej wzdłuż trasy – rysunek MPWiK w Krakowie

Fig. 1. Dobczyce–Kraków transit water pipelines layout along with the drinking water reservoirs location – figure of MPWiK in Krakow

3. Charakterystyka wody płynącej rurociągami

Ponieważ rurociągi tranzytowe z Dobczyc do Krakowa nie są zabezpieczone wyprawą cementową, a oryginalnie nałożona warstwa bitumiczna okazała się nietrwała, więc jakość wody transportowanej tymi rurociągami jest istotna dla właściwego zrozumienia, a w przyszłości prognozowania ich awaryjności.

Udostępnione przez MPWiK w Krakowie średnie miesięczne wyniki analiz scharakteryzowano w tabeli 1 przez średnie, największe i najmniejsze wartości poszczególnych parametrów zmierzone w tym czasie.

Średnie arytmetyczne, najmniejsze i największe średnie poszczególnych parametrów fizyczno-chemicznych z 48 miesięcy codziennych pomiarów MPWiK w Krakowie w latach 1998–2001

Parametry fizyczno-chemiczne	Średnia ze średnich miesięcznych	Największa pomierzona wartość parametru	Najmniejsza pomierzona wartość parametru
temperatura [°C]	10,9	22	2,30
zasadowość [mval/l]	2,14	3,00	1,50
pH	7,83	8,60	7,00
stężenie wapnia [mg/l]	36,74	54,7	23,60
dwutlenek węgla wolny [mg/l]	0,44	17,00	0,00
chlorki [mg/l]	11,60	17,00	7,00
mętność [NTU]	0,17	1,30	0,0
twardość ogólna [mg CaCO ₃ /l]	115,90	147,80	89,20
magnez [mg/l]	6,74	9,50	3,40
tlen rozpuszczony [mg/l]	12,25	13,30	11,20
twardość węglanowa [mg CaCO ₃ /l]	105,69	200,00	80,00
twardość niewęglanowa [mg CaCO ₃ /l]	10,10	28,50	0,00
sucha pozostałość ogólna [mg/l]	177,55	207,50	177,55
sucha pozostałość lotna [mg/l]	36,13	347,50	3,60
sucha pozostałość stała [mg/l]	144,56	168,00	119,00
przewodnictwo właściwe [mikroS/cm]	262,10	333,00	0,30
części rozpuszczone stałe	137,69	167,00	110,90

3.1. Uprzednie oceny korozyjności wody

Na zlecenie Ministerstwa Gospodarki Przestrzennej i Budownictwa w okresie od 1991 do 1994 roku przeprowadzono ocenę agresywności korozyjnej wód w miastach Polski [5]. Według tej oceny nie znaleziono przeciwwskazań do tego, aby wody ze wszystkich czterech pracujących wówczas zakładów uzdatniania wód powierzchniowych: Bielany, Dobczyce, Dłubnia i Rudawa rozprowadzane były przewodami ze stali zwykłej, ocynkowanej, kwasoodpornej 1H18N9T i miedzi.

3.2. Ocena korozyjności wody

Jednym z indeksów stosowanych do oceny korozyjności wody jest indeks nasycenia Langeliera LSI (1), nazywany indeksem nasycenia SI w nieaktualnej Polskiej Normie PN-72/C-04609 [12].

$$LSI = pH - pH_s \quad (1)$$

Tak więc od pomierzonych wartości pH odejmuje się obliczone wartości pH_s , przy których ta woda byłaby w równowadze z węglanem wapnia. Tutaj wartości pH_s zostały obliczone według równania (2), w którym uwzględniono współczynniki aktywności, ale pominięto efekt tworzenia się nieorganicznych kompleksów wapnia i magnezu. Można wykazać, że dla wód słabo zmineralizowanych pominięcie to nie ma znaczenia dla obliczonych wartości pH_s .

$$\text{pH}_s = \text{p}K_2' + \text{p}[\text{Ca}^{2+}] - \text{p}K_s' + \text{p}\{2[\text{Alk}_T] - [\text{OH}^-] + [\text{H}_3\text{O}^+]\} - \text{p}\left(\frac{2 \times K_2'}{[\text{H}_3\text{O}^+]} + 1\right) - \text{p}f_m \quad (2)$$

W równaniu (2) wprowadzono następujące oznaczenia: Alk_T – zasadowość ogólna, K_2 – stała dysocjacji drugorzędowej kwasu węglowego, f_m – współczynnik aktywności jonów jednowartościowych, f_d – współczynnik aktywności jonów dwuwartościowych, K_s – iloczyn rozpuszczalności węglanu wapnia, $K_2' = K_2/f_d$, $K_s' = K_s/f_d^2 = [\text{Ca}^{2+}]_{\text{eq}}[\text{CO}_3^{2-}]_{\text{eq}}$

Stałe równowagowe z równania (2) obliczone w funkcji temperatury bezwzględnej T zgodnie z równaniami empirycznymi (3)–(6).

$$\text{p}K_1 = \frac{17052}{T} + 215,21 \times \lg T - 0,12675 \times T - 545,56 \quad (3)$$

$$\text{p}K_2 = \frac{2902,39}{T} + 0,02379 \times T - 6,498 \quad (4)$$

$$\text{p}K_w = \frac{4787,3}{T} + 7,1321 \times \lg T + 0,010365 \times T - 22,801 \quad (5)$$

$$\text{p}K_s = 0,01183 \times (T - 273,16) + 8,03 \quad (6)$$

Moc jonową roztworu wodnego $I = 0,5 \varepsilon C Z_i$, zdefiniowaną jako połowę sumy iloczynów stężeń jonów C_i oraz kwadratów ich wartościowości Z_i^2 obliczono z empirycznego równania (7), z współczynniki aktywności w zależności od wartości I z równań (8)–(11).

$$I = 2,5 \cdot 10^{-5} (\text{TDS} - 20) \quad (7)$$

$$\log(f_i) = -AZ_i^2 I^{0,5} \text{ dla } I < 0,005 \text{ M} \quad (8)$$

$$\log(f_i) = -AZ_i^2 \{I^{0,5}/(I^{0,5} + 1)\} \text{ dla } I < 0,1 \text{ M} \quad (9)$$

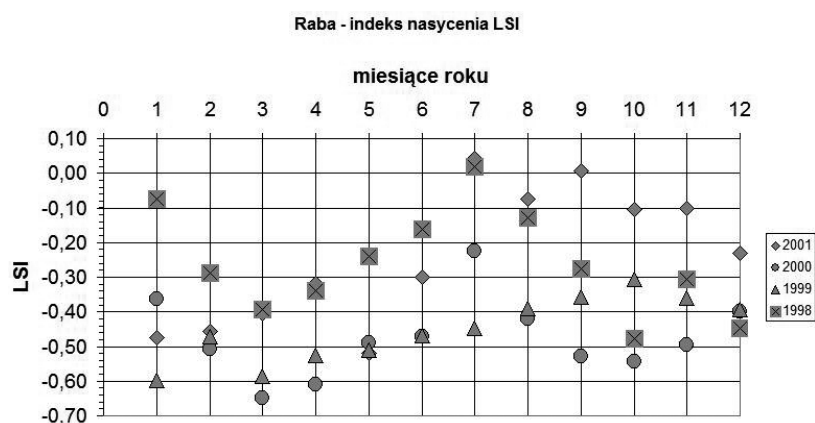
$$\log(f_i) = -AZ_i^2 \{I^{0,5}/(I^{0,5} + 1) - 0,3I\} \text{ dla } I < 0,5 \text{ M} \quad (10)$$

$$\log(f_i) = -AZ_i^2 \{I^{0,5}/(1 + B \cdot b \cdot I^{0,5}) + CiI\} \text{ dla } I < 1,0 \text{ M} \quad (11)$$

W równaniach tych wprowadzono następujące oznaczenia: $A = 1,82 \cdot 10^6 (78,3T)^{-1,5}$, b – średnica jonu [Å^0] ($b = 4$ dla HCO_3^- , $b = 6$ dla Ca^{2+} , $b = 9$ dla H_3O^+ , $b = 3$ dla OH^-), $B = 50,3 \cdot (78,3T)^{0,5}$, C_i – stężenie jonów i , T – temperatura [K], TDS – sucha pozostałość po prażeniu [mg/l], Z_i – ładunek jonu I (+/- 1, +/- 2 itd.).

Wszystkie obliczenia przeprowadzono dla danych otrzymanych z MPWiK S.A. za okres 1998–2001. Oparto je na średnich miesięcznych wartościach poszczególnych parametrów jakości wody, które mierzone są codziennie. Wartości indeksu nasycenia SI przedstawiono na rys. 2. Jak z niego widać, woda z Raby charakteryzuje się ujemnymi wartościami SI,

ale tylko sporadycznie spada on poniżej $-0,5$. Tak więc wykazuje ona lekkie tendencje do rozpuszczania węgla wapnia, ale zapewne nie wymaga stabilizacji zgodnie z zacytowaną tutaj tabelą 2.



Rys. 2. Wartości LSI obliczone dla średniomiesięcznych wartości parametrów jakości wody

Fig. 2. LSI calculated for monthly average water quality parameters

Tabela 2

Zalecenia co do potrzeby i braku potrzeby stabilizacji wody z uwagi na wartość LSI według Carrier Air Conditioning Company [3]

Wartość LSI	Intensywność korozji	Ogólne zalecenia
-5	gwałtowna korozja	zalecane uzdatnianie
-4	gwałtowna korozja	zalecane uzdatnianie
-3	umiarkowana korozja	zalecane uzdatnianie
-2	umiarkowana korozja	może być potrzebne uzdatnianie
-1	łagodna korozja	uzdatnianie może być potrzebne
-0,5	delikatna korozja	prawdopodobnie nie ma potrzeby uzdatniania
0	niemal równowaga węglanowa	nie jest potrzebne uzdatnianie
0,5	delikatne pokrywanie powierzchni	prawdopodobnie nie potrzeby uzdatniania
1	delikatne zmniejszanie przekroju	być może należałoby uzdatniać wodę
2	delikatne do umiarkowanego odkładania osadów	może być potrzebne uzdatnianie
3	umiarkowane odkładanie węgla wapnia w rurach	zalecane uzdatnianie
4	gwałtowne odkładanie kamienia	zalecane uzdatnianie

Kolejnym indeksem opartym na równowadze węglanowej jest indeks Ryznera (12).

$$RI = 2pHs - pH \quad (12)$$

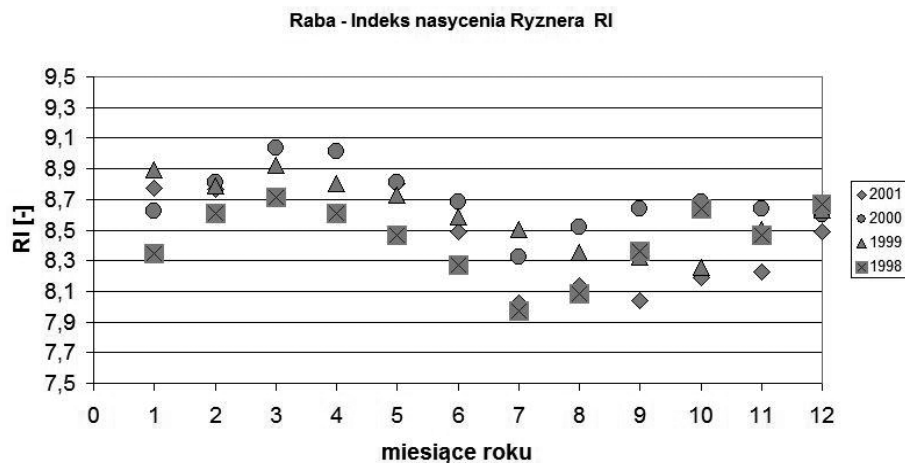
Do indeksów Ryznera i Langeliera przywiązywano zbyt dużą wagę, jak idzie o ocenę właściwości korozyjnych, czego przykładem są tabele 2 oraz 3. Należy pamiętać, że wskazują one głównie na tendencję do odkładania lub rozpuszczania węglanu wapnia, a ich wpływ na korozyjność wody w dużej mierze jest pośredni.

Tabela 3

Właściwości wody w zależności od wartości indeksu Ryznera i wskaźników Carriera [3]

Zakres RI	Oryginalne wskazania Ryznera	Zakres pH	Wskazania Carrier [3]
$RI < 5,5$	grube narosty	4,0–5,0	grube narosty
$5,5 < RI < 6,2$	tworzenie narostów	5,0–6,0	cienkie narosty
$6,2 < RI < 6,8$	bez trudności eksploatacyjnych	6,0–7,0	cienkie narosty albo łagodna korozja
$6,8 < RI < 8,5$	woda jest agresywna	7,0–7,5	istotne nasilenie procesów korozyjnych
$RI > 8,5$	woda jest bardzo agresywna	7,5–9,0	uciążliwa korozja
		$> 9,0$	korozja nie do zaakceptowania

Wartości indeksu Ryznera dla dostarczanej wody zostały przedstawione na rysunku 3.



Rys. 3. Wartości indeksu Ryznera dla dostarczonej wody

Fig. 3. Ryzner's index values for supplied water

Niewątpliwie negatywną cechą wody z Raby jest mała pojemność buforowa β . Jest ona zdefiniowana przez bezwzględną wartość z pochodnej stężenia silnego jednoprotowego kwasu albo silnej zasady z jedną grupą hydroksylową, względem zmiany pH wywołanej dodaniem tego kwasu lub zasady.

$$\beta = \left| \frac{dC}{d \text{pH}} \right| \quad (13)$$

Dla wód naturalnych pojemność buforową oblicza się z równania (14) [2]:

$$\beta = 2,3 \left\{ \alpha_1 ([0,5 \text{Alk}_T] - [\text{OH}^-] + [\text{H}_3\text{O}^+]) \left(\frac{[\text{H}_3\text{O}^+] K_1' K_2'}{([\text{H}_3\text{O}^+] + 4K_2')} \right) / \left[\frac{K_1' (1 + 2K_2')}{[\text{H}_3\text{O}^+]} + [\text{H}_3\text{O}^+] + [\text{OH}^-] \right] \right\} \quad (14)$$

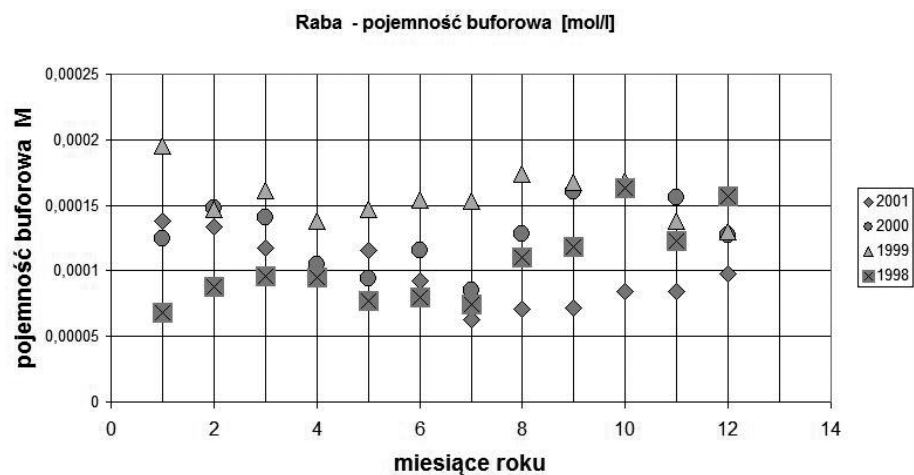
W równaniu tym przez α_1 (16) oznaczono część, jaką w całkowitym węglu nieorganicznym C_T (15) stanowią wodorowęglany, a α_2 oznacza część, którą stanowią węglany.

$$C_T = [\text{H}_2\text{CO}_3] + [\text{CO}_2] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}] \quad (15)$$

$$\alpha_1 = \beta = \left| \frac{dC}{d \text{pH}} \right| \quad (16)$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{\frac{[\text{H}_3\text{O}^+]^2}{K_1' K_2'} + \frac{[\text{H}_3\text{O}^+]}{K_2'} + 1} \quad (17)$$

Obliczone wartości pojemności buforowej β przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Wartości pojemności buforowej β

Fig. 4. Buffer capacity β

Przedstawione na rys. 4 wartości pojemności buforowej wody są kilka razy mniejsze niż pozostałych wód, w którą zaopatrywana jest Miejska Aglomeracja Krakowska. Niska zasadowość ogólna, a więc i niska pojemność buforowa wody jest niekorzystna, gdyż zwiększa różnicę pH wody wypełniającej pory produktów korozji na obszarach katodowych i anodowych, przyczyniając się do przyspieszenia korozji. Niemniej, zgodnie z Normą DIN 50930 [7] stężenie wodorowęglanów dla tych wartości pH, co w wodzie z Raby, niemal identyczne z zasadowością, jest uwzględnione w indeksach korozyjności S_1 oraz S_3 .

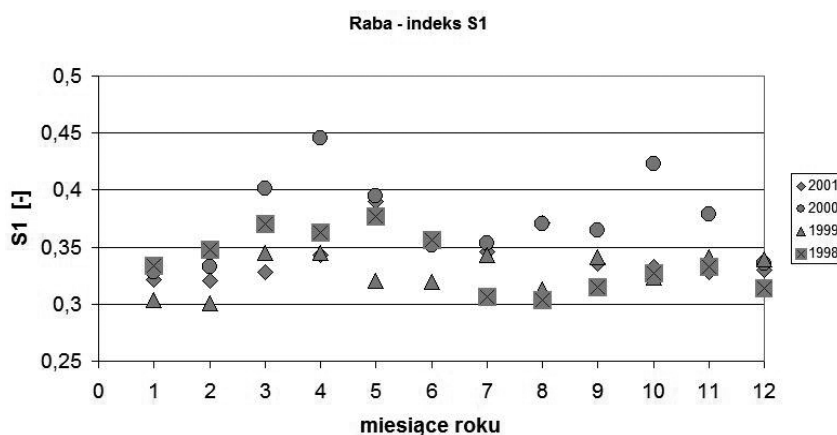
$$S_1 = \{[Cl^-] + 2 [SO_4^{2-}]\} / [HCO_3^-] \quad (18)$$

$$S_3 = [HCO_3^-] / [SO_4^{2-}] \quad (19)$$

Obliczając indeksy S_1 , S_3 , stężenia należy wyrażać molarnie. Wyniki obliczeń indeksów S_1 , S_3 przedstawiono na rysunkach 5 i 6.

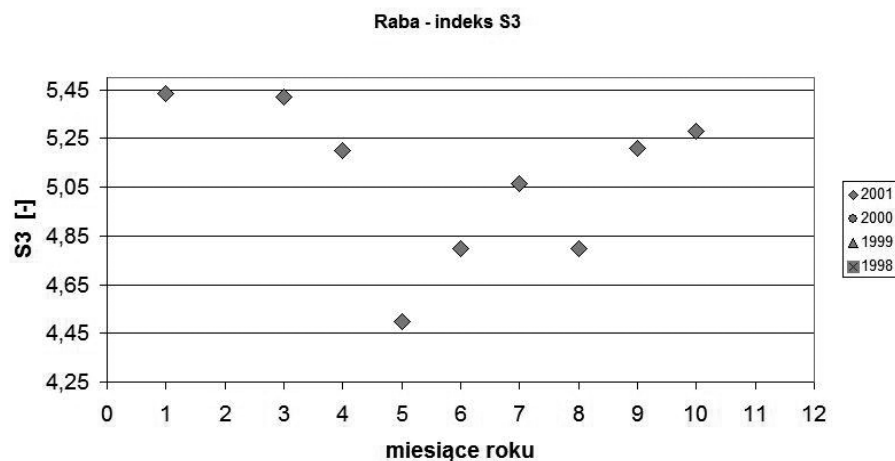
W obliczeniach indeksów S_1 , S_3 korzystano ze średnich miesięcznych parametrów jakości wody mierzonych codziennie przez MPWiK. Nie dotyczyło to jednak siarczanów, które mierzone są jedynie raz na kwartał. Przyjęto dla nich przeciętny wynik analiz 20 mg/l.

Wartości indeksu S_1 były zawsze znacznie mniejsze od 1, co świadczy o niedużym prawdopodobieństwie wystąpienia korozji wżerowej od środka przewodów tranzytowych. Natomiast wskaźnik S_3 znacznie przekracza 2, co świadczy o tym, iż pod względem tego parametru woda nie powinna również stwarzać zagrożenia korozją wżerową instalacji miedzianych w mieście. Podsumowując, ze względu na korozję przesyłana woda charakteryzuje się niekorzystnie małą twardością, zasadowością ogólną i w rezultacie niską pojemnością buforową. Ponadto woda ta okresowo charakteryzuje się tendencją do rozpuszczania węgla wapnia. Jednakże podstawowe parametry charakteryzujące korozyjność S_1 , S_3 według normy DIN 50930 [7] świadczą o niedużym niebezpieczeństwie wystąpienia korozji wżerowej, która stanowi podstawowe niebezpieczeństwo zniszczenia przewodów stalowych i żeliwnych.



Rys. 5. Wartości bezwymiarowego indeksu S_1

Fig. 5. Values of S_1 index

Rys. 6. Wartości bezwymiarowego indeksu S_3 Fig. 6. Values of S_3 index

4. Analiza awarii rurociągów tranzytowych

Miejskie Przedsiębiorstwo Wodociągów i Kanalizacji w Krakowie udostępniło dane dotyczące zarejestrowanych awarii na rurociągach tranzytowych prowadzących wodę z ujęcia Dobczyce. Są to dwa rurociągi o średnicach 1400 mm i 1000 mm. Dane obejmują awarie na przestrzeni 7 lat od roku 2003 do 2009. Sumarycznie na przestrzeni tego czasu wystąpiły 53 awarie. Przy czym zdecydowana większość miała miejsce na rurociągu o średnicy mniejszej niż 1000 mm, a więc na rurociągu starszym. Dotyczyło to szczególnie wżerów. Na rurociągu o średnicy 1400 mm miało miejsce 8 usterek. Z uwagi na różnicę w wieku przewodów, jak i w intensywności uszkodzeń interpretację awaryjności przeprowadzono dla nich oddzielnie.

Tabela 4

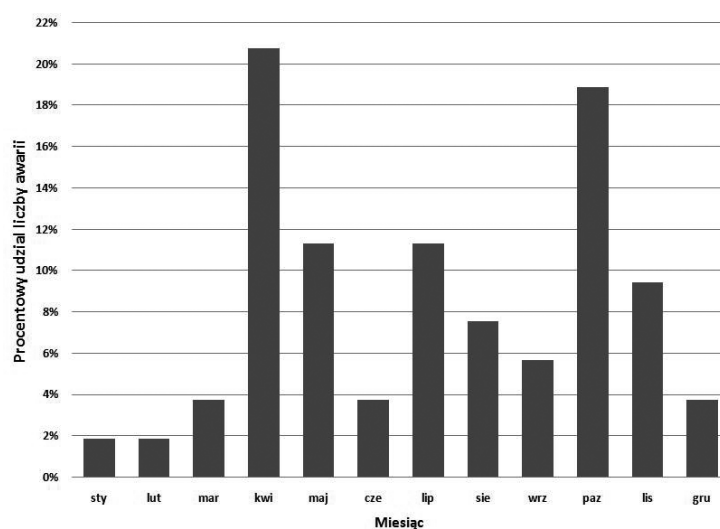
Charakterystyka uszkodzeń rurociągów 1000 mm oraz 1400 mm w latach 2003–2009

Rodzaj uszkodzenia	Liczba przypadków	
	rurociąg 1000 mm	rurociąg 1400 mm
rozszczelnienie	24	3
wżer	15	3
pęknięcie	3	0
dziura	2	1
inne	1	1

Jak wynika z tabeli 4, w bardziej awaryjnym rurociągu 1000 mm zdecydowanie najczęściej występowały rozszczelnienia połączeń. Należy jednak pamiętać, że są to połączenia kielichowe na sznur i ołów, które przy ruchach gruntu tracą szczelność. Obecnie tego typu połączeń już się w ogóle nie stosuje. Współczesne połączenia kielichowe rur żeliwnych są elastyczne w zakresie kątów 3° – 5° , zależnie od średnicy rury i rodzaju połączenia. Pozwala to nawet na prowadzenie przewodów łukami o dużych promieniach. Nasze spostrzeżenia potwierdzają wyniki badań przytaczane przez Kwietniewskiego [11], który sugeruje, że to właśnie uszkodzenia złączy są odpowiedzialne za większość wszystkich awarii rurociągów tranzytowych i magistralnych. Nasze badania pokazują jednak, że istotną część stanowią również uszkodzenia wywołane korozją (wżery). Brakuje szczegółowego rozpoznania przyczyn powstania części wżerów, ale kilka z nich obserwowano i wszystkie one wywołane były korozją zewnętrzną, która pochodziła od prądów błędzących.

Przedmiotem szczególnego zainteresowania znalazła się cykliczność występowania zwiększonej ilości awarii. Rozpatrzono to zagadnienie, mając na uwadze dwa aspekty. Przeanalizowano zmienność liczby uszkodzeń w roku, a następnie na przestrzeni całego okresu badanego.

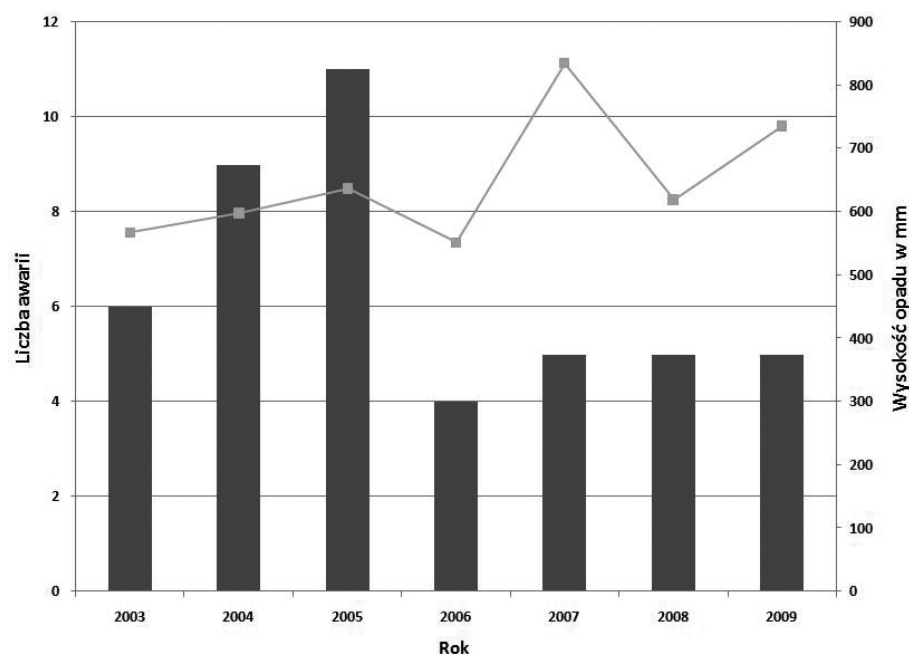
Na rysunku 7 zaprezentowana jest zmienność liczby uszkodzeń roku w poszczególnych miesiącach dla przewodu 1000 mm bez uwzględniania awarii pochodzenia korozyjnego (wżery). Ten procentowy udział uszkodzeń rurociągu w poszczególnych miesiącach został stwierdzony na podstawie 6 lat obserwacji. Zauważalne jest nasilenie awaryjności w okresach przejściowych zima–wiosna oraz jesień–zima. W miesiącach zimowych awaryjność przewodu jest znacznie mniejsza. Inny jest rozkład miesięczny awarii w sieci miejskiej, co świadczy o innych warunkach współpracy przewód – grunt na pochyłym zboczu, a innym w terenie płaskim.



Rys. 7. Sezonowa zmienność liczby awarii dla przewodu tranzytowego 1000 mm na przestrzeni lat 2003–2009

Fig. 7. Seasonal variation in the number of failures for 1000 mm transit pipeline over the years 2003–2009

Rysunek 8 pokazuje, jak w poszczególnych latach przebiegała zmienność awaryjności przewodu o średnicy 1000 mm dla badanego okresu, z którego pochodziły dane od MPWiK. Dodatkowo na wykres naniesiono linię obrazującą rozkład średnich rocznych opadów dla miasta Krakowa – zestawione w tabeli 5. Jak zostało zauważone, ten czynnik może mieć wpływ na awaryjność infrastruktury podziemnej [4]. Można zakładać, że okresy występowania obfitych opadów mogą mieć wpływ na zwiększenie liczby usterek tranzytowego przewodu wodociągowego, prowadzonego w terenie górzystym, co niewątpliwie można wiązać z pojawiającymi się zmianami w środowisku wodno-gruntowym. W latach 2003–2005 wzrost liczby awarii odpowiadał wzrostowi średniej rocznej wysokości opadów, następnie gwałtowny spadek awaryjności w roku 2006 wystąpił podczas zmniejszenia rocznej wysokości opadów, a później tak proste zależności przestały być widoczne. Stabilność zbroczy, którymi przebiega trasa rurociągu, zależy nie tylko od rocznej wysokości opadów, ale również od ich rozkładu w ciągu roku oraz od akumulacji wieloletniej, jeżeli do takiej dochodzi.



Rys. 8. Liczba awarii (szare słupki) przewodu tranzytowego 1000 mm na przestrzeni lat 2003–2009 z uwzględnieniem średnich rocznych opadów

Fig. 8. Number of transit pipeline failures (grey bars) over the years 2003–2009 with average annual precipitation taken into account

Tabela 5

**Charakterystyka opadów
w latach 2003–2009 wg [16]**

Rok	Opad średni dla miasta Krakowa [mm]
2003	567
2004	598
2005	637
2006	552
2007	834
2008	619
2009	735

5. Wnioski

1. Woda transportowana rurociągami 1400 i 1000 mm z Zakładu Uzdatniania Wody „Raba” do Krakowa charakteryzuje się małą pojemnością buforową, co niekorzystnie wpływa na jej właściwości korozyjne. Niekorzystna jest pod tym względem wartość indeksu Ryznera, ale małe stężenia chlorków i siarczanów decydują o tym, że wskaźniki S_1 i S_3 obliczane wg Normy DIN 50930 przyjmują wartości świadczące o niezbyt wysokiej korozyjności.
2. Zarówno indeks Langeliera, jak i Ryznera odnoszą się do równowagi węglanowej i nie powinno się przeceniać ich roli w ocenie korozyjności wody. Ponadto w instalacjach wody ciepłej przy temperaturze 60°C woda staje się lekko przesycona węglanem wapnia i nie stwarza problemów z odkładaniem dużej ilości węglanu wapnia.
3. Porównując awaryjność przewodu o średnicy 1000 mm oddanego do użytku po raz pierwszy w 1974 roku z awaryjnością rurociągu 1400 mm uruchomionego w 1987 roku, można zauważyć że w przewodzie 1000 mm stwierdzono przypadki korozji wżerowej, która dopiero zaczyna się objawiać w młodszym rurociągu.
4. Liczba awarii rurociągu tranzytowego Dobczyce–Kraków wyraźnie zależy od pory roku i miesiąca i okazała się szczególnie wysoka dla kwietnia, lipca i października. Awaryjności były również wyraźnie zróżnicowane w poszczególnych latach, co wydaje się wynikać między innymi ze zmienności opadów, które mają wpływ na stabilność zbczy, którymi prowadzony jest przewód 1000 mm.

Literatura

- [1] Bajer J., Iwanejko R., Kapcia J., *Niezawodność systemów wodociagowych i kanalizacyjnych w zadaniach*, Wydawnictwo PK, Kraków 2006.
- [2] Benefield L.D., Judkins J.F., Weand B.L., *Process chemistry for water and wastewater treatment*, Prentice – Hall, Inc. Englewoods Cliffs, New Jersey 1982.
- [3] Carrier Air Conditioning Company, *Handbook of air conditioning system design*, McGraw-Hill Books, New York 1965.

- [4] Conroy P., *Achieving a cost effective rehabilitation solution*, Chartered Institution of Water and Environmental Management, training day seminar on the true cost of pipelines, Swindon 1996.
- [5] Czarnowska M., *Agresywność korozyjna wód wodociągowych w niektórych miastach Polski w odniesieniu do istniejących materiałów instalacyjnych*, strona internetowa (http://huby.seo.pl/09_woda/09_artykuly/agresywnosc_korozyjna_wod.pdf).
- [6] Dąbrowski W., Buchta R., Dąbrowska B., Mackie R.I., *Calcium carbonate equilibria in water supply systems*, Environment Protection Engineering, 2010, 36, 2, 75-94.
- [7] DIN 50930:1993 *Korozja metali. Korozja materiałów metalicznych przewodów i urządzeń pod wpływem wody*.
- [8] Hong H.P., Allouche E.N., Trivedi M., *Optimal scheduling of replacement and rehabilitation of water distribution systems*, Journal of Infrastructure Systems ASCE, 2006, 12:3, 184-191.
- [9] Kleiner Y., Rajani B., *Comprehensive review of structural deterioration of water mains: statistical models*, Urban Water, 3, 2001, 131-150.
- [10] Knapik K., Dąbrowski W., Głód K., Spaczyńska M., Tuszyńska A., *Opracowanie koncepcji modernizacji uzbrojenia i renowacji magistrali wodociągowej Dobczyce–Kraków*, opracowanie Politechniki Krakowskiej dla MPWiK w Krakowie, Kraków 2004.
- [11] Kwietniewski M., Roman M., Kłoss-Trębaczekiewicz H., *Niezawodność wodociągów i kanalizacji*, Arkady, Warszawa 1993.
- [12] PN-72/C-04609, *Wstępna jakościowa ocena korozyjnego działania zimnych wód*.
- [13] Rajani B., Kleiner Y., *Comprehensive review of structural deterioration of water mains: physically based models*, Urban Water, 3, 2001, 177-190.
- [14] Saegrov S., Melo B. J., Conroy P., Herz R.K., LeGauffre P., Moss G., Oddewald J.E., Rajani B., Schiatti M., *Rehabilitation of water networks. Survey of research needs and on-going efforts*, Urban Water, 1, 1999, 15-22.
- [15] Yamijala S., Guikema S., Brumbelow K., *Statistical models for the analysis of water distribution system pipe break data*, Reliability Engineering and System Safety, 94, 2009, 282-293.
- [16] Roczniki statystyczne (www.stat.gov.pl/gus/roczniki_PLK_HTML.htm).
- [17] Strona Miejskiego Przedsiębiorstwa Wodociągów i Kanalizacji S.A. w Krakowie (www.mpwik.krakow.pl/).