

**Halina Hotłoś**

**Ilościowa ocena  
wpływu wybranych czynników  
na parametry i koszty eksploatacyjne  
sieci wodociągowych**

---



## Recenzenci

Janusz RAK  
Zbigniew SIWONÍ

## Opracowanie redakcyjne

Maria IZBICKA

## Korekta

Alina KACZAK

Wszelkie prawa zastrzeżone. Żadna część niniejszej książki, zarówno w całości, jak i we fragmentach, nie może być reprodukowana w sposób elektroniczny, fotograficzny i inny bez zgody właściciela praw autorskich.

© Copyright by Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2007

OFICYNA WYDAWNICZA POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ

Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

<http://www.oficyna.pwr.wroc.pl>

e-mail: [oficwyd@pwr.wroc.pl](mailto:oficwyd@pwr.wroc.pl)

ISSN 0084-2869

Drukarnia Oficyny Wydawniczej Politechniki Wrocławskiej. Zam. nr 363/2007.

*Sieć wodociągowa, uszkodzenie przewodu,  
koszt naprawy, straty wody, niezawodność*

Halina HOTŁOŚ\*

## **Ilościowa ocena wpływu wybranych czynników na parametry i koszty eksploatacyjne sieci wodociągowych**

W pracy przedstawiono analizy i uogólnienia wyników wieloletnich badań eksploatacyjnych wpływu wybranych czynników na uszkodzalność i koszty naprawy przewodów wodociągowych oraz sieciowe straty wody w kilkunastu miastach Polski.

Wykazano wpływ zmniejszenia wysokości i dobowych zmian ciśnienia tłoczenia pompowni na zmniejszenie intensywności uszkodzeń przewodów (w miastach na terenach nieobjętych działalnością górniczą) wykonanych z różnych materiałów (głównie z żeliwa szarego). Uwzględniono przy tym: średnice i rodzaj uszkodzeń rurociągów i armatury, okres i rok budowy oraz czas eksploatacji przewodów, czas obserwacji, lokalizację (trasę ułożenia) przewodów, porę roku.

Dokonano oceny uszkodzalności rurociągów wykonanych z żeliwa, stali i tworzyw sztucznych na terenie oddziaływania eksploatacji górniczej. Zaprezentowano metodykę oceny udziału szkód górniczych w uszkodzalności przewodów wodociągowych (z wykorzystaniem intensywności uszkodzeń przewodów na terenach nieobjętych działalnością górniczą).

Przeprowadzono analizę całkowitego czasu usuwania uszkodzeń i jego składników (czas organizacji naprawy, czas właściwej naprawy, czas odnowy, czas trwania prac porządkowych) dla rurociągów magistralnych, rozdzielczych i przyłączy domowych, uwzględniając: rodzaj uszkodzeń, rodzaj pokrycia terenu, głębokość ułożenia i czas obserwacji. Oceniono skutki uszkodzeń rurociągów: czas wstrzymania dostawy wody do odbiorców, czas i natężenie wypływu wody z rurociągów.

Na podstawie intensywności uszkodzeń i czasu odnowy rurociągów dokonano oceny poziomu niezawodności systemów dystrybucji wody, a uzyskane wartości wskaźnika gotowości porównano z wymaganym poziomem niezawodności sieci (według propozycji różnych autorów).

Wykonano badania i analizę korelacji pomiędzy jednostkowymi kosztami naprawy przewodów magistralnych i rozdzielczych a rodzajem uszkodzenia, średnicą i głębokością ułożenia rurociągów i armatury (zasuw i hydrantów). Zbadano tendencje zmian kosztów naprawy poszczególnych rodzajów uszkodzeń rurociągów i armatury w czasie badań, z uwzględnieniem zmiany wskaźników cen (inflacji). Wyniki analiz wykorzystano do oceny wpływu wysokości i zmian ciśnienia

---

\* Politechnika Wroclawska, Wydział Inżynierii Środowiska, Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska, Wybrzeże St. Wyspiańskiego 27, 50–370 Wrocław, [halina.hotlos@pwr.wroc.pl](mailto:halina.hotlos@pwr.wroc.pl).

w pompowni na wartości wskaźników kosztów naprawy uszkodzeń przewodów w badanych systemach wodociągowych. Przedstawiono metodykę prognozowania wskaźników kosztów naprawy sieci wodociągowych z kilkuletnim wyprzedzeniem.

Oceny skutków uszkodzeń przewodów wodociągowych dokonano także na podstawie analizy sieciowych strat wody w systemach. Wykazano korelacje pomiędzy ich wielkością a obciążeniem sieci wodociągowych, intensywnością uszkodzeń rurociągów i maksymalną wysokością tłoczenia pompowni.

## Spis oznaczeń

$a$	– liczba uszkodzeń armatury przewodów; $a = a_Z + a_H$ , szt.
$a_Z$	– liczba uszkodzonych zasuw; $a_Z = a_{ZN} + a_{ZW}$ , szt.
$a_H$	– liczba uszkodzonych hydrantów; $a_H = a_{HN} + a_{HW}$ , szt.
$a_{ZN}, a_{HN}$	– liczba naprawionych zasuw i hydrantów, szt.
$a_{ZW}, a_{HW}$	– liczba wymienionych zasuw i hydrantów, szt.
$A$	– rok obserwacji
$c$	– częstość uszkodzeń rurociągów, uszk./a, uszk./m-c
$c_{(l)}$	– częstość uszkodzeń rurociągów w miesiącach wiosenno-letnich (od III do X), uszk./m-c
$c_{(z)}$	– częstość uszkodzeń rurociągów w miesiącach zimowych (od XI do II), uszk./m-c
$c_a$	– częstość uszkodzeń armatury (zasuw i hydrantów), uszk./m-c
$c_{a(l)}$	– częstość uszkodzeń armatury w miesiącach wiosenno-letnich (od III do X), uszk./m-c
$c_{a(z)}$	– częstość uszkodzeń armatury w miesiącach zimowych (od XI do II), uszk./m-c
$d$	– średnica rurociągu, mm
$G$	– wskaźnik uszkodzeń górniczych, %
$h$	– zagłębienie przewodu, m p.p.t.
$H$	– wysokość ciśnienia wody, MPa
$\Delta H$	– dobowe zmiany ciśnienia, MPa
$K_g$	– wskaźnik gotowości sieci wodociągowej lub jej części
$K_{gj}$	– wskaźnik gotowości odniesiony do 1 km przewodów wodociągowych
$K_w$	– wymagany wskaźnik gotowości
$K_{nu}$	– średni jednostkowy koszt naprawy złącza rurociągów, zł
$K_{np}$	– średni jednostkowy koszt naprawy pęknięcia lub perforacji rurociągów, zł
$K_{ZN}$	– średni jednostkowy koszt naprawy zasuw, zł

$K_{ZW}$	– średni jednostkowy koszt wymiany zasuw, zł
$K_{HN}$	– średni jednostkowy koszt naprawy hydrantu, zł
$K_{HW}$	– średni jednostkowy koszt wymiany hydrantu, zł
$K_i$	– całkowity roczny koszt naprawy uszkodzeń przewodu o średnicy $d$ i długości $l$ , zł/a
$K_c$	– całkowity roczny koszt naprawy uszkodzeń sieci wodociągowej zbudowanej z $n$ przewodów o różnych średnicach, zł/a
$l$	– długość rurociągu o określonej średnicy, km
$L$	– całkowita długość rurociągów, km
$L_{sr}$	– średnia długość rurociągów w czasie $\Delta t$ obserwacji, km
$M$	– liczba mieszkańców
$n$	– ogólna liczba uszkodzeń rurociągów; $n = u + p + o$ , szt.
$u$	– liczba uszkodzeń złączy rur, szt.
$p$	– liczba uszkodzeń wskutek pęknięć rurociągów, szt.
$o$	– liczba perforacji (wzrów korozyjnych) rur, szt.
$n_G$	– ogólna liczba uszkodzeń rurociągów spowodowanych wpływem szkód górniczych, szt.
$N$	– ogólna liczba elementów nieliniowych (armatury); $N = N_Z + N_H$ , szt.
$N_Z$	– ogólna liczba zasuw, szt.
$N_H$	– ogólna liczba hydrantów, szt.
$N_{sr}$	– średnia liczba elementów nieliniowych (armatury) w czasie $\Delta t$ obserwacji, szt.
$O_s$	– obciążenie sieci wodociągowej, $m^3/(km \cdot d)$
$Q$	– natężenie przepływu wody, $m^3/h$
$R$	– współczynnik korelacji zmiennych
$R_{kr}$	– wartość krytyczna współczynnika korelacji dla poziomu istotności $\alpha = 0,1$
$S$	– wskaźnik strat wody, %, $dm^3/(M \cdot d)$
$S_j$	– wskaźnik jednostkowych strat wody, $m^3/(km \cdot d)$
$S_w$	– wskaźnik strat wody i zużycia na potrzeby własne systemu wodociągowego, %, $dm^3/(M \cdot d)$ , $m^3/(km \cdot d)$
$T_p$	– średni czas pracy między uszkodzeniami, doby
$T_c$	– średni całkowity czas naprawy jednego uszkodzenia przewodu, h
$T_{on}$	– średni czas organizacji naprawy uszkodzenia, h
$T_n$	– średni czas właściwej naprawy uszkodzenia, h
$T_{pp}$	– średni czas trwania prac porządkowych po zakończeniu naprawy, h
$T_o$	– średni czas odnowy, h
$T_1$	– średni czas wypływu wody z uszkodzonego przewodu, h
$T_w$	– średni czas wstrzymania dopływu wody do odbiorców, h
$W_i$	– wskaźnik cen (inflacja, deflacja), %
$V$	– objętość, $m^3$

$\alpha$	– poziom istotności
$\kappa$	– strumień ogólnych kosztów naprawy uszkodzeń przewodu o średnicy $d$ i długości $l$ ; $\kappa = \kappa_r + \kappa_a$ , zł/(km·a)
$\kappa_r$	– strumień kosztów naprawy rurociągu jw., zł/(km·a)
$\kappa_u$	– strumień kosztów naprawy złączy rurociągu jw., zł/(km·a)
$\kappa_p$	– strumień kosztów naprawy pęknięć i perforacji rurociągu jw., zł/(km·a)
$\kappa_a$	– strumień kosztów naprawy armatury przewodu jw., zł/(km·a)
$\kappa_Z$	– strumień kosztów naprawy i wymiany zasuw na przewodzie jw., zł/(km·a)
$\kappa_H$	– strumień kosztów naprawy i wymiany hydrantów na przewodzie jw., zł/(km·a)
$\kappa_s$	– średni strumień kosztów naprawy uszkodzeń sieci zbudowanej z $n$ przewodów o różnych średnicach, zł/(km·a)
$\kappa_{sr}$	– średni strumień kosztów naprawy uszkodzeń rurociągów sieci jw., zł/(km·a)
$\kappa_{su}$	– średni strumień kosztów naprawy uszkodzeń złączy sieci jw., zł/(km·a)
$\kappa_{sp}$	– średni strumień kosztów naprawy pęknięć i perforacji sieci jw., zł/(km·a)
$\kappa_{sa}$	– średni strumień kosztów naprawy uszkodzeń armatury sieci jw., zł/(km·a)
$\kappa_{sZ}$	– średni strumień kosztów naprawy i wymiany zasuw na sieci jw., zł/(km·a)
$\kappa_{sH}$	– średni strumień kosztów naprawy i wymiany hydrantów na sieci jw., zł/(km·a)
$\lambda$	– ogólna intensywność uszkodzeń rurociągów; $\lambda = \lambda_u + \lambda_p + \lambda_o$ , uszk./(km·a)
$\lambda_u$	– intensywność uszkodzeń złączy rur, uszk./(km·a)
$\lambda_p$	– intensywność pęknięć rurociągów, uszk./(km·a)
$\lambda_o$	– intensywność perforacji materiału rur, uszk./(km·a)
$\lambda_{po}$	– intensywność pęknięć i perforacji rurociągów; $\lambda_{po} = \lambda_p + \lambda_o$ , uszk./(km·a)
$\lambda_{(l)}$	– ogólna intensywność uszkodzeń rurociągów w miesiącach wiosenno-letnich (od III do X), uszk./(km·a)
$\lambda_{(z)}$	– ogólna intensywność uszkodzeń rurociągów w miesiącach zimowych (od XI do II), uszk./(km·a)
$\lambda_{po(l)}$	– intensywność pęknięć i perforacji rurociągów w miesiącach wiosenno-letnich (od III do X), uszk./(km·a)
$\lambda_{po(z)}$	– intensywność pęknięć i perforacji rurociągów w miesiącach zimowych (od XI do II), uszk./(km·a)
$\lambda_a$	– ogólna intensywność uszkodzeń armatury, uszk./a
$\lambda_Z$	– ogólna intensywność uszkodzeń zasuw; $\lambda_Z = \lambda_{ZN} + \lambda_{ZW}$ , uszk./a
$\lambda_{ZN}$	– intensywność naprawy uszkodzonych zasuw, uszk./a
$\lambda_{ZW}$	– intensywność wymiany uszkodzonych zasuw, uszk./a
$\lambda_H$	– ogólna intensywność uszkodzeń hydrantów; $\lambda_H = \lambda_{HN} + \lambda_{HW}$ , uszk./a

- $\lambda_{HN}$  – intensywność naprawy uszkodzonych hydrantów, uszk./a  
 $\lambda_{HW}$  – intensywność wymiany uszkodzonych hydrantów, uszk./a  
 $\lambda_{Z(l)}, \lambda_{H(l)}$  – ogólna intensywność uszkodzeń zasuw i hydrantów w miesiącach wiosenno-letnich (od III do X), uszk./a  
 $\lambda_{Z(z)}, \lambda_{H(z)}$  – ogólna intensywność uszkodzeń zasuw i hydrantów w miesiącach zimowych (od XI do II), uszk./a  
 $\lambda_G$  – ogólna intensywność uszkodzeń rurociągów spowodowanych wpływem szkód górniczych, uszk./ $(\text{km}\cdot\text{a})$   
 $\mu$  – intensywność odnowy, odn./a

## 1. Wprowadzenie

Projektowanie, eksploatację i modernizację współczesnych systemów zaopatrzenia w wodę opiera się nie tylko na analizie techniczno-ekonomicznej, ale również niezawodnościowej. Celem badań niezawodności [95] systemu wodociągowego jest m.in.: wykrycie „słabych ogniw” systemu, poznanie czynników powodujących uszkodzenia i podjęcie działań mających na celu ich eliminację, analiza warunków eksploatacji i ich wpływu na niezawodność systemu, określenie kryteriów uszkodzeń i stanów granicznych, uwzględnienie badań niezawodności w dokumentacji technicznej, a także ocena kosztów eksploatacji (w tym kosztów naprawy uszkodzeń) w dowolnych okresach.

Najbardziej kapitałochłonnym elementem systemu wodociągowego jest sieć wodociągowa, której koszt stanowi ok. 70% jego wartości. Jest ona istotnym elementem na drodze od ujęcia wody do jej odbiorców i ma znaczący wpływ na funkcjonowanie całego systemu wodociągowego.

Dokonanie oceny niezawodności sieci wodociągowych jest skomplikowane i trudne, spełniają one bowiem kilka funkcji jednocześnie (dostarczenie wody do odbiorców w wymaganej ilości, o wymaganej jakości i pod wymaganym ciśnieniem) i mają złożoną strukturę (układy zamknięte), wykonane są z różnych materiałów, mają różne średnice i długości przewodów, różne uzbrojenie itp. Sieci wodociągowe są zróżnicowane technicznie, ciągle modernizowane i pracują ze zmiennym natężeniem przepływu i ciśnieniem wody w przewodach. Występujące losowo uszkodzenia elementów sieci mają różnorodny wpływ na niezawodność dostawy wody do odbiorców. Okresowe braki wody lub dostawa wody o nieodpowiedniej jakości mogą obejmować cały system, znaczną jego część lub mogą mieć charakter lokalny. Niekiedy skutki uszkodzeń mogą być niezauważone przez odbiorców wody.

Oceną niezawodności sieci wodociągowych zajmuje się wiele ośrodków naukowych w Polsce i na świecie. Podstawą oceny są badania prowadzone w trakcie eksploatacji systemów wodociągowych. Opublikowane dotychczas przez różnych autorów dane o awaryjności sieci wodociągowych wielu miast Polski są często trudne do porównania, a zwłaszcza do uogólnienia przede wszystkim z powodu stosowania niepełnej i niejednolitej metody rejestracji uszkodzeń (ich rodzajów, przyczyn, a zwłaszcza skutków) przez użytkowników sieci wodociągowych.

Uogólnienie dotyczące określenia wpływu różnych czynników na poziom niezawodności sieci wodociągowych i skutki ich zawodnego działania wymaga wieloletnich badań i analiz działania sieci wodociągowych w wielu miastach, prowadzonych według jednolitej metodyki. Między innymi z tych powodów podjęto badania, których wyniki przedstawiono w niniejszej pracy.



Monografię tę poświęcono omówieniu wpływu takich czynników, jak: wysokość tłoczenia pompowni i zmiany ciśnienia w sieci, rodzaj materiału i średnice rurociągów, czas eksploatacji i okres budowy przewodów, rodzaj uszkodzeń, warunki gruntowe (tereny szkód górniczych i pozostałe) i in. na uszkodzalność przewodów, czas trwania odnowy, koszty naprawy uszkodzeń, sieciowe straty wody i poziom niezawodności sieci wodociągowych. Uzyskane rezultaty potwierdziły celowość i konieczność prowadzenia systematycznych badań niezawodności, gdyż – wraz z analizą stanu technicznego i hydraulicznego sieci – stanowią podstawowe źródło informacji umożliwiających podejmowanie optymalnych decyzji w zakresie projektowania, eksploatacji i modernizacji sieci wodociągowych.

## 2. Przegląd piśmiennictwa

Sieć wodociągowa, jako najkosztowniejszy element systemu zaopatrzenia w wodę, powinna się charakteryzować dużą niezawodnością działania i niskimi kosztami eksploatacji. Teoria niezawodności w dziedzinie wodociągów stosowana jest od lat 60. ubiegłego wieku, a prekursorem jej zastosowania był prof. N.N. Abramow. Był on autorem wydanej pierwszej w świecie monografii [1] poświęconej zagadnieniom niezawodności systemów wodociągowych. W Polsce pierwsze prace w tym zakresie opublikowali Z. Hoffman [23] oraz W. Petrozolin [88] i dotyczyły one uszkodzalności sieci wodociągowych w Poznaniu i Warszawie.

Celem badań niezawodności sieci wodociągowych [95] jest m.in. uzyskanie danych niezbędnych do wyznaczenia wartości wskaźników niezawodności umożliwiających analizę warunków eksploatacji i ich wpływu na niezawodność sieci i jej elementów, wykrycie „słabych ogniw” i poznanie czynników powodujących uszkodzenia oraz podjęcie działań mających na celu ich eliminację, a także ocenę skutków, w tym ekonomicznych, zawodnego działania sieci. Podstawą oceny niezawodności działania sieci wodociągowych i podejmowania racjonalnych decyzji w zakresie projektowania, eksploatacji i modernizacji sieci są wyniki wieloletnich i kompleksowych badań inwentaryzacyjnych i eksploatacyjnych stanu technicznego i hydraulicznej sprawności istniejących sieci oraz warunków ich działania [75, 115, 117].

Badaniami niezawodności działania sieci wodociągowych zajmują się różne ośrodki naukowe. Prezentowane wyniki dotyczą przede wszystkim badań uszkodzalności sieci i jej elementów, głównie pod kątem przyczyn oraz liczby i rodzajów uszkodzeń. W literaturze krajowej nie ma danych dotyczących badań zarówno wpływu wysokości i zmian ciśnienia w sieci wodociągowej na częstość i rodzaj uszkodzeń jej elementów, sieciowe straty wody, jak i na koszty eksploatacji wynikające z konieczności naprawy uszkodzeń.

Większość badaczy zajmujących się niezawodnością działania sieci wodociągowych zwraca uwagę na niejednorodną i często niepełną rejestrację (dokumentację) uszkodzeń przez użytkowników sieci, co uniemożliwia dokonanie pełnej oceny, zwłaszcza skutków zawodnego działania sieci wodociągowych. Bardzo różny jest przy tym zakres i sposób oceny wskaźników niezawodności przez poszczególnych autorów badań, co utrudnia, a często wręcz uniemożliwia, dokonywanie porównań i uogólnień uzyskiwanych rezultatów. Trudności te spowodowane są ponadto zróżnicowaniem warunków technicznych i warunków eksploatacji poszczególnych systemów dystrybucji wody.

Prezentowane w literaturze wyniki badań intensywności uszkodzeń miejskich systemów dystrybucji wody odnoszone są zazwyczaj do sieci wodociągowej ogółem bądź

do poszczególnych jej rodzajów (sieci magistralne, sieci rozdzielcze, przyłącza domowe), bądź do przewodów (z podziałem na materiał, średnice itp.) w ramach poszczególnych rodzajów sieci. Bardzo rzadko natomiast określana jest intensywność uszkodzeń przewodów z podziałem na rurociągi, tj. elementy liniowe i armaturę przewodów, czyli elementy nieliniowe.

Ze studiów dostępnej w tym zakresie literatury wynika, że dane o intensywności uszkodzeń sieci wodociągowej ogółem dotyczą niekiedy tylko sieci magistralnej i rozdzielczej, niekiedy także i przyłączy, a często nie ma jednoznacznej informacji na ten temat. Ponadto niektórzy autorzy, określając intensywność uszkodzeń sieci, uwzględniają tylko liczbę uszkodzeń rurociągów, inni także liczbę uszkodzeń armatury (zasuw, hydrantów itp.). Odnoszenie liczby uszkodzeń armatury do długości przewodów, a nie do ogólnej liczby armatury zabudowanej na sieci, nie jest właściwe, gdyż nie odzwierciedla rzeczywistego stopnia awaryjności zarówno poszczególnych elementów, jak i całości sieci. Nie jest to ponadto poprawne ze względu na analizę skutków uszkodzeń sieci (niedobór wody u odbiorców, straty wody, koszty naprawy itp.), które są zazwyczaj nieporównywalnie mniejsze w wypadku uszkodzeń armatury czy przyłączy domowych, niż rurociągów rozdzielczych i magistralnych. Z tego powodu w tab. 2.1 zestawiono tylko te dane z publikacji krajowych i zagranicznych, w których intensywność uszkodzeń była określona w sposób jednoznaczny i miarodajny. Należy jednak podkreślić, że publikacje te stanowiły mniejszość w dostępnym piśmiennictwie.

Prezentowane wyniki dotyczyły badań miejskich sieci wodociągowych (magistralnych i rozdzielczych) w Polsce na terenach nieobjętych działalnością górnictwem [3, 7, 12, 18, 19, 20, 58, 67, 86, 90, 107] i częściowo na terenach szkód górniczych [59, 132] oraz w Niemczech i innych krajach [6, 21, 63, 74, 87, 111, 114, 121]. W mniejszym stopniu przedmiotem badań była awaryjność przyłączy domowych w kraju [11, 12, 20, 34, 90, 131] i za granicą [6, 63, 87, 111, 114].

Przy stosunkowo dużym zróżnicowaniu intensywności uszkodzeń poszczególnych sieci wodociągowych można stwierdzić, że:

- najmniejszą awaryjnością charakteryzowały się sieci magistralne, a największą przyłącza domowe,
- awaryjność sieci wodociągowych na terenach objętych działalnością górnictwem była częstsza niż sieci na pozostałych terenach,
- awaryjność sieci wodociągowych w Polsce i we wschodnich landach Niemiec była porównywalna, ale większa niż w landach zachodnich i innych krajach świata.

Aby wyniki badań można było wykorzystać w praktyce, w tym w procesie nowoczesnej i racjonalnej organizacji eksploatacji systemów dystrybucji wody [13, 14], należy prowadzić systemowe badania sieci wodociągowych [69]. Niezbędne jest dokonywanie bardziej szczegółowej oceny, uwzględniającej podział przewodów nie tylko ze względu na ich funkcje, ale i rozwiązania konstrukcyjne (materiał, średnice, sposób połączeń, rodzaj uzbrojenia itp.), parametry pracy, czy warunki eksploatacji.

Bardzo ważnym kryterium jest materiał, z jakiego są wykonane przewody. Wyniki obserwacji (tab. 2.1) przewodów z żeliwa szarego, stali, azbestocementu i tworzyw sztucznych (PVC, PE HD), zarówno w kraju [3, 20, 86], jak i za granicą [6, 51, 63, 114] wskazują, iż największą awaryjność miały przewody z żeliwa szarego, a najmniejszą przewody z tworzyw sztucznych. Różna była intensywność uszkodzeń rurociągów wykonanych z różnych materiałów w zależności od ich średnicy [1, 18, 20, 51, 57, 66, 72, 86, 107, 109, 123, 128]. Z danych literaturowych zestawionych w tab. 2.2 wynika, że najbardziej narażone na uszkodzenia były rurociągi o mniejszych średnicach. Dotyczyło to sieci rurociągów żeliwnych, stalowych oraz sieci ogółem, ze względu na przeważający udział przewodów z żeliwa i stali w eksploatowanych systemach wodociagowych.

Na skutki uszkodzeń sieci, takie jak straty wody, koszty naprawy czy liczba odbiorców pozbawionych dostawy wody, znaczący wpływ ma także rodzaj i wielkość uszkodzeń przewodów. Stosowana w literaturze klasyfikacja uszkodzeń przewodów jest niekiedy bardzo różnorodna i niejednorodna. Racjonalne jest więc wyróżnienie uszkodzeń rurociągów i uszkodzeń armatury. Uszkodzenia rurociągów występują głównie wskutek rozszczelniania złączy (zwłaszcza kielichowych), pęknięcia poprzecznego i podłużnego rur i kształtek oraz perforacji (wżerów korozyjnych) materiału rur. Badania [1, 3, 6, 18, 19, 20, 59, 72, 81, 86, 88, 90, 103, 107, 109, 131] wykazały, że w różnych miastach dominują różne rodzaje uszkodzeń. Uszkodzenia armatury stanowią zazwyczaj niewielki udział w całkowitej liczbie uszkodzeń przewodów. Przeważają uszkodzenia rurociągów, których rodzaj zależy od wielu czynników (m.in. wieku przewodów, rodzaju ich połączeń, jakości materiałów i wykonawstwa, warunków i sposobu eksploatacji itp.), na co zwraca się uwagę w dostępnej literaturze, ale niestety nie są one opisywane ilościowo. A szkoda, gdyż znajomość intensywności uszkodzeń z uwzględnieniem rodzaju uszkodzeń rurociągów i armatury ułatwia podejmowanie decyzji o zakresie, sposobie i kolejności modernizacji przewodów wodociagowych. Z własnych badań na przykład wynika, że stare rurociągi z żeliwa szarego ulegały głównie pęknięciom i perforacji wskutek korozji, co świadczy o zużyciu materiału w czasie kilkudziesięcioletniej ich eksploatacji.

W literaturze brak jest ponadto ilościowej oceny intensywności różnego rodzaju uszkodzeń w odniesieniu do poszczególnych średnic rurociągów i armatury. Takie analizy są jednak konieczne, gdyż na wymienione skutki uszkodzeń duży wpływ ma nie tylko średnica, lecz także rodzaj i wielkość uszkodzeń elementów przewodów.

Bardzo ważne, a jednocześnie bardzo trudne lub niekiedy wręcz niemożliwe, jest określenie przyczyn występowania uszkodzeń przewodów wodociagowych. Jest to związane z losowym charakterem większości uszkodzeń oraz różnorodnością czynników oddziałujących na przewody. Przyczyny awarii mają zazwyczaj związek zarówno z projektowaniem, wykonawstwem, jak i eksploatacją, i mogą nakładać się na siebie. Najczęściej wymieniane w literaturze przyczyny uszkodzeń przewodów, to: wieloletnia eksploatacja, niedbała i niezgodna z zasadami budowa i eksploatacja, wady mate-

riałowe rur, kształtek i armatury, obciążenia dynamiczne, uderzenia hydrauliczne, korozyjność wody i gruntu, nieostrożne prowadzenie robót w pobliżu przewodów, przemarzanie gruntu, wpływ eksploatacji górniczej [1, 3, 5, 6, 7, 18, 19, 20, 57, 58, 59, 66, 67, 68, 72, 76, 81, 83, 86, 88, 89, 90, 103, 107, 108, 109, 110, 112, 113, 114, 131, 132]. Przyczyny uszkodzeń podawane były na ogół w formie opisowej, a tylko w nielicznych wypadkach podejmowano próby określenia ilościowego ich związku z intensywnością uszkodzeń. I tak na przykład wykazano nieznaczne korelacje lub ich brak między wiekiem przewodów a intensywnością ich uszkodzeń [7, 20, 67, 107], pomimo obserwowanego na ogół wzrostu awaryjności podczas eksploatacji. Wzrost ten tłumaczono niewłaściwym wykonawstwem i nieodpowiednią jakością materiałów stosowanych do budowy nowszych sieci, a także nasileniem się innych zewnętrznych przyczyn uszkodzeń przewodów. Badanie tendencji zmian intensywności uszkodzeń przewodów w czasie trwania eksploatacji jest konieczne, gdyż daje podstawy do prognozowania intensywności uszkodzeń z kilkuletnim wyprzedzeniem.

W pracy [67] wykazano korelacje świadczące o spadku liczby uszkodzeń przewodów ze wzrostem temperatury powietrza. Koreponduje to ze spostrzeżeniami wielu badaczy o wzroście częstości uszkodzeń przewodów w okresie jesienno-zimowym [7, 18, 20, 57, 66, 107, 108, 109, 110], zwłaszcza płytko ułożonych.

W dotychczasowych opracowaniach brakuje analiz awaryjności przewodów wodociągowych ze względu na ich lokalizację (ulicę). Na podstawie wyników takiej oceny można wnioskować o wpływie na uszkaźalność przewodów także takich czynników, jak: jakość wykonawstwa, warunki gruntowe i wodne, głębokość ułożenia przewodów, wielkość obciążeń dynamicznych wywołanych ruchem pojazdów, wpływ prądów błądzących, rodzaj prac ziemnych prowadzonych w rejonie trasy przewodów. Prowadzenie tego rodzaju analiz jest konieczne zwłaszcza na terenach eksploatacji górniczej, gdzie przewody ułożone w poszczególnych ulicach narażone są na zmieniające się wielkości obniżeń i kierunki przebiegu izolinii obniżeń terenu względem trasy przewodów.

W literaturze krajowej nie ma także doniesień z badań intensywności uszkodzeń armatury przewodów wodociągowych, dlatego w tab. 2.1 zawarto jedynie dane z badań wykonanych za granicą [6, 51, 114] i badań własnych [24, 28]. Powodem jest (najczęściej) brak danych o liczbie zainstalowanej armatury (zasuw, hydrantów i in.), co uniemożliwia obliczenie wartości intensywności jej uszkodzeń.

Na szczególne podkreślenie zasługuje jeszcze raz brak w dostępnej literaturze, z wyjątkiem [24–30, 45], relacji z badań eksploatacyjnych wpływu wysokości i zmian ciśnienia tłoczenia pompowni i ciśnienia w sieci wodociągowej na uszkaźalność przewodów. Wprawdzie, zwłaszcza w ostatnim czasie, w wielu publikacjach zwraca się uwagę na konieczność stabilizacji ciśnienia w sieci, a w przedsiębiorstwach wodociągowych podejmowane są różne działania w tym zakresie, to dotychczas nie określono ilościowych związków pomiędzy uszkaźalnością elementów sieci a ciśnieniem na podstawie wyników badań prowadzonych podczas eksploatacji systemów dystrybucji wody.

Problem jest szczególnej wagi, gdyż wysokość i zmiany ciśnienia w sieci wpływają jednocześnie na wielkość sieciowych strat wody oraz koszty naprawy uszkodzeń.

Drugim parametrem, oprócz intensywności uszkodzeń, istotnie wpływającym na poziom niezawodności działania sieci wodociągowej jest czas usuwania uszkodzeń przewodów. Zależy on od wielu czynników, z których najważniejsze to: rodzaj przewodów (średnica, materiał, stan techniczny), typ uszkodzonych elementów, rodzaj i wielkość uszkodzeń, zagłębienie przewodów, warunki gruntowe i wodne, rodzaj pokrycia terenu, sposób organizacji naprawy, kwalifikacje i wyposażenie w sprzęt i materiały zespołu naprawiającego, warunki atmosferyczne. Należy zawsze dążyć do skrócenia całkowitego czasu usuwania uszkodzeń, w tym jego składników (czas organizacji naprawy, czas naprawy właściwej, odnowy, czas trwania prac porządkowych, czas wypływu wody przez uszkodzenie, czas wstrzymania dostawy wody do odbiorców). Mają one bowiem bezpośredni wpływ m.in. na: niedogodności i straty spowodowane ograniczeniem bądź wstrzymaniem dostawy wody do użytkowników, straty wody w sieci wodociągowej, koszty naprawy uszkodzeń, utrudnienia i zagrożenia w organizacji ruchu pieszego i kołowego itp.

Z doświadczeń własnych i innych autorów wynika, że w wielu przedsiębiorstwach wodociągowych niedoceniany jest wpływ czasu usuwania uszkodzeń na ich skutki, czego efektem jest często brak pełnej i wiarygodnej dokumentacji uszkodzeń w tym zakresie. W konsekwencji w literaturze krajowej nie ma publikacji analizujących to zagadnienie w sposób kompleksowy, z wyjątkiem częściowo pracy [11], w której zawarto analizę czasu usuwania uszkodzeń przyłączy domowych. W odniesieniu do sieci magistralnych i rozdzielczych tylko w nielicznych publikacjach podane są wartości czasu naprawy właściwej i całkowitej niesprawności jako wartości średnie dla tych sieci [19, 107], albo z podziałem na średnice przewodów [20], albo dla wybranych – pojedynczych przypadków uszkodzeń rurociągów [18, 128]. Nie ma w piśmiennictwie szczegółowych analiz uwzględniających wpływ różnorodnych czynników na składniki całkowitego czasu usuwania uszkodzeń, a nieliczne, jak [62], dotyczą oceny skutków długiego czasu ich trwania.

Wobec powyższego, a także ze względu na niezwykle złożoną strukturę eksploatacyjną oraz niezawodnościową sieci wodociągowych, otwarty pozostaje dotychczas problem metod oceny ich poziomu niezawodności. Przedstawione w publikacjach [13, 56, 57, 60, 62, 72, 106, 123, 125, 126, 127, 128, 129] rozważania dotyczą metod oceny poziomu niezawodności eksploatowanych systemów zaopatrzenia w wodę i ich elementów składowych na podstawie oceny stacjonarnego wskaźnika gotowości – obliczanego na podstawie znajomości średnich wartości czasu pracy między uszkodzeniami i czasu odnowy, oraz uogólnionego wskaźnika gotowości – uwzględniającego także niedobory wody występujące w systemie. Brak danych o czasie trwania odnowy uszkodzeń sieci wodociągowych i wielkości niedoborów wody był powodem, iż tylko w nielicznych publikacjach, jak [72, 107, 129], zawarto ocenę poziomu niezawodności sieci przewodów z wykorzystaniem stacjonarnego wskaźnika gotowości.

Otwarty pozostaje także problem ustalania wymaganego poziomu niezawodności systemu wodociągowego i jego elementów składowych [123, 124, 125, 126], zwłaszcza w oparciu o rachunek ekonomiczny, który powinien uwzględniać koszty zawodnego działania oraz koszty przedsięwzięć zapewniających uzyskanie wymaganego poziomu niezawodności systemu.

Na koszty zawodnego działania sieci wodociągowej wpływają m.in. koszty ponoszone na naprawę zaistniałych uszkodzeń. Niestety, w literaturze krajowej nie ma doniesień z badań kosztów naprawy uszkodzeń przewodów wodociągowych w warunkach rzeczywistych. Znajomość oraz możliwość prognozowania kosztów naprawy różnego rodzaju uszkodzeń rurociągów i armatury wodociągowej jest także przydatna w praktyce m.in. do planowania, z kilkuletnim wyprzedzeniem, środków finansowych na naprawę sieci oraz do podejmowania optymalnych decyzji w zakresie eksploatacji i modernizacji sieci wodociągowej, z uwzględnieniem rachunku ekonomicznego.

Objawem i skutkiem zawodnego działania sieci wodociągowych są ponadto duże straty wody wskutek wycieków przez nieszczelności oraz z uszkodzonych rurociągów i armatury. Jest to problem większości wodociągów na świecie. W Polsce skala problemu uwidoczniła się szczególnie w okresie gospodarki rynkowej. Z zestawionych w tab. 2.3 wskaźników całkowitych ( $S_w$ ) strat wody (straty w sieci i zużycie na potrzeby własne systemu) i sieciowych ( $S$ ) strat wody w wybranych krajach i miastach świata widać, że wskaźniki strat wody w Polsce są porównywalne ze wskaźnikami strat stwierdzonymi w Rumunii, na Słowacji, Węgrzech i we wschodnich landach (i miastach) Niemiec, a większe niż w zachodnich landach (i miastach) Niemiec oraz innych państwach zachodnich. Powodem znacznych strat wody w Polsce, stanowiących niekiedy 50% i więcej objętości wody wtłaczanej do sieci wodociągowej, jest zły stan techniczny przewodów wskutek wieloletnich zaniedbań w remontach, modernizacji i rozbudowie sieci, a także nieodpowiednia jakość materiałów, armatury i wykonawstwa w okresie gospodarki planowej. Na wysoki poziom strat wody wpływają także duże wysokości i wahania ciśnienia w sieciach wodociągowych. Dotychczas jednak nie określono ilościowego związku między ciśnieniem a sieciowymi stratami wody na podstawie badań eksploatacyjnych.

Zarówno w literaturze krajowej [3, 15, 16, 17, 68, 85, 90, 116, 118, 119], jak i zagranicznej [2, 9, 10, 21, 22, 53, 54, 73, 74, 84, 114, 121, 122] można znaleźć opis prowadzonych prac studialnych, badawczych, a także działań podejmowanych w celu wczesnego wykrywania, zapobiegania i eliminowania nadmiernych strat wody w systemach wodociągowych.

W podsumowaniu analizy przytoczonych wyżej materiałów źródłowych należy stwierdzić, że zakres badań wpływu wielu różnorodnych czynników na parametry i koszty eksploatacyjne sieci wodociągowych w Polsce nie jest zadowalający. Dlatego celem prezentowanej monografii jest poszerzenie wiedzy na ten temat oraz opracowanie podstaw metodycznych oceny i przewidywania uszkaźalności oraz skutków, zwłaszcza finansowych, zawodnego działania sieci wodociągowych.

Tabela 2.1. Zestawienie intensywności uszkodzeń, intensywności odnowy i czasu odnowy przewodów wodociągowych na podstawie badań własnych<sup>1)</sup> i danych z literatury  
 Table 2.1. Rate of failure, rate of rehabilitation and time of rehabilitation for water-pipe networks, established in the present study (referred to as <sup>1)</sup>) and reported in the literature

Miasto/kraj	Intensywność uszkodzeń $\lambda$ uszk./(km·a)			Intensywność odnowy $\mu$ odn./a
	$\lambda_{\min}$	$\lambda_{\text{sr}}$	$\lambda_{\max}$	
<b>SIEĆ WODOCIĄGOWA OGÓLEM</b>				
Oleśnica (bez przyłączy i armatury) <sup>1)</sup> (85% żel., 11% PVC, 4% PE):				
1981–1992 ( $H = 0,50$ MPa)	–	0,88	–	–
1993–2000 ( $H = 0,40$ MPa)	0,30	0,37	0,53	–
Wrocław, rejon 2 (bez przyłączy i armatury) <sup>1)</sup> (76% żel., 5% PVC, 5% PE, 13% stal i AC):				
1990–1994 ( $H = 0,42$ MPa)	0,77	0,87	0,99	–
1995–1998 ( $H = 0,25$ MPa)	0,37	0,61	0,94	–
Kłodzko (bez przyłączy i armatury) <sup>1)</sup> (58% żel., 24% stal, 5% PVC, 11% PE):				
1992–VIII 1997 ( $H = 0,70$ MPa)	0,20	0,33	0,42	–
IX 1997–1999 ( $H \leq 0,60$ MPa)	0,09	0,20	0,31	–
Brzeg (bez przyłączy i armatury) <sup>1)</sup> (66 % żel., 25% PCW, 8% PE):				
1991–VIII 1996 ( $H = 0,50$ MPa)	0,25	0,30	0,36	1168 ( $T_o = 7,5$ h)
IX 1996–2000 ( $H = 0,45$ MPa)	0,14	0,21	0,36	1413 ( $T_o = 6,2$ h)
Opole (bez przyłączy i armatury) <sup>1)</sup> (57% żel., 29% PVC, 6% PE, 5% AC):				
1996–2001	0,09	0,14	0,21	270–800 (śr. 440)
Warszawa 1959–1982 [20]: ogółem	0,21	0,38	0,50	–
w tym: przewody magistralne	0,23	0,33	0,54	–
przewody rozdzielcze	0,15	0,28	0,40	–
przyłącza domowe	0,38	0,78	1,01	–
Warszawa 1979–1983 [107]:				
przewody magistralne	–	0,40	–	244 ( $T_o \text{ sr} = 35,9$ h)
przewody rozdzielcze	–	0,38	–	288 ( $T_o \text{ sr} = 30,8$ h)
Warszawa 1996–1999 (bez armatury) [12]:				
przewody magistralne	0,19	0,25	0,31	–
przewody rozdzielcze	0,33	0,58	0,71	–
przyłącza domowe	0,49	1,06	1,55	–
Warszawa 1992–1996 [86]:				
przewody rozdzielcze $\phi 80$ – $\phi 250$ (bez armatury) (77% żel. z 1580 km, 11% AC, 7% stal, 5% PVC)	0,46	0,62	0,74	–



Miasto/kraj	Intensywność uszkodzeń $\lambda$ uszk./(km·a)			Intensywność odnowy $\mu$ odn./a
	$\lambda_{\min}$	$\lambda_{\text{sr}}$	$\lambda_{\max}$	
Częstochowa $\phi 80$ – $\phi 1400$ (bez przyłączy) [3]: 1981–1990	0,23	0,34	0,40	–
Polska 1988–1997 (z przyłączami – wg ankiet z 72 przedsiębiorstw wodociągowych) [59]: sieci poza terenami szkód górniczych: żeliwo (50% dł.)	–	0,76	–	–
stal (20%)	–	0,71	–	–
PVC (20%)	–	0,14	–	–
PE HD (4%)	–	0,39	–	–
tereny szkód górniczych – Górny Śląsk: żeliwo (15%)	–	0,82	–	–
stal (65%)	–	2,58	–	–
PVC (8%)	–	0,43	–	–
PE HD (8%)	–	0,77	–	–
Polska 1999–2001 (dla miast z podziałem na liczbę mieszkańców) [100]: przewody magistralne	–	0,23–0,41	–	–
przewody rozdzielcze	–	0,59–1,12	–	–
przyłącza domowe	–	1,06–1,64	–	–
Polska – 10 miast województwa podkarpackiego [102]: przewody magistralne	–	0,0–1,86	–	–
przewody rozdzielcze	–	0,27–3,13	–	–
przyłącza domowe	–	0,15–1,65	–	–
Miasto „B” 2000–2001 (bez armatury) [90]: przewody magistralne ( $l = 25$ km)	0,28	–	0,51	–
przewody rozdzielcze ( $l = 772$ km)	0,73	–	0,79	–
przyłącza domowe ( $l = 552$ km)	0,77	–	0,82	–
Miasto „W” 1995–2002 [90]	0,19 (2002)	–	1,67 (1995)	–
Kielce 1995–1999 (z przyłączami) (77% żel. sz., 12% PVC, 9,5% stal, 1% PE) [58]	0,43	0,54	0,77	–
Białystok 1975–1984 (bez przyłączy) (80% żel.) (36,5% pękn., 40% uszk. złączy) [19]	0,20	0,25	0,32	–
Łódź 1960–1978 (bez przyłączy) ( $\phi 100$ – $\phi 1000$ , głównie żeliwo) [67, 18]	–	0,34	–	–

cd. tab. 2.1

Miasto/kraj	Intensywność uszkodzeń $\lambda$ uszk./( $\text{km}\cdot\text{a}$ )			Intensywność odnowy $\mu$ odn./a
	$\lambda_{\min}$	$\lambda_{\text{sr}}$	$\lambda_{\max}$	
Kraków 1996–2003 [131]: przewody tranzytowe i magistralne ( $\phi 350$ – $\phi 1400$ , $l = 283$ km) (36,5% żel., 55% stal, ~9% PVC i PE)	~0,30	0,36	~0,60	896 ( $T_{o\text{sr}} = 9,8$ h)
przewody rozdzielcze ( $\phi 80$ – $\phi 325$ , $l = 1100$ km) (37% PVC, 30,2% żel. sz., 16,5% stal, 10,4% PE, 5,9% AC)	~0,60	0,84	~1,40	1048 ( $T_{o\text{sr}} = 8,4$ h)
Krynica 1994–2003 [7] przewody magistralne ( $\phi 200$ – $\phi 400$ , $l = 18,8$ km, 52% żel., 48% stal)	0	0,11	0,32	–
przewody rozdzielcze ( $\phi 50$ – $\phi 315$ , $l = 44,2$ km, żel., stal, PVC, PE)	0,24	0,45	0,71	–
Bonn (z armaturą, bez przyłączy) (49% żel. sz. z 740 km, 23% żel. sferoid., 2% stal, 25% tworzywa szt., 1% AC) [121]:				
1975–1984	~0,20	–	~1,70	–
1984–1991	0,70	–	~1,70	–
Niemcy – landy wschodnie 1997 (bez przył.) (39% żel. sz. z 18000 km, 9% żel. sferoid., 16% stal, 19% AC, 17% PVC i PE; wg ankiet z 44 przedsiębiorstw wodociągowych [21]:				
ogółem	~0,05	0,97	2,20	–
w tym pęknięcia	0	0,40	1,10	–
Obszar Erfurtu 1980–1997 (bez armat.) [114] przewody magistralne i rozdzielcze				
ogółem	–	0,54	–	–
w tym: żeliwo szare	–	0,47	–	–
żeliwo sferoidalne	–	0,01	–	–
stal	–	1,88	–	–
PVC	–	0,17	–	–
PE	–	0,08	–	–
AC	–	0,78	–	–
beton	–	0,05	–	–
Niemcy – przew. magistralne i rozdz. [114]:				
stare landy	–	0,15	–	–
nowe landy	–	0,38	–	–

Miasto/kraj	Intensywność uszkodzeń $\lambda$ uszk./(km·a)			Intensywność odnowy $\mu$ odn./a
	$\lambda_{\min}$	$\lambda_{\text{sr}}$	$\lambda_{\max}$	
Niemcy 1995–1996 (59 przeds.) [6]: przewody magistralne i rozdzielcze ogółem ( $L = 47\,000$ km, tj. ok. 10% tej sieci)	–	0,18	–	–
w tym: żeliwo szare	–	0,27	–	–
żeliwo sferoidalne	–	0,03	–	–
stal	–	0,33	–	–
PVC	–	0,04	–	–
PE	–	0,18	–	–
AC	–	0,22	–	–
Rejon Kotbus 1997 [63]: przewody magistralne (ok. 300 km) i rozdzielcze (700 km) ( $\lambda_{\text{gr}} = 0,50$ uszk./(km·a))				
żeliwo	–	0,13	–	–
stal	–	0,55	–	–
PVC	–	0,04	–	–
PE	–	0,17	–	–
AC	–	0,09	–	–
Berlin 1998 [87]: przewody magistralne i rozdzielcze: część wschodnia	–	0,28	–	–
część zachodnia	–	0,08	–	–
Rejon Düren (bez przyłączy) [74] 1980–1996	0,14 (1992)	–	0,42 (1981)	–
<b>SIEĆ WODOCIĄGOWA NA TERENACH SZKÓD GÓRNICZYCH</b>				
Polkowice – os. Sienkiewicza 1991–VIII 1994 <sup>1)</sup>				
sieć rozdzielcza ogółem:	0,72	1,63	2,87	–
w tym szkody górnicze	0,24	0,85	1,43	–
z uwzględnieniem ulic:				
ogółem	0	–	6,95	–
w tym szkody górnicze	0	–	6,06	–
Górny Śląsk 1988–1997 (z przyłączami) (wg ankiet) [59]:				
żeliwo (15% dł.)	–	0,82	–	–
stal (65%)	–	2,58	–	–
PVC (8%)	–	0,43	–	–
PE HD (8%)	–	0,77	–	–

cd. tab. 2.1

Miasto/kraj	Intensywność uszkodzeń $\lambda$ uszk./((km·a)			Intensywność odnowy $\mu$ odn./a
	$\lambda_{\min}$	$\lambda_{\text{sr}}$	$\lambda_{\max}$	
Górny Śląsk [132]:				
Katowice (1977–1994): ogółem	1,57	–	3,94	–
w tym szkody górnicze	0,20	–	1,49	–
Ruda Śląska (1977–1994): ogółem	1,90	–	7,00	–
w tym szkody górnicze	1,10	–	5,60	–
Tychy (1985–1994): ogółem	1,62	–	2,07	–
w tym szkody górnicze	0,03	–	0,12	–
Gliwice (1978–1994): ogółem	1,10	–	3,40	–
w tym szkody górnicze	0	–	0,50	–
Olkusz (1986–1994): ogółem	0,80	–	1,69	–
w tym szkody górnicze	0	–	0,02	–
Chorzów (1990–1994): ogółem	3,38	–	4,44	–
w tym szkody górnicze	0,01	–	0,09	–
<b>PRZEWODY ŻELIWNE</b>				
Wrocław, rejon 1: $\phi 80$ – $\phi 500$ <sup>1)</sup> :				
1990–1994 ( $H = 0,42$ MPa)	0,67	1,10	1,41	–
1995–VI 1997 ( $H = 0,25$ MPa)	0,41	0,62	0,85	–
Wrocław, rejon 2: $\phi 80$ – $\phi 500$ <sup>1)</sup> :				
1990–1994 ( $H = 0,42$ MPa)	0,81	0,89	0,99	–
1995–1998 ( $H = 0,25$ MPa)	0,32	0,60	0,88	–
Kłodzko $\phi 80$ – $\phi 400$ <sup>1)</sup> :				
1992–VIII 1997 ( $H = 0,70$ MPa)	0,30	0,38	0,54	–
IX 1997–1999 ( $H \leq 0,60$ MPa)	0,12	0,22	0,32	–
Brzeg $\phi 80$ – $\phi 500$ <sup>1)</sup> :				
1982–1987	0,23	0,33	0,42	–
Brzeg $\phi 80$ – $\phi 500$ <sup>1)</sup> :				
1991–VIII 1996 ( $H = 0,50$ MPa)	0,30	0,38	0,49	–
IX 1996–2000 ( $H = 0,45$ MPa)	0,10	0,23	0,43	–
Oleśnica $\phi 100$ – $\phi 500$ <sup>1)</sup> :				
1981–1992 ( $H = 0,50$ MPa)	0,56	0,93	1,24	–
1993–2000 ( $H = 0,40$ MPa)	0,35	0,41	0,58	–
Opole $\phi 80$ – $\phi 600$ <sup>1)</sup> :				
1996–2001	0,13	0,21	0,26	–
Polkowice $\phi 80$ – $\phi 250$ (teren szkód gór.) <sup>1)</sup> :				
1986–VIII 1994	0,24	1,19	2,87	–
1991–VIII 1994 ogółem	0,72	1,63	2,87	–
w tym szkody górnicze	0,24	0,85	1,43	–

Miasto/kraj	Intensywność uszkodzeń $\lambda$ uszk./km·a			Intensywność odnowy $\mu$ odn./a
	$\lambda_{\min}$	$\lambda_{\text{sr}}$	$\lambda_{\max}$	
<i>z uwzględnieniem ulic:</i>				
ogółem	0	–	6,95	–
w tym szkody górnicze	0	–	6,06	–
Według [51] $H \leq 0,6$ MPa $\phi 100-\phi 900$	0,79–0,3	0,89–0,32	1,0–0,35	87,6–350,4
Warszawa 1980–1981 [20]:				
przewody magistralne	–	0,25	–	–
przewody rozdzielcze	–	0,39	–	–
Warszawa 1992–1996 [86]				
przewody rozdzielcze (bez armatury)	0,45	0,61	0,72	–
Częstochowa 1981–1990 [3]				
przewody magistralne i rozdzielcze	0,22	0,35	0,44	–
Obszar Erfurtu 1980–1997 (bez armat.) [114]				
przewody magistralne i rozdzielcze	–	0,47	–	–
Niemcy 1995–1996 (59 przedsiębiorstw) [6]				
przewody magistralne i rozdzielcze	–	0,27	–	–
Rejon Kotbus 1997 [63]				
przewody magistralne i rozdzielcze	–	0,13	–	–
<b>PRZEWODY STALOWE</b>				
Kłodzko $\phi 80-\phi 250$ <sup>1)</sup> :				
1992–VIII 1997 ( $H = 0,70$ MPa)	0,12	0,30	0,73	–
IX 1997–1999 ( $H \leq 0,60$ MPa)	0,06	0,21	0,37	–
Według [51] ( $H \leq 0,6$ MPa) $\phi 100-\phi 900$	0,16–0,09	0,25–0,09	0,35–0,1	175,2–350,4
Warszawa 1980–1981 [20]:				
przewody magistralne	–	0,36	–	–
przewody rozdzielcze	–	0,14	–	–
Warszawa 1992–1996 [86]				
przewody rozdzielcze (bez armatury)	0,66	1,05	1,29	–
Częstochowa 1981–1990 [3]				
przewody magistralne	0,23	0,51	0,84	–
Obszar Erfurtu 1980–1997 (bez armat.) [114]				
przewody magistralne i rozdzielcze	–	1,88	–	–
Niemcy 1995–1996 (59 przedsiębiorstw) [6]				
przewody magistralne i rozdzielcze	–	0,33	–	–
Rejon Kotbus 1997 [63]				
przewody magistralne i rozdzielcze	–	0,55	–	–

cd. tab. 2.1

Miasto/kraj	Intensywność uszkodzeń $\lambda$ uszk./((km·a)			Intensywność odnowy $\mu$ odn./a
	$\lambda_{\min}$	$\lambda_{\text{sr}}$	$\lambda_{\max}$	
<b>PRZEWODY z PVC</b>				
Oleśnica $\phi 90\text{--}\phi 160$ <sup>1)</sup> : 1981–1992 ( $H = 0,50$ MPa)	0	0,19	0,51	–
1993–2000 ( $H = 0,40$ MPa)	0	0,07	0,25	–
Wrocław, rejon 2 $\phi 200, \phi 315$ <sup>1)</sup> : 1990–1994 ( $H = 0,42$ MPa)	0	0,15	0,53	–
1995–1998 ( $H = 0,25$ MPa)	0	0,40	1,07	–
Kłodzko $\phi 90\text{--}\phi 160$ <sup>1)</sup> : ( $l = 3,04$ ) 1992–VIII 1997 ( $H = 0,70$ MPa)	0	0,17	0,47	–
( $l = 3,21$ ) X 1997–1999 ( $H \leq 0,60$ MPa)	0	0,27	0,62	–
Brzeg $\phi 90\text{--}\phi 200$ <sup>1)</sup> : 1991–VIII 1996 ( $H = 0,50$ MPa)	0	0,08	0,21	–
IX 1996–2000 ( $H = 0,45$ MPa)	0	0,05	0,05	–
Opole $\phi 90\text{--}\phi 315$ <sup>1)</sup> 1996–2001	0,01	0,04	0,11	–
Polkowice $\phi 90\text{--}\phi 160$ (ter. szkód górniczych) <sup>1)</sup> IX 1994–1999	–	0,30	–	–
Warszawa – przewody rozdzielcze [20] 1980–1981	–	0,144	–	–
Warszawa 1992–1996 [86] przewody rozdzielcze (bez armatury)	0,09	0,25	0,33	–
Częstochowa – przewody rozdzielcze [3]: 1975–1980	0,14	0,43	0,78	–
1981–1990	0,06	0,12	0,22	–
Obszar Erfurtu 1980–1997 (bez armat.) [114] przewody magistralne i rozdzielcze	–	0,17	–	–
Niemcy 1995–1996 (59 przedsiębiorstw) [6] przewody magistralne i rozdzielcze	–	0,04	–	–
Rejon Kotbus 1997 [63] przewody magistralne i rozdzielcze	–	0,04	–	–
<b>PRZEWODY z PE HD</b>				
Oleśnica $\phi 90\text{--}\phi 315$ <sup>1)</sup> 1995–2000	0	0	0	–
Kłodzko $\phi 90\text{--}\phi 160$ <sup>1)</sup> : ( $l = 1,57$ ) 1992–VIII 1997 ( $H = 0,70$ MPa)	0	0	0	–
( $l = 6,41$ ) IX 1997–1999 ( $H \leq 0,60$ MPa)	0	0,07	0,15	–

Miasto/kraj	Intensywność uszkodzeń $\lambda$ uszk./ $(\text{km}\cdot\text{a})$			Intensywność odnowy $\mu$ odn./a
	$\lambda_{\min}$	$\lambda_{\text{sr}}$	$\lambda_{\max}$	
Brzeg $\phi 90$ – $\phi 160$ <sup>1)</sup> : 1991–VIII 1996 ( $H = 0,50$ MPa) IX 1996-2000 ( $H = 0,45$ MPa)	0 0,32	0,25 0,52	0,48 0,81	– –
Opole $\phi 90$ – $\phi 315$ <sup>1)</sup> 1996–2001	0	0,02	0,06	–
Polkowice IX 1994–1999 (teren szkód górniczych) <sup>1)</sup> $\phi 110$ – $\phi 180$ $\phi 225$ – $\phi 315$	– –	0 0,11	– –	– –
Częstochowa – przewody rozdzielcze [3] 1981–1990	0,27	0,69	1,22	–
Obszar Erfurtu 1980–1997 (bez armatury) [114] przewody magistralne i rozdzielcze	–	0,08	–	–
Niemcy 1995–1996 (59 przedsiębiorstw) [6] przewody magistralne i rozdzielcze	–	0,18	–	–
Rejon Kotbus 1997 [63] przewody magistralne i rozdzielcze	–	0,17	–	–
<b>PRZEWODY z AC</b>				
Wrocław, rejon 2: $\phi 100$ , $\phi 125$ <sup>1)</sup> : ( $l = 0,88$ ) 1990–1994 ( $H = 0,42$ MPa) 1995–1998 ( $H = 0,25$ MPa)	0 0	0,57 1,42	1,14 3,41	– –
Kłodzko $\phi 300$ , $\phi 350$ <sup>1)</sup> : ( $l = 1,585$ ) 1992–VIII 1997 ( $H = 0,70$ MPa) IX 1997–1999 ( $H \leq 0,60$ MPa)	0 0	0 0	0 0	– –
Brzeg $\phi 80$ , $\phi 100$ <sup>1)</sup> : ( $l = 0,845$ ) 1991–VIII 1996 ( $H = 0,50$ MPa) IX 1996–2000 ( $H = 0,45$ MPa)	0 0	0,42 0	1,18 0	– –
Opole $\phi 80$ – $\phi 300$ <sup>1)</sup> ( $l = 14,34$ ) 1996-2001	0,07	0,15	0,42	–
Warszawa $\phi 80$ – $\phi 250$ (bez armatury) [86] 1992–1996	0,33	0,64	0,79	–
Częstochowa 1981–1990 [3] przewody magistralne i rozdzielcze	0,08	0,28	0,92	–
Obszar Erfurtu 1980–1997 (bez armatury) [114] przewody magistralne i rozdzielcze	–	0,78	–	–

cd. tab. 2.1

Miasto/kraj	Intensywność uszkodzeń $\lambda$ uszk./((km·a)			Intensywność odnowy $\mu$ odn./a
	$\lambda_{\min}$	$\lambda_{\text{sr}}$	$\lambda_{\max}$	
Niemcy 1995–1996 (59 przeds.) [6] przewody magistralne i rozdzielcze	–	0,22	–	–
Rejon Kotbus 1997 [63] przewody magistralne i rozdzielcze	–	0,09	–	–
<b>PRZYŁĄCZA WODOCIĄGOWE</b>				
Brzeg 1995–2000 <sup>1)</sup>	0,23	0,85	1,87	930–1560 (śr. 1370) [ $T_o = 5,6\text{--}9,4$ h (śr. 6,4)]
Opole 1996–2001 <sup>1)</sup>	0,08	0,14	0,23	200–350 (śr. 258) [ $T_o = 25\text{--}44$ h (śr. 34)]
Polkowice 1991–VIII 1994, rury stalowe (teren szkód górniczych) <sup>1)</sup>	3,09	5,06	7,72	–
Polkowice, rury z PVC (ter. szkód górn.) <sup>1)</sup> : IX 1994–VI 1997 IX 1994–XII 1999	0,0 –	0,34 0,18	0,95 –	– –
Warszawa 1959–1982 [20]	0,38	0,78	1,01	–
Warszawa 1990–1995, rury stalowe oc. i żeliwne $\phi 25\text{--}\phi 250$ [11]: * oczekiwanie na naprawę ** naprawa właściwa	2,77	4,02	5,32	380–470* 600–5800*
Warszawa 1996–1999 [12]	0,49	1,06	1,55	–
Miasto „B” 2000–2001 [90]	0,77	–	0,82	–
Kraków 1996–2003, $\phi 25\text{--}\phi 100$ (56,4% stal z 466 km, 33,3% PE, 9,4% żel. sz., 0,9% PVC) [128]	~1,10	1,27	~1,60	~1070 ( $T_{o,\text{sr}} = 8,2$ h)
Obszar Erfurtu 1980–1997 [114]:				
ogółem	–	2,35 (32,4 uszk./1000 p·a)	–	–
w tym: żeliwo szare	–	1,64	–	–
stal	–	2,40	–	–
PVC	–	4,60	–	–
PE	–	0,48	–	–
AC	–	0,65	–	–
inne	–	3,79	–	–
Niemcy [114]:				
stare landy	–	4,5/1000 p·a	–	–
nowe landy	–	12/1000 p·a	–	–
Niemcy 1995–1996 (59 przeds.) [6]: ogółem	–	7,5/1000 p·a	–	–



Miasto/kraj	Intensywność uszkodzeń $\lambda$ uszk./1000 p·a			Intensywność odnowy $\mu$ odn./a
	$\lambda_{\min}$	$\lambda_{\text{sr}}$	$\lambda_{\max}$	
w tym: stal	–	10,3	–	–
PVC	–	1,5	–	–
PE	–	3,6	–	–
ołów	–	23,4	–	–
inne	–	3,8	–	–
Rejon Kotbus 1997 (24 500 szt.) [63] ( $\lambda_{gr} = 4$ uszk./1000p·a, co dla $l = 12\text{--}15$ m daje $\lambda_{gr} = 0,33\text{--}0,27$ uszk./ km·a)	–	7	–	–
Berlin 1998 [87]:				
część wschodnia	–	17,4	–	–
część zachodnia	–	6,8	–	–
Według [111]: Ameryka 1996	–	~1	–	–
Austria 1996	–	13	–	–
Belgia 1996	–	4	–	–
Francja 1996	–	13	–	–
Holandia 1996	–	5	–	–
Niemcy 1996	–	5	–	–
Singapur 1996	–	3	–	–
Szwajcaria 1996	–	11	–	–
Szwecja 1996	–	2	–	–
<b>ARMATURA OGÓŁEM <math>\lambda_a</math>, uszk./a</b>				
Niemcy 1995–1996 (59 przeds.) [6]:				
ogółem	–	0,013	–	–
zasuwki/klapy	–	0,015	–	–
nawiertki	–	0,009	–	–
hydranty nadziemne	–	0,054	–	–
hydranty podziemne	–	0,019	–	–
Berlin 1998 [87]				
część wschodnia	–	0,0082	–	–
część zachodnia	–	0,0017	–	–
Według [111]: Ameryka 1996	–	0,001	–	–
Austria 1996	–	0,006	–	–
Belgia 1996	–	0,007	–	–
Francja 1996	–	0,018	–	–
Hongkong 1996	–	0,009	–	–
Niemcy 1996	–	0,012	–	–
Singapur 1996	–	~0,001	–	–
Szwajcaria 1996	–	0,003	–	–
Szwecja 1996	–	0,009	–	–

cd. tab. 2.1

Miasto/kraj	Intensywność uszkodzeń $\lambda$ uszk./a			Intensywność odnowy $\mu$ odn./a
	$\lambda_{\min}$	$\lambda_{\text{sr}}$	$\lambda_{\max}$	
<b>ZASUWY ODCINAJĄCE (<math>\lambda_Z</math>)</b>				
Wrocław, rejon 1 <sup>1)</sup> 1990–VI 1997	0,055	0,098	0,150	–
Wrocław, rejon 2 <sup>1)</sup> : 1990–1994 ( $H = 0,42$ MPa)	0,041	0,103	0,190	–
1995–1998 ( $H = 0,25$ MPa)	0,023	0,055	0,096	–
Według [51]	0,088	0,131	0,701	175,2–700,8
Erfurt 1994–1997 [114]	0,006	0,016	0,027	–
Niemcy [114]: stare landy	–	0,013	–	–
nowe landy	–	0,015	–	–
Niemcy 1995/1996 [5]	–	0,015	–	–
<b>HYDRANTY (<math>\lambda_H</math>)</b>				
Wrocław, rejon 1 <sup>1)</sup> 1990–VI 1997	0,013	0,037	0,055	–
Wrocław, rejon 2 <sup>1)</sup> : 1990–1994 ( $H = 0,42$ MPa)	0,006	0,072	0,161	–
1995–1998 ( $H = 0,25$ MPa)	0,041	0,056	0,069	–
Erfurt 1994–1997 [114]	0,030	0,042	0,052	–
Niemcy [114]: stare landy	–	0,018	–	–
nowe landy	–	0,020	–	–
Niemcy 1995/1996 [6]: hydranty nadziemne	–	0,054	–	–
hydranty podziemne	–	0,019	–	–
<b>SYSTEMY WODOCIĄGOWE ŚWIATA</b> według ankiety IWSA 1996 [111]	Przewody uszk./km·a		Przyłącza uszk./1000 p·a	Armatura uszk./a
Niemcy	0,14		5	0,012
Austria	0,14		13	0,006
Szwajcaria	0,31		11	0,003
Szwecja	0,21		2	0,009
Belgia	0,10		4	0,007
Hongkong	0,20		–	0,009
Singapur	0,21		3	~0,001
Francja	0,16		13	0,018
Ameryka	0,05		~1	0,001
Holandia	0,12		5	–

<sup>1)</sup> dane dotyczące sieci w Brzegu, Kłodzku, Oleśnicy, Wrocławiu, Opolu i Polkowicach pochodzą z badań własnych

Tabela 2.2. Ogólna intensywność uszkodzeń rurociągów o różnych średnicach na podstawie danych z literatury  
 Table 2.2. Overall rate of failure for pipes differing in diameter, reported in the literature

d mm	Ogólna intensywność uszkodzeń rurociągów: średnie wartości w okresach badań oraz najmniejsze i największe z poszczególnych lat obserwacji (wartości w nawiasach), uszk./(km·a)										
	Rurociągi żeliwne					Rur. stalowe	Rurociągi ogółem (przewaga żeliwnych)				
	Berlin Zach. 1968–1973 (pęknięcia rur) [66]	Białystok 1970– 1975 [20, 107]	Mysłenice 1970–1979 [109]	Warszawa 1971– 1974 [20, 107]	Według J. Ilina [51, 123]	Według J. Ilina [51, 123]	Kraków 1966–1981 (z armaturą) [57]	Łódź 1960–1978 (bez armatury) [18]	Warszawa 1992–1996 (77% żel., 11,5% AC) [86]	Miasto „S” 1976–1980 [109]	Miasto „U” 1976–1980 [109]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
80	0,048 (0,031–0,063)	0,33	–	–	~0,95 (0,83–1,07)	~0,26 (0,17–0,37)	–	–	1,59 (0,61–2,17)	–	–
100	0,045 (0,035–0,056)	0,22	~0,80 (0,20 – 2,40)	0,36	0,89 (0,79–1,00)	0,25 (0,16–0,35)	0,93 (0,74–0,96)	0,42	0,54 (0,39–0,65)	1,22	0,45
125	0,044 (0,028–0,063)	0,95	–	–	–	–	0,41 (0,35–0,56)	0,47	–	–	0,63
150	0,02 (0,01–0,03)	0,13	~1,00 (0,3–1,72)	0,30	0,81 (0,66–0,95)	0,22 (0,14–0,31)	0,80 (0,60–0,90)	0,24	0,58 (0,43–0,69)	0,96	0,34
200	0,013 (0,006–0,018)	0,16	~0,60 (0,12–1,88)	0,30	0,76 (0,61–0,92)	0,19 (0,13–0,26)	0,60 (0,29–0,71)	0,26	0,77 (0,48–1,03)	0,20	0,71
250	~0,01 (0,01–0,01)	0,11	–	0,15	0,70 (0,53–0,88)	0,17 (0,11–0,22)	0,52 (0,44–0,61)	0,31	0,76 (0,58–0,88)	0,21	0,92
300	–	0,33	–	0,25	0,61 (0,48–0,74)	0,14 (0,11–0,18)	0,39 (0,32–0,55)	0,36	–	1,56	0,11
350	–	0,09	–	–	~0,58 (0,46–0,70)	–	0,59 (0,36–0,81)	0,30	–	0,43	–

cd. tab. 2.2

d mm	Ogólna intensywność uszkodzeń rurociągów: średnie wartości w okresach badań oraz najmniejsze i największe z poszczególnych lat obserwacji (wartości w nawiasach), uszk./(km·a)										
	Rurociągi żeliwne					Rur. stalowe	Rurociągi ogółem (przewaga żeliwnych)				
	Berlin Zach. 1968–1973 (pęknięcia rur) [66]	Białystok 1970– 1975 [20, 107]	Myslenice 1970–1979 [109]	Warszawa 1971– 1974 [20, 107]	Według J. Ilina [51, 123]	Według J. Ilina [51, 123]	Kraków 1966–1981 (z armaturą) [57]	Łódź 1960–1978 (bez armatury) [18]	Warszawa 1992–1996 (77% żel., 11,5% AC) [86]	Miasto „S” 1976–1980 [109]	Miasto „U” 1976–1980 [109]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
400	–	0,50	–	0,31	0,54 (0,44–0,65)	0,13 (0,10–0,16)	0,29 (0,19–0,46)	0,57	–	1,30	0,81
500	–	–	–	0,60	0,46 (0,41–0,50)	0,11 (0,09–0,13)	0,87 (0,57–1,20)	0,32	–	0,12	1,46
600	–	0,06	–	0,65	0,42 (0,39–0,46)	– (0,09–0,12)	0,54 (0,40–0,64)	0,26	–	–	0,44
700	–	–	–	0,86	0,39 (0,35–0,42)	0,11 (0,09–0,11)	–	–	–	–	–
800	–	0,04	–	0,36	0,34 (0,32–0,37)	– (0,09–0,11)	0,24 (0,1–0,64)	0,15	–	–	0,07
900	–	–	–	0,56	0,32 (0,30–0,35)	0,09 (0,09–0,10)	–	1,10	–	–	–
1000	–	–	–	0,45	–	–	0,01 (0–0,03)	0,09	–	–	–

Tabela 2.3. Straty wody w sieciach wodociągowych w wybranych krajach i miastach na podstawie badań własnych <sup>1)</sup> i danych z literatury  
 Table 2.3. Water loss in water-pipe networks in countries and municipalities of choice, established in the present study (referred to as <sup>1)</sup>) and reported in the literature

Kraj/miasto	Wskaźniki strat wody $S_w$ i $S$ (w nawiasach)			
	%	dm <sup>3</sup> /(M·d)	m <sup>3</sup> /(km·d)	
1	2	3	4	
Polska (1996) – 12 miast <sup>1)</sup>	7,7–41 (6,8–31)	13–102 (11–77)	5,9–37,6 (5,9–25,1)	
Polska (1999) – 10 miast <sup>1)</sup>	12,6–30,4 (9,2–26,4)	18–79 (17–64)	11,6–39,3 (6,3–31,8)	
Oleśnica (1993–2000) <sup>1)</sup>	14–23 (9–13)	25–51 (17–28)	14–30 (9–17)	
Brzeg (1996–2000) <sup>1)</sup>	14–17 (11–14,5)	36–48 (30–41)	19–26 (16–22)	
Kłodzko (1995–1999) <sup>1)</sup>	23,5–28 (19,5–23)	55–77 (46–66)	25–36 (21–31)	
Polkowice (1996) – teren szkód gór. <sup>1)</sup>	18	22	13	
Polska (1998) [15]	18,6	47	17,2	
Polanica Zdrój (2001) [116]	–(36–50)	–	–(33,8–38)	
Polska południowa (1993) [17]	35–60	–	11–80	
Górny Śląsk (1994) [68]	tereny szkód górniczych	śr. 30; maks. 41	–	śr. 37,3; maks. 103
	poza terenami szkód	śr. 21; maks. 37	–	śr. 14,7; maks. 42
Miasto „W” (1995–2002) [90]	48,9–38,3	–	27,4–9,8	
Miasto „B” (1991–2001) [90]	41–24	–	52,3–16,6	
Miasto „M.” (2000; 2001) [90]	41,2; 30,6	–	10,1; 6,2	
Krynica (1994–2003) [7]	9,8–23,9	–	7–16	
Niemcy	zachodnie landy [74]	8–9	–	–
	wschodnie landy [21]	20; maks. 40	34	7; maks. 23
Erfurt (1993–1997) [114]	–	–	44–23	
Düren (1994) [74]	–	–	7	
Duisburg (1978–1988) [54]	2,8–8,6	–	2,7–9,7	
Bonn [121]	ogółem (1974–1992)	–	–	2–9
	wybrane rejony	–(11;12,2;25,8)	–	–(3,1;7,4;13,7)
Stuttgart (1997) [22]	–	–	7,2 (3,6)	
Finlandia [84]	mniejsze systemy	do 30	–	–
	duże systemy	15–25	–	–
	Tampere	15	–	–
	Helsinki	20	–	–
Turku	25	–	17	
Argentyna – duże miasta [84]	ok. 20	–	do 50	
Portugalia [84]	20–40	–	3–10; maks. 60	
Włochy [84]	24,9	–	–	

cd. tab. 2.3

Kraj/miasto	Wskaźniki strat wody $S_w$ i $S$ (w nawiasach)		
	%	dm <sup>3</sup> /(M·d)	m <sup>3</sup> /(km·d)
1	2	3	4
Holandia [84]	5	–	–
Dania [84]	10	–	–
Tajwan [84]	15–30	–	–
Cypr – Nikozja (1996) [84]	14,5	–	–
Rumunia (1995) [84]	21,6	110	–
Anglia i Walia [2]	24	–	11,8
Zurych [2]	6	–	10,6
Tokio [2]	10	–	10,6
Słowacja – wybrane miasta [2]	20–30	–	16,8–25,2
Węgry – wybrane miasta [2]	do 50	–	–

<sup>1)</sup> dane z badań własnych

### 3. Cel i zakres pracy

Prezentowana praca ma znamiona poznawcze. Badania wpływu wysokości tłoczenia pompowni i zmian ciśnienia w sieci wodociągowej na uszkodzalność przewodów, sieciowe straty wody oraz na koszty naprawy przewodów na podstawie danych uzyskanych z eksploatacji nie były i nadal nie są prowadzone w innych ośrodkach naukowych w Polsce.

Ponadto w dotychczasowych opracowaniach dotyczących niezawodności systemów wodociągowych pomijana jest ekonomiczna strona tego zagadnienia, dlatego prezentowane wyniki badań są ważne zarówno dla rozwoju dyscypliny naukowej w zakresie szacowania kosztów osiągnięcia wymaganego poziomu niezawodności systemów wodociągowych, jak i dla praktyki inżynierskiej. Wyniki odpowiednio i systematycznie prowadzonych badań obejmujących przyczyny i skutki zawodnego działania sieci powinny być wykorzystywane w przedsiębiorstwach wodociągowych do prognozowania wskaźników uszkodzeń i kosztów naprawy przewodów oraz wskaźników strat wody, a także do podejmowania optymalnych decyzji w zakresie projektowania, eksploatacji i modernizacji systemów wodociągowych z uwzględnieniem rachunku ekonomicznego.

Celem niniejszej pracy jest:

1. Ilościowa ocena wpływu wysokości i zmienności ciśnienia tłoczenia pompowni wodociągowych na uszkodzalność rurociągów i armatury przewodów magistralnych i rozdzielczych w miastach położonych na terenach nieobjętych działalnością górniczą.
2. Ilościowa ocena wpływu szkód górniczych na uszkodzalność przewodów wodociągowych na terenie oddziaływania eksploatacji górniczej.
3. Ocena poziomu niezawodności sieci wodociągowych na podstawie wyników badań częstości uszkodzeń i czasu trwania odnowy rurociągów.
4. Ilościowa ocena wpływu ciśnienia na koszty naprawy przewodów wodociągowych.
5. Opracowanie metodyki prognozowania kosztów naprawy sieci wodociągowych (z kilkuletnim wyprzedzeniem).
6. Ilościowa ocena wpływu ciśnienia na sieciowe straty wody.

Zrealizowanie tego celu wymagało przeprowadzenia badań *in situ* w kilkunastu wybranych miastach Polski na podstawie wieloletniej dokumentacji eksploatacyjnej występujących uszkodzeń rurociągów i armatury, kosztów ich naprawy oraz sieciowych strat wody, z uwzględnieniem parametrów charakteryzujących sieci wodociągowe i warunki ich eksploatacji.

W rozdziale 4. przedstawiono analizę i próbę uogólnienia wyników badań wpływu wybranych czynników na wskaźniki niezawodności rurociągów i armatury wodociąg-

gowej w miastach nieobjętych działalnością górniczą (Brzeg, Kłodzko, Oleśnica, Wrocław, Opole) i na terenie eksploatacji górniczej złóż rudy miedzi (Polkowice). Źródłem danych wyjściowych do analiz były wieloletnie dokumentacje eksploatacyjne dotyczące przewodów magistralnych i rozdzielczych o średnicach od 80 do 1000 mm i łącznej długości ok. 570 km w wymienionych miastach oraz częściowo przyłączy domowych (w Brzegu, Opolu, Polkowicach).

Ocenę wpływu wysokości i zmian ciśnienia tłoczenia pompowni, a więc i ciśnienia w sieci wodociągowej, na intensywność uszkodzeń rurociągów i armatury przewodów w miastach nienarażonych na szkody górnicze wykonano na podstawie wyników badań w dwóch (od kilku do kilkunastoletnich) okresach eksploatacji każdego z systemów: w warunkach nadmiernej – w stosunku do wymaganej eksploatacyjnej – wysokości tłoczenia pompowni (I okres badań) oraz w warunkach obniżonego ciśnienia i mniejszych jego zmian w ciągu doby (II okres badań). Analizę i ilościową ocenę przeprowadzono oddzielnie dla przewodów wykonanych z żeliwa szarego, tworzyw sztucznych (PCV, PE HD), stali i azbestocementu oraz dla przewodów ogółem (niezależnie od rodzaju materiału), uwzględniając przy tym: średnice przewodów, rodzaj uszkodzeń rurociągów i armatury, okres i rok budowy oraz czas eksploatacji przewodów, czas obserwacji, lokalizację (trasę ułożenia) przewodów, porę roku. W rozdziale 4. dokonano także oceny uszkadzalności rurociągów wykonanych z żeliwa i stali (bez dodatkowych zabezpieczeń przed górniczymi deformacjami terenu) oraz z tworzyw sztucznych na terenie oddziaływania eksploatacji górniczej, na podstawie danych dotyczących eksploatacji sieci wodociągowej w osiedlu Sienkiewicza w Polkowicach w latach 1986–1999. Zaproponowano metodę oceny udziału szkód górniczych w uszkadzalności przewodów wodociągowych, z wykorzystaniem wskaźników intensywności uszkodzeń przewodów (z badań własnych i wziętych z literatury) na terenach nieobjętych działalnością górniczą.

W omawianym rozdziale zawarto ponadto analizę całkowitego czasu usuwania uszkodzeń oraz jego składników (czas organizacji naprawy, czas właściwej naprawy, czas trwania prac porządkowych, czas odnowy), przeprowadzoną na podstawie dokumentacji dotyczącej eksploatacji sieci wodociągowych w Brzegu (w latach 1991–2000) i Opolu (w latach 1996–2001). Analizą objęto sieć rurociągów magistralnych, rozdzielczych i przyłączy domowych, uwzględniając: rodzaj uszkodzeń, rodzaj pokrycia terenu w miejscu awarii, głębokość ułożenia przewodów, porę roku oraz czas obserwacji. Dokonano także oceny skutków uszkodzeń rurociągów w postaci: czasu ograniczenia i wstrzymania dostawy wody do odbiorców, czasu i natężenia wypływu wody z uszkodzonych rurociągów z uwzględnieniem rodzaju ich uszkodzeń, a także zużycia wody do płukania przewodów.

Na podstawie wyników analizy wskaźników intensywności uszkodzeń i czasu odnowy przewodów wodociągowych w Brzegu w latach 1991–2000 i Opolu w latach 1996–2001 dokonano oceny poziomu niezawodności systemów dystrybucji wody na podstawie średnich wartości wskaźnika gotowości, obliczonych w poszczególnych latach



i okresach badań (w Brzegu wyróżniono dwa okresy eksploatacji, tj. z nadmiernym oraz obniżonym ciśnieniem w sieci). Analizę przeprowadzono oddzielnie dla sieci rurociągów magistralnych oraz dla sieci ogółem. Uzyskane wartości wskaźnika gotowości porównano z wymaganym poziomem niezawodności sieci według propozycji różnych autorów.

W rozdziale 5. przeprowadzono analizę jednostkowych kosztów naprawy uszkodzeń (dokonywanych systemem zleconym) przewodów magistralnych i rozdzielczych (średnice od 80 mm do 1200 mm) we Wrocławiu w 1993 r., 1996 r. i 1999 r. Wykonano szczegółową analizę korelacji między jednostkowym kosztem naprawy a rodzajem uszkodzenia, średnicą i głębokością ułożenia rurociągów oraz między kosztem naprawy a rodzajem uszkodzenia armatury (zasuw i hydrantów) sieci wodociągowej. Zbadano także tendencje zmian kosztów naprawy poszczególnych rodzajów uszkodzeń rurociągów i armatury w czasie badań, z uwzględnieniem zmiany wskaźników cen (inflacji). Wyniki powyższych badań i analiz wykorzystano do oceny wpływu wysokości ciśnienia na wartości wskaźników kosztów naprawy sieci w badanych systemach wodociągowych oraz do opracowania metodyki prognozowania wskaźników kosztów naprawy sieci wodociągowych (z kilkuletnim wyprzedzeniem).

Wymiernym negatywnym skutkiem występowania awarii sieci wodociągowych jest nie tylko wzrost kosztów eksploatacji, ze względu na konieczność naprawy przewodów, ale także m.in. wzrost strat wody wskutek wycieków, co podraża koszty ujmowania, oczyszczania i dystrybucji większej ilości wody. Konieczność ograniczenia strat wody jest ważna zarówno ze względów ekonomicznych, jak i ochrony niewielkich dyspozycyjnych zasobów wodnych Polski. W rozdziale 6. krótko omówiono na podstawie danych GUS zmiany wielkości zasobów wodnych i poboru wody w Polsce w latach 1990–2004 oraz ocenę dynamiki zmian wskaźników zużycia i strat wody w systemach wodociągowych, na podstawie wyników własnych badań ankietowych, w dziesięciu polskich miastach (leżących na terenach nieobjętych działalnością górnictwem) w latach 1990–2000. W analizowanych miastach (Trzebnica, Chojnów, Wołów, Kłodzko, Oleśnica, Brzeg, Świdnica, Legnica, Zielona Góra, Opole) w wodę z wodociągu zaopatrywanych było 12,5–131,0 tys. mieszkańców poprzez sieć dystrybucji o długości 20–270 km. Korzystając z danych dotyczących rocznego poboru i zużycia wody, w każdym z miast analizowano zmiany wskaźników zużycia wody w gospodarstwach domowych, zużycia przez przemysł i na inne cele komunalne oraz ilości wody wtłoczonej do sieci. Poddano ocenie także wskaźniki strat wody i zużycia na potrzeby technologiczne ujęć i zakładów oczyszczania wody, wskaźniki strat wody w sieci wodociągowej i zużycia na potrzeby własne systemów wodociągowo-kanalizacyjnych oraz wskaźniki strat wody w sieciach wodociągowych. Najwięcej uwagi poświęcono sieciowym stratom wody, badając korelacje pomiędzy ich wielkością a obciążeniem sieci wodociągowych, intensywnością uszkodzeń rurociągów i maksymalną wysokością tłoczenia pompowni.

W rozdziale 7. zawarto podsumowanie wyników przeprowadzonych badań i analiz, uwagi końcowe i wnioski, także odnośnie do dalszych badań.

## 4. Badania wskaźników niezawodności sieci wodociągowych

### 4.1. Ilościowa charakterystyka niezawodności sieci wodociągowych

W teorii niezawodności wyodrębnia się dwie metody określania wskaźników niezawodności elementów lub systemów w zależności od tego czy są one odnawialne, czy nieodnawialne [92, 106, 123]. Wprawdzie systemy dystrybucji wody zalicza się do odnawialnych, to jednak przy założeniu, że średni czas trwania naprawy jest wielokrotnie krótszy od średniego czasu bezuszkodzeniowej pracy elementu między kolejnymi naprawami, można przy określaniu wskaźników niezawodności systemów korzystać z metody odnoszącej się do elementów nieodnawialnych. Przyjęcie założenia, że czas trwania naprawy (odnowy) stanowi jedynie krótkotrwały sygnał niezdolności do pracy w znacznym stopniu upraszcza obliczenia, nie wpływając istotnie na dokładność uzyskiwanych wyników. Z kolei wybór wskaźników do oceny niezawodności systemu dystrybucji wody zależy od celu i zakresu oceny, która może być mniej lub bardziej szczegółowa, a przede wszystkim zależy od rodzaju i zakresu badań prowadzonych w rzeczywistych warunkach funkcjonowania i eksploatacji systemu oraz uzyskanej w ten sposób bazy danych. W wielu wypadkach właśnie brak niektórych danych z eksploatacji, bądź ich mała wiarygodność uniemożliwia dokonanie pełnej oceny niezawodności elementów lub systemów dystrybucji wody. Poniżej przedstawiono opis podstawowych wskaźników niezawodności [55, 72, 91, 92, 93, 107, 123] sieci wodociągowej, które obliczono i poddano analizie na podstawie danych uzyskanych z eksploatacji badanych miejskich systemów dystrybucji wody.

**Intensywność uszkodzeń  $\lambda$**  (miara elementów nieodnawialnych) jest podstawowym wskaźnikiem służącym do oceny niezawodności działania sieci wodociągowej. Intensywność uszkodzeń  $\lambda_a$  elementów nieliniowych – armatury przewodów (zasuwki, hydranty itp.), oznacza średnią częstość ( $c_a$ ) uszkodzeń badanych elementów odniesioną do ogólnej liczby ( $N$ ) badanych elementów. Wskaźnik ten można obliczyć na podstawie danych z eksploatacji według wzoru

$$\lambda_a = a(\Delta t)/(N\Delta t) = c_a/N, \text{ uszk./a} \quad (4.1)$$

W wypadku elementów liniowych (rurociągi) średnia częstość uszkodzeń ( $c$ ) odniesiona jest do całkowitej długości badanych elementów i wówczas

$$\lambda = n(\Delta t)/(L\Delta t) = c/L, \text{ uszk./}(km \cdot a) \quad (4.2)$$

gdzie:

$a(\Delta t)$ ,  $n(\Delta t)$  – liczba uszkodzeń armatury i rurociągów w przedziale czasu obserwacji  $\Delta t$ , szt.,

$N$  – liczba badanych elementów nieliniowych (armatury) w czasie  $\Delta t$ , szt.,

$L$  – długość badanych rurociągów w czasie  $\Delta t$ , km,

$\Delta t$  – czas obserwacji, a,

$c_a$ ,  $c$  – średnia częstość uszkodzeń armatury i rurociągów, uszk./a.

Jeśli w przedziale czasu obserwacji ulega zmianie liczba  $N$  badanych elementów lub długość  $L$  rurociągów, we wzorach (4.1) i (4.2) należy uwzględnić średnie wartości tych parametrów na początku i na końcu przedziału czasu  $\Delta t$  ( $N_{sr}$  lub  $L_{sr}$ ).

**Średnia częstość uszkodzeń  $c_a$  lub  $c$**  oznacza liczbę uszkodzeń armatury lub rurociągów w jednostce czasu

$$c_a = a(\Delta t)/\Delta t \text{ oraz } c = n(\Delta t)/\Delta t, \text{ uszk./a} \quad (4.3)$$

**Średni czas pracy  $T_p$**  oznacza czas pracy (sprawności) między kolejnymi uszkodzeniami, dla elementów nieodnawialnych wynosi

$$T_p = 1/c_a = \Delta t/a(\Delta t) \text{ oraz } T_p = 1/c = \Delta t/n(\Delta t), \text{ a} \quad (4.4)$$

**Średni czas odnowy  $T_o$**  (miara elementów odnawialnych) jest sumą średniego czasu  $T_{on}$  organizacji naprawy i średniego czasu  $T_n$  trwania właściwej naprawy uszkodzeń

$$T_o = T_{on} + T_n, \text{ h} \quad (4.5)$$

Średnie wartości czasów  $T_{on}$  i  $T_n$  można określić na podstawie danych z eksploatacji

$$T_{on} = 1/n_o \sum_{i=1}^{n_o} t_{oni}, \text{ h} \quad (4.6)$$

$$T_n = 1/n_o \sum_{i=1}^{n_o} t_{ni}, \text{ h} \quad (4.7)$$

gdzie:

$n_o$  – liczba napraw (odnów) uszkodzonych elementów, szt.,

$t_{noi}$  – czas organizacji naprawy  $i$ -tego uszkodzenia, h,

$t_{ni}$  – czas trwania właściwej naprawy  $i$ -tego uszkodzenia, h.

**Intensywność odnowy  $\mu$**  oznacza liczbę niesprawności – o średnim czasie trwania odnowy  $T_o$  – możliwych do usunięcia w jednostce czasu (doba, rok). Średnią wartość wskaźnika  $\mu$  można obliczyć ze wzorów

$$\mu = n_o/t_o \text{ lub } \mu = 1/T_o, \text{ odn./d (lub odn./a)} \quad (4.8)$$

w których:

$t_o$  – sumaryczny czas trwania odnów uszkodzeń w czasie obserwacji  $\Delta t$ , równy sumie czasów  $t_{on}$  oraz  $t_n$ , w dobach (latach),

$n_o$ ,  $T_o$  – liczba odnów (szt.) i średni czas odnowy, w dobach (latach).

**Wskaźnik gotowości**  $K_g$  elementu (odnawialnego) wyraża prawdopodobieństwo tego, że element będzie w stanie zdadności w dowolnej chwili  $t$ . Wartość wskaźnika  $K_g$  jest funkcją czasu, która w wypadku długiej pracy elementu przyjmuje wartość stałą. Stacjonarną wartość wskaźnika gotowości można obliczyć ze wzorów

$$K_g = t_p / (t_p + t_o) = T_p / (T_p + T_o) \quad (4.9)$$

lub z uwzględnieniem wskaźnika  $\lambda$

$$\text{dla przewodów o długości } L \text{ km: } K_g = 1 / (1 + \lambda L T_o) \quad (4.10)$$

$$\text{dla przewodu o długości 1km: } K_{gj} = 1 / (1 + \lambda T_o) \quad (4.11)$$

Ocena niezawodności działania sieci wodociągowej, ze względu na jej złożoną strukturę, musi być poprzedzona szczegółową analizą techniczną, funkcjonalną i strukturalną. W analizie tej powinno się uwzględniać topologię sieci, udział różnych rodzajów przewodów i ich wpływ na funkcjonowanie sieci, rozwiązania konstrukcyjne przewodów (materiał, średnica, rodzaj połączeń itp.), warunki gruntowe i wodne, warunki miejscowe (tereny szkód górniczych i pozostałe), warunki eksploatacji i współpracy z innymi elementami systemu dystrybucji wody oraz parametry pracy sieci (natężenia przepływów, ciśnienia, jakość wody itp.). W zależności od założonego celu i zakresu badań, podział strukturalny sieci wodociągowej może być bardzo zróżnicowany, gdyż składa się na nią szereg różnorodnych elementów, które ze sobą współdziałają i są od siebie zależne.

Oceniając niezawodność sieci wodociągowej można zatem [56, 69, 72, 123]:

- analizować sieć wodociagową (lub jej wycinek) jako całość,
- wyodrębnić i analizować poszczególne elementy składowe sieci, istotne ze względu na ich wpływ na działanie sieci jako całości.

Podejście całościowe do sieci wodociągowej wymaga niewielkiej bazy danych wyjściowych, a ocena wskaźników niezawodności jest stosunkowo prosta. Uzyskane rezultaty są jednak zbyt ogólne, aby na ich podstawie można było wnioskować o tym, które elementy sieci i w jakim stopniu wpływają na jej niezawodność oraz jakie są tego przyczyny i skutki. Jeśli więc celem badań jest uzyskanie pełnych i szczegółowych informacji o pracy poszczególnych elementów, które mają być wykorzystane w praktyce (w projektowaniu, modernizacji czy budowie oraz eksploatacji sieci), a jest to głównym celem badań niezawodności, należy uwzględnić wewnętrzną strukturę sieci wodociągowej. Podział (dekompozycja) sieci, w zależności od postawionego celu badań, może być dokonywany etapowo i według różnych kryteriów.

W pracy przyjęto następujący podział strukturalny badanych sieci wodociagowych: w pierwszym etapie wyodrębniono:

- przewody magistralne (rurociągi + armatura),
- przewody rozdzielcze (rurociągi + armatura),
- przyłącza domowe (rurociągi + armatura);

w drugim etapie, dla poszczególnych rodzajów przewodów, wyodrębniono:

- rurociągi, jako elementy liniowe,
- uzbrojenie przewodów, jako elementy nieliniowe;

w trzecim etapie dekompozycji dokonano podziału na:

- rurociągi wykonane z poszczególnych materiałów, w tym o określonych średnicach,
- rodzaj uzbrojenia (zasuwy odcinające oraz hydranty).

Uwzględniono przy tym rodzaj uszkodzeń, rok i okres budowy przewodów, czas eksploatacji oraz trasę ich ułożenia.

## 4.2. Metodyka i zakres badań

Źródłem danych do badań była dokumentacja eksploatacyjna dotycząca: wysokości tłoczenia pompowni, uszkodzeń przewodów (przede wszystkim magistralnych i rozdzielczych oraz częściowo przyłączy domowych), przerw w pracy sieci (przyczyny, czas trwania, skutki) oraz inwentaryzacji sieci wodociągowej obejmująca okres od kilku do kilkunastu lat, uzyskana z przedsiębiorstw wodociągowych w Brzegu, Kłodzku, Oleśnicy, Opolu, Wrocławiu i w Polkowicach.

Tabela 4.1. Wysokość tłoczenia pompowni w okresach przed i po modernizacji systemów dystrybucji wody

Table 4.1. Forcing pressure at pumping stations before and after modernization of the water distribution system

Miasto	Okres nadmiernego ciśnienia		Okres obniżonego ciśnienia		$(H_{\max I} - H_{\max II})$
	I okres badań	$H_{\max I}$ MPa	II okres badań	$H_{\max II}$ MPa	$H_{\max I}$ %
1	2	3	4	5	6
Brzeg	1991–VIII 1996	0,50 (0,46–0,54)	IX 1996–2000	0,45	10
Kłodzko	1992–VIII 1997	~ 0,70	IX 1997–1999	≤ 0,60	~ 15
Oleśnica	1981–1992	~ 0,50	1993–2000	~ 0,40	~ 20
Wrocław, rejon 1	1990–1994	0,40–0,45	1995–VI 1997	0,22–0,28	~ 40
Wrocław, rejon 2	1990–1994	0,40–0,45	1995–1998	0,22–0,28	~ 40
Opole	1996–2001	brak danych	–	–	–
Polkowice os. Sienkiewicza	1986–VIII 1994 (sieć z żeliwa)	brak danych	IX 1994–1999 (PVC i PE)	brak danych	–

W przedsiębiorstwach tych prowadzone są w ostatnich latach różne działania zmierzające do zapewnienia wymaganego poziomu niezawodności dostawy wody do odbiorców. W tym celu na przykład ograniczono nadwyżki wysokości ciśnienia w sieci, powyżej wymaganego ciśnienia eksploatacyjnego, oraz zmniejszono jego wahania

w ciągu doby. Działania te, przeprowadzone w Brzegu, Kłodzku, Oleśnicy i w wybranych rejonach Wrocławia, umożliwiły wyodrębnienie dwóch okresów eksploatacji sieci ze względu na wysokość ciśnienia wody. Oceny wskaźników niezawodności dokonano zatem w okresie poprzedzającym modernizację, tj. podczas eksploatacji z nadmiernym ciśnieniem w sieci (I okres badań) oraz po modernizacji systemów dystrybucji wody – w okresie obniżonych wahań i wysokości ciśnienia w sieci (II okres badań). Uzyskane z przedsiębiorstw wodociągowych dane dotyczące średnic – w poszczególnych okresach badań – wartości maksymalnej manometrycznej wysokości tłoczenia pompowni II stopnia zawarto w tab. 4.1. Nie dysponowano danymi o wysokości ciśnienia w systemach wodociągowych Opola i Polkowic.

Polkowice, jako jedyne z analizowanych miast, położone są na terenach występowania szkód górniczych. Przeprowadzenie modernizacji sieci wodociągowej miało także zwiększyć niezawodność dostawy wody do odbiorców, gdyż przewody wodociągowe w Polkowicach (głównie z żeliwa szarego i stali) były wybudowane w większości przed rozpoczęciem eksploatacji złóż rudy miedzi z filara ochronnego i nie zostały zabezpieczone przed górniczymi deformacjami terenu. Spowodowało to zwiększenie uszkodzalności przewodów, szczególnie w osiedlu Sienkiewicza, które znalazło się w zasięgu pełnych oddziaływań górniczych właściwych dla II kategorii górniczej. Zwiększona awaryjność była powodem wymiany w 1994 r. żeliwnych przewodów magistralnych i rozdzielczych w osiedlu (o długości ok. 4 km) oraz stałowych przyłączy na przewody z tworzyw sztucznych (PE 10 i PVC). Pierwszy (I) okres badań w osiedlu Sienkiewicza w Polkowicach dotyczył więc oceny uszkodzalności sieci przewodów przed ich wymianą, a drugi (II) okres badań – po wymianie.

Badania wskaźników niezawodności sieci wodociągowych realizowane były systematycznie przez wiele lat. Były one bardzo pracochłonne oraz czasochłonne, zwłaszcza jeśli chodzi o dostępność i możliwość uzyskania wiarygodnych i pełnych danych źródłowych z eksploatacji systemów dystrybucji wody. Dotyczyło to zwłaszcza danych inwentaryzacyjnych przewodów – ich materiału i średnic, roku budowy, głębokości ułożenia, liczby i rodzaju zamontowanej armatury itp. Uzyskane z przedsiębiorstw wodociągowych dane wyjściowe z lat objętych analizą zestawiono w tabelach stanowiących materiał archiwalny. W tabelach tych wyszczególniono informacje dotyczące: daty i miejsca powstania uszkodzenia, daty zakończenia naprawy, średnicy i materiału przewodu, rodzaju armatury, przyczyn i rodzaju uszkodzeń, roku budowy i czasu trwania eksploatacji przewodu, niekiedy rodzaju przykrycia terenu, wysokości ciśnienia panującego w przewodzie oraz objętości wody straconej wskutek wycieku i zużytej do płukania przewodów po ich naprawie. Zebrano i poddano analizie bardzo obszerny materiał informacyjny (źródłowy), który wykorzystano do realizacji projektów badawczych na zlecenie KBN oraz w ramach badań własnych i statutowych Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej [27, 41, 45, 78, 81]. Wyniki prowadzonych badań i analiz prezentowane były systematycznie w czasopismach branżowych i na konferencjach naukowo-technicznych [24, 25, 26, 28–38, 40, 42, 43, 44, 46, 49, 79].

Jak wspomniano na wstępie, badania dotyczyły wskaźników niezawodności sieci wodociągowych w sześciu miastach Polski (we Wrocławiu w dwóch wybranych rejonach), dla których analizowano parametry z dwóch okresów eksploatacji sieci, każdy o czasie trwania od 2,5 roku do 12 lat (tab. 4.1).

Tabela 4.2. Długość i struktura materiałowa sieci wodociągowych (bez przyłączy) na początku i na końcu okresów badań  
Table 4.2. Length and material structure of water-pipe networks (excluding fittings) at the beginning and termination of each period of the study

Miasto	Data badań	Długość <i>L</i> km	Udział przewodów z różnych materiałów w ogólnej długości sieci, %					Średnice mm
			żeliwo	stal	PVC	PE HD	AC	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Brzeg	1 I 1991	67,686	71,3 (14,2) <sup>1)</sup>	0,2	19,6	7,6	1,3	80–500
	31 VIII 1996	74,426	66,0 (12,9)	0,2	24,4	8,3	1,1	
	31 XII 2000	74,581	65,8 (12,9)	0,2	24,6	8,3	1,1	
Kłodzko	1 I 1992	61,985	66,0 (46,1)	26,3 (0,8)	4,8	0,3	2,6	80–400
	31 VIII 1997	67,861	60,2 (41,6)	24,1 (0,7)	4,7	8,6	2,4	
	31 XII 1999	68,511	58,5 (40,1)	23,8 (0,7)	4,7	10,7	2,3	
Oleśnica	1 I 1981	43,197	95,8 (b.d.)	–	4,2	–	–	90–500
	31 XII 1992	60,213	89,4 (b.d.)	–	10,6	–	–	
	31 XII 2000	67,841	84,5 (b.d.)	–	11,7	3,8	–	
Wrocław rejon 1 (bez 1992)	1 I 1990	40,438	100 (53,2)	–	–	–	–	80–500
	31 XII 1994	41,035	100 (52,5)	–	–	–	–	
	30 VI 1997	41,035	100 (52,5)	–	–	–	–	
Wrocław rejon 2 (bez 1992)	1 I 1990	32,025	83,3 (66,5)	12,1 (1,0)	1,8	–	2,8	80–500
	31 XII 1994	35,184	80,2 (60,4)	11,0 (0,9)	5,3	1,0	2,5	
	31 XII 1998	35,184	76,5 (56,7)	11,0 (0,9)	5,3	4,7	2,5	
Opole <sup>2)</sup>	1 I 1996	244,599	62,7 (31,0)	0,3	26,0	1,7	5,9	80–1000
	31 XII 2001	271,210	56,6 (28,0)	0,3	28,9	5,9	5,3	80–1000
Polkowice os. Sienkiewicza	1 I 1986	4,183	100	–	–	–	–	80–250
	31 VIII 1994	4,183	100	–	–	–	–	
	1 IX 1994	3,585	–	–	52,2	47,8	–	90–315
	31 XII 1999	3,917	–	–	52,2	47,8	–	

<sup>1)</sup> wartości w nawiasach oznaczają udział przewodów sprzed 1940 r. w ogólnej długości sieci, %

<sup>2)</sup> rury Betras i Hobas (o średnicach 600–1000 mm) stanowiły 3,4% długości sieci w 1996 r. i 3,0% w 2001 r.

b.d. – brak danych

Badania wartości wskaźnika intensywności uszkodzeń dotyczyły przewodów magistralnych i rozdzielczych o średnicach od 80 mm do 1000 mm i łącznej długości ok. 570 km (tab. 4.2.) oraz częściowo przyłączy domowych (w Brzegu, Opolu i Polkowicach). Określono i przeanalizowano wartości liczbowe intensywności uszkodzeń przewodów z uwzględnieniem zmian wysokości i wahań ciśnienia tłoczenia pompowni, materiału i średnicy przewodów, rodzaju uszkodzeń rurociągów i armatury, okresu i roku budowy, czasu eksploatacji przewodów, czasu (roku) obserwacji, lokalizacji (trasy ułożenia) przewodów oraz pory roku. Intensywność uszkodzeń armatury, tj. zasuw odcinających i hydrantów, poddano ocenie jedynie w dwóch rejonach sieci we Wrocławiu. W pozostałych miastach objętych programem badań oceniono wyłącznie liczbę uszkodzeń, gdyż nie dysponowano danymi o ogólnej liczbie zainstalowanej armatury, co uniemożliwiło obliczenie wskaźników intensywności uszkodzeń.

Drugim, obok intensywności uszkodzeń, wskaźnikiem opisującym niezawodność działania sieci wodociągowej jest czas usuwania uszkodzeń. Z własnych doświadczeń uzyskanych w czasie wieloletnich badań eksploatacyjnych sieci wodociągowych wynika, że w wielu przedsiębiorstwach wodociągowych niedoceniany jest wpływ czasu usuwania uszkodzeń na niezawodność działania i koszty eksploatacji systemu wodociągowego. Konsekwencją jest więc brak szczegółowych i w pełni wiarygodnych danych na ten temat, co uniemożliwiło dokonania pełnej oceny działania systemów wodociągowych w części analizowanych miast. Analizę całkowitego czasu usuwania uszkodzeń oraz jego elementów składowych (czas organizacji naprawy, czas trwania właściwej naprawy, czas trwania prac porządkowych, czas odnowy) przeprowadzono na podstawie danych z eksploatacji sieci wodociągowych w Brzegu w latach 1991–2000 i Opolu w latach 1996–2001. Średnie wartości poszczególnych składników całkowitego czasu usuwania uszkodzeń określono dla przewodów rozdzielczych (średnice od 80 mm do 315 mm), magistralnych (średnice od 400 mm do 600 mm) i przyłączy domowych. Uwzględniono przy tym: rodzaj uszkodzeń rurociągów (uszkodzenie złączy, pęknięcia lub perforacje rur), z pominięciem uszkodzeń armatury (stanowiły ok. 10% uszkodzeń przewodów), rodzaj pokrycia terenu w miejscu awarii (nawierzchnia utwardzona lub nieutwardzona), głębokość ułożenia przewodów i czas obserwacji.

Dokonano ponadto oceny skutków uszkodzeń przewodów wodociągowych na podstawie takich wskaźników, jak: czas ograniczenia i wstrzymania dopływu wody do odbiorców (w Brzegu i Opolu), czas i natężenie wypływu wody z uszkodzonych przewodów – z uwzględnieniem rodzaju uszkodzeń (pęknięcie rur, uszkodzenie złączy, perforacje rur) (w Opolu), zużycie wody do płukania przewodów po ich naprawie (w Opolu). Nigdzie nie określono upływu czasu od chwili powstania uszkodzenia do chwili zgłoszenia informacji o uszkodzeniu. W obecnych warunkach jest to nieosiągalne.

Dokonano także oceny poziomu niezawodności systemów dystrybucji wody na podstawie wskaźnika gotowości. Ponieważ wartości tego wskaźnika zależą od czę-



stości uszkodzeń i czasu ich odnowy, więc ocenę tę przeprowadzono jedynie dla systemów wodociągowych w Brzegu (w latach 1991–2000) i Opolu (w latach 1996–2001), ze względu na brak informacji o czasie trwania odnowy uszkodzeń w pozostałych badanych systemach. Średnie wartości wskaźnika gotowości, w poszczególnych latach oraz okresach badań, obliczono w odniesieniu do sieci ogółem (rurociągi magistralne i rozdzielcze) oraz sieci rurociągów magistralnych. Uzyskane wartości porównano z wymaganym poziomem niezawodności sieci według propozycji różnych autorów.

### **4.3. Sieci wodociągowe na terenach nieobjętych działalnością górniczą**

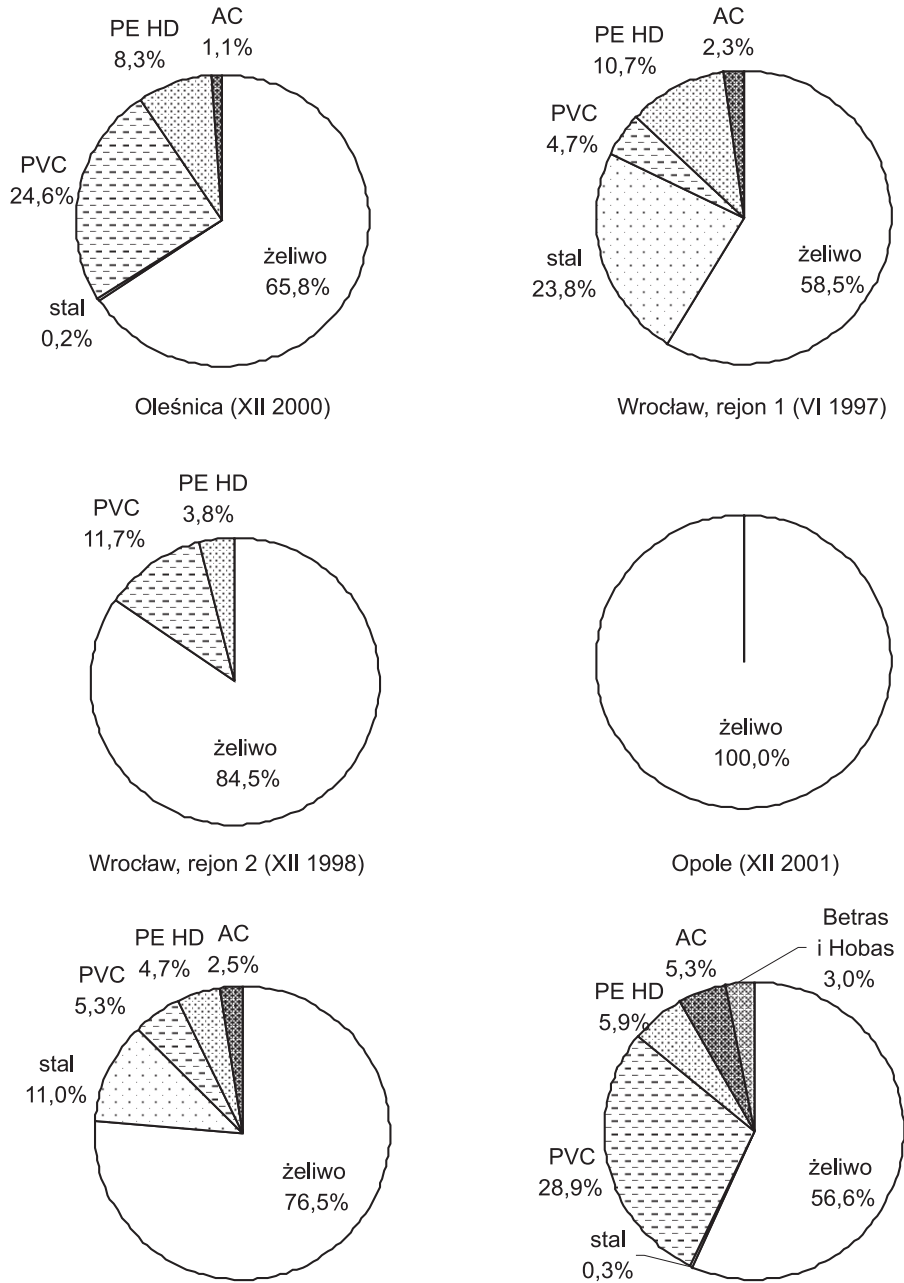
Badania wpływu wybranych czynników na parametry eksploatacyjne sieci wodociągowych dotyczyły w głównej mierze miast położonych na terenach nienarażonych na szkody górnicze. Należały do nich: Brzeg, Kłodzko, Oleśnica, Wrocław i Opole. Badaniami objęto całą sieć przewodów magistralnych i rozdzielczych w tych miastach, za wyjątkiem Wrocławia, gdzie do badań wytypowano sieci wodociągowe położone w zachodniej części miasta. Rejon 1 obejmował sieci przewodów w osiedlach Kozanów, Pilczyce i Stabłowice, natomiast rejon 2 – sieci w osiedlach Złotniki i Żerniki.

Całkowita długość przewodów (w końcu badań) analizowanych sieci wynosiła ok. 560 km (tab. 4.2). W strukturze materiałowej przeważało żeliwo szare, stanowiące od ok. 60% długości (Kłodzko, Opole) do 100% (rejon 1 we Wrocławiu) oraz tworzywa sztuczne (PVC i PE HD) stanowiące nawet do 35% długości sieci (Brzeg, Opole) (rys. 4.1). Struktura ta uległa istotnej zmianie podczas badań. W każdym systemie zmniejszył się udział przewodów z żeliwa, a wzrósł udział przewodów z tworzyw sztucznych (o 6–11% ogólnej długości) (tab. 4.2). Był to efekt budowy nowych sieci i wymiany starych przewodów z żeliwa, stali i azbestocementu na przewody z PVC i PE HD. W strukturze wiekowej znaczący udział miały przewody budowane w okresie przed 1940 r., stanowiące od 12,9% ogólnej długości sieci w Brzegu do 57,6% długości w rejonie 2 we Wrocławiu (rys. 4.2). Średnice badanych przewodów (niezależnie od rodzaju materiału) wynosiły od 80 mm do 1000 mm (tab. 4.2), przy czym największy był udział przewodów o najmniejszych średnicach 80–250 mm, wynoszący od 60,8% długości sieci w rejonie 2 we Wrocławiu do 94,2% długości w Kłodzku (rys. 4.3).

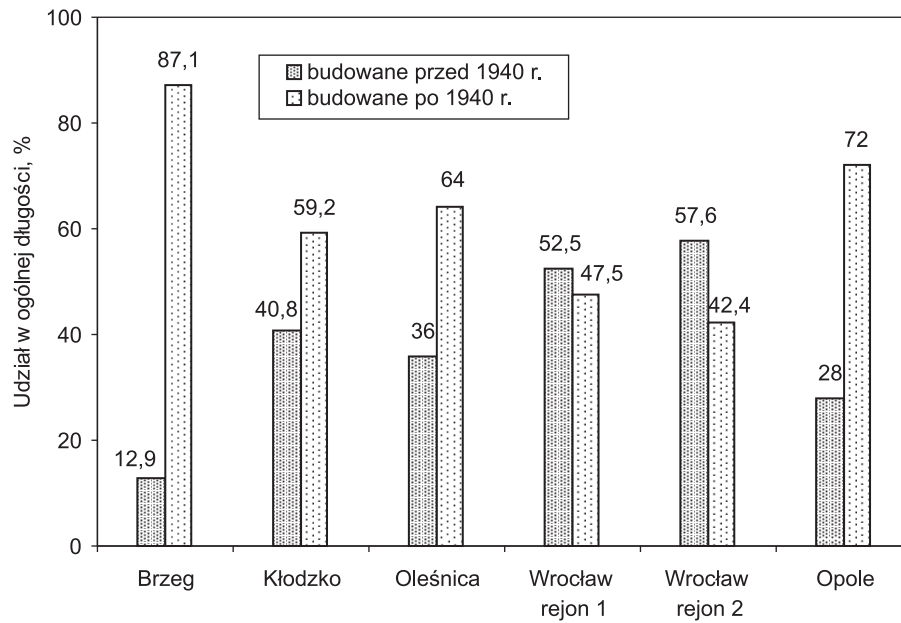
#### **4.3.1. Charakterystyka badanych systemów dystrybucji wody**

*Jednostrefowy system wodociągowy Brzegu* jest zasilany w wodę podziemną i powierzchniową przez pompownię drugiego stopnia zlokalizowaną na terenie Zakładu Uzdatniania Wody w Gierszowicach. Z wodociągu zaopatrywanych jest ok. 40 tysięcy mieszkańców miasta. Z uwagi na występujące nadwyżki zdolności produkcyjnej

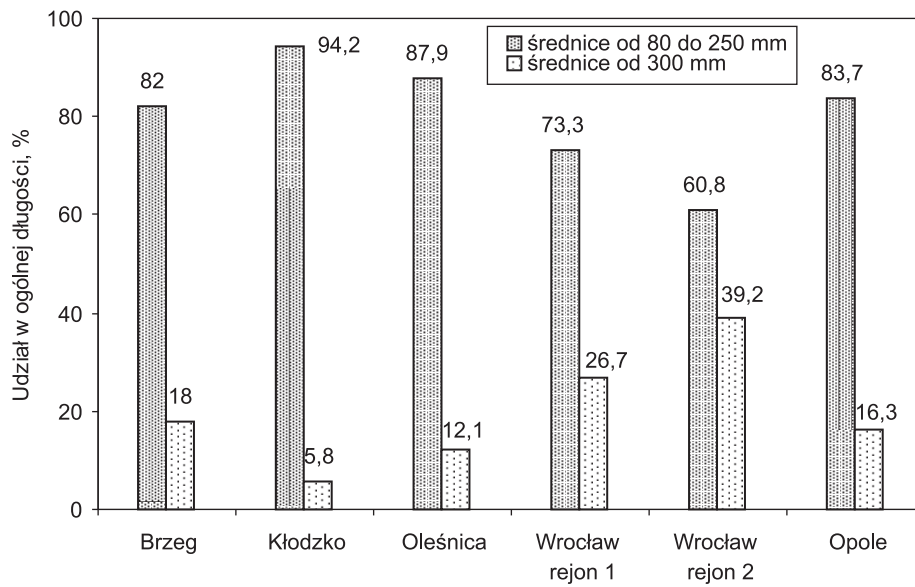
przedsiębiorstwa, woda dostarczana jest także do odbiorców w sąsiednich miejscowościach.



Rys. 4.1. Struktura materiałowa sieci wodociągowych  
Fig. 4.1. Material structure of the water-pipe networks under study



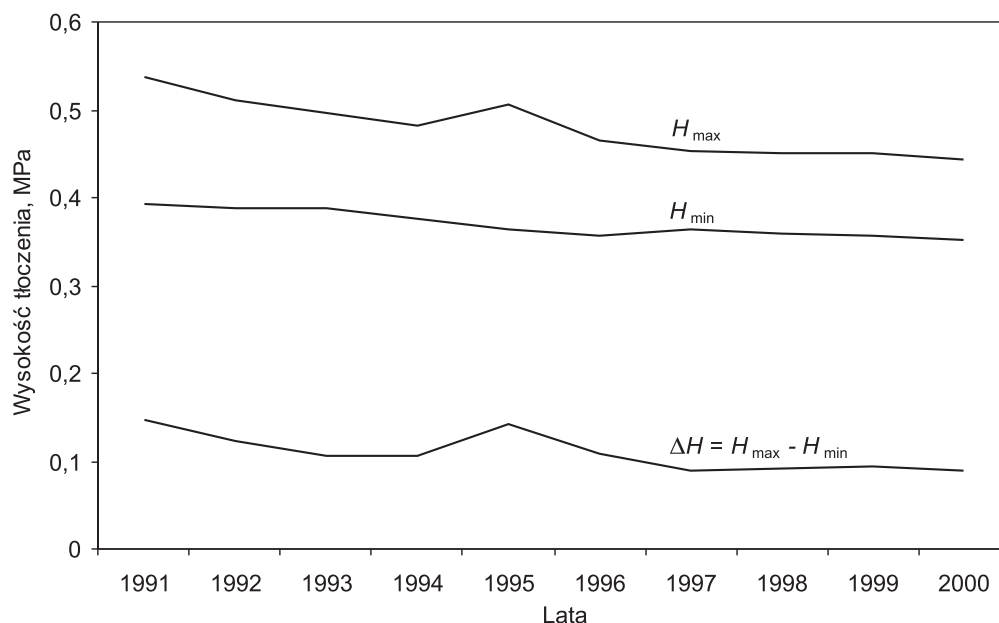
Rys. 4.2. Struktura wiekowa sieci wodociągowych  
Fig. 4.2. Age of the water-pipe networks under study



Rys. 4.3. Procentowy udział przewodów rozdzielczych i magistralnych w ogólnej długości sieci wodociągowych

Fig. 4.3. Proportion of distributing pipes and mains to the overall length of the water-pipe networks

ściach. Spadek zużycia wody przez wszystkie grupy jej odbiorców spowodował, że ilość wody wtłoczonej do sieci wodociągowej miasta zmniejszyła się aż o 44% w latach 1991–2000. Obciążenie sieci wodociągowej, określające ilość wody (w  $\text{m}^3/\text{d}$ ) wtłoczonej do sieci w przeliczeniu na jednostkę długości (1 km) przewodów magistralnych i rozdzielczych, zmalało o 48% w 2000 r. ( $129 \text{ m}^3/(\text{km}\cdot\text{d})$ ) w stosunku do wartości z 1991r. ( $250 \text{ m}^3/(\text{km}\cdot\text{d})$ ) przy wzroście długości sieci o 10%. W pierwszej połowie 1996 r. przeprowadzono modernizację pompowni II stopnia, polegającą na wymianie części agregatów pompowych oraz zainstalowaniu falownika, rozruch zaś instalacji do płynnej regulacji prędkości obrotowej pompy nastąpił we wrześniu 1996 r. Działania te spowodowały znaczne ustabilizowanie wysokości tłoczenia pompowni i ciśnienia w sieci wodociągowej (nie jest eksploatowany sieciowy zbiornik wyrównawczy). W analizie wykorzystano uzyskane z przedsiębiorstwa wodociągowego dane o wartościach maksymalnej i minimalnej w dobach manometrycznej wysokości tłoczenia pompowni w latach 1991–2000 (określone na podstawie codziennych notowań wskazań manometrów zamontowanych na rurociągach tłocznych). Na ich podstawie określono średnie wysokości tłoczenia minimalnego ( $H_{\min}$ ) i maksymalnego ( $H_{\max}$ ) w poszczególnych latach badań (rys. 4.4) oraz średnie wartości z I okresu badań – przed modernizacją pompowni (I 1991 r.–VIII 1996 r.) i z II okresu badań – po modernizacji (IX 1996 r.–XII 2000 r.).



Rys. 4.4. Wysokość tłoczenia ( $H_{max}$ ,  $H_{min}$ ) pompowni II stopnia w Brzegu  
 Fig. 4.4. Forcing pressure ( $H_{max}$ ,  $H_{min}$ ) at the pumping station in Brzeg

Na warunki i niezawodność działania systemu dystrybucji wody znaczący wpływ miało zmniejszenie o 10% średnich (w analizowanych okresach eksploatacji) wartości maksymalnej wysokości tłoczenia pompowni. W I okresie badań (przed modernizacją pompowni) średnia wartość ciśnienia  $H_{max}$  wynosiła 0,50 MPa, a w II okresie (po modernizacji) 0,45 MPa. Wpłynęło to na ograniczenie występujących nadwyżek ciśnienia w sieci ponad wartości wymagane, a zwłaszcza na znaczący spadek (o 25%) dobowych zmian wysokości tłoczenia ( $\Delta H = H_{max} - H_{min}$ ) średnio z 0,12 MPa do 0,09 MPa, co ustabilizowało ciśnienie w sieci wodociągowej w okresie po modernizacji pompowni.

*Wielostrefowy system wodociągowy Kłodzka* zasilany jest w wodę infiltracyjną, ujmowaną z doliny rzeki Nysy Kłodzkiej, za pomocą pompowni głównej zlokalizowanej przy ul. Korczaka, która tłoczy wodę do miasta poprzez układ przewodów magistralnych o średnicach 400 mm, 350 mm i 250 mm. Z wodociągu zaopatrywanych jest ok. 30,5 tysiąca mieszkańców miasta. W latach 1992–1999 ilość wody wtłoczonej do sieci wodociągowej Kłodzka uległa obniżeniu o 24%, a obciążenie sieci w 1999 r. ( $105 \text{ m}^3/(\text{km}\cdot\text{d})$ ) zmniejszyło się o 31% w porównaniu z 1992 r. ( $152 \text{ m}^3/(\text{km}\cdot\text{d})$ ). Długość sieci magistralnej i rozdzielczej zwiększyła się w tym czasie o 10,5%.

Sieć wodociągowa na terenie Kłodzka, ze względu na duże zróżnicowanie wysokościowe terenu, podzielona jest na pięć stref ciśnienia. Pierwsza strefa, obejmująca największy obszar centralnej części miasta, zasilana jest z pompowni głównej, pozostające

stałe zaś cztery strefy zasilane są z pompowni lokalnych (przy ulicach Dusznickiej, Sienkiewicza, Śląskiej i Warty). Na sieci wodociągowej zlokalizowane są dwa zbiorniki wyrównawcze terenowe – na terenie Twierdzy Kłodzkiej i przy ul. Dusznickiej (obecnie pełni on funkcję zbiornika dolnego pompowni strefowej). Zbiorniki te napełniane są wodą w godzinach nocnych. Ze względu na wysokie usytuowanie zbiornika na terenie twierdzy, ciśnienie w pompowni głównej i w sieci wodociągowej na przeważającym obszarze pierwszej strefy (obejmującej prawie 80% ogólnej długości sieci magistralnej i rozdzielczej) utrzymywane było na bardzo wysokim poziomie, przekraczającym w godzinach nocnych 0,60 MPa, a nawet 0,70 MPa (I okres badań – od początku 1992 r. do końca sierpnia 1997 r.). Dzięki przeprowadzonej w sierpniu 1997 r. modernizacji pompowni głównej, polegającej na zastosowaniu płynnej regulacji z wykorzystaniem falownika, ciśnienie w pompowni i sieci wodociągowej utrzymywano do 2000 r. na poziomie nieprzekraczającym 0,60 MPa (II okres badań – od początku września 1997 r. do końca 1999 r.). Falowniki zainstalowano także w dwóch pompowniach strefowych – w kwietniu 1995 r. przy ul. Sienkiewicza i w sierpniu 1996 r. przy ul. Dusznickiej. Maksymalne ciśnienie w tych pompowniach i na obszarze ich zasilania, obejmującym łącznie ok. 13% długości sieci wodociągowej, nie przekraczało 0,60 MPa zarówno przed, jak i po modernizacji. Efektem przeprowadzonych działań modernizacyjnych w Kłodzku było ograniczenie dobowych wahań ciśnienia oraz zmniejszenie o ok. 15% maksymalnego ciśnienia na przeważającym obszarze dystrybucji wody.

*System wodociągowy Oleśnicy* zasilany jest w wodę pitną z ujęć wody podziemnej zlokalizowanych w Oleśnicy (stare ujęcie) i w Smardzowie (nowe ujęcie). Woda z ujęcia w Oleśnicy jest uzdatniana, natomiast ze Smardzowa podawana jest do miasta bez uzdatniania. W latach 1990–2000 ilość wody wtłoczonej do sieci wodociągowej Oleśnicy uległa obniżeniu o 20%, obciążenie zaś sieci w 2000 r. ( $101 \text{ m}^3/(\text{km}\cdot\text{d})$ ) zmniejszyło się o 32% w porównaniu z 1990 r. ( $150 \text{ m}^3/(\text{km}\cdot\text{d})$ ). Długość sieci magistralnej i rozdzielczej zwiększyła się w tym czasie o ok. 18%. System zaopatruje w wodę ok. 37 tysięcy mieszkańców miasta.

W grudniu 1992 r. oddano do eksploatacji zbiorniki wody czystej w nowym Zakładzie Uzdatniania Wody, do których tłoczona jest obecnie woda ze studni głębinowych, skąd pompy w pompowni II stopnia tłoczą wodę do miasta. Spowodowało to obniżenie maksymalnej wysokości tłoczenia o ok. 0,10 MPa w porównaniu z wartościami występującymi uprzednio, tj. podczas bezpośredniego tłoczenia wody ze studni ujęciowych w Smardzowie do sieci wodociągowej. W latach 1981–1992 (I okres badań) maksymalne ciśnienie wynosiło ok. 0,50 MPa, natomiast w latach 1993–2000 (II okres badań) było niższe o ok. 20% i wynosiło ok. 0,40 MPa.

*System wodociągowy Wrocławia* zasilany jest w wodę powierzchniową ujmowaną z rzeki Oławy (zasilanej wodą przetrzucaną z Nysy Kłodzkiej) i uzdatnianą w Zakładzie Produkcji Wody „Mokry Dwór”, w wodę infiltracyjną uzdatnianą w zakładzie „Na Grobli” oraz w nieznacznym stopniu w wodę podziemną uzdatnianą w zakładzie

„Leśnica”. Spadek zużycia wody przez wszystkie grupy jej odbiorców spowodował, że ilość wody wtłoczonej do sieci wodociągowej miasta zmniejszyła się o ok. 54% w latach 1990–2000, natomiast obciążenie sieci przewodów magistralnych i rozdzielczych zmalało o ok. 60%, przy wzroście długości sieci o ok. 10%. W wodę zaopatrywanych jest ok. 650 tysięcy mieszkańców aglomeracji wrocławskiej.

Analizowana sieć wodociągowa położona jest w zachodniej części Wrocławia (rejon 1 i 2). Obszar ten jest bardzo zróżnicowany pod względem wysokości zabudowy mieszkaniowej i zasilany jest w wodę przez pompownię strefową. Powodowało to występowanie stale wysokiego ciśnienia w sieci, przekraczającego w godzinach nocnych 0,60 MPa, szczególnie na końcówkach sieci w rejonie niskiej i starej zabudowy. Od 1995 r. ograniczono zasięg oddziaływania strefy wysokiego ciśnienia dzięki zamontowaniu zaworu redukcyjnego na początku układu zasilającego w wodę osiedla o niskiej zabudowie. Dzięki temu od początku 1995 r. (II okres badań) zredukowano ciśnienie (o ok. 40%) do poziomu 0,22–0,28 MPa, w porównaniu do wartości z lat 1990–1994 (I okres badań), kiedy wynosiło ono 0,40–0,45 MPa.

*System wodociągowy Opola* zasilany jest wyłącznie w wodę podziemną pochodzącą z czterech poziomów wodonośnych: na ujęciu „Zawada” z poziomów pstrego piaskowca i czwartorzędowego, na ujęciu „Opole” z poziomów wapienia muszlowego i cenomańskiego, na ujęciu „Groszowice” z poziomów cenomańskiego i czwartorzędowego (nieczynne od 2001 r.) oraz na ujęciu „Grotowice” z poziomu wapienia muszlowego. Woda z ujęć „Zawada” (pokrywa ok. 55% zapotrzebowania) i „Opole” pompowana jest do sieci po uzdatnieniu, natomiast woda z ujęcia „Grotowice” tłoczona jest do sieci magistralnej bez uzdatniania. Obiekt na ujęciu „Groszowice” pełni obecnie funkcję pompowni strefowej zasilającej w wodę południowe rejon miasta. Z wodociągu zaopatrywanych jest w wodę ok. 131 tysięcy mieszkańców miasta. Badania sieci wodociągowej w Opolu obejmowały okres eksploatacji od początku 1996 r. do końca 2001 r. W tym czasie ilość wody wtłoczonej do sieci wodociągowej zmniejszyła się o 27%, obciążenie sieci zaś o 33% z ok. 160 m<sup>3</sup>/(km·d) w 1996 r. do 108 m<sup>3</sup>/(km·d) w 2001 r. Przyrost długości sieci magistralnej i rozdzielczej wyniósł ok. 8%. Nie dysponowano danymi o wysokości ciśnienia w systemie wodociągowym.

#### 4.3.2. Intensywność uszkodzeń przewodów wodociągowych

Występujące uszkodzenia przewodów wodociągowych mają w większości charakter losowy, a ustalenie ich przyczyny jest niekiedy bardzo trudne, z powodu różnorodności czynników oddziałujących równocześnie na przewody. Do najczęstszych przyczyn powstawania uszkodzeń sieci wodociągowych na terenach nieobjętych działalnością górnictwem należą:

- korozyjność wody podziemnej (gruntu), a także płynącej wewnątrz rurociągów,

- prądy błędzące, występujące na terenach miast i zakładów przemysłowych posiadających trakcję elektryczną,
- przemarzanie gruntu w otoczeniu rurociągu,
- osiadanie gruntu, ruchy tektoniczne i inne pochodzenia geologicznego,
- nadmierne obciążenie naziomu, zwłaszcza dynamiczne (duży ruch ciężkich pojazdów itp.),
- uderzenia hydrauliczne w sieci wodociągowej,
- nadmierne ciśnienie i duże jego wahania w sieci,
- wady materiałowe rur, armatury, złączy itp.,
- niedbała i niezgodna z zasadami budowa przewodów,
- niedbała konserwacja armatury i urządzeń (zasuw, hydrantów itp.),
- wieloletnia eksploatacja przewodów bez okresowego płukania, czyszczenia czy renowacji,
- nieostrożne prowadzenie robót w pobliżu przewodów wodociągowych, rodzaj gruntu i inne.

Wymienione przyczyny awarii przewodów mogą mieć związek zarówno z projektowaniem, wykonawstwem, jak i eksploatacją i mogą nakładać się na siebie. W każdym przypadku należy dążyć do ustalenia przyczyn występowania awarii, gdyż ich znajomość, wraz z oceną ilościową awaryjności oraz jej skutków, jest podstawą podejmowania racjonalnych decyzji w zakresie eksploatacji, modernizacji, czy rozbudowy istniejących sieci wodociągowych.

W rezultacie oddziaływania wymienionych czynników dochodzi do różnego rodzaju uszkodzeń przewodów, które sprowadzają się głównie do:

- rozszczelniania złączy rurociągów, zwłaszcza kielichowych,
- pęknięcia poprzecznego i podłużnego rur i kształtek,
- perforacji (wżerów korozyjnych) materiału rur,
- uszkodzeń armatury.

W literaturze stosowana jest bardzo różnorodna i niejednorodna klasyfikacja uszkodzeń przewodów wodociągowych, co utrudnia porównanie i uogólnienie wyników prowadzonych badań. Przyjęta przez autorkę, w obecnej i wcześniejszych pracach, klasyfikacja uszkodzeń uwzględnia strukturalny podział przewodów na rurociągi (elementy liniowe), których dotyczą pierwsze trzy rodzaje wymienionych uszkodzeń, i armaturę przewodów (elementy nieliniowe). Zaproponowany podział uszkodzeń jest także wynikiem szczegółowej analizy wpływu rodzaju występujących uszkodzeń na koszty naprawy przewodów (rozdział 5.) oraz na straty wody wskutek przecieków (rozdział 6.).

Uszkodzenia przewodów, jak wspomniano, powstają w wyniku oddziaływania na sieć wodociągową różnych czynników, których stopień wpływu jest także bardzo zróżnicowany w poszczególnych systemach dystrybucji wody. Dlatego ocena przyczyn, stopnia i skutków zawodnego działania sieci jest możliwa jedynie na podstawie wyników systematycznych i wieloletnich badań eksploatacyjnych w każdym z syste-



mów. Z badań własnych wynika, że podstawowy wskaźnik niezawodności sieci wodociągowej – intensywność uszkodzeń, zależy przede wszystkim od materiału i średnicy przewodów, wysokości i zmian ciśnienia wody, czasu eksploatacji i okresu budowy przewodów, trasy ich ułożenia i pory roku.

Szczegółową analizę wartości intensywności uszkodzeń badanych sieci wodociągowych zawarto w wielu pracach publikowanych i niepublikowanych [24–32, 34, 36, 40, 42, 44, 45, 81]. W niniejszej monografii podjęto próbę uogólnienia uzyskanych wyników i wniosków z przeprowadzonych badań eksploatacyjnych sieci wodociągowych.

#### **4.3.2.1. Intensywność uszkodzeń rurociągów**

Należy przypomnieć, że intensywność uszkodzeń rurociągów, jako elementów liniowych, oznacza liczbę uszkodzeń odniesioną do jednostki czasu i jednostki długości przewodów, i określana jest ze wzoru (4.2). Średnie wartości liczbowe intensywności uszkodzeń rurociągów w analizowanych systemach obliczono w poszczególnych latach obserwacji oraz w dwóch wyróżnionych okresach badań ze względu na ciśnienie w sieci wodociągowej.

Na ogólną intensywność uszkodzeń ( $\lambda$ ) rurociągów składały się:

- intensywność uszkodzeń złączy rur ( $\lambda_w$ ),
- intensywność uszkodzeń wskutek pęknięcia rur ( $\lambda_p$ ),
- intensywność uszkodzeń wskutek perforacji rur ( $\lambda_o$ ).

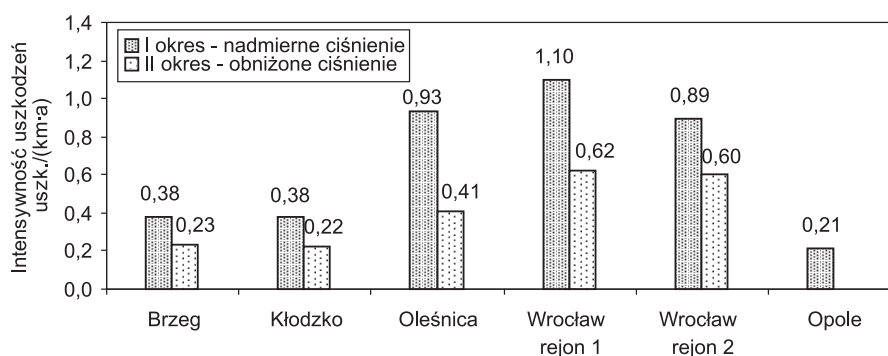
##### **4.3.2.1.1. Wpływ wybranych czynników na intensywność uszkodzeń rurociągów z żeliwa szarego**

Eksploatowane obecnie w polskich miastach sieci wodociągowe wykonane są w przeważającej większości z rur z żeliwa szarego, bez odpowiednich powłok zabezpieczających. Charakteryzuje je duża awaryjność, wynikająca nie tylko z kilkudziesięcioletniej eksploatacji (znaczny udział przewodów sprzed 1940 r.), ale również z ograniczeń technologicznych, wad materiałowych rur i nieodpowiedniej jakości wykonawstwa w latach 60.–80. XX wieku.

Najmniejszą awaryjnością spośród analizowanych sieci wodociągowych charakteryzowały się rurociągi żeliwne w Opolu oraz w Brzegu i Kłodzku, a największą w rejonie 1 Wrocławia (rys. 4.5). Duża awaryjność rurociągów żeliwnych wpłynęła na niezawodność działania całej sieci wodociągowej, gdyż przewody te w analizowanych miastach stanowiły ok. 57%–85%, a w osiedlach we Wrocławiu 76,5% i 100% długości eksploatowanej sieci magistralnej i rozdzielczej. Ponadto są to przewody znacznie zdekapitalizowane; udział rurociągów żeliwnych budowanych przed 1940 r. wynosił ok. 13%–57% ogólnej długości sieci rurociągów (tab. 4.2).

#### 4.3.2.1.1.1. Wysokość i zmiany ciśnienia wody

Badania eksploatacyjne wpływu wysokości i zmienności ciśnienia tłoczenia pompowni na uszkodzalność przewodów nie były dotychczas prowadzone w innych ośrodkach naukowych w Polsce. Prezentowane wyniki badań sieci wodociągowych w miastach nienarażonych na szkody górnicze (Brzeg, Kłodzko, Oleśnica, wybrane rejony Wrocławia) wykazały, że wysokość ciśnienia, a zwłaszcza jego dobowe wahania mają bardzo duży wpływ na uszkodzalność przewodów. Wynika to m.in. z analizy średnich wartości intensywności uszkodzeń rurociągów żeliwnych w dwóch okresach eksploatacji ze względu na wysokość ciśnienia wody (rys. 4.5).



Rys. 4.5. Ogólna intensywność uszkodzeń ( $\lambda$ ) rurociągów żeliwnych w dwóch okresach eksploatacji sieci  
Fig. 4.5. Overall failure rate ( $\lambda$ ) for cast iron pipes over period I and period II of service

Tabela 4.3. Intensywność uszkodzeń rurociągów z żeliwa, stali i azbestocementu w dwóch okresach eksploatacji sieci

Table 4.3. Failure rate for cast iron pipes, steel pipes and asbestos cement pipes over two periods of service

Miasto	Okres budowy przewodów	Średnia intensywność uszkodzeń rurociągów uszk./((km·a)								$\lambda_{II} / \lambda_I$		
		I okres nadmierne ciśnienie				II okres obniżone ciśnienie						
		$\lambda_u$	$\lambda_p$	$\lambda_o$	$\lambda$	$\lambda_u$	$\lambda_p$	$\lambda_o$	$\lambda$	$u$	$p + o$	$\Sigma$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
<b>RUROCIĄGI Z ŻELIWA SZAREGO</b>												
Brzeg	przed 1940 r.	0,04	0,11	0	0,15	0,05	0,09	0	0,14	1,25	0,82	0,93
	1953–1991	0,09	0,33	0,01	0,43	0,06	0,19	0	0,25	0,67	0,58	0,60
	ogółem	0,08	0,29	0,01	<b>0,38</b>	0,06	0,17	0	<b>0,23</b>	0,75	0,57	<b>0,61</b>
Kłodzko	przed 1940 r.	0,02	0,06	0,19	0,27	0	0,03	0,17	0,20	0	0,80	0,74
	1955–1995	0,20	0,34	0,10	0,64	0,13	0,10	0,03	0,26	0,65	0,30	0,41

	ogółem	0,07	0,14	0,17	<b>0,38</b>	0,04	0,05	0,13	<b>0,22</b>	0,57	0,58	<b>0,58</b>
Oleśnica	przed 1961r.	0,22	0,12	0,01	0,35	0,10	0,12	0,01	0,23	0,45	1,00	0,66
	1961–1996	1,18	0,33	0,04	1,55	0,20	0,35	0	0,55	0,17	0,95	0,35
	ogółem	0,69	0,22	0,02	<b>0,93</b>	0,16	0,24	0,01	<b>0,41</b>	0,23	1,04	<b>0,44</b>
Wrocław rejon 1	1928–1939	0,08	1,00	0,29	1,37	0,07	0,50	0,19	0,76	0,87	0,53	0,55
	1969–1991	0,61	0,16	0,02	0,79	0,45	0,02	0	0,47	0,74	0,11	0,59
	ogółem	0,33	0,60	0,17	<b>1,10</b>	0,25	0,27	0,10	<b>0,62</b>	0,76	0,48	<b>0,56</b>
Wrocław rejon 2	1928–1939	0,08	0,46	0,16	0,70	0,14	0,47	0,11	0,72	1,75	0,94	1,03
	1952–1993	1,13	0,34	0	1,47	0,14	0,11	0	0,25	0,12	0,32	0,17
	ogółem	0,33	0,43	0,13	<b>0,89</b>	0,14	0,38	0,08	<b>0,60</b>	0,42	0,82	<b>0,67</b>
Opole	przed 1940 r.	0,04	0,13	0,04	0,21	–	–	–	–	–	–	–
	1941–1993	0,04	0,15	0,02	0,21	–	–	–	–	–	–	–
	ogółem	0,04	0,14	0,03	<b>0,21</b>	–	–	–	–	–	–	–
Polkowice os. Sienkiewicza	lata 60. XX w.	0,39	0,80	0	<b>1,19</b>	–	–	–	–	–	–	–
RUROCIĄGI ZE STALI												
Brzeg (0,116 km)	1960–1974	0	0	0	0	0	0	0	0	–	–	–
Kłodzko (16,3 km)	przed 1940 r. (0,52 km)	0	0	0,34	0,34	0	0	0,82	0,82	–	2,41	2,41
	1960–1992	0,02	0,06	0,22	0,30	0	0	0,19	0,19	0	0,68	0,63
	ogółem	0,02	0,05	0,23	0,30	0	0	0,21	0,21	0	0,75	0,70

Miasto	Okres budowy przewodów	Średnia intensywność uszkodzeń rurociągów uszk./.(km·a)								$\lambda_{II} / \lambda_I$		
		I okres nadmierne ciśnienie				II okres obniżone ciśnienie						
		$\lambda_u$	$\lambda_p$	$\lambda_o$	$\lambda$	$\lambda_u$	$\lambda_p$	$\lambda_o$	$\lambda$	$u$	$p + o$	$\Sigma$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Wrocław rejon 2	1932, 1934 (0,326 km)	0	0	7,68	7,68	0	0	4,61	4,61	–	0,60	0,60
	1961–1975 <sup>1)</sup> (3,55 km)	0,35	0,07	0,14	0,56	0,07	0,07	0	0,14	0,20	0,33	0,25
	ogółem	0,32	0,07	0,77	1,16	0,06	0,06	0,39	0,51	0,19	0,54	0,44
Opole	ogółem (0,743)	0	0,22	0,67	0,89	–	–	–	–	–	–	–
RUROCIĄGI Z AZBESTOCEMENTU												
Brzeg (0,845)	1959-1974	0	0,42	0	0,42	0	0	0	0	–	0	0
Kłodzko (1,585)	1960	0	0	0	0	0	0	0	0	–	–	–
Wrocław rejon 2 (0,880)	1937–1939 1960	0	0,57	0	0,57	0	1,42	0	1,42	–	2,49	2,49

Opole (14,343)	do 1984 r.	0,01	0,10	0,04	0,15	–	–	–	–	–	–
----------------	------------	------	------	------	------	---	---	---	---	---	---

<sup>1)</sup> rurociągi ze stali i częściowo z azbestocementu

Tabela 4.4. Procentowy udział różnych rodzajów uszkodzeń w ogólnej liczbie uszkodzeń rurociągów  
Table 4.4. Percentage of different types of damage in the overall number of pipe damage evants

Miasto	Okres budowy przewodów	Udział rodzajów uszkodzeń rurociągów w ogólnej liczbie uszkodzeń, %							
		I okres – nadmierne ciśnienie				II okres – obniżone ciśnienie			
		<i>u</i>	<i>p</i>	<i>o</i>	<i>p + o</i>	<i>u</i>	<i>p</i>	<i>o</i>	<i>p + o</i>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>RUROCIĄGI Z ŻELIWA SZAREGO</b>									
Brzeg	przed 1940 r.	27	73	0	73	36	64	0	64
	1953–1991	21	77	2	79	24	76	0	76
	ogółem	<b>21</b>	<b>76</b>	<b>3</b>	<b>79</b>	<b>26</b>	<b>74</b>	<b>0</b>	<b>74</b>
Kłodzko	przed 1940 r.	7	22	71	93	0	15	85	100
	1955–1995	31	53	16	69	50	38	12	50
	ogółem	<b>18</b>	<b>37</b>	<b>45</b>	<b>82</b>	<b>18</b>	<b>23</b>	<b>59</b>	<b>82</b>
Oleśnica	przed 1961r.	63	34	3	37	43	52	5	57
	1961–1996	76	21	3	24	36	64	0	64
	ogółem	<b>74</b>	<b>24</b>	<b>2</b>	<b>26</b>	<b>39</b>	<b>59</b>	<b>2</b>	<b>61</b>
Wrocław rejon 1	1928–1939	6	73	21	94	9	66	25	91
	1969–1991	77	20	3	23	96	4	0	4
	ogółem	<b>30</b>	<b>55</b>	<b>15</b>	<b>70</b>	<b>40</b>	<b>44</b>	<b>16</b>	<b>60</b>

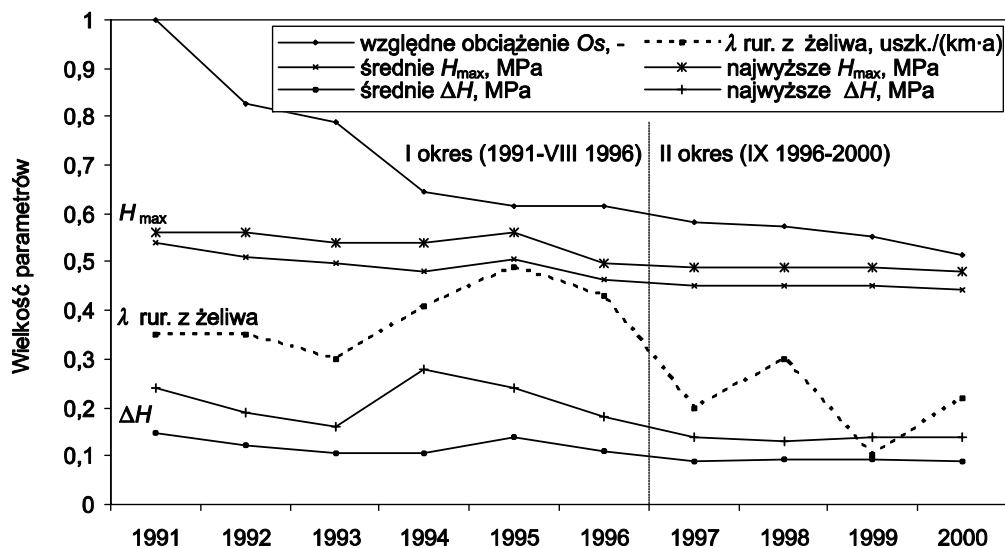
cd. tab. 4.4

Miasto	Okres budowy przewodów	Udział rodzajów uszkodzeń rurociągów w ogólnej liczbie uszkodzeń, %							
		I okres – nadmierne ciśnienie				II okres – obniżone ciśnienie			
		<i>u</i>	<i>p</i>	<i>o</i>	<i>p + o</i>	<i>u</i>	<i>p</i>	<i>o</i>	<i>p + o</i>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Wrocław rejon 2	1928–1939	11	66	23	89	20	65	15	80
	1952–1993	77	23	0	23	56	44	0	44
	ogółem	<b>37</b>	<b>48</b>	<b>15</b>	<b>63</b>	<b>23</b>	<b>64</b>	<b>13</b>	<b>77</b>
Opole	przed 1940 r.	19	62	19	81	–	–	–	–
	1941–1993	19	71	10	81	–	–	–	–
	ogółem	<b>19</b>	<b>67</b>	<b>14</b>	<b>81</b>	–	–	–	–
Polkowice	lata 60. XX w.	<b>33</b>	<b>67</b>	<b>0</b>	<b>67</b>	–	–	–	–
<b>RUROCIĄGI ZE STALI</b>									
Brzeg	1959–1974	0	0	0	0	0	0	0	0
Kłodzko	przed 1940 r.	0	0	100	100	0	0	100	100

	1960–1992	7	20	73	93	0	0	100	100
	ogółem	7	17	76	93	0	0	100	100
Wrocław rejon 2	1932, 1934	0	0	100	100	0	0	100	100
	1961–1975	62	13	25	100	50	50	0	100
	ogółem	28	6	66	69	12	12	76	88
Opole	ogółem	0	25	75	100	–	–	–	–
RUROCIĄGI Z AC									
Brzeg	1959–1974	0	100	0	100	0	0	0	0
Kłodzko	1960	0	0	0	0	0	0	0	0
Wrocław, 2	1937-39, 1960	0	100	0	100	0	100	0	100
Opole	do 1984 r.	7	66	27	93	–	–	–	–
RUROCIĄGI Z PVC									
Brzeg	1970–1999	25	75	–	75	20	80	–	80
Kłodzko	1960–1996	0	100	–	100	0	100	–	100
Oleśnica	1972–1998	26	74	–	74	0	100	–	100
Wrocław, 2	1989–1990	0	100	–	100	0	100	–	100
Opole	1970–2001	50	50	–	50	–	–	–	–
Polkowice	1992–1994	–	–	–	–	100	0	–	0
RUROCIĄGI Z PE HD									
Brzeg	1981–1994	0	100	–	100	13	87	–	87
Kłodzko	1992–1999	0	0	–	0	0	100	–	100
Oleśnica	1995–2000	0	0	–	0	0	0	–	0
Opole	1983–2000	100	0	–	0	–	–	–	–
Polkowice	1992–1996	–	–	–	–	0	100	–	100

W okresie przed modernizacją systemów dystrybucji wody, tj. w I okresie – nadmiernego ciśnienia w sieci (w stosunku do wymaganego eksploatacyjnego) – ogólna intensywność uszkodzeń ( $\lambda$ ) rurociągów była duża i wynosiła średnio od 0,38 uszk./( $\text{km}\cdot\text{a}$ ) w Brzegu do 1,10 uszk./( $\text{km}\cdot\text{a}$ ) w rejonie 1 Wrocławia. Natomiast w okresie po modernizacji systemów dystrybucji wody, tj. w II okresie – obniżonego ciśnienia w sieci – średnia intensywność  $\lambda$  rurociągów żeliwnych w każdym systemie dystrybucji wody zmniejszyła się i wynosiła od 0,22 uszk./( $\text{km}\cdot\text{a}$ ) w Kłodzku do ok. 0,60 uszk./( $\text{km}\cdot\text{a}$ ) we Wrocławiu (rejony 1 i 2). Było to efektem przeprowadzonej modernizacji systemów, która spowodowała, że maksymalne ciśnienie tłoczenia (średnie w okresach badań) uległo obniżeniu od 10% w Brzegu do ok. 40% we Wrocławiu i zmniejszyły się dobowe jego wahania, co ustabilizowało ciśnienie w sieci analizowanych miast (tab. 4.1). W konsekwencji stwierdzono znaczący (ok. 1,5–2,3-krotny) spadek średniej intensywności uszkodzeń  $\lambda$ , wynoszący od 33% w rejonie 2 Wrocławia do 56% w Oleśnicy (tab. 4.3 i tab. 4.4). Pomimo stwierdzonej zależności między wysokością tłoczenia pompowni a awaryjnością rurociągów w każdym z badanych systemów wodociągowych oddzielnie, zależności takiej (większej awaryjności w systemie o wyż-

szym ciśnieniu) nie stwierdzono, porównując systemy między sobą. Wynika to prawdopodobnie ze specyfiki każdego z systemów wodociągowych i różnego stopnia wpływu innych czynników, poza ciśnieniem, na intensywność uszkodzeń przewodów.

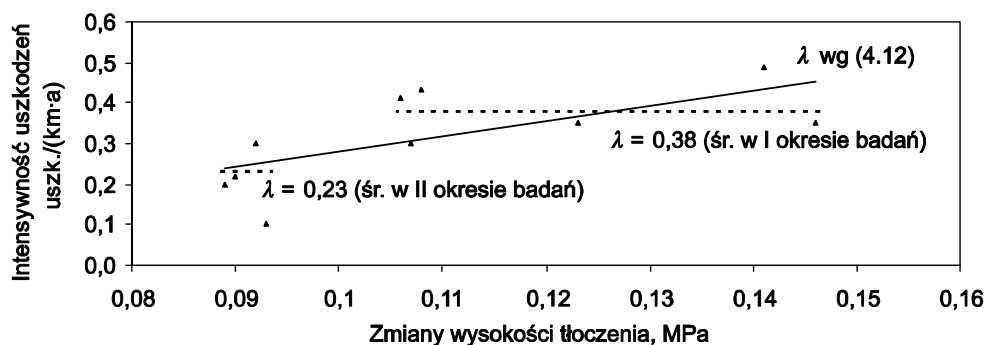


Rys. 4.6. Parametry eksploatacyjne sieci wodociągowej w Brzegu w latach 1991–2000  
Fig. 4.6. Operating parameters of the water-pipe network of Brzeg in the time span of 1991 to 2000

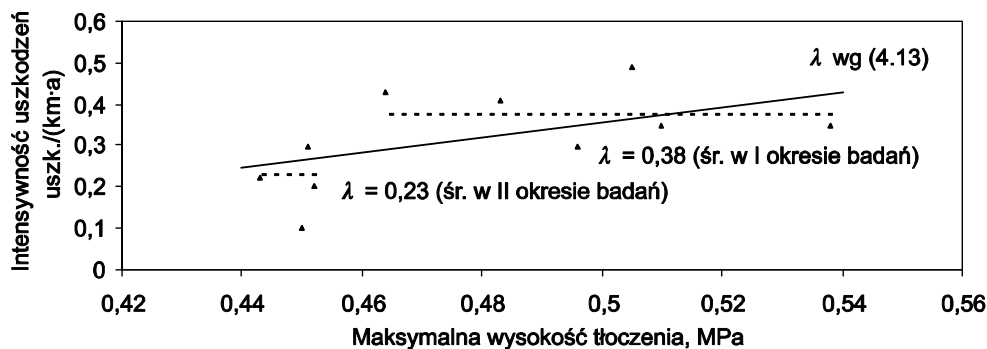
Korelacje pomiędzy wysokością ciśnienia w pompowni i jego wahaniami a intensywnością uszkodzeń rurociągów zbadano tylko w odniesieniu do sieci w Brzegu, dzięki uzyskaniu z przedsiębiorstwa wodociągowego szczegółowych danych o dobowych zmianach wysokości tłoczenia pompowni w okresie od stycznia 1991 r. do grudnia 2000 r.

Na rysunku 4.6 przedstawiono zmiany podstawowych parametrów eksploatacyjnych systemu dystrybucji wody w Brzegu w poszczególnych latach objętych analizą:

- względne, odniesione do wartości z 1991 r., obciążenie ( $O_s$ ) sieci wodociągowej,
- średnie wartości z maksymalnych dobowych wysokości ( $H_{max}$ ) tłoczenia pompowni,
- największe wartości z maksymalnych dobowych wysokości ( $H_{max}$ ) tłoczenia pompowni,
- średnie wartości z maksymalnych dobowych zmian ( $\Delta H = H_{max} - H_{min}$ ) wysokości tłoczenia pompowni,



Rys. 4.7. Ogólna intensywność uszkodzeń ( $\lambda$ ) rurociągów żeliwnych w zależności od zmian wysokości tłoczenia ( $\Delta H$ ) pompowni w Brzegu  
 Fig. 4.7. Overall failure rate ( $\lambda$ ) for cast iron pipes related to forcing pressure variations ( $\Delta H$ ) at the pumping station of Brzeg



Rys. 4.8. Ogólna intensywność uszkodzeń ( $\lambda$ ) rurociągów żeliwnych w zależności od maksymalnej wysokości tłoczenia ( $H_{\max}$ ) pompowni w Brzegu  
 Fig. 4.8. Overall failure rate ( $\lambda$ ) for cast iron pipes, related to maximal forcing pressure ( $H_{\max}$ ) at the pumping station in Brzeg

- największe wartości z maksymalnych dobowych zmian ( $\Delta H$ ) wysokości tłoczenia pompowni,
- średnie wartości ogólnej intensywności ( $\lambda$ ) uszkodzeń rurociągów żeliwnych.

Analiza średnich wartości dobowych wahań wysokości tłoczenia w poszczególnych latach obserwacji wykazała istotny wpływ zmniejszenia wahań  $\Delta H$  (MPa) na spadek ogólnej intensywności uszkodzeń  $\lambda$  (uszk./km·a) rurociągów żeliwnych według zależności (rys. 4.7)

$$\lambda = 3,792\Delta H - 0,100 \quad (R = 0,6724; R_{kr} = 0,5494) \quad (4.12)$$

Statystycznie przeciętną korelację stwierdzono pomiędzy średnimi (w latach obserwacji) wartościami wysokości tłoczenia  $H_{\max}$  (MPa) i intensywności uszkodzeń rurociągów  $\lambda$  (uszk./km·a) (rys. 4.8)

$$\lambda = 1,827H_{\max} - 0,558 \quad (R = 0,5174; R_{kr} = 0,5494) \quad (4.13)$$

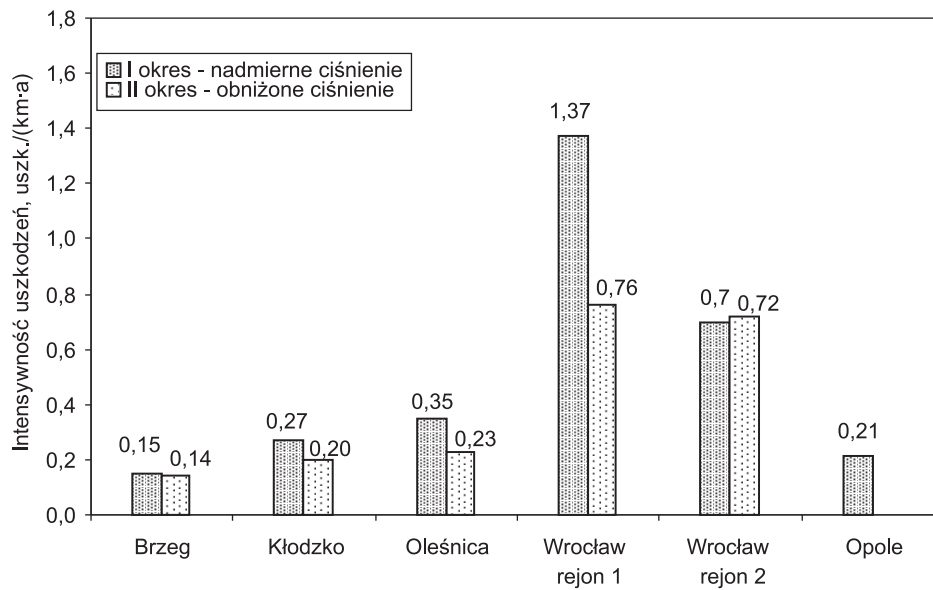
Z tego wynika, że dla analizowanych zakresów zmian średnich wysokości tłoczenia  $H_{\max}$  (0,54–0,44 MPa) oraz jego wahań  $\Delta H$  (0,15–0,09 MPa) w latach 1991–2000 intensywność uszkodzeń  $\lambda$  rurociągów żeliwnych w Brzegu zależała w większym stopniu od wahań ciśnienia niż wysokości tłoczenia pompowni.

O znaczącym wpływie zmian ciśnienia tłoczenia na awaryjność rurociągów świadczy zwłaszcza porównanie średnich wartości parametrów  $\Delta H$ ,  $H_{\max}$  i  $\lambda$  z okresów eksploatacji sieci przed i po modernizacji pompowni. Badania w Brzegu wykazały, że zmniejszenie o 25% średnich wartości dobowych wahań ciśnienia (z 0,12 MPa w I okresie do 0,09 MPa w II okresie) i jednocześnie zmniejszenie o 10% ciśnienia maksymalnego (z 0,50 MPa do 0,45 MPa) spowodowało spadek średniej ogólnej intensywności uszkodzeń rurociągów żeliwnych prawie o 40% (z 0,38 uszk./km·a do 0,23 uszk./km·a). Należy przy tym podkreślić, iż w analizie uwzględniono średnie wartości ciśnienia  $H_{\max}$  i jego wahań dobowych  $\Delta H$  w pompowni. Maksymalne natomiast wartości ciśnienia w I okresie wynosiły często 0,56 MPa, maksymalne wahania zaś dochodziły do 0,24 MPa (rys. 4.6), a niekiedy nawet do 0,40 MPa, co jak widać nie było bez wpływu na awaryjność rurociągów żeliwnych w tym okresie eksploatacji. Po modernizacji pompowni w końcu 1996 r. (II okres eksploatacji) nastąpiła stabilizacja ciśnienia, które nie przekraczało 0,49 MPa przy maksymalnych wahaniami do 0,14 MPa (rys. 4.6).

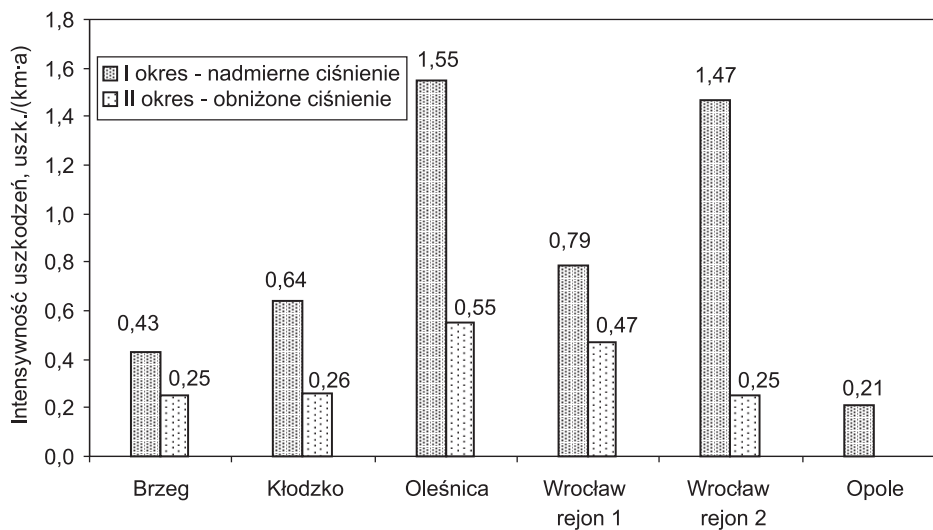
#### 4.3.2.1.1.2. Okres i rok budowy rurociągów

W celu zbadania wpływu okresu budowy przewodów żeliwnych na ich awaryjność obliczono średnie wartości intensywności uszkodzeń rurociągów budowanych w okresach przed 1940 r. oraz po 1940 r., tj. w latach 1952–1996. W grupie starych rurociągów, budowanych przed 1940 r., ogólna intensywność uszkodzeń ( $\lambda$ ) w czasie eksploatacji z nadmiernym ciśnieniem w analizowanych systemach wynosiła średnio 0,15–1,37 uszk./km·a, a w okresie obniżonego ciśnienia spadła do 0,14–0,76 uszk./km·a (tab. 4.3, rys. 4.9).





Rys. 4.9. Ogólna intensywność uszkodzeń ( $\lambda$ ) rurociągów żeliwnych wybudowanych przed 1940 r. w dwóch okresach eksploatacji sieci  
 Fig. 4.9. Overall failure rate ( $\lambda$ ) for cast iron pipelines constructed before 1940, observed over period I and period II of service

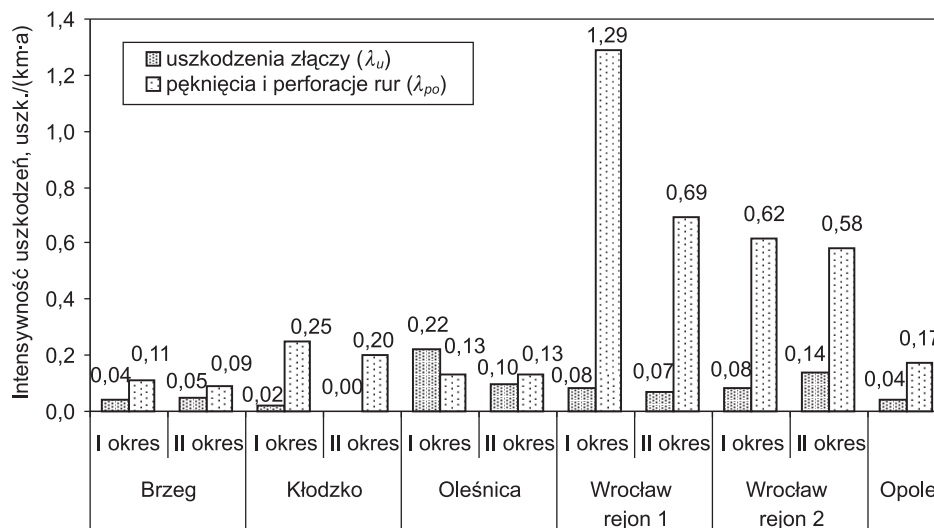


Rys. 4.10. Ogólna intensywność uszkodzeń ( $\lambda$ ) rurociągów żeliwnych wybudowanych w latach 1952–1996 w dwóch okresach eksploatacji sieci  
 Fig. 4.10. Overall failure rate ( $\lambda$ ) for cast iron pipelines constructed in time span of 1952 to 1996, observed over period I and period II of service

Dla nowszych rurociągów, budowanych po 1940 r., wartości wskaźnika uszkodzeń  $\lambda$  wynosiły 0,43–1,55 uszk./(km·a) w I okresie badań oraz 0,25–0,55 uszk./(km·a) w II okresie badań (tab. 4.3, rys. 4.10).

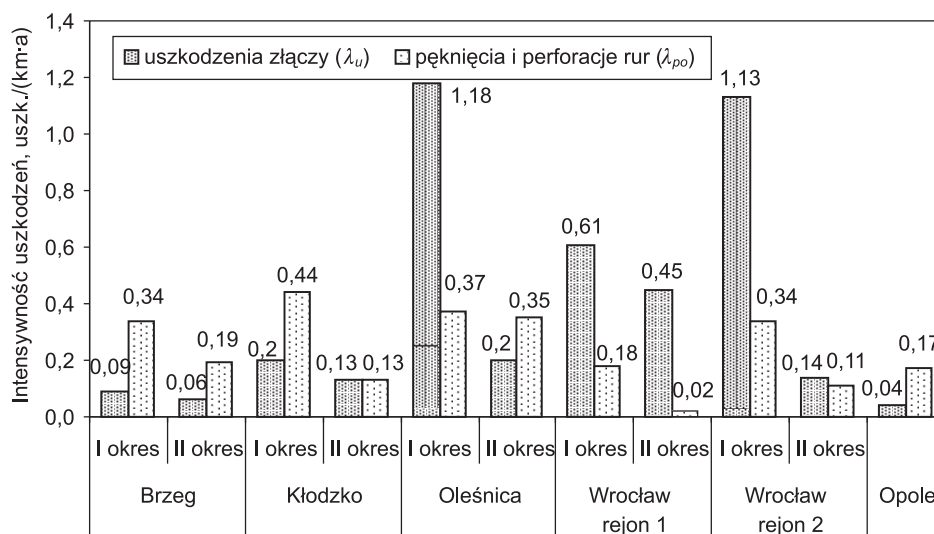
Przeprowadzona analiza wykazała jednak w większości miast brak korelacji między intensywnością uszkodzeń a okresem budowy rurociągów żeliwnych. Jedynie we Wrocławiu stare przewody charakteryzowały się większą intensywnością uszkodzeń niż nowsze. W rejonie 1 sieci, w obydwu okresach badań, intensywność uszkodzeń starych rurociągów żeliwnych była ok. 1,7-krotnie większa niż rurociągów nowszych, natomiast w rejonie 2 sieci – jedynie w II okresie badań, wskaźnik  $\lambda$  starych rurociągów był prawie 3-krotnie większy niż nowszych. W Opolu stare i nowsze rurociągi miały jednakowy i stosunkowo niski wskaźnik uszkodzeń (0,21 uszk./(km·a)). Natomiast w Brzegu, Kłodzku i Oleśnicy około 1,3–4,4-krotnie większą awaryjnością charakteryzowały się rurociągi nowsze, tj. budowane w II połowie XX w. Wpłynęły na to m.in. występujące w tym czasie ograniczenia technologii produkcji i wykonawstwa rur i ich połączeń, braki materiałów i niekonkurencyjny rynek pracy. Nie można zatem jednoznacznie stwierdzić, że rurociągi dłużej eksploatowane częściej ulegają uszkodzeniom, gdyż składa się na to wiele różnorodnych czynników.

Potwierdzają to wyniki przeprowadzonych badań sieci w wymienionych miastach, w których najmniejszą średnią awaryjnością (0,14 uszk./(km·a)) charakteryzowały się rurociągi sprzed 1940 r. w Brzegu, natomiast największą (1,55 uszk./(km·a)) – rurociągi budowane w latach 1961–1996 w Oleśnicy (tab. 4.3).



Rys. 4.11. Intensywność uszkodzeń ( $\lambda_u$ ,  $\lambda_{po}$ ) rurociągów żeliwnych sprzed 1940 r., z uwzględnieniem rodzaju uszkodzeń, w dwóch okresach eksploatacji sieci

Fig. 4.11. Failure rate ( $\lambda_u$ ,  $\lambda_{po}$ ) for cast iron pipelines constructed before 1940, including type of damage, observed over period I and period II of service



Rys. 4.12. Intensywność uszkodzeń ( $\lambda_u, \lambda_{po}$ ) rurociągów żeliwnych z lat 1952–1996, z uwzględnieniem rodzaju uszkodzeń, w dwóch okresach eksploatacji sieci

Fig. 4.12. Failure rate ( $\lambda_u, \lambda_{po}$ ) for cast iron pipelines constructed in the time span of 1952 to 1996, including type of damage, observed over period I and period II of service

Z badań jednak wynika, że okres budowy oraz czas eksploatacji przewodów mają znaczący wpływ na rodzaj powstających uszkodzeń rurociągów, a także na ich podatność na uszkodzenia w różnych warunkach eksploatacji ze względu na wysokość i zmiany ciśnienia wody. Stare rurociągi żeliwne sprzed 1940 r. ulegały głównie pęknięciom i perforacji wskutek korozji (wskaźniki  $\lambda_p$  i  $\lambda_o$ ), co świadczy o znacznym zużyciu materiału rur podczas długoletniej (ponad 55 lat) eksploatacji (rys. 4.11). Uszkodzenia te w okresie nadmiernego ciśnienia w sieci stanowiły od 73% (Brzeg) do 94% (Wrocław, rejon 1) uszkodzeń starych przewodów, a w okresie obniżonego ciśnienia – od 64% (Brzeg) do 100% (Kłodzko). W Opolu 81% uszkodzeń było wynikiem pęknięcia i perforacji materiału rur (tab. 4.4).

Struktura uszkodzeń nowszych rurociągów żeliwnych, eksploatowanych średnio od kilku do 54 lat, była zróżnicowana w poszczególnych miastach i zmienna w zależności od warunków eksploatacji sieci (rys. 4.12). Generalnie przeważały jednak uszkodzenia złączy rur, co świadczy m.in. o ich złym wykonawstwie. Podczas eksploatacji z nadmiernym ciśnieniem w sieci (I okres badań) uszkodzenia złączy (wskaźnik  $\lambda_u$ ) dominowały w Oleśnicy i Wrocławiu, gdzie stanowiły ok. 77% uszkodzeń nowszych rurociągów, natomiast w Brzegu i Kłodzku stanowiły jedynie 21% i 31%. Po zmniejszeniu wysokości i wahań ciśnienia w sieci wodociągowej (II okres badań) uszkodzenia złączy stanowiły 50% uszkodzeń rurociągów w Kłodzku, 56% we Wrocławiu w rejonie 2 i 96% w rejonie 1, zaś w Brzegu i Oleśnicy tylko 24% i 36%. W Opolu

udział uszkodzeń złączy w ogólnej liczbie uszkodzeń nowszych rurociągów żeliwnych wynosił 19% (tab. 4.4).

Brak korelacji między intensywnością uszkodzeń i okresem budowy (zatem i wiekiem) rurociągów żeliwnych (w niektórych systemach wodociagowych) nie zawsze upoważnia do wnioskowania o dobrym stanie technicznym starych rurociągów, co jest dosyć częste. Przyczyną tego jest na ogół zły stan techniczny nowszych przewodów (budowanych w okresie gospodarki planowej) i dlatego ocena ta wypada na korzyść starych rurociągów.

O dekapitalizacji przewodów świadczy m.in. nie tylko częstość, ale i rodzaj ich uszkodzeń. Bardzo duża podatność na pęknięcia i perforacje rurociągów żeliwnych po kilkudziesięcioletniej ich eksploatacji powinna być więc istotnym kryterium decydującym o podjęciu działań modernizacyjnych, tym bardziej jeśli weźmie się pod uwagę skutki tego rodzaju uszkodzeń, tj. większe koszty naprawy i straty wody niż w razie uszkodzeń złączy (rozdziały 5. i 6.). O znacznej dekapitalizacji rurociągów z żeliwa szarego sprzed 1940 r. świadczy także fakt, że ograniczenie wysokości i wahań ciśnienia w badanych systemach nie spowodowało tak znaczącego zmniejszenia intensywności ich uszkodzeń, jak w wypadku nowszych rurociągów. Średnia ogólna intensywność uszkodzeń rurociągów budowanych począwszy od 1952 r. zmniejszyła się o 40–83%, natomiast rurociągów sprzed 1940 r. jedynie o 0–45% (tab. 4.3).

W kolejnym etapie badań nowszych przewodów żeliwnych przeanalizowano średnie wartości wskaźników uszkodzeń rurociągów budowanych w dziesięcioletnich przedziałach czasu, a także wyodrębniono lata, w których zostały wybudowane rurociągi charakteryzujące się obecnie największą awaryjnością. Wyniki zawarto w tabelach 4.5 i 4.6. Szczegółowa analiza wykazała, że awarie występowały najczęściej na przewodach wybudowanych w latach 1960–1969 oraz 1980–1989. Średnie wartości wskaźnika  $\lambda$  rurociągów z lat 60. w I okresie badań w Brzegu, Oleśnicy i we Wrocławiu były prawie 2-krotnie większe od średniej intensywności uszkodzeń wszystkich rurociągów wybudowanych po 1940 r. W II okresie eksploatacji z obniżonym ciśnieniem w sieci wodociagowej wystąpił znaczący spadek awaryjności tych rurociągów (z wyjątkiem Kłodzka), kształtując się na poziomie wartości średniej dla wszystkich rurociągów. W tabeli 4.6 zestawiono dane o rurociągach, których intensywność uszkodzeń, średnia w okresach badań, była największa i przekraczała jedno uszkodzenie na kilometr w roku. Były to głównie rurociągi o średnicach 100–200 mm (Brzeg, Kłodzko), a także o średnicach 300–500 mm (Oleśnica, Wrocław). Szczególnie dużą uszkodzalnością ( $\lambda$ ) charakteryzowały się rurociągi wybudowane w Oleśnicy w latach 1968–1970 (5,49 uszk./km·a) i w 1964 r. (2,73 uszk./km·a) oraz we Wrocławiu w 1969 r. (2,83 uszk./km·a), w 1977 r. (2,55 uszk./km·a) i w 1974 r. (2,37 uszk./km·a). W każdym wypadku dominowały uszkodzenia złączy rur ( $\lambda_{ul}$ ), które stanowiły 70–100% wartości  $\lambda$ . Po zmniejszeniu ciśnienia i jego wahań intensywność uszkodzeń tych rurociągów zmniejszyła się 2–3-krotnie.

Tabela 4.5. Średnia intensywność uszkodzeń rurociągów z żeliwa w zależności od okresu ich budowy i rodzaju uszkodzeń w dwóch okresach eksploatacji sieci

Table 4.5. Average failure rate for cast iron pipelines related to the time of construction and type of damage over two periods of service

Miasto	Okres budowy przewodów	$L_{sr}$ w dwóch okresach badań km	Intensywność uszkodzeń rurociągów żeliwnych uszk./(km·a)								$\lambda_{II}/\lambda_I$
			I okres nadmierne ciśnienie				II okres obniżone ciśnienie				
			$\lambda_u$	$\lambda_p$	$\lambda_o$	$\lambda$	$\lambda_u$	$\lambda_p$	$\lambda_o$	$\lambda$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Brzeg	<b>przed 1940</b>	9,632	<b>0,04</b>	<b>0,11</b>	<b>0</b>	<b>0,15</b>	<b>0,05</b>	<b>0,09</b>	<b>0</b>	<b>0,14</b>	<b>0,93</b>
	<b>1953–1991</b>	39,383; 39,453	<b>0,09</b>	<b>0,33</b>	<b>0,01</b>	<b>0,43</b>	<b>0,06</b>	<b>0,19</b>	<b>0</b>	<b>0,25</b>	<b>0,60</b>
	1950–1959	6,192	0,11	0,20	0,03	0,34	0,11	0,11	0	0,22	0,65
	1960–1969	9,736	0,09	0,63	0	0,72	0,05	0,26	0	0,31	0,43
	1970–1979	14,409	0,07	0,23	0	0,30	0,03	0,16	0	0,19	0,63
	1980–1989	7,578	0,14	0,33	0	0,47	0,12	0,24	0	0,36	0,76
	1990–1999	1,468; 1,538	0	0	0	0	0	0,15	0	0,15	–
	<i>ogółem</i>	49,015; 49,085	<i>0,08</i>	<i>0,29</i>	<i>0,01</i>	<i>0,38</i>	<i>0,06</i>	<i>0,17</i>	<i>0</i>	<i>0,23</i>	<i>0,61</i>
Kłodzko	<b>przed 1940</b>	28,455; 28,073	<b>0,02</b>	<b>0,06</b>	<b>0,19</b>	<b>0,27</b>	<b>0</b>	<b>0,03</b>	<b>0,17</b>	<b>0,20</b>	<b>0,74</b>
	<b>1955–1995</b>	12,388; 12,635	<b>0,20</b>	<b>0,34</b>	<b>0,10</b>	<b>0,64</b>	<b>0,13</b>	<b>0,10</b>	<b>0,03</b>	<b>0,26</b>	<b>0,41</b>
	1950–1959	0,710	0	0	0	0	0	0	0	0	–
	1960–1969	4,310	0,29	0,37	0	0,66	0,40	0,20	0,10	0,70	1,06
	1970–1979	4,340	0,04	0,29	0,16	0,49	0	0	0	0	0
	1980–1989	2,570	0,41	0,55	0,14	1,10	0	0,17	0	0,17	0,15
	1990–1999	0,458; 0,705	0	0	0,38	0,38	0	0	0	0	0
	<i>ogółem</i>	40,843; 40,708	<i>0,07</i>	<i>0,14</i>	<i>0,17</i>	<i>0,38</i>	<i>0,04</i>	<i>0,05</i>	<i>0,13</i>	<i>0,22</i>	<i>0,58</i>
Oleśnica <sup>1)</sup>	<b>przed 1961</b>	24,408	<b>0,22</b>	<b>0,12</b>	<b>0,01</b>	<b>0,35</b>	<b>0,10</b>	<b>0,12</b>	<b>0,01</b>	<b>0,23</b>	<b>0,66</b>
	<b>1961–1996</b>	22,478; 32,325	<b>1,18</b>	<b>0,33</b>	<b>0,04</b>	<b>1,55</b>	<b>0,20</b>	<b>0,35</b>	<b>0</b>	<b>0,55</b>	<b>0,35</b>
	1961–1969	10,034	1,97	0,43	0,06	2,46	0,44	0,30	0	0,74	0,30
	1970–1979	6,758	0,83	0,22	0,02	1,07	0,15	0,26	0	0,41	0,38
	1980–1989	5,034; 8,947	0,26	0,31	0,02	0,59	0,10	0,58	0	0,68	1,15
	1990–1999	0,652; 6,586	0	0	0	0	0,04	0,21	0	0,25	–
	<i>ogółem</i>	46,886; 56,733	<i>0,69</i>	<i>0,22</i>	<i>0,02</i>	<i>0,93</i>	<i>0,16</i>	<i>0,24</i>	<i>0,01</i>	<i>0,41</i>	<i>0,44</i>
Wrocław rejon I	<b>1928–1939</b>	21,531	<b>0,08</b>	<b>1,00</b>	<b>0,29</b>	<b>1,37</b>	<b>0,07</b>	<b>0,50</b>	<b>0,19</b>	<b>0,76</b>	<b>0,55</b>
	<b>1969–1991</b>	19,280; 19,504	<b>0,61</b>	<b>0,16</b>	<b>0,02</b>	<b>0,79</b>	<b>0,45</b>	<b>0,02</b>	<b>0</b>	<b>0,47</b>	<b>0,59</b>
	1960–1969	4,202	0,95	0,12	0,12	1,19	0,47	0	0	0,47	0,39
	1970–1979	7,047	0,57	0,11	0	0,67	0,62	0,06	0	0,68	1,01
	1980–1989	7,658	0,46	0,23	0	0,69	0,16	0	0	0,16	0,23
	1990–1997	0,373; 0,597	0,67	0	0	0,67	2,01	0	0	2,01	3
	<i>ogółem</i>	40,811; 41,035	<i>0,33</i>	<i>0,60</i>	<i>0,17</i>	<i>1,10</i>	<i>0,25</i>	<i>0,27</i>	<i>0,10</i>	<i>0,62</i>	<i>0,56</i>

Miasto	Okres budowy przewodów	$L_{\text{sr}}$ w dwóch okresach badań km	Intensywność uszkodzeń rurociągów żeliwnych uszk./(km·a)								$\lambda_{\text{II}}/\lambda_{\text{I}}$
			I okres nadmierne ciśnienie				II okres obniżone ciśnienie				
			$\lambda_u$	$\lambda_p$	$\lambda_o$	$\lambda$	$\lambda_u$	$\lambda_p$	$\lambda_o$	$\lambda$	
Wrocław rejon 2	1928–1939	21,295; 20,850	<b>0,08</b>	<b>0,46</b>	<b>0,16</b>	<b>0,70</b>	<b>0,14</b>	<b>0,47</b>	<b>0,11</b>	<b>0,72</b>	<b>1,03</b>
	1952–1993	6,632; 6,980	<b>1,13</b>	<b>0,34</b>	<b>0</b>	<b>1,47</b>	<b>0,14</b>	<b>0,11</b>	<b>0</b>	<b>0,25</b>	<b>0,17</b>
	1950–1959	0,462	0	1,62	0	1,62	0	0	0	0	0
	1960–1969	1,410	2,30	0,36	0	2,66	0	0,35	0	0,35	0,13
	1970–1979	3,458	1,08	0,22	0	1,30	0,29	0,07	0	0,36	0,28
	1980–1989	0,056	0	0	0	0	0	0	0	0	–
	1990–1998	1,247; 1,595	0,40	0,20	0	0,60	0	0	0	0	0
<i>ogółem</i>	27,927; 27,830	<i>0,33</i>	<i>0,43</i>	<i>0,13</i>	<i>0,89</i>	<i>0,14</i>	<i>0,38</i>	<i>0,08</i>	<i>0,60</i>	<i>0,67</i>	

<sup>1)</sup> brak szczegółowej inwentaryzacji przewodów sprzed 1961 r.

Tabela 4.6. Rurociągi żeliwne o największej intensywności uszkodzeń, z uwzględnieniem średnicy i roku budowy w okresie po 1940 r.

Table 4.6. Cast iron water pipes of the highest failure rate, with consideration of diameter and year of construction after 1940

Miasto	Rurociągi żeliwne wybudowane w latach 1952–1996, o najwyższych – średnio w okresach badań – wskaźnikach uszkodzeń							
	I okres nadmierne ciśnienie				II okres obniżone ciśnienie			
	rok budowy	$d$ mm	$L_{\text{sr}}$ km	$\lambda$ ( $\lambda_u; \lambda_{po}$ ) uszk./(km·a)	rok budowy	$d$ mm	$L_{\text{sr}}$ km	$\lambda$ ( $\lambda_u; \lambda_{po}$ ) uszk./(km·a)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Brzeg	1966	100	0,922	1,15 (0,19; 0,96)	1966	100	0,922	0,75 (0,25; 0,50)
	1967	100	1,159	1,37 (0,30; 1,07)				
	1969	100	0,871	1,22 (0; 1,22)				
	1969	150	0,695	1,02 (0; 1,02)	1969	150	0,695	1,00 (0; 1,00)
Kłodzko	1960	150	1,880	1,13 (0,47; 0,66)	1960	150	1,880	0,91 (0,68; 0,23)
					1965	150	1,775	0,72 (0,24; 0,48)
	1985	150	1,080	1,14 (0,16; 0,98)				
Oleśnica <sup>1)</sup>	1985	200	1,490	1,06 (0,59; 0,47)				
	1961	100–300	4,241	1,47 (1,28; 0,19)				
	1963	150, 200	1,420	2,35 (1,29; 1,06)				
	1964	150	0,945	2,73 (2,29; 0,44)				
	1968	150, 300 400	2,175	4,63 (3,79; 0,84)	1968	150, 300 400	2,175	1,66 (1,32; 0,34)
	1969	150, 300 400	1,186	1,90 (1,62; 0,28)				
1968–70	300	1,261	5,49 (4,30; 1,19)	1968–70	300	1,261	2,48 (1,88; 0,60)	

cd. tab. 4.6

Miasto	Rurociągi żeliwne wybudowane w latach 1952–1996, o najwyższych – średnio w okresach badań – wskaźnikach uszkodzeń							
	I okres nadmierne ciśnienie				II okres obniżone ciśnienie			
	rok budowy	<i>d</i> mm	<i>L</i> <sub>śr</sub> km	$\lambda$ ( $\lambda_u$ ; $\lambda_{po}$ ) uszk./km·a	rok budowy	<i>d</i> mm	<i>L</i> <sub>śr</sub> km	$\lambda$ ( $\lambda_u$ ; $\lambda_{po}$ ) uszk./km·a
Oleśnica <sup>1)</sup> (cd.)	1975	150	1,832	1,95 (1,77; 0,18)				
	1978	100, 150	1,159	1,08 (0,72; 0,36)				
	1981	100, 150	1,838	1,23 (0,57; 0,66)	1981	100, 150	1,838	2,72 (0,41; 2,31)
Wrocław rejon 1	1969	500	4,202	1,19 (0,95; 0,24)				
	1977	300	0,880	2,55 (1,70; 0,85)	1977	300	0,880	1,36 (1,36; 0)
Wrocław rejon 2	1969	500	1,060	2,83 (2,83; 0)				
	1974	350	1,795	2,37 (1,95; 0,42)	1974	350	1,795	0,70 (0,56; 0,14)

<sup>1)</sup> brak szczegółowej inwentaryzacji przewodów sprzed 1961 r.

Uwzględniono przewody o  $\lambda > 1,0$  uszk./km·a i jednocześnie  $L > \sim 1$  km.

#### 4.3.2.1.1.3. Czas trwania eksploatacji (wiek) rurociągów

Określenie związku między intensywnością uszkodzeń przewodów wodociągowych ( $\lambda$ ) a czasem trwania eksploatacji ( $t$ ) jest utrudnione z powodu wielu dodatkowych, uprzednio po części wymienionych, czynników wpływających na uszkodzalność sieci. Odnośne badania przeprowadzono dla sieci wodociągowych Oleśnicy i rejonu 1 Wrocławia.

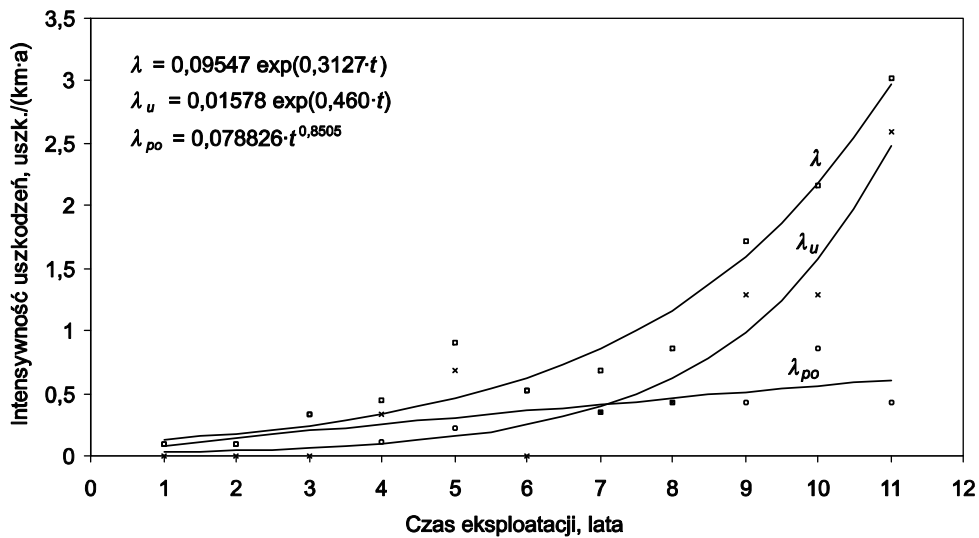
W Oleśnicy analizie poddano wyłącznie rurociągi żeliwne budowane od 1980 r. Powodem był brak pełnych informacji o długości przewodów wymienionych w latach 60. i 70., a przede wszystkim częste awarie rurociągów z tych lat spowodowane innymi czynnikami. W okresie eksploatacji z nadmiernym ciśnieniem w sieci (1981–1992) średnie wartości ogólnej intensywności uszkodzeń ( $\lambda$ ), intensywności uszkodzeń złączy ( $\lambda_u$ ) oraz pęknięć i perforacji ( $\lambda_{po}$ ) rurociągów żeliwnych ogółem rosły wraz ze wzrostem czasu eksploatacji ( $1 \leq t \leq 11$  lat) według zależności

$$\lambda = 0,09547 \exp(0,3127 \cdot t) \quad (R = 0,9776; R_{kr} = 0,5214) \quad (4.14)$$

$$\lambda_u = 0,01578 \exp(0,460 \cdot t) \quad (R = 0,9513; R_{kr} = 0,5214) \quad (4.15)$$

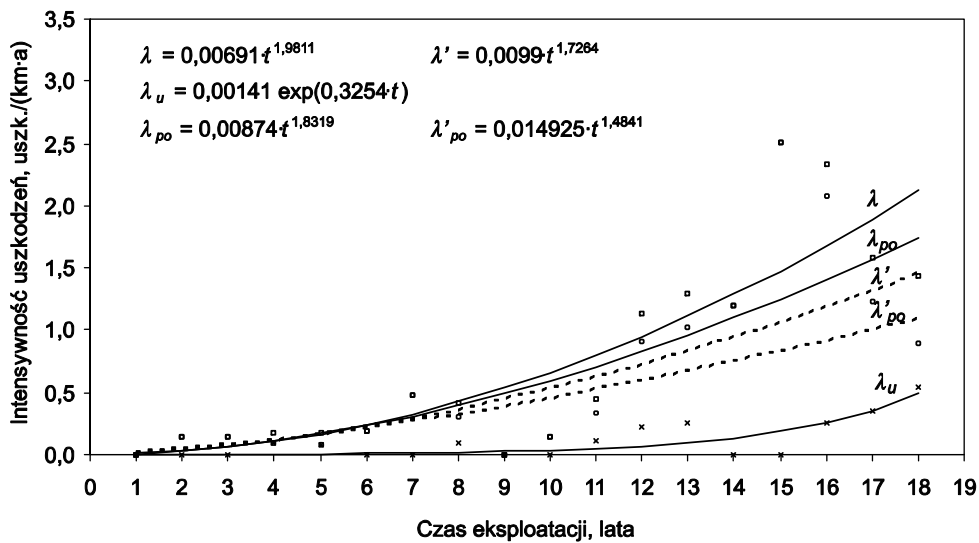
$$\lambda_{po} = 0,078826 \cdot t^{0,8505} \quad (R = 0,7642; R_{kr} = 0,5214) \quad (4.16)$$

W okresie eksploatacji z obniżonym ciśnieniem w sieci (1993–2000) średnie wartości wskaźników uszkodzeń rurociągów rosły wraz ze wzrostem czasu eksploatacji ( $1 \leq t \leq 18$  lat) według zależności



Rys. 4.13. Intensywność uszkodzeń ( $\lambda$ ,  $\lambda_u$ ,  $\lambda_{po}$ ) rurociągów żeliwnych wybudowanych w Oleśnicy w latach 1980–1992, w zależności od czasu eksploatacji, w I okresie badań

Fig. 4.13. Failure rate ( $\lambda$ ,  $\lambda_u$ ,  $\lambda_{po}$ ) for cast iron pipelines constructed in Oleśnica in the time span of 1980 to 1992, related to duration of service, observed over period I



Rys. 4.14. Intensywność uszkodzeń ( $\lambda$ ,  $\lambda_u$ ,  $\lambda_{po}$ ) rurociągów żeliwnych wybudowanych w Oleśnicy w latach 1980–1996, w zależności od czasu eksploatacji, w II okresie badań

Fig. 4.14. Failure rate ( $\lambda$ ,  $\lambda_u$ ,  $\lambda_{po}$ ) for cast iron pipelines constructed in Oleśnica in the time span of 1980 to 1996, related to duration of service, observed over period II



$$\lambda = 0,00691 \cdot t^{1,9811} \quad (R = 0,8585; R_{kr} = 0,4000) \quad (4.17)$$

$$\lambda_u = 0,00141 \exp(0,3254 \cdot t) \quad (R = 0,8233; R_{kr} = 0,4000) \quad (4.18)$$

$$\lambda_{po} = 0,00874 \cdot t^{1,8319} \quad (R = 0,7825; R_{kr} = 0,4000) \quad (4.19)$$

Z ilustracji zamieszczonych na rys. 4.13 i 4.14 widać, że znaczny wzrost intensywności uszkodzeń rurociągów żeliwnych (wybudowanych w latach 80. i 90.) miał miejsce po dziewięciu latach ich eksploatacji, według danych z I okresu badań, oraz po dwunastu latach eksploatacji, według danych z II okresu badań. Należy przy tym zaznaczyć, że w każdym z okresów badań do grupy rurociągów o określonym czasie eksploatacji należały rurociągi budowane w innych latach. Szczegółowa analiza wykazała, że duży wzrost uszkodzalności analizowanej sieci rurociągów w stosunkowo krótkim czasie eksploatacji spowodowany był m.in. bardzo dużą awaryjnością rurociągów o średnicach 100 mm i 150 mm wybudowanych w 1981 r. Dotyczyło to zwłaszcza II okresu eksploatacji (tab. 4.6), w którym jedną trzecią ogólnej liczby awarii tych rurociągów stanowiły pęknięcia rur w okresie zimowym. Pominiecie tych awarii w analizie spowodowało, iż ogólna intensywność uszkodzeń oraz intensywność pęknięć i perforacji rosły łagodniej podczas eksploatacji, co określają zależności (4.20) i (4.21)

$$\lambda' = 0,0099 \cdot t^{1,7264} \quad (R = 0,7216; R_{kr} = 0,4000) \quad (4.20)$$

$$\lambda'_{po} = 0,014925 \cdot t^{1,4841} \quad (R = 0,6324; R_{kr} = 0,4000) \quad (4.21)$$

Zbadano także zależności  $\lambda = f(t)$  w odniesieniu do wymienionych rurociągów żeliwnych w Oleśnicy, ale z podziałem na ich średnice i rodzaj występujących uszkodzeń [40, 42, 81]. Uzyskane wyniki wykazały różny stopień korelacji między parametrami  $\lambda$ ,  $\lambda_u$ ,  $\lambda_{po}$  a  $t$ , oraz różne tendencje zmian wskaźników intensywności uszkodzeń podczas eksploatacji. W większości wypadków miał miejsce wzrost wartości parametrów  $\lambda$ ,  $\lambda_u$  i  $\lambda_{po}$  wraz z czasem eksploatacji  $t$  (wiekiem rurociągów). Pełna i obiektywna ocena wpływu procesu starzenia się rurociągów na ich stan techniczny, którego jedną z miar jest podatność na uszkodzenia, nie jest jednak możliwa, gdyż w większości wypadków nie było (w kartach awarii) informacji o przyczynach zaistniałych uszkodzeń. Najczęściej było to spowodowane brakiem możliwości jednoznacznego wskazania głównej przyczyny uszkodzenia lub niepodjęciem próby takiej oceny. Niezbędne i uzasadnione jest więc w takich sytuacjach prowadzenie badań stanu technicznego rurociągów podczas dokonywania naprawy.

Badania wpływu czasu eksploatacji na intensywność uszkodzeń ( $\lambda$ ,  $\lambda_u$ ,  $\lambda_{po}$ ) rurociągów żeliwnych przeprowadzono także dla sieci wodociągowej rejonu 1 we Wrocławiu. Wykazały one brak istotnych zależności między tymi parametrami, zarówno dla średnich wartości intensywności uszkodzeń z poszczególnych lat, jak i okresów badań [24, 45]. Oznacza to, że na intensywność uszkodzeń rurociągów we Wrocławiu

większy wpływ miały inne czynniki niż upływ czasu. Nie bez znaczenia była także stosunkowo mała długość przewodów o określonym czasie eksploatacji, co przy krótszych okresach badań (niż w Oleśnicy) mogło mieć wpływ na średnie wartości intensywności uszkodzeń. Uwzględniając powyższe, nie kontynuowano analizy dla sieci wodociągowych w pozostałych miastach objętych programem badań.

#### 4.3.2.1.1.4. Czas trwania obserwacji

Badanie tendencji zmian intensywności uszkodzeń przewodów podczas trwania eksploatacji jest bardzo ważne, gdyż na podstawie uzyskanych wyników można prognozować wartości  $\lambda$  z kilkuletnim wyprzedzeniem. Umożliwia to, przy znajomości jednostkowych kosztów naprawy uszkodzeń, szacowanie środków finansowych na naprawę przewodów (o czym mowa w rozdziale 5.) oraz podejmowanie optymalnych decyzji w zakresie eksploatacji i modernizacji sieci wodociągowej z uwzględnieniem rachunku ekonomicznego.

Ilościową ocenę zmian intensywności uszkodzeń rurociągów żeliwnych podczas obserwacji – w każdym z analizowanych okresów eksploatacji sieci, przeprowadzono z uwzględnieniem rodzaju uszkodzeń rurociągów. Wyniki analizy, na podstawie danych wyjściowych zawartych w tab. 4.7, zestawiono w tab. 4.8. Zmiany wartości wskaźników  $\lambda$ ,  $\lambda_u$  i  $\lambda_{po}$  w miarę upływu czasu badań ( $A-P$ ) ( $A$  oznacza rok obserwacji, natomiast  $P$  – rok poprzedzający pierwszą obserwację w danym okresie badań) określono łącznie w 11 okresach eksploatacji sieci (po dwa w Brzegu, Kłodzku i Oleśnicy, cztery we Wrocławiu i jeden w Opolu). W większości wypadków nie było istotnych korelacji, co można wytłumaczyć m.in. zbyt krótkim czasem trwania poszczególnych okresów badawczych (poza Oleśnicą) przy dużej losowości i różnorodności czynników wpływających na wartości wskaźników uszkodzeń rurociągów. Analizując jednak tendencje występujących zmian, można zauważyć nieznaczną (w 55% wypadków, czyli w 6 okresach na 11) przewagę spadku ogólnej intensywności uszkodzeń ( $\lambda$ ) podczas badań i wzrostu intensywności uszkodzeń złączy ( $\lambda_u$ ) oraz wyraźną (w 64% wypadków) tendencję wzrostu intensywności wskutek pęknięć i perforacji rur ( $\lambda_{po}$ ).

Badania sieci wodociągowej w Oleśnicy obejmowały okresy dwunastoletni i ośmioletni. W czasie eksploatacji w warunkach podwyższonego ciśnienia (lata 1981–1992) statystycznie istotny wzrost w czasie obserwacji ( $1980 < A \leq 1992$ ) stwierdzono w wypadku ogólnej intensywności uszkodzeń ( $\lambda$ ) rurociągów żeliwnych (korelacje dla  $\lambda_u$  i  $\lambda_{po}$  były przeciętne – tab. 4.8)

$$\lambda = 0,70725 (A-1980)^{0,155906} \quad (4.22)$$

$$\lambda_u = 0,529853 (A-1980)^{0,147957} \quad (4.23)$$

$$\lambda_{po} = 0,177804 (A-1980)^{0,177655} \quad (4.24)$$

Tabela 4.7. Intensywność uszkodzeń rurociągów żeliwnych w poszczególnych latach obserwacji  
 Table 4.7. Failure rate for cast iron pipes in particular years of observation

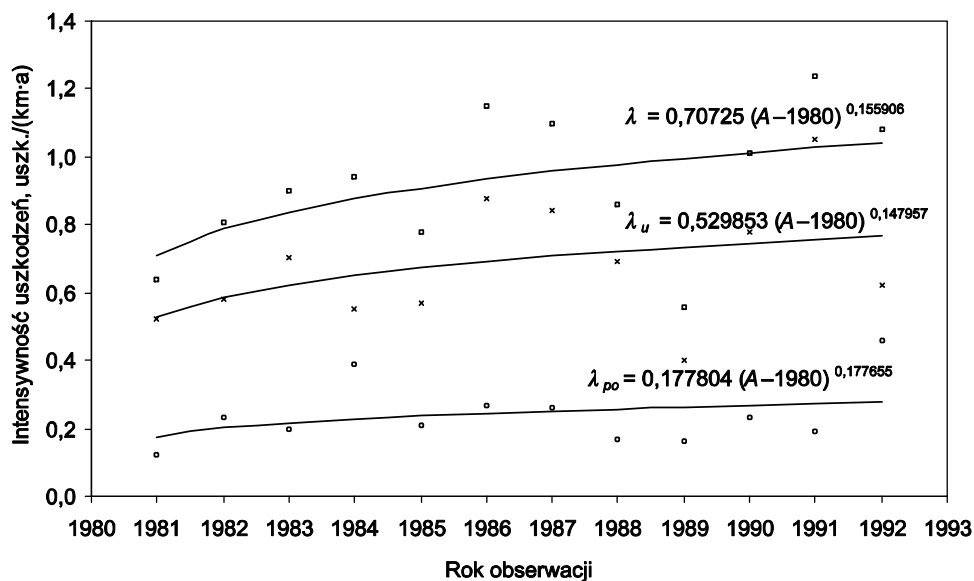
Ogólna intensywność uszkodzeń, intensywność uszkodzeń złączy oraz pęknięć i perforacji (wartości w nawiasach) rurociągów żeliwnych w poszczególnych latach obserwacji, uszk./km·a															
Brzeg		Kłodzko		Oleśnica				Wrocław, rejon 1		Wrocław, rejon 2		Opole		Polkowice	
Rok	$\lambda$ ( $\lambda_{us}; \lambda_{po}$ )	Rok	$\lambda$ ( $\lambda_{us}; \lambda_{po}$ )	I okres		II okres		Rok	$\lambda$ ( $\lambda_{us}; \lambda_{po}$ )	Rok	$\lambda$ ( $\lambda_{us}; \lambda_{po}$ )	Rok	$\lambda$ ( $\lambda_{us}; \lambda_{po}$ )	Rok	$\lambda$ ( $\lambda_{us}; \lambda_{po}$ )
				Rok	$\lambda$ ( $\lambda_{us}; \lambda_{po}$ )	Rok	$\lambda$ ( $\lambda_{us}; \lambda_{po}$ )								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1991	0,35 (0,04; 0,31)	1992	0,30 (0,15; 0,15)	1981	0,64 (0,52; 0,12)	1993	0,58 (0,29; 0,29)	1990	0,67 (0,30; 0,37)	1990	0,99 (0,59; 0,40)	1996	0,23 (0,05; 0,18)	1986	1,19 (0,71; 0,48)
1992	0,35 (0,10; 0,25)	1993	0,51 (0,12; 0,39)	1982	0,81 (0,58; 0,23)	1994	0,36 (0,16; 0,20)	1991	1,25 (0,37; 0,88)	1991	0,93 (0,29; 0,64)	1997	0,26 (0,03; 0,23)	1987	0,96 (0,24; 0,72)
1993	0,30 (0,08; 0,22)	1994	0,54 (0,07; 0,47)	1983	0,90 (0,70; 0,20)	1995	0,39 (0,23; 0,16)	1993	1,41 (0,34; 1,07)	1993	0,81 (0,18; 0,63)	1998	0,13 (0,01; 0,12)	1988	1,19 (0,71; 0,48)
1994	0,41 (0,12; 0,29)	1995	0,32 (0,03; 0,29)	1984	0,94 (0,55; 0,39)	1996	0,40 (0,09; 0,31)	1994	1,05 (0,32; 0,73)	1994	0,81 (0,28; 0,53)	1999	0,18 (0,03; 0,15)	1989	0,72 (0,24; 0,47)
1995	0,49 (0,06; 0,43)	1996	0,22 (0,05; 0,17)	1985	0,78 (0,57; 0,21)	1997	0,38 (0,09; 0,29)	1995	0,41 (0,17; 0,24)	1995	0,32 (0,11; 0,21)	2000	0,26 (0,10; 0,16)	1990	0,24 (0; 0,24)
I–VIII 1996	0,37 (0,09; 0,28)	I–VIII 1997	0,40 (0; 0,40)	1986	1,15 (0,88; 0,27)	1998	0,40 (0,14; 0,26)	1996	0,85 (0,34; 0,51)	1996	0,75 (0,18; 0,57)	2001	0,19 (0,04; 0,15)	1991 <sup>1)</sup>	1,43 (0,48; 0,95)
IX–XII 1996	0,55 (0,18; 0,37)	IX–XII 1997	0,22 (0,07; 0,15)	1987	1,10 (0,84; 0,26)	1999	0,43 (0,14; 0,29)	I–VI 1997	0,58 (0,24; 0,34)	1997	0,47 (0,07; 0,40)			1992	1,19 (0; 1,19)
1996	0,43 (0,12; 0,31)	1997	0,34 (0,02; 0,32)	1988	0,86 (0,69; 0,17)	2000	0,35 (0,12; 0,23)			1998	0,88 (0,22; 0,66)			1993	2,87 (0,96; 1,91)
1997	0,20 (0,06; 0,14)	1998	0,32 (0,05; 0,27)	1989	0,56 (0,40; 0,16)									I–VIII 1994	0,72 (0; 0,72)
1998	0,30 (0,08; 0,22)	1999	0,12 (0,02; 0,10)	1990	1,01 (0,78; 0,23)										
1999	0,10 (0,02; 0,08)			1991	1,24 (1,05; 0,19)										
2000	0,22 (0,04; 0,18)			1992	1,08 (0,62; 0,46)										

<sup>1)</sup> od 1991 r. wznowiono eksploatację złóż rudy miedzi z filara ochronnego

Tabela 4.8. Zależność zmian intensywności uszkodzeń rurociągów żeliwnych w czasie obserwacji, w dwóch okresach eksploatacji sieci

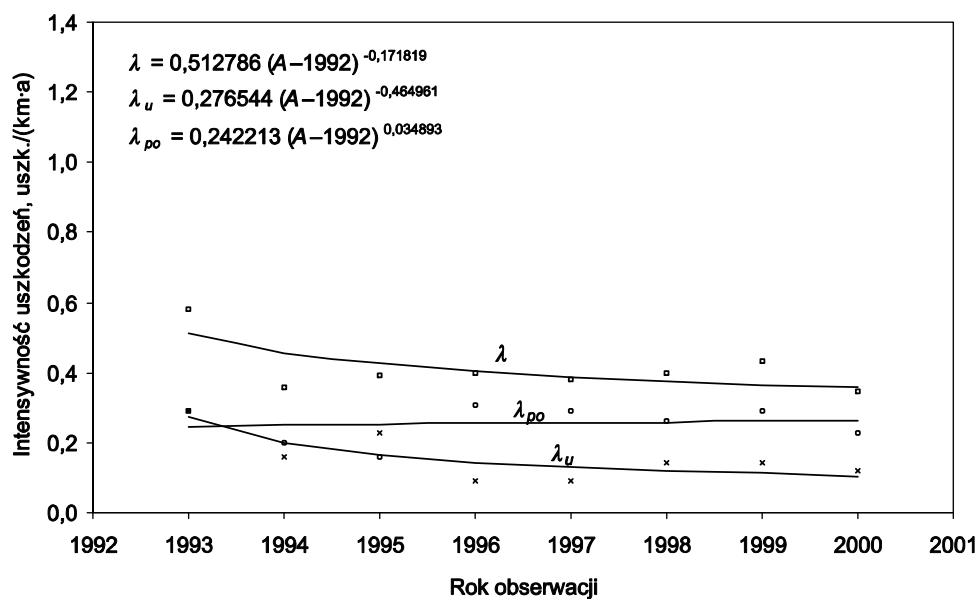
Table 4.8. Variations in failure rate for cast iron pipes during observations over two periods of service

Miasto	Lata obserwacji $A$	Rurociągi żeliwne o średnicach $d$ mm	Postać zależności $\lambda = f(A-P)$ : (uszk./km·a) $\lambda$ – uszkodzenia ogółem $\lambda_u$ – uszkodzenia złączy $\lambda_{po}$ – pęknięcia i perforacje rur	Tendencja zmian wartości $\lambda$ w czasie badań	Wsp. korelacji $R$	$R_{kr}$ dla $\alpha = 0,1$ [130]
1	2	3	4	5	6	7
Brzeg	1991–1995 (I okres)	80–500 ( $H = 0,50$ MPa)	$\lambda - 0,278 + 0,034 (A-1990)$ $\lambda_u$ – brak istotnej zależności $\lambda_{po}$ – brak istotnej zależności	wzrost wzrost wzrost	0,7384	0,8054
	1997–2000 (II okres)	80–500 ( $H = 0,45$ MPa)	$\lambda$ – brak istotnej zależności $\lambda_u$ – brak istotnej zależności $\lambda_{po}$ – brak istotnej zależności	spadek spadek spadek		
Kłodzko	1992–1996 (I okres)	80–400 ( $H = 0,70$ MPa)	$\lambda$ – brak istotnej zależności $\lambda_u - 0,171 - 0,029 (A-1991)$ $\lambda_{po}$ – brak istotnej zależności	spadek spadek spadek	0,9207	0,8054
	1998–1999 (II okres)	80–400 ( $H = 0,60$ MPa)	$\lambda$ – brak istotnej zależności $\lambda_u$ – brak istotnej zależności $\lambda_{po}$ – brak istotnej zależności	spadek spadek spadek		
Oleśnica	1981–1992 (I okres)	100–500 ( $H = 0,50$ MPa)	$\lambda - 0,70725 (A-1980)^{0,155906}$ $\lambda_u - 0,529853 (A-1980)^{0,147957}$ $\lambda_{po} - 0,177804 (A-1980)^{0,177655}$	wzrost wzrost wzrost	0,5062 0,4023 0,3232	0,4973
	1993–2000 (II okres)	100–500 ( $H = 0,40$ MPa)	$\lambda - 0,512786 (A-1992)^{-0,171819}$ $\lambda_u - 0,276544 (A-1992)^{-0,464961}$ $\lambda_{po} - 0,242213 (A-1992)^{0,034893}$	spadek spadek wzrost	0,6876 0,8036 0,1134	0,6215
Wrocław rejon 1	1990–1994 (bez 1992) (I okres)	80–500 ( $H = 0,40-0,45$ )	$\lambda$ – brak istotnej zależności $\lambda_u$ – brak istotnej zależności $\lambda_{po}$ – brak istotnej zależności	wzrost wzrost wzrost		
	1995–VI 1997 (II okres)	80–500 ( $H = 0,22-0,28$ )	$\lambda$ – brak istotnej zależności $\lambda_u$ – brak istotnej zależności $\lambda_{po}$ – brak istotnej zależności	wzrost wzrost wzrost		
Wrocław rejon 2	1990–1994 (bez 1992) (I okres)	80–500 ( $H = 0,40-0,45$ )	$\lambda - 0,998548 (A-1989)^{-0,134831}$ $\lambda_u - 0,56549 (A-1989)^{-0,680335}$ $\lambda_{po}$ – brak istotnej zależności	spadek spadek wzrost	0,9819 0,9202	0,9000 0,9000
	1995–1998 (II okres)	80–500 ( $H = 0,22-0,28$ )	$\lambda - 0,381816 (A-1994)^{0,534261}$ $\lambda_u$ – brak istotnej zależności $\lambda_{po} - 0,275673 (A-1994)^{0,591388}$	wzrost wzrost wzrost	0,7149 0,7829	0,9000 0,9000
Opole	1996–2001	80–600	$\lambda$ – brak istotnej zależności $\lambda_u$ – brak istotnej zależności $\lambda_{po}$ – brak istotnej zależności	spadek wzrost spadek		



Rys. 4.15. Intensywność uszkodzeń ( $\lambda$ ,  $\lambda_u$ ,  $\lambda_{po}$ ) rurociągów żeliwnych w Oleśnicy w poszczególnych latach w I okresie badań

Fig. 4.15. Failure rate ( $\lambda$ ,  $\lambda_u$ ,  $\lambda_{po}$ ) for cast iron pipelines in Oleśnica in particular years of period I



Rys. 4.16. Intensywność uszkodzeń ( $\lambda$ ,  $\lambda_u$ ,  $\lambda_{po}$ ) rurociągów żeliwnych w Oleśnicy w poszczególnych latach w II okresie badań

Fig. 4.16. Failure rate ( $\lambda$ ,  $\lambda_u$ ,  $\lambda_{po}$ ) for cast iron pipelines in Oleśnica in particular years of period II

Po modernizacji systemu dystrybucji wody (w końcu 1992 r.) i zmianie warunków eksploatacji sieci (obniżenie wysokości i dobowych wahań ciśnienia) nastąpiło przede wszystkim znaczne ograniczenie uszkodzeń złączy rur (przy praktycznie stałej wartości  $\lambda_{po}$ ), z tendencją do dalszego spadku wartości  $\lambda_u$ , a więc i  $\lambda$  w czasie obserwacji ( $1992 < A \leq 2000$ )

$$\lambda = 0,512786 (A-1992)^{-0,171819} \quad (4.25)$$

$$\lambda_u = 0,276544 (A-1992)^{-0,464961} \quad (4.26)$$

$$\lambda_{po} = 0,242213 (A-1992)^{0,034893} \quad (4.27)$$

Powyższe zmiany ilustrują wykresy na rysunkach 4.15 i 4.16. Na zmniejszanie się w latach 1993–2000 wartości wskaźników  $\lambda_u$  i  $\lambda$  rurociągów żeliwnych miał także wpływ stosunkowo duży przyrost (ok. 6,5%) długości nowych przewodów żeliwnych o małej awaryjności.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że całościowa ocena i prognozowanie wskaźników uszkodzeń przewodów są możliwe w miastach, w których prowadzone są systematyczne i wieloletnie (ok. 10-letnie) badania sieci w jednakowych warunkach jej eksploatacji.

#### 4.3.2.1.1.5. Średnica rurociągów

Ocena niezawodności działania sieci wodociągowej, a zwłaszcza skutków jej zawodnego działania, powinna uwzględniać średnice przewodów. Jest bowiem oczywiste, że uszkodzenia przewodów rozdzielczych, o mniejszych średnicach, powodują zazwyczaj wystąpienie mniejszych niedoborów wody u odbiorców niż uszkodzenia przewodów magistralnych. Mniejsze są także w takich wypadkach m.in. koszty naprawy uszkodzeń (rozdział 5.) i straty wody (rozdział 6.), zależne również od rodzaju i wielkości uszkodzeń przewodów.

W badanych systemach dystrybucji wody, na terenach nieobjętych działalnością górniczą, eksploatowana była sieć żeliwnych rurociągów magistralnych i rozdzielczych o średnicach 80–600 mm (tab. 4.9). Obliczono i poddano analizie średnie, w poszczególnych latach i okresach badań, wartości wskaźników uszkodzeń rurociągów o określonych średnicach i rodzajach uszkodzeń. W tabeli 4.9 zestawiono średnie wartości ogólnej intensywności uszkodzeń ( $\lambda$ ) rurociągów oraz zakres zmian w poszczególnych latach analizowanych okresów obserwacji (wartości w nawiasach). Natomiast w tabeli 4.10 zawarto średnie wartości ogólnej intensywności uszkodzeń, intensywności uszkodzeń złączy rur ( $\lambda_u$ ) oraz intensywności uszkodzeń spowodowanych pęknięciami i korozją materiału rur ( $\lambda_{po}$ ) w dwóch okresach eksploatacji sieci. Na podstawie powyższych danych określono zależności średniej intensywności uszkodzeń od średnicy rurociągów – z uwzględnieniem rodzaju ich uszkodzeń – we wszystkich analizowanych systemach wodociągowych. Zależności te miały postać funkcji liniowych i wykładniczych. Wyniki obliczeń zestawiono w tab. 4.11.

Tabela 4.9. Ogólna intensywność uszkodzeń rurociągów żeliwnych o różnych średnicach  
 Table 4.9. Overall failure rate for cast iron pipes differing in diameter

d mm	Ogólna intensywność uszkodzeń rurociągów żeliwnych: średnie wartości w okresach badań oraz najmniejsze i największe z poszczególnych lat obserwacji (wartości w nawiasach), uszk./(km·a)												
	Brzeg		Kłodzko		Oleśnica		Wrocław, rejon 1		Wrocław, rejon 2		Opole	Polkowice	
	1982–1987	I okres	II okres	I okres	II okres	I okres	II okres	I okres	II okres	I okres	II okres	1996–2001	1986–VIII 1994
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
80	<b>0,15</b> (0–0,46)	<b>0</b>	<b>1,63<sup>2)</sup></b>	<b>0,45</b>	<b>0,22</b>	–	–	<b>1,14</b> (0–2,61)	<b>0,61</b> (0,44–0,65)	<b>0,14</b>	<b>0,73</b>	<b>0,40</b>	<b>0,09<sup>2)</sup></b> (0–0,80)
100	<b>0,61</b> (0,47–0,76)	<b>0,76</b>	<b>0,53</b>	<b>0,22</b>	<b>0,24</b>	<b>0,74</b> (0,29–1,19)	<b>0,45</b> (0,33–0,57)	<b>1,22</b> (0,84–1,68)	<b>0,59</b> (0,21–1,26)	<b>0,77</b>	<b>0,61</b>	<b>0,30</b>	<b>2,47<sup>1)</sup></b> (0–7,63)
125	<b>0,09</b> (0–0,14)	<b>0,24</b>	<b>0</b>	<b>0<sup>1)</sup></b>	<b>0</b>	–	–	<b>1,28</b> (0,46–2,01)	<b>1,11</b> (0,62–1,70)	<b>0,72</b>	<b>1,25</b>	–	–
150	<b>0,56</b> (0,28–0,84)	<b>0,48</b>	<b>0,20</b>	<b>0,73</b>	<b>0,50</b>	<b>1,06</b> (0,46–1,71)	<b>0,35</b> (0,15–0,75)	<b>1,17</b> (0,75–2,12)	<b>0,70</b> (0,25–1,00)	<b>0,42<sup>2)</sup></b>	<b>0,13</b>	<b>0,16</b>	<b>1,67<sup>1)</sup></b> (0–7,23)
175	–	–	–	–	–	–	–	<b>2,65<sup>1)</sup></b> (1,32–4,97)	<b>0,79</b> (0,33–1,32)	<b>1,81<sup>2)</sup></b>	<b>0,53</b>	–	–
200	<b>0,16</b> (0–0,62)	<b>0,25</b>	<b>0,23</b>	<b>0,44</b>	<b>0,16</b>	<b>0,62</b> (0–1,59)	<b>0,21</b> (0–0,52)	<b>0,92<sup>2)</sup></b> (0–2,94)	<b>0</b>	<b>1,40<sup>1)</sup></b>	<b>0</b>	<b>0,21</b>	<b>0,67<sup>2)</sup></b> (0–1,65)
225	–	–	–	–	–	–	–	<b>1,66<sup>2)</sup></b> (0–2,65)	<b>0,53</b> (0–1,33)	–	–	–	–
250	<b>0</b>	<b>0,15</b>	<b>0</b>	<b>0,08</b>	<b>0</b>	–	–	–	–	<b>0,58<sup>2)</sup></b>	<b>0</b>	<b>0,22</b>	<b>2,52<sup>1)</sup></b> (1,28–6,41)
300	<b>0<sup>1)</sup></b>	<b>0</b>	<b>0<sup>2)</sup></b>	<b>0<sup>1)</sup></b>	<b>0</b>	<b>3,49<sup>2)</sup></b> (0,90–6,90)	<b>1,27</b> (0,62–2,30)	<b>0,68</b> (0,27–1,37)	<b>0,66</b> (0–1,09)	<b>0,39<sup>1)</sup></b>	<b>0</b>	<b>0,05</b>	–
350	<b>0,14</b> (0–0,28)	<b>0,06</b>	<b>0</b>	–	–	–	–	–	–	<b>2,23<sup>2)</sup></b>	<b>0,70</b>	–	–
400	<b>0,16<sup>1)</sup></b> (0–0,94)	<b>0</b>	<b>0,44<sup>2)</sup></b>	<b>0,19<sup>2)</sup></b>	<b>0</b>	<b>0,66<sup>2)</sup></b> (0–1,86)	<b>0,35</b> (0–0,93)	<b>0,50<sup>2)</sup></b> (0–0,80)	<b>0,32</b> (0–0,80)	–	–	–	–
500	<b>0,25</b> (0–0,54)	<b>0,08</b>	<b>0,02</b>	–	–	<b>0,21<sup>2)</sup></b> (0–0,57)	<b>0</b>	<b>0,68</b> (0,30–1,01)	<b>0,40</b> (0,30–0,60)	<b>1,28<sup>2)</sup></b>	<b>0</b>	<b>0,05</b>	–
600	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	<b>0,04</b>	–

<sup>1)</sup> długość rurociągów ≤ 1 km

<sup>2)</sup> długość rurociągów ≤ 3 km

Tabela 4.10. Intensywność uszkodzeń rurociągów żeliwnych w zależności od ich średnicy i rodzaju uszkodzeń  
Table 4.10. Failure rate for cast iron pipes related to pipe diameter and type of damage

d mm	Ogólna intensywność uszkodzeń oraz intensywność uszkodzeń złączy oraz pęknięć i perforacji łącznie (wartości w nawiasach) rurociągów żeliwnych – średnie wartości w dwóch okresach eksploatacji sieci, uszk./(km·a)											
	Brzeg		Kłodzko		Oleśnica		Wrocław, rejon 1		Wrocław, rejon 2		Opole	Polkowice
	I okres	II okres	I okres	II okres	I okres	II okres	I okres	II okres	I okres	II okres	1996–2001	1986– VIII 1994
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
80	<b>0</b> (0; 0)	<b>1,63</b> <sup>2)</sup> (0,54; 1,09)	<b>0,45</b> (0,02; 0,43)	<b>0,22</b> (0; 0,22)	–	–	<b>1,14</b> (0; 1,14)	<b>0,61</b> (0; 0,61)	<b>0,14</b> (0; 0,14)	<b>0,73</b> (0,22; 0,51)	<b>0,40</b> (0,07; 0,33)	<b>0,09</b> <sup>2)</sup> (0; 0,09)
100	<b>0,76</b> (0,11; 0,65)	<b>0,53</b> (0,07; 0,46)	<b>0,22</b> (0,02; 0,20)	<b>0,24</b> (0; 0,24)	<b>0,74</b> (0,45; 0,29)	<b>0,45</b> (0,11; 0,34)	<b>1,22</b> (0,05; 1,17)	<b>0,59</b> (0,08; 0,51)	<b>0,77</b> (0,12; 0,65)	<b>0,61</b> (0,19; 0,42)	<b>0,30</b> (0,03; 0,27)	<b>2,47</b> <sup>1)</sup> (0,71; 1,76)
125	<b>0,24</b> (0,08; 0,16)	<b>0</b> (0; 0)	<b>0</b> <sup>1)</sup> (0; 0)	<b>0</b> (0; 0)	–	–	<b>1,28</b> (0,08; 1,20)	<b>1,11</b> (0,06; 1,05)	<b>0,72</b> (0,08; 0,64)	<b>1,25</b> (0,12; 1,13)	–	–
150	<b>0,48</b> (0,17; 0,31)	<b>0,20</b> (0,08; 0,12)	<b>0,73</b> (0,24; 0,49)	<b>0,50</b> (0,28; 0,22)	<b>1,06</b> (0,84; 0,22)	<b>0,35</b> (0,12; 0,23)	<b>1,17</b> (0,52; 0,65)	<b>0,70</b> (0,50; 0,20)	<b>0,42</b> <sup>2)</sup> (0,14; 0,28)	<b>0,13</b> (0; 0,13)	<b>0,16</b> (0,02; 0,14)	<b>1,67</b> <sup>1)</sup> (0,83; 0,84)
175	–	–	–	–	–	–	<b>2,65</b> <sup>1)</sup> (0,33; 2,32)	<b>0,79</b> (0,26; 0,53)	<b>1,81</b> <sup>2)</sup> (0,21; 1,60)	<b>0,53</b> (0,11; 0,42)	–	–
200	<b>0,25</b> (0; 0,25)	<b>0,23</b> (0,09; 0,14)	<b>0,44</b> (0,17; 0,27)	<b>0,16</b> (0; 0,16)	<b>0,62</b> (0,48; 0,14)	<b>0,21</b> (0,08; 0,13)	<b>0,92</b> <sup>2)</sup> (0,74; 0,18)	<b>0</b> (0; 0)	<b>1,40</b> <sup>1)</sup> (0; 1,40)	<b>0</b> (0; 0)	<b>0,21</b> (0,04; 0,17)	<b>0,67</b> <sup>2)</sup> (0,10; 0,57)
225	–	–	–	–	–	–	<b>1,66</b> <sup>2)</sup> (0; 1,66)	<b>0,53</b> (0; 0,53)	–	–	–	–
250	<b>0,15</b> (0,05; 0,10)	<b>0</b> (0; 0)	<b>0,08</b> (0,04; 0,04)	<b>0</b> (0; 0)	–	–	–	–	<b>0,58</b> <sup>2)</sup> (0,14; 0,44)	<b>0</b> (0; 0)	<b>0,22</b> (0,13; 0,09)	<b>2,52</b> <sup>1)</sup> (1,04; 1,48)
300	<b>0</b> (0; 0)	<b>0</b> <sup>2)</sup> (0; 0)	<b>0</b> <sup>1)</sup> (0; 0)	<b>0</b> (0; 0)	<b>3,49</b> <sup>2)</sup> (2,82; 0,67)	<b>1,27</b> (0,93; 0,34)	<b>0,68</b> (0,48; 0,20)	<b>0,66</b> (0,55; 0,11)	<b>0,39</b> <sup>1)</sup> (0,39; 0)	<b>0</b> (0; 0)	<b>0,05</b> (0,03; 0,02)	–
350	<b>0,06</b> (0; 0,06)	<b>0</b> (0; 0)	–	–	–	–	–	–	<b>2,23</b> <sup>2)</sup> (1,95; 0,28)	<b>0,70</b> (0,56; 0,14)	–	–
400	<b>0</b> (0; 0)	<b>0,44</b> <sup>2)</sup> (0,44; 0)	<b>0,19</b> <sup>2)</sup> (0; 0,19)	<b>0</b> (0; 0)	<b>0,66</b> <sup>2)</sup> (0,66; 0)	<b>0,35</b> (0,35; 0)	<b>0,50</b> <sup>2)</sup> (0,50; 0)	<b>0,32</b> (0,32; 0)	–	–	–	–
500	<b>0,08</b> (0,04; 0,04)	<b>0,02</b> (0,02; 0)	–	–	<b>0,21</b> <sup>2)</sup> (0,105; 0,105)	<b>0</b> (0; 0)	<b>0,68</b> (0,58; 0,10)	<b>0,40</b> (0,40; 0)	<b>1,28</b> <sup>2)</sup> (1,19; 0,09)	<b>0</b> (0; 0)	<b>0,05</b> (0,02; 0,03)	–
600	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	<b>0,04</b> (0,04; 0)	–

<sup>1)</sup> długość rurociągów ≤ 1 km    <sup>2)</sup> długość rurociągów ≤ 3 km

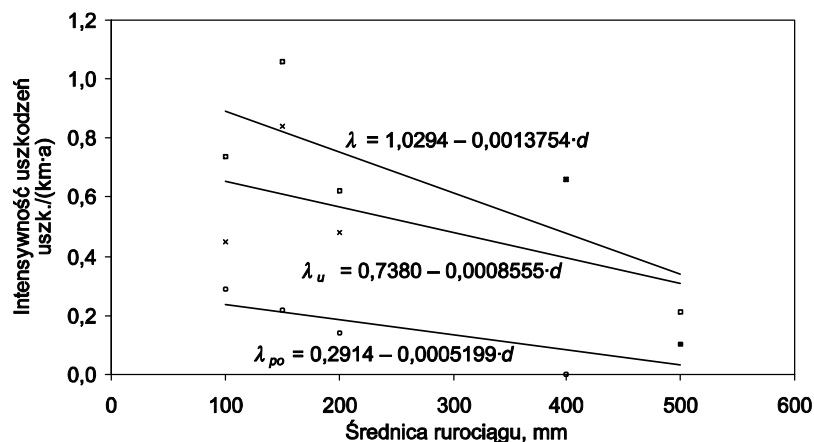


Tabela 4.11. Zmiany średniej intensywności uszkodzeń rurociągów żeliwnych wraz z ich średnicą  
 Table 4.11. Variations in average failure rate for cast iron pipes related to pipe diameter

Miasto	Okres badań	Rurociągi żeliwne o średnicach $d$ mm	Postać zależności $\lambda = f(d)$ : $\lambda$ – uszkodzenia ogółem, uszk./(km·a) $\lambda_u$ – uszkodzenia złączy $\lambda_{po}$ – pęknięcia i perforacje rur	$R$	$R_{kr}$ dla $\alpha = 0,1$ [130]
1	2	3	4	5	6
Brzeg	I okres 1991–VIII 1996	80–500 ( $H = 0,50$ MPa)	$\lambda = 0,4372 - 0,0008744 \cdot d$ $\lambda_u = 0,0887 - 0,0001774 \cdot d$ $\lambda_{po} = 0,3485 - 0,000697 \cdot d$	0,5420 0,4234 0,5354	0,5494
	II okres IX 1996–2000	100–500 ( $H = 0,45$ MPa)	$\lambda = 0,2654 - 0,0004 \cdot d$ $\lambda_u$ – brak istotnej zależności $\lambda_{po} = 0,2567 - 0,0005 \cdot d$	0,2662 0,5907	0,5822 0,5822
Kłodzko	I okres 1992–VIII 1997	80–400 ( $H = 0,70$ MPa)	$\lambda, \lambda_u, \lambda_{po}$ – brak istotnej zależności		
	II okres IX 1997–1999	80–400 ( $H = 0,60$ MPa)	$\lambda = 0,5765 \exp(-0,01787 \cdot d)$ $\lambda_u$ – brak istotnej zależności $\lambda_{po} = 0,4716 \exp(-0,01738 \cdot d)$	0,6614 0,6713	0,6215 0,6215
Oleśnica	I okres 1981–1992	100–500 (bez $\phi$ 300) ( $H = 0,50$ MPa)	$\lambda = 1,0294 - 0,0013754 \cdot d$ $\lambda_u = 0,7380 - 0,0008555 \cdot d$ $\lambda_{po} = 0,2914 - 0,0005199 \cdot d$	0,7762 0,5366 0,8058	0,8054
	II okres 1992–2000	100–500 (bez $\phi$ 300) ( $H = 0,40$ MPa)	$\lambda = 0,4727 - 0,000743 \cdot d$ $\lambda_u = 0,1164 + 0,000031 \cdot d$ $\lambda_{po} = 0,3563 - 0,000712 \cdot d$	0,7319 0,0758 0,9305	0,8054
Wrocław rejon 1	I okres 1990–1994 (bez 1992)	80–500 ( $H = 0,40-0,45$ )	$\lambda = \exp(0,584 - 0,00229 \cdot d)$ $\lambda_u = 0,068 + 0,00115 \cdot d$ (wzrost) $\lambda_{po} = \exp(1,867 - 0,01424 \cdot d)$	$\alpha = 0,042$ $\alpha = 0,083$ $\alpha = 0,039$	
	II okres 1995–VI 1997	80–500 ( $H = 0,22-0,28$ )	$\lambda = 0,7766 - 0,000912 \cdot d$ $\lambda_u = 0,0287 + 0,000835 \cdot d$ (wzrost) $\lambda_{po} = \exp(1,769 - 0,0227 \cdot d)$	0,4210 0,5259 $\alpha = 0,012$	0,5494 0,5494
Wrocław rejon 2	I okres 1990–1994 (bez 1992)	80–500 ( $H = 0,40-0,45$ )	$\lambda = 0,2171 + 0,00376 \cdot d$ (wzrost) $\lambda_u = 0,01606 \exp(0,0098 \cdot d)$ (wzrost) $\lambda_{po} = 0,8818 \exp(-0,005 \cdot d)$	0,4856 0,7378 0,4365	0,5494
	II okres 1995–1998	80–500 ( $H = 0,22-0,28$ )	$\lambda = 0,8898 \exp(-0,00936 \cdot d)$ $\lambda_u$ – brak istotnej zależności $\lambda_{po} = 0,772 \exp(-0,00992 \cdot d)$	0,5690 0,6677	0,5494 0,5494
Opole	1996–2001	80–600	$\lambda = 0,4234 \exp(-0,004295 \cdot d)$ $\lambda_u$ – brak istotnej zależności $\lambda_{po} = 0,7246 \exp(-0,009381 \cdot d)$	0,8926 0,9616	0,6215 0,6215

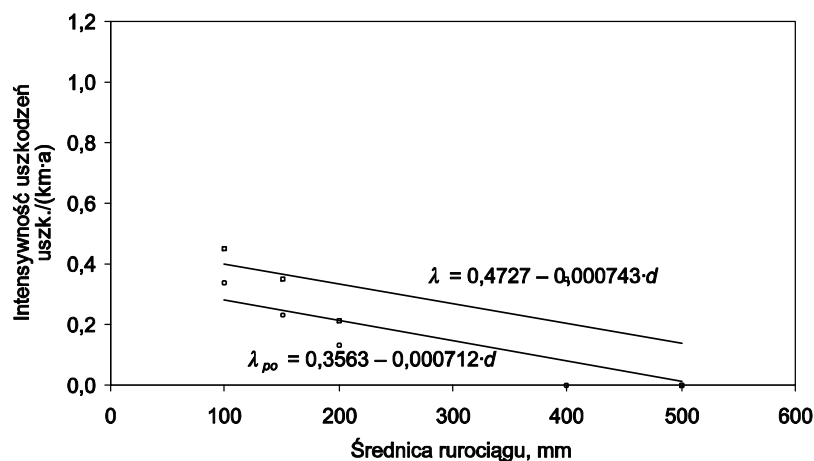
Uwaga:

W każdym wypadku, gdzie *brak istotnej zależności*, stwierdzono tendencję spadku intensywności uszkodzeń wraz ze wzrostem  $d$ .



Rys. 4.17. Intensywność uszkodzeń ( $\lambda$ ,  $\lambda_u$ ,  $\lambda_{po}$ ) rurociągów żeliwnych w zależności od średnicy ( $d$ ) w I okresie badań w Oleśnicy

Fig. 4.17. Failure rate ( $\lambda$ ,  $\lambda_u$ ,  $\lambda_{po}$ ) for cast iron pipelines in Oleśnica, related to pipe diameter ( $d$ ), observed over period I



Rys. 4.18. Intensywność uszkodzeń ( $\lambda$ ,  $\lambda_{po}$ ) rurociągów żeliwnych w zależności od średnicy ( $d$ ) w II okresie badań w Oleśnicy

Fig. 4.18. Failure rate ( $\lambda$ ,  $\lambda_{po}$ ) for cast iron pipelines in Oleśnica, related to pipe diameter ( $d$ ), observed over period II

Wnioski z dokonanej analizy wyników:

- Ogólna intensywność uszkodzeń  $\lambda$  w większości (64%) wypadków istotnie zależała od średnicy  $d$  rurociągów i malała wraz z jej wzrostem (tab. 4.11). Wzrost wartości wskaźnika  $\lambda$  ze wzrostem średnicy rurociągów stwierdzono jedynie w I okresie badań sieci w rejonie 2 Wrocławia.

- Intensywność uszkodzeń złączy rur istotnie rosła ze wzrostem średnicy rurociągów tylko w 27% wypadków (we Wrocławiu: w rejonie 1 – w okresach I i II, w rejo-

nie 2 – w okresie I). Generalnie stwierdzono tendencję spadku wartości wskaźnika  $\lambda_u$  wraz ze wzrostem średnicy rurociągów.

- Intensywność uszkodzeń wskutek pęknięć i perforacji materiału rur istotnie malała wraz ze wzrostem średnicy rurociągów w większości (ponad 80%) przypadków w analizowanych systemach dystrybucji wody, niezależnie od warunków ich eksploatacji (tab. 4.11).

- Obniżenie ciśnienia i jego wahań po modernizacji systemów wodociągowych spowodowało spadek wartości wskaźników uszkodzeń ( $\lambda$ ,  $\lambda_u$ ,  $\lambda_{po}$ ) większości rurociągów (tab. 4.10).

Generalnie można stwierdzić, że w badanym zakresie średnic (80–600 mm), rurociągi żeliwne o większych średnicach charakteryzowały się mniejszą awaryjnością, spowodowaną głównie uszkodzeniami złączy rur, niż przewody o mniejszych średnicach, których awaryjność była większa i wynikała przede wszystkim z pęknięć i perforacji wskutek korozji materiału rur. Dla przykładu na rysunkach 4.17 i 4.18 zilustrowano zmiany (według zależności z tab. 4.11) wartości wskaźników intensywności uszkodzeń wraz ze zmianami średnic rurociągów żeliwnych w dwóch okresach eksploatacji sieci wodociągowej w Oleśnicy (nie stwierdzono korelacji pomiędzy  $\lambda_u$  a  $d$  w II okresie badań, w I okresie zaś korelacja była wysoka).

#### 4.3.2.1.1.6. Lokalizacja (trasa) rurociągów

Podjęcie decyzji o renowacji czy wymianie przewodów należy poprzedzić oceną niezawodności uwzględniającą nie tylko materiał i średnice rur, czas eksploatacji i okres budowy, rodzaj występujących uszkodzeń, lecz także szczegółową lokalizację (trasę, ulicę) przewodów. Na tej podstawie można bowiem wnioskować o wpływie na uszkodzalność przewodów także takich czynników, jak: jakość wykonawstwa, warunki gruntowe i wodne, głębokość ułożenia przewodów, wielkość obciążeń dynamicznych wywołanych ruchem pojazdów, wpływ prądów błądzących, rodzaj prac ziemnych prowadzonych w rejonie trasy przewodów i innych. Tak prowadzona ocena umożliwi dokładniejsze i bardziej obiektywne określenie przyczyn występowania uszkodzeń, i ułatwi podjęcie racjonalnej decyzji o sposobie i kolejności modernizacji przewodów wodociągowych.

Jako przykład takiej oceny może posłużyć żeliwny przewód o średnicy 300 mm w Oleśnicy, ułożony (w latach 1968–1970) na przeważającej długości wzdłuż międzynarodowej drogi, z której obciążenia dynamiczne, spowodowane dużym natężeniem ruchu samochodowego, przenoszone są przez grunt na przewód. W konsekwencji intensywność uszkodzeń  $\lambda$  tego rurociągu była bardzo duża i w okresie nadmiernego ciśnienia w sieci wynosiła średnio 5,49 uszk./(km·a), z czego 78% stanowiły uszkodzenia złączy kielichowych wykonanych ze sznura konopnego i folii aluminiowej. Po obniżeniu ciśnienia i jego wahań awaryjność tego przewodu zmniejszyła się ponaddwukrotnie, ale i tak wskutek dalszego oddziaływania obciążeń dynamicznych była bardzo duża i wynosiła 2,48 uszk./(km·a), a uszkodzenia złączy stanowiły 76% (tab. 4.6).

Tabela 4.12. Intensywność uszkodzeń rurociągów w wybranych ulicach we Wrocławiu

Table 4.12. Failure rate for pipelines of selected streets in the city of Wrocław

Ulica	Średnica, materiał	Rok budowy	Długość $L_{sr}$ w dwóch okresach km	Średnia intensywność uszkodzeń (uszk./km·a) oraz przyczyny uszkodzeń rurociągów w wybranych ulicach we Wrocławiu					
				I okres badań			II okres badań		
				$\lambda$	$\lambda_u; \lambda_p; \lambda_o$	Główne przyczyny uszkodzeń	$\lambda$	$\lambda_u; \lambda_p; \lambda_o$	Główne przyczyny uszkodzeń
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
WROCLAW, rejon 1									
Kosmonautów	500 ż.	1969	1,060	2,83	2,83; 0,00; 0,00	złe wykonanie połączeń	0	0	–
Drzymały	300 ż.	1977	0,880	2,56	1,71; 0,85; 0,00	złe wyk. połączeń ( $\lambda_u$ ) osiadanie gruntu ( $\lambda_p$ )	1,36	1,36; 0,00; 0,00	złe wykonanie połączeń
Górnicza	125 ż.	1931	0,727	2,75	0,00; 2,06; 0,69	długoletnia eksploatacja	3,85	0,00; 3,85; 0,00	długoletnia eksploatacja
	175 ż.	1932	0,770	4,87	0,65; 3,25; 0,97	długoletnia eksploatacja	0,52	0,00; 0,52; 0,00	–
Jeleniogórska	175 ż.	1938	1,640	2,13	0,15; 1,83; 0,15	długoletnia eksploatacja	0,97	0,49; 0,24; 0,24	–
Tkacka	125 ż.	1929/31	0,640	2,34	0,00; 1,56; 0,78	długoletnia eksploatacja	1,88	0,00; 1,25; 0,63	długoletnia eksploatacja
WROCLAW, rejon 2									
Szczecińska	350 ż.	1974	1,795	2,37	1,95; 0,42; 0,00	złe wykonanie połączeń i duży ruch kołowy	0,70	0,56; 0,14; 0,00	–
Berberysowa	100 ż., 125 ż.	1937/39	0,481 0,361	3,12	0,00; 3,12; 0,00	długoletnia eksploatacja	2,77	0,00; 2,77; 0,00	długoletnia eksploatacja i niskie temperatury
Gdajusza	125 ż.	przed 1940 r.	0,489	1,02	0,00; 0,00; 1,02	długoletnia eksploatacja	7,66	0,50; 4,60; 2,56	długoletnia eksploatacja i niskie temperatury
Objazdowa	125 ż.	1928/29	0,796 0,728	1,88	0,31; 1,57; 0,00	długoletnia eksploatacja i niskie temperatury	1,37	0,34; 1,03; 0,00	długoletnia eksploatacja
Rumiankowa	125 a–c.	1937/39	0,158	0	0	–	6,33	0,00; 6,33; 0,00	uszk. mechan. w czasie budowy kanalizacji
Strachowicka	100 ż.	1928/39	0,622	2,41	0,40; 2,01; 0,00	zwiększony ruch kołowy (60% $\lambda_p$ )	0,80	0,40; 0,40; 0,00	–
	200 ż.	1952	0,461	1,63	0,00; 1,63; 0,00	zwiększony ruch kołowy (100% $\lambda_p$ )	0	0	–
Zagłoby	80 stal	1932	0,206	12,13	0,00; 0,00; 12,13	korozja	6,07	0,00; 0,00; 6,07	korozja
	100 ż.	1931	0,427 0,392	2,34	0,00; 2,34; 0,00	długoletnia eksploatacja	1,28	0,64; 0,64; 0,00	zamarznięcie (100% $\lambda_p$ )
Żwirowa	175 ż.	1934	0,730	4,11	0,68; 1,03; 2,40	długoletnia eksploatacja	0	0	–

Opierając się na wynikach analizy uszkodzeń przewodów przeprowadzonej z podziałem na ulice, można podać wiele podobnych przykładów dla sieci wodociągowej Wrocławia. W tabeli 4.12 zestawiono dane o rurociągach, które charakteryzowały się szczególnie wysokimi wskaźnikami uszkodzeń oraz wyszczególniono główne ich przyczyny. Jak można zauważyć, we Wrocławiu, gdzie średnia ogólna intensywność uszkodzeń rurociągów żeliwnych wynosiła od 1,1 do 0,6 uszk./ $(\text{km}\cdot\text{a})$  (rys. 4.5), rurociągi ułożone w niektórych ulicach charakteryzowały się wartościami dochodzącymi do 5,0 uszk./ $(\text{km}\cdot\text{a})$ , a nawet 8 uszk./ $(\text{km}\cdot\text{a})$ . Przyczyny były różnorodne, w tym m.in.: niedbała i niezgodna z zasadami budowa przewodów (złe wykonanie połączeń rur), długoletnia eksploatacja (rurociągi o średnicy 100–175 mm z lat 30. XX w.), duże obciążenia dynamiczne (zwiększony ruch kołowy), uszkodzenia mechaniczne powstałe podczas budowy kanalizacji, czy niskie temperatury.

Rozkład uszkodzeń w roku i wpływ temperatury w odniesieniu do wszystkich rurociągów, niezależnie od rodzaju materiału, będzie przedmiotem analizy w rozdziale 4.3.2.1.4.3.

#### 4.3.2.1.2. Intensywność uszkodzeń rurociągów ze stali i azbestocementu

*Przewody wykonane ze stali* mają wiele zalet w porównaniu z rurociągami żeliwnymi, ale nie są odporne na korozję. Udział przewodów stalowych w długości sieci magistralnej i rozdzielczej w większości badanych miast i osiedli był znikomy i wynosił do 1% (długość poniżej 0,5 km), z wyjątkiem sieci rejonu 2 we Wrocławiu i w Kłodzku, gdzie stanowiły odpowiednio ok. 11% (3,9 km) i 25% (16,3 km) (tab. 4.2, rys. 4.1). Przewody we Wrocławiu stanowiły połączenie rur stalowych i azbestocementowych, dlatego za miarodajne można uznać jedynie wyniki badań sieci w Kłodzku. Ogólna intensywność uszkodzeń ( $\lambda$ ) rurociągów stalowych o średnicach 80–250 mm wynosiła średnio 0,30 uszk./ $(\text{km}\cdot\text{a})$  w czasie eksploatacji z nadmiernym ciśnieniem w sieci (I okres badań) i 0,21 uszk./ $(\text{km}\cdot\text{a})$  w czasie obniżonego ciśnienia w sieci (II okres badań) (tab. 4.3). Zatem po modernizacji pompowni średnia wartość wskaźnika  $\lambda$  zmniejszyła się o 30%. Większość uszkodzeń (76% i 100% odpowiednio w I i II okresach badań – tab. 4.4) spowodowana była korozją materiału rur (wskaźnik  $\lambda_o$ ). Ponad 97% długości rurociągów stalowych w Kłodzku wybudowano w latach 1960–1992.

*Przewody wykonane z azbestocementu* są obecnie wymieniane na przewody z innych materiałów. Poza Opolem, gdzie eksploatowano 13,3 km tych przewodów, w pozostałych miastach długość rurociągów z azbestocementu (poniżej 1 km lub 1,5 km) była zbyt mała do miarodajnej oceny ich awaryjności. W Opolu rurociągi azbestocementowe o średnicach 80–300 mm były budowane do 1984 r. Średnia intensywność ich uszkodzeń w latach 1996–2001 była niewielka i wynosiła 0,15 uszk./ $(\text{km}\cdot\text{a})$ , z czego 93% stanowiły pęknięcia (tab. 4.3 i 4.4).

#### 4.3.2.1.3. Intensywność uszkodzeń rurociągów z tworzyw sztucznych

Najmniejsze problemy eksploatacyjne stwarzały przewody wodociągowe wykonane z tworzyw sztucznych. Udział najdłużej stosowanych rur z PVC w ogólnej długości sieci (bez przyłączy domowych) w badanych systemach dystrybucji wody wynosił od kilku do ok. 25%, a rur z PE HD – do ok. 10% i miał ciągłą tendencję wzrostową (tab. 4.2).

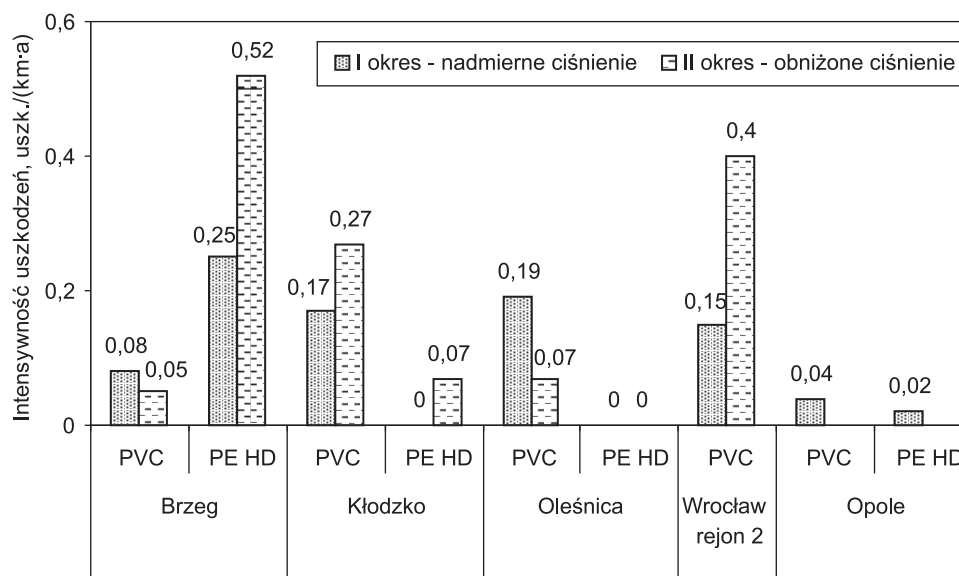
Rurociągi z tworzyw sztucznych (średnice od 90 mm do 315 mm) charakteryzowały się na ogół kilkakrotnie mniejszą uszkodzalnością w porównaniu do rur z żeliwa szarego, przy czym nie stwierdzono jednoznacznego wpływu zmian ciśnienia w sieci na wskaźniki ich uszkodzeń (tab. 4.13, rys. 4.19).

Tabela 4.13. Intensywność uszkodzeń rurociągów z tworzyw sztucznych w dwóch okresach eksploatacji sieci

Table 4.13. Failure rate for plastic pipes over two periods of service

Miasto	Lata budowy przewodów	Średnica $d$ mm	$L_{sr}$ km		Średnia intensywność uszkodzeń rurociągów uszk./(km·a)					
			I okres	II okres	I okres nadmiernego ciśnienia			II okres obniżonego ciśnienia		
					$\lambda_u$	$\lambda_p$	$\lambda$	$\lambda_u$	$\lambda_p$	$\lambda$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<b>RUROCIĄGI z PVC</b>										
Brzeg	1970–1999	90–200	16,930	18,229	0,02 (2)	0,06 (6)	0,08	0,01(1)	0,04 (3)	0,05
Kłodzko	1960–1996	90–160	3,040	3,211	0	0,17 (3)	0,17	0	0,27 (2)	0,27
Oleśnica	1972–1976 1981–1988 1991–1998	90–160	3,600	7,500	0,05 (2)	0,14 (6)	0,19	0	0,07 (4)	0,07
Wrocław, rejon 2	1989–1990	200, 315	1,708	1,870	0	0,15 (1)	0,15	0	0,40 (3)	0,40
Opole	1970–2001	90–315	75,138	–	0,02 (7)	0,02 (10)	0,04	–	–	–
Polkowice os. Sienkiewicza	1992–1994	90–160	–	1,872	–	–	–	0,30 (3)	0	0,30
<b>RUROCIĄGI z PE HD</b>										
Brzeg	1981–1994	90–160	5,701	6,204	0	0,25 (8)	0,25	0,07 (2)	0,45 (12)	0,52
Kłodzko	1992–1999	90–160	1,572	6,407	0	0	0	0	0,07 (1)	0,07
Oleśnica	1995–1996 1999–2000	90–315	–	1,046	–	–	–	0	0	0
Wrocław, rejon 2	1990–1997	90, 110	0,124	0,728	0	0	0	0	0	0
Opole	1983–2000	90–315	10,474	–	0,02 (1)	0	0,02	–	–	–
Polkowice os. Sienkiewicza	1992–1996	110–315	–	1,931	–	–	–	0	0,10 (1)	0,10

Wartości w nawiasach oznaczają liczbę uszkodzeń w okresie badań.



Rys. 4.19. Ogólna intensywność uszkodzeń ( $\lambda$ ) rurociągów z tworzyw sztucznych

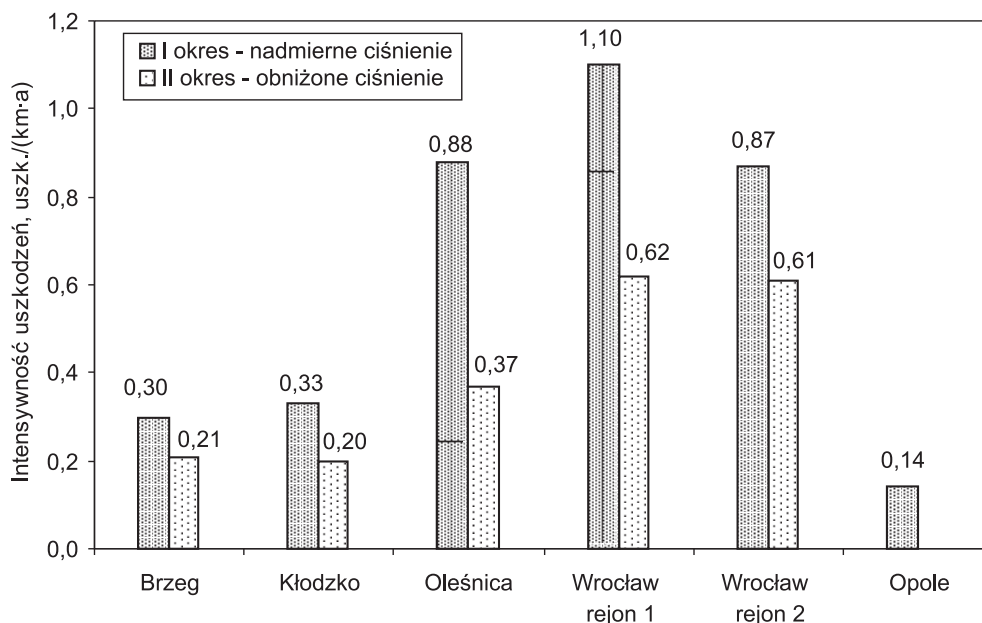
Fig. 4.19. Overall failure rate ( $\lambda$ ) for plastic pipes

W okresie nadmiernego ciśnienia w sieci intensywność uszkodzeń  $\lambda$  rurociągów z PVC w badanych systemach wynosiła średnio 0,08–0,19 uszk./ $(\text{km}\cdot\text{a})$ , a rurociągów z PE HD – średnio 0,0–0,25 uszk./ $(\text{km}\cdot\text{a})$ . Po zmniejszeniu maksymalnego ciśnienia i jego wahań wartości wskaźnika  $\lambda$  rurociągów z PVC obniżyły się w Brzegu i w Oleśnicy, i wynosiły odpowiednio 0,04 uszk./ $(\text{km}\cdot\text{a})$  i 0,07 uszk./ $(\text{km}\cdot\text{a})$ . Wyższymi wskaźnikami uszkodzeń w okresie po obniżeniu ciśnienia w sieci charakteryzowały się rurociągi z PVC w Kłodzku (0,27 uszk./ $(\text{km}\cdot\text{a})$ ) i w rejonie 2 Wrocławia (0,40 uszk./ $(\text{km}\cdot\text{a})$ ). Wyniki te nie są w pełni miarodajne z powodu zbyt krótkiego czasu badań (2,5 roku) i niewielkiej długości rurociągów (poniżej 3 km). Większą uszkadzalnością w II okresie eksploatacji sieci charakteryzowały się także rurociągi wykonane z PE w Brzegu i Kłodzku (rys. 4.19). Najwięcej awarii rurociągów z tworzyw sztucznych nastąpiło wskutek pęknięcia rur, kształtek i zgrzewu. Stanowiły one 50–100% wszystkich uszkodzeń (tab. 4.4). Przewody z tworzyw sztucznych znalazły także szerokie zastosowanie na terenach szkód górniczych, co omówiono w rozdziale 4.4.

#### 4.3.2.1.4. Wpływ wybranych czynników na intensywność uszkodzeń sieci rurociągów

Analizując sieć rurociągów magistralnych i rozdzielczych ogółem, niezależnie od rodzaju materiału, w miastach objętych programem badań i nienarażonych na szkody

górnice można stwierdzić, że najmniejszą awaryjnością charakteryzowała się sieć wodociągowa w Opolu, a największą sieć rejonu 1 we Wrocławiu (tab. 4.14 i 4.15). Ogólna intensywność uszkodzeń, średnia w czasie badań, była we Wrocławiu prawie ośmiokrotnie większa niż w Opolu i wynosiła odpowiednio 1,10 uszk./(km·a) i 0,14 uszk./(km·a) (rys. 4.20).



Rys. 4.20. Ogólna intensywność uszkodzeń ( $\lambda$ ) sieci rurociągów w dwóch okresach badań  
Fig. 4.20. Overall failure rate ( $\lambda$ ) for water-pipe networks (irrespective of the material used) over period I and period II

Głównym powodem była z pewnością znaczna różnica w strukturze materiałowej i wiekowej przewodów wodociągowych. We Wrocławiu 100% długości sieci stanowiły rurociągi z żeliwa szarego, z których ponad 50% wybudowano przed 1940 r. Rurociągi te, w porównaniu z innymi, charakteryzowały się najwyższymi wskaźnikami uszkodzeń. W Opolu sytuacja była zupełnie odmienna, gdyż mniejszy był zarówno udział rurociągów żeliwnych (ok. 60% długości), jak i tych sprzed 1940 r. (ok. 30%), natomiast znaczącą część sieci (ponad 30%) stanowiły rurociągi z tworzyw sztucznych o małej awaryjności.

Badane sieci wodociągowe charakteryzowały się podobną strukturą uszkodzeń. Najwięcej było uszkodzeń wskutek pęknięć i perforacji materiału rur (wskaźniki  $\lambda_p$  i  $\lambda_o$ ), stanowiących ok. 60–90% ogólnej intensywności uszkodzeń ( $\lambda$ ), z wyjątkiem sieci wodociągowej w Oleśnicy, gdzie w I okresie badań przeważały (73%) uszkodzenia złączy rur (tab. 4.15, rys. 4.21).



Tabela 4.14. Intensywność uszkodzeń sieci rurociągów w poszczególnych latach obserwacji  
 Table 4.14. Failure rate for water-pipe networks in particular years of observation

Ogólna intensywność uszkodzeń, intensywność uszkodzeń złączy oraz pęknięć i perforacji (wartości w nawiasach) sieci rurociągów w poszczególnych latach obserwacji, uszk./km·a															
Brzeg		Kłodzko		Oleśnica				Wrocław, rejon 1 (tylko żeliwne)		Wrocław, rejon 2		Opole		Polkowice (żeliwo)	
Rok	$\lambda$ ( $\lambda_{us}; \lambda_{po}$ )	Rok	$\lambda$ ( $\lambda_{us}; \lambda_{po}$ )	I okres		II okres		Rok	$\lambda$ ( $\lambda_{us}; \lambda_{po}$ )	Rok	$\lambda$ ( $\lambda_{us}; \lambda_{po}$ )	Rok	$\lambda$ ( $\lambda_{us}; \lambda_{po}$ )	Rok	$\lambda$ ( $\lambda_{us}; \lambda_{po}$ )
				Rok	$\lambda$ ( $\lambda_{us}; \lambda_{po}$ )	Rok	$\lambda$ ( $\lambda_{us}; \lambda_{po}$ )								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1991	0,29 (0,04; 0,25)	1992	0,24 (0,10; 0,14)	1981	0,63 (0,50; 0,13)	1993	0,53 (0,26; 0,27)	1990	0,67 (0,30; 0,37)	1990	0,99 (0,48; 0,51)	1996	0,17 (0,10; 0,07)	1986	1,19 (0,71; 0,48)
1992	0,27 (0,07; 0,20)	1993	0,40 (0,08; 0,32)	1982	0,77 (0,55; 0,22)	1994	0,33 (0,14; 0,19)	1991	1,25 (0,37; 0,88)	1991	0,89 (0,29; 0,60)	1997	0,21 (0,14; 0,07)	1987	0,96 (0,24; 0,72)
1993	0,25 (0,06; 0,19)	1994	0,42 (0,05; 0,37)	1983	0,85 (0,65; 0,20)	1995	0,36 (0,20; 0,16)	1993	1,41 (0,34; 1,07)	1993	0,83 (0,20; 0,63)	1998	0,09 (0,07; 0,02)	1988	1,19 (0,71; 0,48)
1994	0,31 (0,08; 0,23)	1995	0,39 (0,05; 0,34)	1984	0,92 (0,53; 0,39)	1996	0,35 (0,08; 0,27)	1994	1,05 (0,32; 0,73)	1994	0,77 (0,26; 0,51)	1999	0,11 (0,07; 0,04)	1989	0,72 (0,24; 0,47)
1995	0,35 (0,04; 0,31)	1996	0,20 (0,03; 0,17)	1985	0,74 (0,54; 0,20)	1997	0,33 (0,07; 0,26)	1995	0,41 (0,17; 0,24)	1995	0,37 (0,11; 0,26)	2000	0,16 (0,09; 0,07)	1990	0,24 (0; 0,24)
I–VIII 1996	0,34 (0,08; 0,26)	I–VIII 1997	0,34 (0; 0,34)	1986	1,08 (0,83; 0,25)	1998	0,37 (0,12; 0,25)	1996	0,85 (0,34; 0,51)	1996	0,65 (0,14; 0,51)	2001	0,14 (0,10; 0,04)	1991 <sup>1)</sup>	1,43 (0,48; 0,95)
IX–XII 1996	0,40 (0,12; 0,28)	IX–XII 1997	0,22 (0,04; 0,18)	1987	1,05 (0,80; 0,25)	1999	0,37 (0,12; 0,25)	I–VI 1997	0,58 (0,24; 0,34)	1997	0,48 (0,06; 0,42)			1992	1,19 (0; 1,19)
1996	0,36 (0,09; 0,27)	1997	0,30 (0,02; 0,28)	1988	0,83 (0,64; 0,19)	2000	0,30 (0,11; 0,19)			1998	0,94 (0,26; 0,68)			1993	2,87 (0,96; 1,91)
1997	0,17 (0,05; 0,12)	1998	0,31 (0,03; 0,28)	1989	0,50 (0,36; 0,14)									I–VIII 1994	0,72 (0; 0,72)
1998	0,24 (0,08; 0,16)	1999	0,09 (0,02; 0,07)	1990	0,91 (0,70; 0,21)										
1999	0,14 (0,01; 0,13)			1991	1,17 (0,98; 0,19)										
2000	0,21 (0,02; 0,19)			1992	0,99 (0,55; 0,44)										

<sup>1)</sup> od 1991 r. wznowiono eksploatację złóż rudy miedzi z filara ochronnego

Tabela 4.15. Liczba i intensywność uszkodzeń rurociągów ogółem (bez przyłączy)  
z uwzględnieniem rodzaju uszkodzeń w dwóch okresach eksploatacji sieci  
Table 4.15. Rate of failure and number of failure events for all the pipelines irrespective of  
the material used (excluding fittings), with consideration of the type of damage  
over two periods of service (period I and period II)

Miasto	Okres badań	$L_{\text{śr}}$ km	Rurociągi magistralne i rozdzielcze (bez przyłączy) ogółem							
			liczba uszkodzeń w okresie szt.				średnia intensywność uszkodzeń uszk./km·a			
			$u$	$p$	$o$	$\Sigma$	$\lambda_u$	$\lambda_p$	$\lambda_o$	$\lambda$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Brzeg	I (1991–VIII 1996)	72,608	25 (20)	97 (79)	1 (1)	123	0,06	0,23	0,01	0,30
	II (IX 1996–2000)	74,480	16 (24)	52 (76)	0	68	0,05	0,16	0	0,21
	$\lambda_{II}/\lambda_I$	–	–	–	–	–	0,83	0,67		0,70
Kłodzko	I (1992–VIII 1997)	63,371	19 (16)	41 (34)	59 (50)	119	0,05	0,11	0,17	0,33
	II (IX 1997–1999)	68,242	4 (12)	8 (25)	20 (63)	32	0,02	0,05	0,13	0,20
	$\lambda_{II}/\lambda_I$	–	–	–	–	–	0,40	0,64		0,61
Oleśnica	I (1981–1992)	50,486	387 (73)	129 (24)	14 (3)	530	0,64	0,22	0,02	0,88
	II (1993–2000)	65,202	71 (37)	118 (62)	2 (1)	191	0,14	0,225	0,005	0,37
	$\lambda_{II}/\lambda_I$	–	–	–	–	–	0,22	0,96		0,42
Wrocław rejon 1	I okres (1990–1994, bez 1992)	40,811	54 (30)	98 (55)	27 (15)	179	0,33	0,60	0,17	1,10
	II (1995–VI 1997)	41,035	26 (41)	28 (44)	10 (15)	64	0,25	0,27	0,10	0,62
	$\lambda_{II}/\lambda_I$	–	–	–	–	–	0,76	0,48		0,56
Wrocław rejon 2	I (1990–1994, bez 1992)	34,515	42 (35)	52 (43)	26 (22)	120	0,30	0,38	0,19	0,87
	II (1995–1998)	35,184	20 (23)	51 (59)	15 (18)	86	0,14	0,36	0,11	0,61
	$\lambda_{II}/\lambda_I$	–	–	–	–	–	0,47	0,82		0,70
Opole	1996–2001	262,450	48 (21)	150 (66)	30 (13)	228	0,03	0,09	0,02	0,14
Polkowice os. Sienkiewicza	1986–VIII 1994 (żeliwo)	4,183	14 (33)	29 (69)	0	43	0,39	0,80	0	1,19
	IX 1994–1999 (PVC i PE HD)	3,803	3 (75)	1 (25)	0	4	0,15	0,05	0	0,20

Wartości w nawiasach – udział w ogólnej liczbie uszkodzeń, %

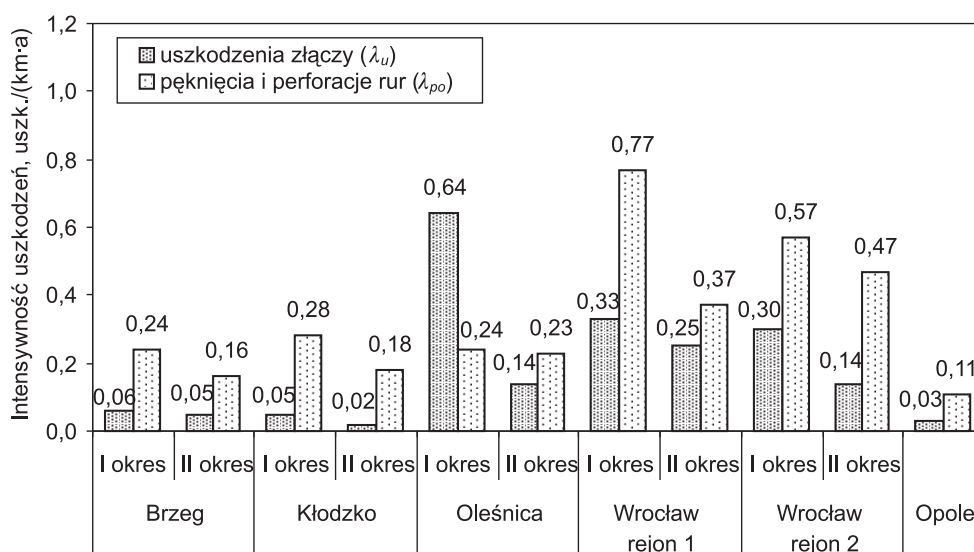
#### 4.3.2.1.4.1. Wysokość i zmiany ciśnienia wody

Ogólna intensywność uszkodzeń sieci rurociągów magistralnych i rozdzielczych (bez względu na rodzaj materiału) w analizowanych systemach dystrybucji wody wynosiła średnio 0,30–1,10 uszk./(km·a) w okresie eksploatacji z nadmiernym ciśnieniem oraz 0,20–0,62 uszk./(km·a) w okresie obniżonego ciśnienia (tab. 4.15, rys. 4.20). Ograniczenie maksymalnego ciśnienia (o 10% w Brzegu do ok. 40% we Wrocławiu) i zmniejszenie jego wahań w ciągu doby spowodowało we wszystkich systemach spadek ogólnej intensywności uszkodzeń, wynoszący od 30% w Brzegu i w rejonie 2 Wrocławia do 58% w Oleśnicy. W odniesieniu do uszkodzeń złączy spadek ten wynosił 17–78%, natomiast w odniesieniu do pęknięć i perforacji rur 4–52% (tab. 4.15, rys. 4.21).

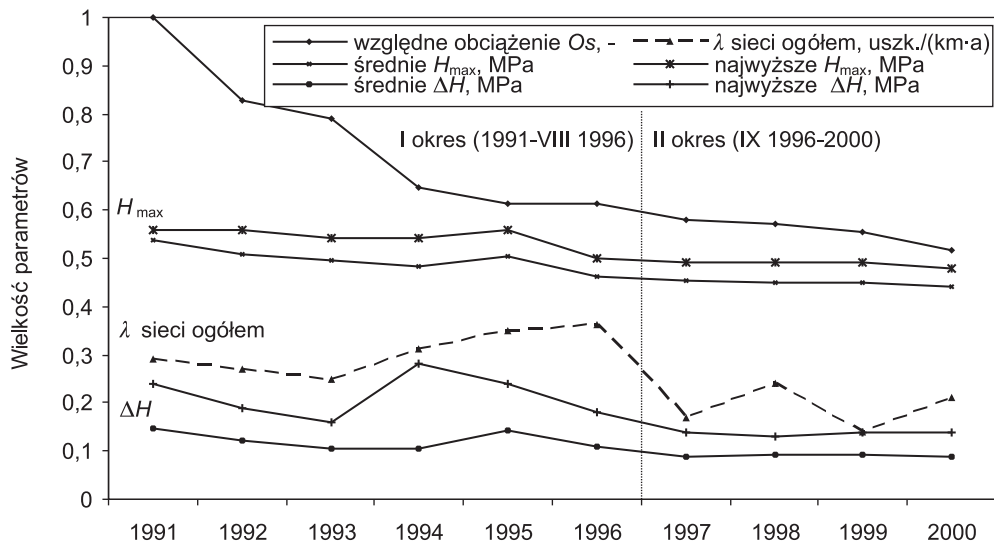
Szczegółową analizę zmian intensywności ( $\lambda$ ) uszkodzeń rurociągów ogółem (niezależnie od rodzaju materiału) przeprowadzono dla sieci wodociągowej eksploatowanej w Brzegu w latach 1991–2000, uwzględniając dobową zmienność ( $\Delta H$ ) oraz maksymalną wysokość tłoczenia ( $H_{\max}$ ) pompowni (rys. 4.22).

W odniesieniu do sieci rurociągów ogółem, podobnie jak w wypadku rurociągów żeliwnych (rozdział 4.3.2.1.1.1), średnia intensywność uszkodzeń  $\lambda$  w poszczególnych latach obserwacji malała istotnie wraz ze zmniejszaniem się średnich dobowych wahań ciśnienia  $\Delta H$  według zależności (rys. 4.23)

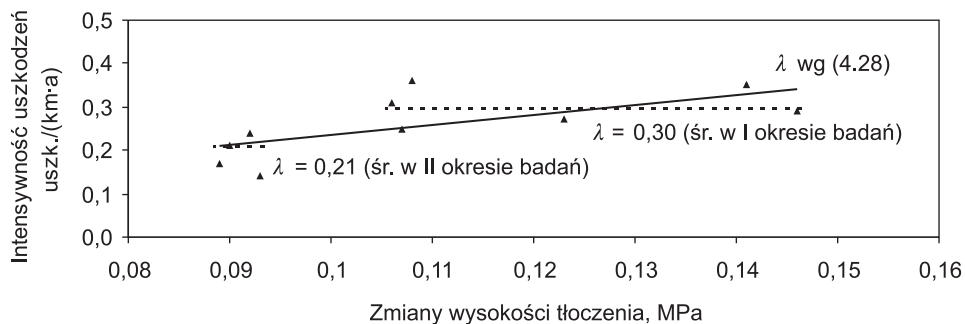
$$\lambda = 2,282\Delta H + 0,009 \quad (R = 0,6573; R_{kr} = 0,5494) \quad (4.28)$$



Rys. 4.21. Intensywność uszkodzeń ( $\lambda_u$ ,  $\lambda_{po}$ ) sieci rurociągów, z uwzględnieniem rodzaju uszkodzeń, w dwóch okresach badań  
 Fig. 4.21. Failure rate ( $\lambda_u$ ,  $\lambda_{po}$ ) for water-pipe networks (irrespective of the material used), including type of damage, observed over period I and period II



Rys. 4.22. Parametry eksploatacyjne sieci wodociągowej w Brzegu  
Fig. 4.22. Operating parameters of the water-pipe network of Brzeg



Rys. 4.23. Ogólna intensywność uszkodzeń ( $\lambda$ ) sieci rurociągów  
w zależności od zmian wysokości tłoczenia ( $\Delta H$ ) pompowni w Brzegu  
Fig. 4.23. Overall failure rate ( $\lambda$ ) for water-pipe networks (irrespective of the material used)  
related to the variations in forcing pressure ( $\Delta H$ ) at the pumping station of Brzeg

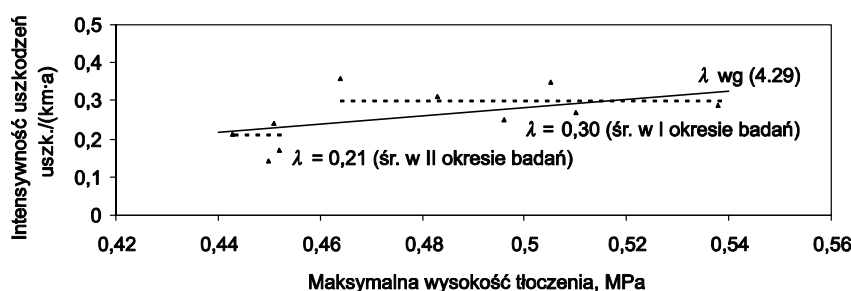
Statystycznie przeciętny okazał się wpływ zmniejszania się średniej wartości maksymalnej wysokości tłoczenia pompowni na spadek intensywności uszkodzeń sieci rurociągów (rys. 4.24):

$$\lambda = 1,0622H_{\max} - 0,2487 \quad (R = 0,4885; R_{kr} = 0,5494) \quad (4.29)$$

Stąd wniosek, że w warunkach eksploatacji sieci w Brzegu w latach 1991–2000 ( $H_{\max} = 0,54\text{--}0,44$  MPa,  $\Delta H = 0,15\text{--}0,09$  MPa) większy wpływ na intensywność

uszkodzeń sieci rurociągów ogółem (podobnie jak rurociągów żeliwnych) miały wahania ciśnienia w pompowni niż jego wysokość.

Z wyników przeprowadzonych badań sieci wodociągowej w Brzegu jednoznacznie wynika, że zmniejszenie o 25% dobowych wahań ciśnienia i o 10% ciśnienia maksymalnego – analizując średnie ich wartości w dwóch okresach eksploatacji – spowodowało spadek ogólnej intensywności uszkodzeń sieci rurociągów średnio o 30% (z 0,30 uszk./(km·a) w I okresie do 0,21 uszk./(km·a) w II okresie).



Rys. 4.24. Ogólna intensywność uszkodzeń ( $\lambda$ ) sieci rurociągów w zależności od maksymalnej wysokości tłoczenia ( $H_{\max}$ ) pompowni w Brzegu  
 Fig. 4.24. Overall failure rate ( $\lambda$ ) for water-pipe networks (irrespective of the material used) related to the maximal forcing pressure ( $H_{\max}$ ) at the pumping station of Brzeg

Należy przy tym przypomnieć, iż w analizie uwzględniono średnie wartości ciśnienia  $H_{\max}$  i jego wahań dobowych  $\Delta H$  w pompowni. Maksymalne natomiast wartości ciśnienia przed modernizacją pompowni (I okres eksploatacji) były zmienne i wynosiły często 0,56 MPa, maksymalne zaś wahania dochodziły do 0,24 MPa (rys. 4.22), a nawet do 0,40 MPa. Po modernizacji pompowni (II okres eksploatacji) nastąpiła stabilizacja ciśnienia, którego wysokość nie przekraczała 0,49 MPa przy maksymalnych wahaniamiach do 0,14 MPa (rys. 4.22), co w efekcie wpłynęło na zmniejszenie intensywności uszkodzeń rurociągów.

#### 4.3.2.1.4.2. Średnica rurociągów

Cała sieć przewodów magistralnych i rozdzielczych, niezależnie od rodzaju materiału, zbudowana była w badanych systemach dystrybucji wody z rurociągów o średnicach od 80 mm do 1000 mm. Rurociągi o średnicach 600 mm, 800 mm i 1000 mm eksploatowane były tylko w Opolu, natomiast w pozostałych systemach największe rurociągi miały średnicę 500 mm. W tabeli 4.16 zestawiono średnie – w dwóch okresach eksploatacji sieci – wartości ogólnej intensywności uszkodzeń ( $\lambda$ ), intensywności uszkodzeń złączy rur ( $\lambda_{uj}$ ) oraz intensywności uszkodzeń spowodowanych pęknięciami i korozją materiału rur ( $\lambda_{po}$ ). Dane dotyczą rurociągów o średnicach od 80 do 600 mm, gdyż rurociągi o średnicach 800 mm i 1000 mm (Betras i Hobas) nie uległy uszkodzeniu w okresie badań.

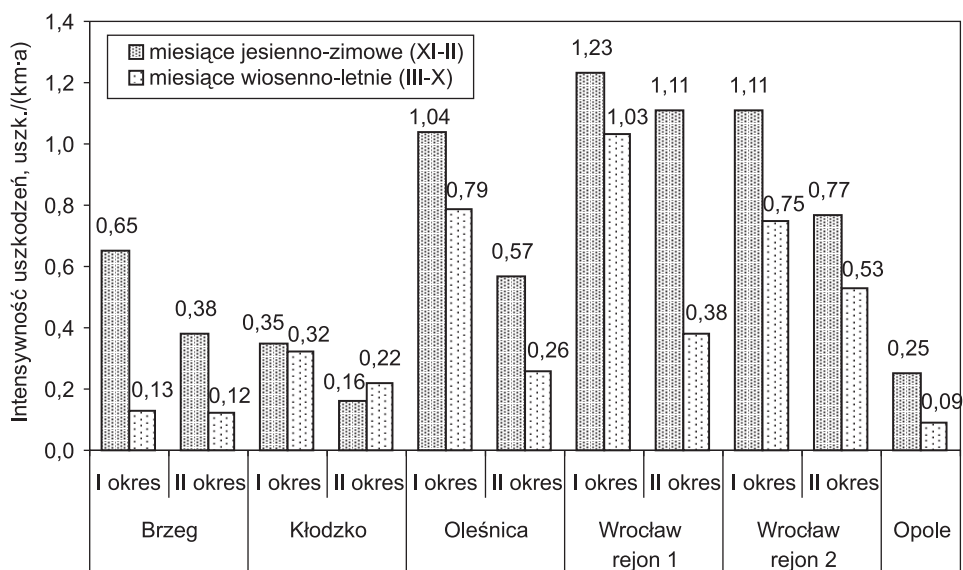
Tabela 4.16. Intensywność uszkodzeń rurociągów ogółem, w zależności od ich średnicy i rodzaju uszkodzeń, w dwóch okresach eksploatacji sieci  
 Table 4.16. Rate of failure for all the pipelines irrespective of the material used, related to pipe diameter

d mm	Ogólna intensywność uszkodzeń oraz intensywność uszkodzeń złączy oraz pęknięć i perforacji łącznie (wartości w nawiasach) rurociągów ogółem – średnie wartości w dwóch okresach eksploatacji sieci, uszk./(km·a)											
	Brzeg		Kłodzko		Oleśnica		Wrocław, rejon 1		Wrocław, rejon 2		Opole	Polkowice
	I okres 1991–VIII1996	II okres IX 96–2000	I okres 1992–VIII1997	II okres IX 97–1999	I okres 1981–1992	II okres 1993–2000	I okres 1990–1994	II okres 1995–VI 97	I okres 1990–1994	II okres 1995–1998	1996–2001	1986–VIII 1994
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
80	<b>0,11</b> (0; 0,11)	<b>1,00</b> (0,13; 0,87)	<b>0,45</b> (0,02; 0,43)	<b>0,21</b> (0; 0,21)	<b>0,31</b> (0; 0,31)	<b>0,13</b> (0; 0,13)	<b>1,14</b> (0; 1,14)	<b>0,61</b> (0; 0,61)	<b>0,82</b> (0; 0,82)	<b>1,02</b> (0,20; 0,82)	<b>0,20</b> (0,03; 0,17)	<b>0,09</b> (0; 0,09)
100	<b>0,47</b> (0,06; 0,41)	<b>0,33</b> (0,05; 0,28)	<b>0,18</b> (0,01; 0,17)	<b>0,11</b> (0; 0,11)	<b>0,70</b> (0,43; 0,27)	<b>0,39</b> (0,09; 0,30)	<b>1,22</b> (0,05; 1,17)	<b>0,59</b> (0,08; 0,51)	<b>0,75</b> (0,10; 0,65)	<b>0,66</b> (0,26; 0,40)	<b>0,18</b> (0,03; 0,15)	<b>2,47</b> (0,71; 1,76)
125	<b>0,24</b> (0,08; 0,16)	<b>0</b> (0; 0)	<b>0,21</b> (0; 0,21)	<b>0,50</b> (0; 0,50)	–	–	<b>1,28</b> (0,08; 1,20)	<b>1,11</b> (0,06; 1,05)	<b>0,70</b> (0,08; 0,62)	<b>1,38</b> (0,12; 1,26)	–	–
150	<b>0,31</b> (0,11; 0,20)	<b>0,17</b> (0,06; 0,11)	<b>0,47</b> (0,14; 0,34)	<b>0,45</b> (0,12; 0,34)	<b>1,00</b> (0,79; 0,21)	<b>0,30</b> (0,10; 0,20)	<b>1,17</b> (0,52; 0,65)	<b>0,70</b> (0,50; 0,20)	<b>0,40</b> (0,13; 0,27)	<b>0,22</b> (0; 0,22)	<b>0,10</b> (0,01; 0,09)	<b>1,67</b> (0,83; 0,84)
175	–	–	–	–	–	–	<b>2,65</b> (0,33; 2,32)	<b>0,79</b> (0,26; 0,53)	<b>1,81</b> (0,21; 1,60)	<b>0,53</b> (0,11; 0,42)	–	–
200	<b>0,20</b> (0; 0,20)	<b>0,18</b> (0,07; 0,11)	<b>0,47</b> (0,10; 0,37)	<b>0,15</b> (0; 0,15)	<b>0,36</b> (0,28; 0,08)	<b>0,21</b> (0,08; 0,13)	<b>0,92</b> (0,74; 0,18)	<b>0</b> (0; 0)	<b>0,54</b> (0; 0,54)	<b>0,37</b> (0; 0,37)	<b>0,19</b> (0,04; 0,15)	<b>0,67</b> (0,10; 0,57)
225	–	–	–	–	–	–	<b>1,66</b> (0; 1,66)	<b>0,53</b> (0; 0,53)	–	–	–	–
250	<b>0,15</b> (0,05; 0,10)	<b>0</b> (0; 0)	<b>0,08</b> (0,04; 0,04)	<b>0</b> (0; 0)	–	–	–	–	<b>0,58</b> (0,14; 0,44)	<b>0</b> (0; 0)	<b>0,20</b> (0,10; 0,10)	<b>2,52</b> (1,04; 1,48)
300	<b>0</b> (0; 0)	<b>0</b> (0; 0)	<b>0</b> (0; 0)	<b>0</b> (0; 0)	<b>3,49</b> (2,82; 0,67)	<b>1,10</b> (0,81; 0,29)	<b>0,68</b> (0,48; 0,20)	<b>0,66</b> (0,55; 0,11)	<b>0,41</b> (0,20; 0,21)	<b>0</b> (0; 0)	<b>0,05</b> (0,03; 0,02)	–
350	<b>0,06</b> (0; 0,06)	<b>0</b> (0; 0)	<b>0</b> (0; 0)	<b>0</b> (0; 0)	–	–	–	–	<b>2,23</b> (1,95; 0,28)	<b>0,70</b> (0,56; 0,14)	–	–
400	<b>0</b> (0; 0)	<b>0,44</b> (0,44; 0)	<b>0,19</b> (0; 0,19)	<b>0</b> (0; 0)	<b>0,66</b> (0,66; 0)	<b>0,35</b> (0,35; 0)	<b>0,50</b> (0,50; 0)	<b>0,32</b> (0,32; 0)	<b>0,56</b> (0,35; 0,21)	<b>0,14</b> (0,07; 0,07)	–	–
500	<b>0,08</b> (0,04; 0,04)	<b>0,02</b> (0,02; 0)	–	–	<b>0,21</b> (0,105; 0,105)	<b>0</b> (0; 0)	<b>0,68</b> (0,58; 0,10)	<b>0,40</b> (0,40; 0)	<b>1,28</b> (1,19; 0,09)	<b>0</b> (0; 0)	<b>0,06</b> (0,02; 0,04)	–
600	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	<b>0,03</b> (0,03; 0)	–

Z analizy danych w tab. 4.16 wynika, że wartości intensywności uszkodzeń dla poszczególnych średnic sieci rurociągów w większości wypadków były równe lub nieznacznie mniejsze od wartości odpowiednich wskaźników dla rurociągów z żeliwa szarego (tab. 4.10). Miały na to wpływ zarówno przeważający udział rurociągów żeliwnych w całkowitej długości badanych sieci (od ok. 57% do 100%), jak i z reguły mniejsza intensywność uszkodzeń rurociągów wykonanych z innych materiałów, zwłaszcza z tworzyw sztucznych. Tylko w nielicznych wypadkach stwierdzono wzrost wartości wskaźników uszkodzeń sieci, spowodowany większą awaryjnością rurociągów stalowych. Dotyczyło to rurociągów o średnicach 125 mm w Kłodzku oraz 80 mm i 150 mm w rejonie 2 sieci Wrocławia.

W odniesieniu do sieci rurociągów ogółem, podobnie jak dla rurociągów żeliwnych, miała miejsce wyraźna tendencja zmniejszania się intensywności uszkodzeń rurociągów wraz ze wzrostem ich średnicy, przy czym rurociągi o mniejszych przekrojach częściej ulegały uszkodzeniom wskutek pęknięcia i perforacji materiału, a o większych przekrojach – wskutek uszkodzenia złączy rur. Obniżenie ciśnienia i jego wahań po modernizacji systemów wodociagowych spowodowało spadek wartości wskaźników  $\lambda$ ,  $\lambda_u$ ,  $\lambda_{po}$  przeważającej większości rurociągów (tab. 4.16).

Wyniki analizy wskaźników uszkodzeń, z uwzględnieniem średnicy rurociągów i rodzaju uszkodzeń, wykorzystano do oceny i prognozowania wskaźników kosztów naprawy sieci wodociagowych (rozdziały 5.3, 5.4, 5.5).



Rys. 4.25. Ogólna intensywność uszkodzeń sieci rurociągów ( $\lambda_{(c)}$ ,  $\lambda_{(l)}$ ), z uwzględnieniem pory roku, w dwóch okresach badań

Fig. 4.25. Overall failure rate ( $\lambda_{(c)}$ ,  $\lambda_{(l)}$ ) for water-pipe networks (irrespective of the material used), including seasonal pattern, observed over period I and period II

#### 4.3.2.1.4.3. Pora roku i głębokość ułożenia rurociągów

Zwiększenie niezawodności działania systemu dystrybucji wody poprzez ograniczenie awaryjności jego elementów można uzyskać przestrzegając w trakcie projektowania i wykonawstwa wymagań dotyczących minimalnej głębokości ułożenia przewodów wodociągowych ze względu na przemarzanie gruntu. Jak wykazują bowiem doświadczenia, niezachowanie minimalnego przykrycia przewodów jest częstą przyczyną ich awarii w okresie jesienno-zimowym, zwłaszcza na końcowych odcinkach sieci o bardzo małych prędkościach przepływu wody.

Dla badanych systemów dystrybucji wody poddano analizie liczbę, częstość oraz intensywność uszkodzeń rurociągów w miesiącach jesienno-zimowych (od listopada do lutego włącznie) oraz wiosenno-letnich (od marca do października). Wyniki oceny średnich wartości tych parametrów, z podziałem na rodzaj występujących uszkodzeń rurociągów, w dwóch okresach eksploatacji sieci w Brzegu, Kłodzku i Oleśnicy zawarto w tab. 4.17, a we Wrocławiu i Opolu w tab. 4.18. Wskaźniki intensywności uszkodzeń (odniesione do roku) zilustrowano na rys. 4.25.

Tabela 4.17. Liczba i intensywność uszkodzeń rurociągów rozdzielczych i magistralnych w zależności od pory roku w dwóch okresach eksploatacji sieci w Brzegu, Kłodzku i Oleśnicy

Table 4.17. Rate of failure and number of failure events for distributing pipes and mains related to the seasons of the year in Brzeg, Kłodzko and Olesnica over two periods in service

Wskaźniki		Całkowita liczba uszkodzeń oraz średnia częstość i intensywność uszkodzeń rurociągów w dwóch okresach badań sieci, z uwzględnieniem pory roku					
		BRZEG		KŁODZKO		OLEŚNICA	
		I okres	II okres	I okres	II okres	I okres	II okres
1	2	3	4	5	6	7	
Okres badań (czas badań)		1991–VIII 1996 (5,66 roku)	IX 1996 –2000 (4,33 roku)	1992–VIII 1997 (5,66 roku)	IX 1997 –1999 (2,33 roku)	1981–1992 (12 lat)	1993–2000 (8 lat)
Ogólna liczba uszkodzeń $n$ w okresie, w tym: (uszkodzenia złączy; pęknięcia i perforacje rur)	zima (XI–II)	86 (19; 67) <sup>1)</sup>	42 (5; 37)	41 (7; 34)	9 (0; 9)	211 (146;65)	100 (29; 71)
	wiosna, lato (III–X)	37 (6; 31) <sup>1)</sup>	26 (11; 15)	78 (12; 66)	23 (4; 19)	319 (241;78)	91 (42; 49)
	razem (I–XII)	123(25;98) <sup>1)</sup>	68 (16; 52)	119 (19;100)	32 (4; 28)	530(387;143)	191 (71;120)
Udział uszkodzeń od XI do II w ogólnej liczbie, %		69,9	61,8	34,4	28,1	39,8	52,3
Średnia w okresie badań częstość uszkodzeń $c$ rurociągów uszk./m-c	$c_{(I)}$ (XI–II)	3,909 (22) <sup>2)</sup>	2,333 (18)	1,864 (22)	0,900 (10)	4,3958 (48)	3,125 (32)
	$c_{(II)}$ (III–X)	0,804 (46) <sup>2)</sup>	0,765 (34)	1,696 (46)	1,278 (18)	3,3229 (96)	1,4219 (64)
	$c$ (I–XII)	1,809 (68) <sup>2)</sup>	1,308 (52)	1,750 (68)	1,143 (28)	3,6805 (144)	1,9896 (96)



cd. tab 4.17

Wskaźniki		Całkowita liczba uszkodzeń oraz średnia częstość i intensywność uszkodzeń rurociągów w dwóch okresach badań sieci, z uwzględnieniem pory roku					
		BRZEG		KŁODZKO		OLEŚNICA	
		I okres	II okres	I okres	II okres	I okres	II okres
1		2	3	4	5	6	7
Średnia w okresie badań częstość pęknięć i perforacji rur $c_{po}$ uszk./m-c	XI–II	3,045	2,056	1,545	0,900	1,354	2,219
	III–X	0,674	0,441	1,435	1,055	0,812	0,766
	I–XII	1,441	1,000	1,470	1,000	0,993	1,250
Długość rurociągów $L_{sr}$ , km		72,608	74,480	63,371	68,242	50,486	65,202
Średnia w okresie badań ogólna intensywność uszkodzeń $\lambda$ uszk./km·a	$\lambda_{(z)}$ (XI–II)	0,65	0,376	0,35	0,16	1,045	0,575
	$\lambda_{(l)}$ (III–X)	0,13	0,123	0,32	0,224	0,79	0,262
	$\lambda$ (I–XII)	0,30	0,21	0,33	0,20	0,88	0,37
Średnia w okresie intensywność pęknięć i perforacji rur $\lambda_{po}$ uszk./km·a	$\lambda_{po(z)}$ (XI–II)	0,50	0,33	0,29	0,16	0,322	0,408
	$\lambda_{po(l)}$ (III–X)	0,11	0,07	0,27	0,19	0,193	0,141
	$\lambda_{po}$ (I–XII)	0,24	0,16	0,28	0,175	0,24	0,23
$\lambda_{(z)}/\lambda_{(l)}$		4,86	3,05	1,10	0,70	1,32	2,20
$\lambda_{po(z)}/\lambda_{po(l)}$		4,518	4,662	1,08	0,85	1,67	2,90
$(\lambda_{(z)} - \lambda_{(l)})/\lambda_{(z)}, \%$		79,4	67,2	9,0	0 (-0,42)	24,4	54,5

<sup>1)</sup> wartości w nawiasach oznaczają sumaryczną liczbę uszkodzeń w okresie badań: złączy rur; pęknięć i perforacji rur

<sup>2)</sup> wartości w nawiasach oznaczają liczbę miesięcy w okresie badań

Z analizy uzyskanych wyników badań wynikają następujące wnioski:

- We wszystkich systemach wodociągowych, z wyjątkiem Kłodzka, ogólna intensywność uszkodzeń rurociągów w okresie jesienno-zimowym ( $\lambda_{(z)}$ ) była większa niż w okresie wiosenno-letnim ( $\lambda_{(l)}$ ). Średnie, w poszczególnych okresach badań, wartości wskaźnika  $\lambda_{(z)}$  były 1,2–5,0-krotnie większe niż wartości wskaźnika  $\lambda_{(l)}$ . W porównaniu do średniej intensywności uszkodzeń ( $\lambda$ ) z całego roku, wzrost wartości w okresie jesienno-zimowym był 1,1–2,2-krotny.

- Zwiększona awaryjność w miesiącach zimowych, wskutek przemarzania gruntu w otoczeniu rurociągu i nierzadko wskutek zamarznięcia wody w przewodzie, spowodowana była pęknięciami materiału rur, których udział w ogólnej liczbie uszkodzeń w tym okresie był w większości wypadków o 3–13% większy niż średnio w całym roku.

Tabela 4.18. Liczba i intensywność uszkodzeń rurociągów rozdzielczych i magistralnych w zależności od pory roku w dwóch okresach eksploatacji sieci we Wrocławiu oraz w Opolu  
 Table 4.18. Rate of failure and number of failure events for distributing pipes and mains related to the seasons of the year in Wrocław and Opole over two periods of service

Wskaźniki		Całkowita liczba uszkodzeń oraz średnia częstość i intensywność uszkodzeń rurociągów w dwóch okresach badań sieci, z uwzględnieniem pory roku				
		WROCLAW, rejon 1		WROCLAW, rejon 2		OPOLE
		I okres	II okres	I okres	II okres	
1		2	3	4	5	6
Okres badań (czas badań)		1990–1994 (bez 1992) (4 lata)	1995–VI 97 (2,5 roku)	1990–1994 (bez 1992) (4 lata)	1995–1998 (4 lata)	1996–2001 (6 lat)
Ogólna liczba uszkodzeń $n$ w okresie, w tym: (uszkodzenia złączy; pęknięcia i perforacje rur)	zima (XI–II)	67 (20; 47) <sup>1)</sup>	38 (12; 26)	51 (14; 37)	36 (7; 29)	133 (36; 97)
	wiosna, lato (III–X)	112 (34; 78) <sup>1)</sup>	26 (14; 12)	69 (28; 41)	50 (13; 37)	95 (13; 82)
	razem (I–XII)	179 (54; 125) <sup>1)</sup>	64 (26; 38)	120 (42; 78)	86 (20; 66)	228 (49; 179)
Udział uszkodzeń w miesiącach od XI do II w ogólnej liczbie uszkodzeń, %		37,4	59,4	42,5	41,9	58,3
Średnia w okresie badań częstość uszkodzeń $c$ rurociągów uszk./m-c	$c_{(z)}$ (XI–II)	4,1875 (16) <sup>2)</sup>	3,80 (10)	3,1875 (16)	2,25 (16)	5,5417 (24)
	$c_{(l)}$ (III–X)	3,500 (32) <sup>2)</sup>	1,30 (20)	2,156 (32)	1,562 (32)	1,9792 (48)
	$c$ (I–XII)	3,729 (48) <sup>2)</sup>	2,133 (30)	2,500 (48)	1,792 (48)	3,1667 (72)
Średnia w okresie badań częstość pęknięć i perforacji rur $c_{po}$ uszk./m-c	XI–II	2,9375	2,60	2,3125	1,8125	4,0417
	III–X	2,4375	0,60	1,2812	1,1562	1,7803
	I–XII	2,604	1,267	1,625	1,375	2,486
Długość rurociągów $L_{sr}$ , km		40,811	41,035	34,515	35,184	262,450
Średnia w okresie badań ogólna intensywność uszkodzeń $\lambda$ uszk./km-a	$\lambda_{(z)}$ (XI–II)	1,23	1,11	1,11	0,77	0,25
	$\lambda_{(l)}$ (III–X)	1,03	0,38	0,75	0,53	0,09
	$\lambda$ (I–XII)	1,10	0,62	0,87	0,61	0,14
Średnia w okresie badań intensywność pęknięć i perforacji rur $\lambda_{po}$ uszk./km-a	$\lambda_{po(z)}$ (XI–II)	0,86	0,76	0,80	0,62	0,185
	$\lambda_{po(l)}$ (III–X)	0,72	0,175	0,445	0,39	0,078
	$\lambda_{po}$ (I–XII)	0,77	0,37	0,57	0,47	0,11
$\lambda_{(z)}/\lambda_{(l)}$		1,20	2,92	1,48	1,44	2,78
$\lambda_{po(z)}/\lambda_{po(l)}$		1,20	4,333	1,805	1,568	2,37
$(\lambda_{(z)} - \lambda_{(l)})/\lambda_{(z)}$ , %		16,4	65,8	32,4	30,6	64,3

<sup>1)</sup> wartości w nawiasach oznaczają sumaryczną liczbę uszkodzeń w okresie badań: złączy rur; pęknięć i perforacji rur

<sup>2)</sup> wartości w nawiasach oznaczają liczbę miesięcy w okresie badań

- Oszacowano (ze wzoru:  $(\lambda_{(z)} - \lambda_{(l)})/\lambda_{(z)}$ ), że przyczyną ok. 16–80% awarii w miesiącach jesienno-zimowych były niekorzystne warunki atmosferyczne i płytkie ułożenie przewodów. Dokładna ocena nie jest możliwa, gdyż w większości wypadków brak było informacji o przyczynach powstałych uszkodzeń.

#### 4.3.2.2. Liczba i intensywność uszkodzeń armatury wodociągowej

Oceniając niezawodność działania sieci wodociągowej, nie można pomijać armatury przewodów, na którą składają się głównie zasuwy odcinające i hydranty. W większości wypadków uszkodzenia armatury przewodów nie wpływają na niezawodność dostawy wody do odbiorców, gdyż naprawa nie wymaga wyłączenia przepływu wody w rejonie uszkodzenia. Niższe są zazwyczaj także jednostkowe koszty naprawy oraz straty wody w porównaniu ze skutkami uszkodzeń rurociągów. Czynniki te nie mogą stanowić jednak uzasadnienia do zaniechania oceny niezawodności armatury, gdyż jak wykazano w rozdziale 5.4, uszkodzenia armatury, przy dużym ich udziale w ogólnej liczbie uszkodzeń sieci, w znaczący sposób wpływają na wzrost kosztów jej eksploatacji (także sieciowych strat wody).

Wielu badaczy, zajmujących się oceną wskaźników intensywności uszkodzeń przewodów wodociągowych, pomija ocenę tego wskaźnika w odniesieniu do armatury, albo co gorsze – odnosi liczbę jej uszkodzeń do długości przewodów. W konsekwencji uzyskane wartości wskaźników nie odzwierciedlają faktycznego stopnia awaryjności przewodów, i nie mogą być wykorzystane do oceny i porównań. Powodem jest (najczęściej) brak danych o ogólnej liczbie zainstalowanej armatury, co uniemożliwia poprawne obliczenie wskaźników intensywności jej uszkodzeń z wykorzystaniem wzoru (4.1). Intensywność uszkodzeń armatury, jako elementów nieliniowych, oznacza bowiem udział poszczególnych rodzajów armatury (zasuw, hydrantów itp.), które uległy uszkodzeniu w ciągu roku w ogólnej liczbie armatury danego rodzaju (zasuw, hydrantów itp.).

Z tych też względów, ocena wartości wskaźników intensywności uszkodzeń armatury była możliwa tylko w odniesieniu do sieci wodociągowej w analizowanych rejonach Wrocławia, a w pozostałych miastach objętych programem badań oceniono wyłącznie liczbę uszkodzeń. Średnie (w okresach badań) wartości liczbowe intensywności uszkodzeń zasuw i hydrantów (nie stwierdzono awarii innego typu uzbrojenia) określono z podziałem na uszkodzenia, które podlegały naprawie, co umożliwiło obliczenie wartości wskaźników  $\lambda_{ZN}$  i  $\lambda_{HN}$  oraz uszkodzenia, których konsekwencją była wymiana zasuw ( $\lambda_{ZW}$ ) i hydrantów ( $\lambda_{HW}$ ).

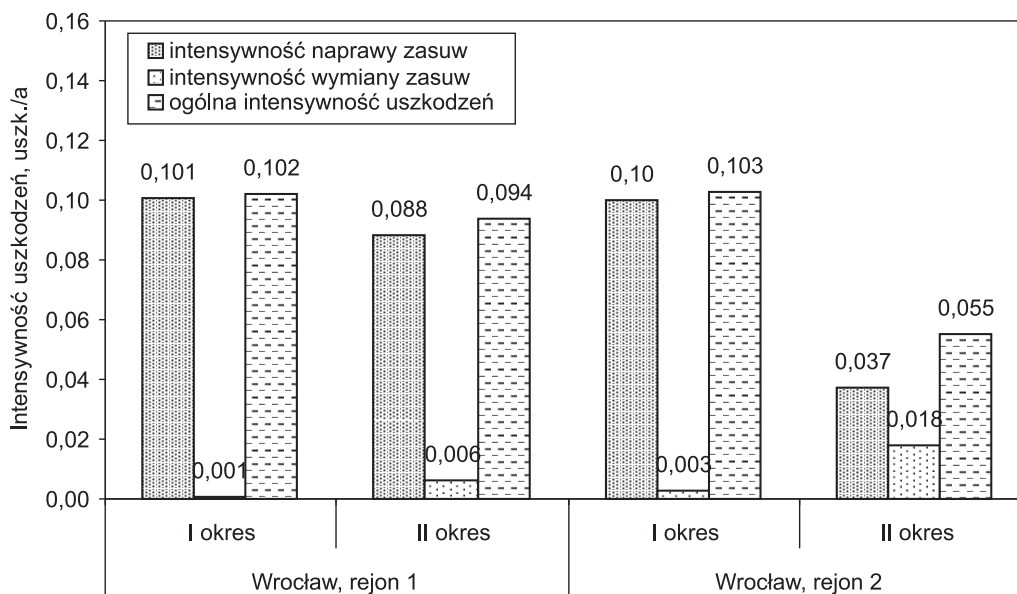
Wnioski z przeprowadzonych badań, których wyniki zestawiono w tabeli 4.19 i zilustrowano na rysunkach 4.26 i 4.27, są następujące:

- Ogólna intensywność uszkodzeń zasuw ( $\lambda_Z$ ) w okresie eksploatacji z nadmiernym ciśnieniem w sieci we Wrocławiu była duża i jednakowa w obydwu rejonach (ok. 0,1 uszk./a). Spowodowana była głównie pęknięciami i nieszczelnością dławików oraz pęknięciami obudowy zasuw, które w 97–99% przypadków naprawiono (wskaźnik  $\lambda_{ZN}$ ),

a w pozostałych – zamontowano nowe zasuwy ( $\lambda_{ZW}$ ). W okresie eksploatacji z obniżonym ciśnieniem zarówno ogólna intensywność uszkodzeń, jak i struktura uszkodzeń zasuw nie uległy istotnym zmianom w sieci rejonu 1. Natomiast w sieci rejonu 2 wystąpił prawie 2-krotny spadek ogólnej intensywności, przy prawie 3-krotnym spadku intensywności naprawy oraz 6-krotnym wzroście intensywności wymiany zasuw (rys. 4.26).

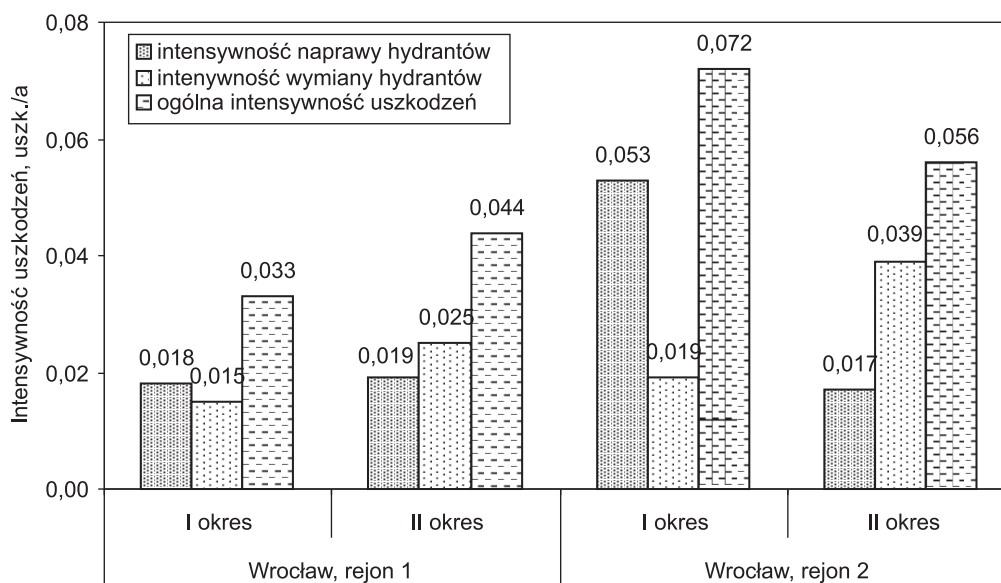
- Ogólna intensywność uszkodzeń hydrantów ( $\lambda_H$ ) na sieci wodociągowej w rejonie 1 we Wrocławiu była prawie jednakowa w obydwu okresach badań i wynosiła 0,033 uszk./a i 0,044 uszk./a. Około 50% uszkodzonych hydrantów wymieniono na nowe. Awaryjność hydrantów zamontowanych na przewodach w rejonie 2 sieci była wyższa i wynosiła 0,072 uszk./a w I okresie badań oraz 0,056 uszk./a w II okresie (spadek o 22%). Zmianie uległa struktura uszkodzeń hydrantów, które w I okresie w większości naprawiono (74%), a w II okresie wymieniono (70%) (rys. 4.27).

- Na podstawie oceny liczby uszkodzeń armatury zabudowanej na sieci w pozostałych miastach (Brzeg, Kłodzko, Oleśnica, Opole) (tab. 4.19) można wnioskować, że intensywność uszkodzeń zasuw i hydrantów była znacznie mniejsza niż we Wrocławiu. Wynika to z faktu odnotowania mniejszej liczby awarii armatury (stanowiły 3–14% ogólnej liczby uszkodzeń przewodów, a we Wrocławiu 40–57%) w odniesieniu do prawdopodobnie większej ogólnej liczby zabudowanej armatury, ze względu na dłuższą sieć przewodów w powyższych miastach niż we Wrocławiu.



Rys. 4.26. Intensywność uszkodzeń zasuw ( $\lambda_{ZN}$ ,  $\lambda_{ZW}$ ,  $\lambda_Z$ ), z uwzględnieniem rodzaju uszkodzeń, w dwóch okresach eksploatacji sieci we Wrocławiu

Fig. 4.26. Failure rate for valves ( $\lambda_{ZN}$ ,  $\lambda_{ZW}$ ,  $\lambda_Z$ ), including type of damage, observed in Wrocław over period I and period II of service



Rys. 4.27. Intensywność uszkodzeń hydrantów ( $\lambda_{HN}$ ,  $\lambda_{HW}$ ,  $\lambda_H$ ), z uwzględnieniem rodzaju uszkodzeń, w dwóch okresach eksploatacji sieci we Wrocławiu

Fig. 4.27. Failure rate for hydrants ( $\lambda_{HN}$ ,  $\lambda_{HW}$ ,  $\lambda_H$ ), including type of damage, observed in Wrocław over period I and period II of service

Tabela 4.19. Liczba i intensywność uszkodzeń armatury przewodów w dwóch okresach eksploatacji sieci  
Table 4.19. Rate of failure and number of failure events for fittings over two periods of service

Miasto	Okres badań	Średnia w okresie liczba armatury	Liczba uszkodzeń armatury w okresie badań, szt			Średnia w okresie badań intensywność, uszk./a		
			liczba napraw	liczba wymian	razem	naprawy	wymiany	ogólna
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>ZASUWY ODCINAJĄCE</b>		$N_{srz}$	$a_{zN}$	$a_{zW}$	$a_z$	$\lambda_{zN}$	$\lambda_{zW}$	$\lambda_z$
Wrocław rejon 1	I (1990–1994, bez 1992)	186	75	1	76	0,101	0,001	0,102
	II (1995–VI 1997)	187	41	3	44	0,088	0,006	0,094
Wrocław rejon 2	I (1990–1994, bez 1992)	173	69	2	71	0,100	0,003	0,103
	II (1995–1998)	177	26	13	39	0,037	0,018	0,055
Brzeg	I i II (1991–2000)	b.d.	8 (4; 4) <sup>1)</sup>	4 (2; 2)	12 (6; 6)	–	–	–
Kłodzko	I i II (1992–1998)	b.d.	4 (4; 0)	5 (4; 1)	9 (8; 1)	–	–	–
Oleśnica	II (1993–2000)	b.d.	10	0	10	–	–	–
Opole	1996–2000	b.d.	5	1	6	–	–	–

Miasto	Okres badań	Średnia w okresie liczba armatury	Liczba uszkodzeń armatury w okresie badań, szt			Średnia w okresie badań intensywność, uszk./a		
			liczba napraw	liczba wymian	razem	naprawy	wymiany	ogólna
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>HYDRANTY</b>		$N_{srH}$	$a_{HN}$	$a_{HW}$	$a_H$	$\lambda_{HN}$	$\lambda_{HW}$	$\lambda_H$
Wrocław rejon 1	I (1990–1994, bez 1992)	308	22	19	41	0,018	0,015	0,033
	II (1995–VI1997)	310	15	19	34	0,019	0,025	0,044
Wrocław rejon 2	I (1990–1994, bez 1992)	311	66	24	90	0,053	0,019	0,072
	II (1995–1998)	320	22	50	72	0,017	0,039	0,056
Brzeg	I i II (1991–2000)	b.d.	3 (3; 0) <sup>1)</sup>	8 (3; 5)	11 (6; 5)	–	–	–
Kłodzko	I i II (1992–1998)	b.d.	7 (7; 0)	1 (1; 0)	8 (8; 0)	–	–	–
Oleśnica	II (1993–2000)	b.d.	4	4	8	–	–	–
Opole	1996–2000	b.d.	10	10	20	–	–	–

<sup>1)</sup> wartości w nawiasach: liczba uszkodzeń odpowiednio w I i II okresie badań  
b.d. – brak danych

Tabela 4.20. Liczba i intensywność uszkodzeń armatury przewodów wodociągowych w zależności od pory roku

Table 4.20. Rate of failure and number of failure events for fittings related to the season of the year

WSKAŹNIKI	Całkowita liczba uszkodzeń oraz średnia częstość i intensywność uszkodzeń armatury w okresach badań, z uwzględnieniem pory roku						
	BRZEG	KŁODZKO	OLEŚNICA	WROCLAW rejon 1	WROCLAW rejon 2	OPOLE	
1	2	3	4	5	6	7	
Okres badań (czas badań)	1991–2000 (10 lat)	1992–1998 (7 lat)	1993–2000 (8 lat)	1990–1996 (bez 1992) (6 lat)	1990–1998 (bez 1992) (8 lat)	1996–2001 (6 lat)	
Ogólna liczba uszkodzeń $a$ armatury w okresie, w tym: (zasuwy; hydranty)	zima (XI–II)	12 (5; 7) <sup>1)</sup>	3 (2; 1)	6 (3; 3)	63 (41; 22)	89 (33; 56)	13 (2; 11)
	wiosna, lato (III–X)	11 (7; 4) <sup>1)</sup>	14 (7; 7)	12 (7; 5)	116 (65; 51)	183 (77; 106)	13 (4; 9)
	razem (I–XII)	23 (12; 11) <sup>1)</sup>	17 (9; 8)	18 (10; 8)	179 (106; 73)	272 (110; 162)	26 (6; 20)

cd. tab. 4.20

WSKAŹNIKI	Całkowita liczba uszkodzeń oraz średnia częstość i intensywność uszkodzeń armatury w okresach badań, z uwzględnieniem pory roku						
	BRZEG	KŁODZKO	OLEŚNICA	WROCŁAW rejon 1	WROCŁAW rejon 2	OPOLE	
1	2	3	4	5	6	7	
Miesiące o największej liczbie uszkodzeń	I (7 uszk.), V (4)	II (4), X (4)	I (3), III (3), IX (3)	X (24), IX (23), II (17), XI (16)	II (37), III (33), X (32)	XI (5), XII (4), I (4)	
Udział uszkodzeń armatury od XI do II w ogólnej liczbie uszkodzeń $a$ , %	52,2	17,6	33,3	35,2	32,7	50,0	
Liczba uszkodzeń w okresie badań, szt.	rurociągów ( $u+p+o$ )	191	145	191	231	206	228
	armatury ( $a_Z+a_H$ )	23	17	18	179	272	26
	ogółem przewodów	214	162	209	410	478	254
Udział uszkodzeń armatury w ogólnej liczbie uszkodzeń przewodów, %	10,7	10,5	8,6	43,6	56,9	10,2	
Średnia w okresie badań częstość $c_a$ uszkodzeń armatury uszk./m-c	$c_{a(z)}$ (XI–II)	0,30	0,107	0,1875	2,625	2,781	0,5417
	$c_{a(l)}$ (III–X)	0,1375	0,250	0,1875	2,417	2,859	0,2708
	$c_a$ (I–XII)	0,1917	0,202	0,1875	2,486	2,833	0,3611
$c_{a(z)}/c_{a(l)}$	2,2	0,43	1,0	1,09	0,97	2,0	
Średnia w okresie badań liczba $N_{szZ}$ zasuw, szt.	b.d.	b.d.	b.d.	186	175	b.d.	
Średnia w okresie badań ogólna intensywność $\lambda_Z$ uszkodzeń zasuw uszk./a	$\lambda_{Z(z)}$ (XI–II)	–	–	–	0,1102	0,0707	–
	$\lambda_{Z(l)}$ (III–X)	–	–	–	0,0874	0,0825	–
	$\lambda_Z$ (I–XII)	–	–	–	<b>0,0950</b>	<b>0,0786</b>	–
Średnia w okresie badań liczba $N_{szH}$ hydrantów, szt.	b.d.	b.d.	b.d.	309	315	b.d.	
Średnia w okresie badań ogólna intensywność $\lambda_H$ uszkodzeń hydrantów uszk./a	$\lambda_{H(z)}$ (XI–II)	–	–	–	0,0356	0,0667	–
	$\lambda_{H(l)}$ (III–X)	–	–	–	0,0413	0,0631	–
	$\lambda_H$ (I–XII)	–	–	–	<b>0,0394</b>	<b>0,0643</b>	–

1) wartości w nawiasach oznaczają liczbę uszkodzeń w okresie badań: zasuw; hydrantów

W odniesieniu do armatury nie stwierdzono tak jednoznacznego i negatywnego wpływu niskich temperatur na jej awaryjność, jak to miało miejsce w wypadku rurociągów. Tylko w sieciach wodociągowych w Brzegu i Opolu średnia częstość uszkodzeń zasuw i hydrantów w okresie jesienno-zimowym ( $c_{a(z)}$ ) była 2-krotnie większa niż w okresie wiosenno-letnim ( $c_{a(l)}$ ), a w pozostałych nie odbiegała od średniej częstości ( $c_a$ ) uszkodzeń w roku (tab. 4.20).

### 4.3.3. Czas usuwania uszkodzeń przewodów wodociągowych

Na czas usuwania uszkodzeń przewodów wodociągowych wpływają różne czynniki, z których najważniejsze to:

- rodzaj przewodów (średnica, materiał, stan techniczny),
- typ uszkodzonych elementów,
- rodzaj i wielkość uszkodzeń,
- zagłębienie przewodów,
- warunki gruntowe i wodne,
- rodzaj pokrycia terenu,
- sposób organizacji naprawy,
- kwalifikacje i wyposażenie w sprzęt i materiały zespołu naprawiającego,
- warunki atmosferyczne.

W każdym wypadku należy dążyć do skrócenia czasu naprawy, gdyż ma on bezpośredni wpływ m.in. na:

- niedogodności i straty spowodowane ograniczeniem bądź wstrzymaniem dostawy wody do użytkowników,
- straty wody w sieci wodociągowej,
- koszty naprawy uszkodzeń,
- utrudnienia i zagrożenia w organizacji ruchu pieszego i kołowego,
- szkody spowodowane zalaniem budowli i urządzeń naziemnych oraz podziemnych itp.

#### 4.3.3.1. Składniki czasu usuwania uszkodzeń

Czas usuwania uszkodzeń określa się na podstawie badań eksploatacyjnych jako średnią wartość z czasów trwania naprawy poszczególnych uszkodzeń, które wystąpiły w ciągu roku lub w dłuższym okresie obserwacji [34, 72, 91, 107, 123]. W zależności od celu badań ocena wartości tego wskaźnika może dotyczyć przewodów wodociągowych ogółem lub może uwzględniać czynniki (wymienione we wstępie), które mają decydujący wpływ na jego wartość. Mniej lub bardziej szczegółowy może być także podział całkowitego czasu usuwania uszkodzeń na przedziały czasu, z uwzględnieniem stopnia i rodzaju występujących w nich zakłóceń w funkcjonowaniu systemu oraz ich skutków.



Biorąc to pod uwagę, średni całkowity czas usuwania uszkodzeń przewodów opisano wzorem

$$T_c = T_{on} + T_n + T_{pp} \quad (4.30)$$

Czas  $T_{on}$  organizacji naprawy obejmuje czas od momentu powstania uszkodzenia do momentu przystąpienia do właściwej naprawy. W praktyce znany jest najczęściej czas zgłoszenia awarii, który często nie pokrywa się z czasem jej wystąpienia i jest trudny do ustalenia. Czas organizacji naprawy obejmuje czas dojazdu do miejsca uszkodzenia i czas jego lokalizacji, czas przygotowania sprzętu i materiałów, a niekiedy także czas oczekiwania na przystąpienie do naprawy wynikający z braku zespołu naprawczego czy z pilności innych prac. Czas  $T_n$  właściwej naprawy uszkodzenia obejmuje czas od chwili rozpoczęcia prac związanych z naprawą uszkodzenia do jej zakończenia, czyli do wznowienia dostawy wody do odbiorców po płukaniu i dezynfekcji rurociągu. Czas właściwej naprawy uszkodzenia zależy od czynników wymienionych we wstępie. Czas  $T_{pp}$  trwania prac porządkowych jest to czas potrzebny na zasypanie wykopu, odtworzenie nawierzchni i uporządkowanie rejonu awarii.

Z punktu widzenia odbiorców wody istotny jest czas, jaki upływa od chwili wystąpienia uszkodzenia do zakończenia jego naprawy właściwej, gdyż w tym okresie może (w zależności od rodzaju uszkodzenia) wystąpić zmniejszenie lub całkowite wstrzymanie dopływu wody do użytkowników. Czas ten, zwany czasem odnowy, opisano wzorem (4.5) ( $T_o = T_{on} + T_n$ ), a jednocześnie [34]

$$T_o = T_1 + T_w \quad (4.31)$$

Parametr  $T_1$  oznacza czas jaki upływa od chwili powstania uszkodzenia do wyłączenia przepływu wody na uszkodzonym odcinku przewodu. Jest to zatem czas wypływu wody przez uszkodzenie, decydujący o wielkości strat wody. Parametr  $T_w$  jest to czas całkowitego wstrzymania dopływu wody do odbiorców, czyli czas, jaki upływa od momentu zamknięcia uszkodzonego odcinka przewodu aż do ponownego włączenia przepływu wody po naprawie uszkodzenia, płukaniu i dezynfekcji rurociągu.

#### 4.3.3.2. Czas usuwania uszkodzeń rurociągów magistralnych i rozdzielczych

W wielu przedsiębiorstwach wodociągowych niedoceniany jest wpływ czasu trwania naprawy uszkodzeń na niezawodność działania i koszty eksploatacji systemu wodociągowego, a także wielkość sieciowych strat wody. W konsekwencji brak szczegółowych i wiarygodnych danych na ten temat uniemożliwił dokonanie pełnej oceny działania niektórych systemów wodociągowych.

Analizę całkowitego czasu usuwania uszkodzeń oraz jego elementów składowych przeprowadzono z tego powodu tylko dla sieci wodociągowych w Brzegu i Opolu. Badania sieci wodociągowej w Brzegu obejmowały lata 1991–2000. W końcu 2000 r.

długość przewodów magistralnych i rozdzielczych (o średnicach 80–500 mm) wynosiła w mieście ok. 74,6 km. Prawie 66% długości stanowiły przewody z żeliwa szarego, a 33% przewody z PVC i PE HD. Sprzed 1940 r. pochodziło ok. 13% przewodów. Badania sieci wodociągowej w Opolu obejmowały lata 1996–2001. W końcu 2001 r. długość przewodów magistralnych i rozdzielczych (o średnicach 80–1000 mm) wynosiła ok. 271 km. W strukturze materiałowej, podobnie jak w Brzegu, przeważało żeliwo szare (ok. 57% długości) i tworzywa sztuczne – PVC i PE HD (ok. 35%). Przewody wybudowane przed 1940 r. stanowiły 28% długości.

Analizując czas usuwania uszkodzeń sieci wodociągowej, uwzględniono przypadki awarii rurociągów, a pominięto uszkodzenia armatury, które stanowiły ok. 10% ogólnej liczby uszkodzeń przewodów i w większości wypadków nie spowodowały zakłóceń w dostawie wody do odbiorców. Średnie wartości składników czasu usuwania uszkodzeń rurociągów w poszczególnych latach obserwacji oraz okresach badań określono dla sieci rozdzielczej (średnica przewodów <400 mm), magistralnej (średnica  $\geq 400$  mm) oraz dla sieci ogółem. Wyniki obliczeń, z uwzględnieniem rodzaju występujących uszkodzeń (awarie złączy oraz pęknięcia i perforacje rur), dla sieci w Brzegu zestawiono w tab. 4.21, a dla sieci w Opolu w tab. 4.22. W obu systemach wodociągowych ok. 97% awarii w okresie badań wystąpiło na przewodach rozdzielczych.

Tabela 4.21. Czas usuwania uszkodzeń rurociągów magistralnych i rozdzielczych w Brzegu  
Table 4.21. Duration of damage removal for mains and distributing pipes in Brzeg

Parametr		Czas usuwania uszkodzeń rurociągów w Brzegu w latach 1991–2000					
		rozdzielcze $\phi 80\text{--}\phi 350$ mm		magistralne $\phi 400, \phi 500$ mm		ogółem $\phi 80\text{--}\phi 500$ mm	
		zakres zmian	wartość średnia	zakres zmian	wartość średnia	zakres zmian	wartość średnia
Czas organizacji $T_{on}$ , h	ogółem	0,5–2,3	1,3 (163)	0,5–1,5	1,2 (3)	0,5–2,2	1,3 (166)
Czas właściwej naprawy $T_n$ , h	ogółem	4,8–8,9	5,6 (163)	5,5–10,5	7,5 (3)	4,8–8,9	5,6 (166)
	pęknięć	4,9–8,9	5,7 (133)	–	–	4,9–8,9	5,7 (133)
	złączy	4,0–8,0	4,9 (30)	5,5–10,5	7,5 (3)	4,2–8,0	5,2 (33)
Czas odnowy $T_o$ , h	ogółem	5,7–9,4	6,9 (163)	7,0–11,0	8,7 (3)	5,7–9,4	7,0 (166)
	pęknięć	5,7–9,4	7,1 (133)	–	–	5,7–9,4	7,1 (133)
	złączy	5,2–8,5	6,0 (30)	7,0–11,0	8,7 (3)	5,2–8,5	6,2 (33)
Czas całkowity naprawy $T_c$ , h	ogółem	7,3–9,9	8,6 (176)	8,5–12,0	9,7 (3)	7,3–9,9	8,7 (179)
	pęknięć	7,3–10,1	8,9 (141)	–	–	7,3–10,1	8,9 (141)
	złączy	7,0–9,0	7,8 (35)	8,5–12,0	9,7 (3)	7,0–9,0	7,9 (38)
Czas wypływu $T_l$ , h	ogółem	0,5–3,2	2,2 (137)	0,5–4,5	2,2 (3)	0,5–3,1	2,2 (140)
Czas wyłączenia dopływu $T_w$ , h	ogółem	3,1–7,1	4,3 (153)	3,5–10,5	6,5 (3)	3,3–7,1	4,4 (156)

Wartości w nawiasach oznaczają liczbę obserwacji.

Tabela 4.22. Czas usuwania uszkodzeń rurociągów magistralnych i rozdzielczych w Opolu  
 Table 4.22. Duration of damage removal for mains and distributing pipes in Opole

Parametr		Czas usuwania uszkodzeń rurociągów w Opolu w latach 1996–2001					
		rozdzielcze φ80–φ315 mm		magistralne φ500 i φ600 mm		ogółem φ80–φ600	
		zakres zmian	wartość średnia	zakres zmian	wartość średnia	zakres zmian	wartość średnia
Czas organizacji $T_{on}$ , h	ogółem	6–21,3	12,4 (221)	0,5–42	14,5 (6)	5,7–21,3	12,4 (227)
Czas naprawy i prac porządkowych $T_n^*$ , h	ogółem	7,5–13,6	9,5 (221)	11,5–68	32,9 (6)	8–13,8	10,2 (227)
	pęknięć	7,9–14,6	9,8 (175)	15–88	40,3 (3)	8,1–14,6	10,3 (178)
	złączy	4,5–12	8,4 (46)	11,5–48	25,5 (3)	6,5–13,7	9,5 (49)
Czas całkowity naprawy $T_c$ , h	ogółem	13,5–34,9	21,9 (221)	12–110	47,4 (6)	13,7–34,9	22,6 (227)
	pęknięć	14,3–36,1	22,2 (175)	16–160	65 (3)	14,6–36,1	22,9 (178)
	złączy	5,5–31,8	20,9 (46)	12–60	29,8 (3)	8,7–31,8	21,5 (49)
Czas wypływu wody $T_1$ , h	ogółem	1,9–4,5	3,6 (170)	–	–	–	–
	pęknięć	1,6–4,9	3,6 (136)	–	–	–	–
	złączy	1,0–7,9	3,5 (34)	–	–	–	–

Wartości w nawiasach oznaczają liczbę obserwacji.

Z analizy średnich wartości składników całkowitego czasu usuwania uszkodzeń rurociągów rozdzielczych wynikają wnioski:

- Czas organizacji naprawy uszkodzeń ( $T_{on}$ ) był znacznie dłuższy w Opolu niż w Brzegu i wynosił 6–21,3 h (średnio 12,4 h). W wielu bowiem przypadkach, gdy uszkodzenie wystąpiło przed świętem lub weekendem, do właściwej naprawy przystępowano dopiero po kilku dniach. W Brzegu, gdzie prace rozpoczynano bezpośrednio po stwierdzeniu awarii, czas ten wynosił 0,5–2,3 h (średnio 1,3 h).

- Czas właściwej naprawy ( $T_n$ ) uszkodzeń ogółem (awarii złączy oraz pęknięć i perforacji rur) w Brzegu wynosił 4,8–8,9 h (średnio 5,6 h). W Opolu czas naprawy wraz z pracami porządkowymi ( $T_n^*$ ) wynosił 7,5–13,6 h (średnio 9,5 h). Porządkowanie terenu po zakończeniu naprawy, według nielicznych danych, trwało od 2,5 do 3,0 godzin. Można zatem z pewnym przybliżeniem przyjąć, że średni czas naprawy właściwej ( $T_n$ ) rurociągów rozdzielczych w Opolu wynosił od 6,5 do 7,0 godzin. Czas trwania naprawy zależy od rodzaju uszkodzeń rurociągów. W obu systemach średni czas naprawy właściwej pęknięć rurociągów był dłuższy od czasu naprawy złączy rur (o 0,8 godz. w Brzegu i o ok. 1,4 godz. w Opolu). Wynikało to zarówno ze sposobu naprawy, jak i z konieczności wykonania większego wykopu w wypadku naprawy pęknięć rur.

- Na czas naprawy rurociągów miał także wpływ rodzaj pokrycia terenu w miejscu awarii. W Brzegu czas od momentu przystąpienia do zdejmowania nawierzchni był

najdłuższy dla nawierzchni asfaltowej, nieco krótszy dla nawierzchni z kostki kamiennej i płyt chodnikowych, a najkrótszy dla przewodów ułożonych w terenie zielonym. Różnice te były niewielkie (0,1–0,2 godziny), stąd wniosek, że rodzaj pokrycia terenu nie miał tak istotnego wpływu na czas trwania naprawy właściwej jak rodzaj uszkodzeń rurociągów.

- Nie stwierdzono znaczącego wpływu warunków atmosferycznych na czas trwania naprawy uszkodzeń rurociągów rozdzielczych. W obydwu systemach wodociągowych ok. 60% analizowanych przypadków uszkodzeń miało miejsce w okresie zimowym (od grudnia do lutego włącznie). Wartości średniego czasu naprawy ( $T_n$  w Brzegu i  $T_n^*$  w Opolu) w miesiącach zimowych były w przybliżeniu równe średnim (w latach i okresach badań) wartościom z pozostałych miesięcy roku.

- Czas odnowy ( $T_o$ ) rurociągów sieci rozdzielczej, stanowiący sumę czasu organizacji naprawy i czasu naprawy właściwej uszkodzeń ogółem, wynosił 5,7–9,4 h (średnio 6,9 h) w Brzegu, a w Opolu był 2,5-krotnie dłuższy i wynosił ok. 19 godzin. Spowodowane to było długim czasem organizacji naprawy, przewyższającym prawie dwukrotnie czas naprawy właściwej. W obydwu systemach czas odnowy był o ponad jedną godzinę dłuższy w wypadku naprawy pęknięć lub perforacji rur niż uszkodzeń złączy.

- Znaczący wpływ na czas odnowy ma głębokość ułożenia przewodów pod powierzchnią terenu. Ze względu na brak informacji na ten temat, przyjęto, że przewody rozdzielcze o średnicach mniejszych od 400 mm ułożone są na głębokości do 2 m ppt. Zgodnie z normą PN-97/B-10725 [98] jest ona wystarczająca, gdyż w obu systemach wodociągowych zapewnia minimalne przykrycie przewodów ze względu na przemarzanie (1,2 m dla Brzegu i 1,6 m dla Opolu). Według normatywów SNIP [120] średni postulowany czas odnowy przewodów o średnicy mniejszej od 400 mm wynosi 8 godzin dla głębokości ich ułożenia do 2 m oraz 12 godzin dla głębokości większej od 2 m. Można zatem stwierdzić, że średni czas odnowy rurociągów w Brzegu był nieco krótszy, a w Opolu ponaddwukrotnie dłuższy od postulowanego według SNIP.

- Całkowity czas usuwania uszkodzeń ( $T_c$ ), średni w okresie badań, wynosił 8,6 godziny w Brzegu i 21,9 godziny w Opolu. Porządkowanie terenu (czas  $T_{pp}$ ) po usunięciu awarii trwało odpowiednio 1,7 godziny i 2,5 godziny.

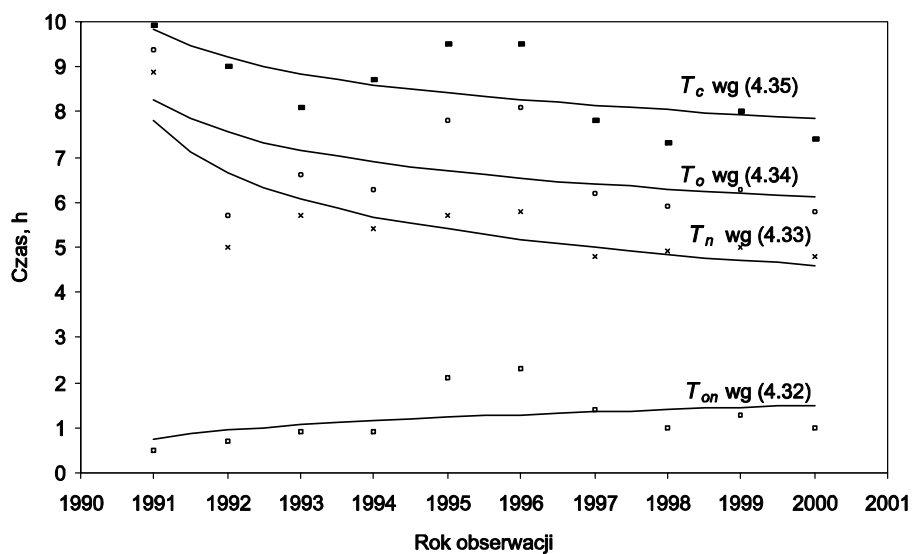
- Analizując zmiany wartości składników całkowitego czasu usuwania uszkodzeń (niezależnie od rodzaju uszkodzeń) rurociągów sieci wodociągowej w Brzegu w czasie obserwacji (dla  $1991 < A \leq 2000$ ) stwierdzono istotne ( $R_{kr} = 0,5494$ ) zależności (z wyjątkiem czasu  $T_{on}$ ) postaci

$$T_{on} = 0,763389 (A-1990)^{0,294538} \quad (R = 0,4548) \quad (4.32)$$

$$T_n = 7,824411 (A-1990)^{-0,231031} \quad (R = 0,8023) \quad (4.33)$$

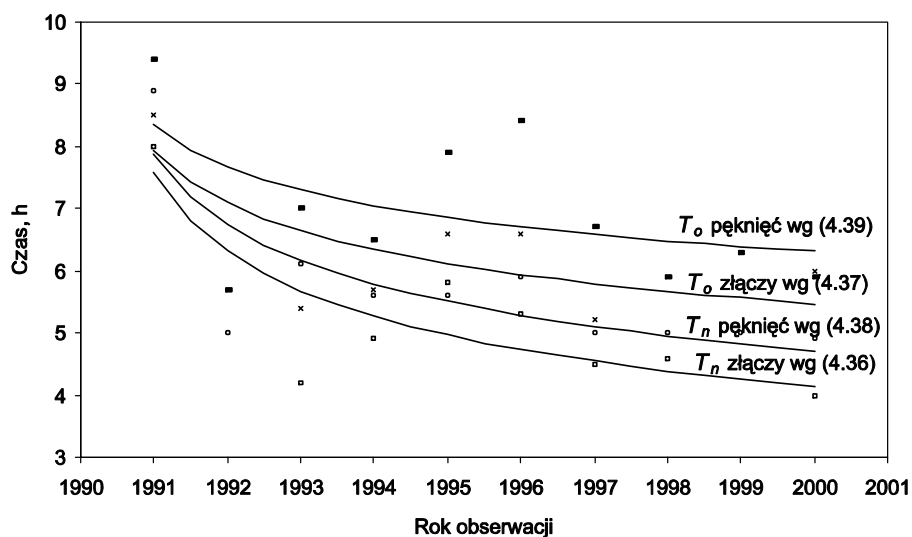
$$T_o = 8,267594 (A-1990)^{-0,131356} \quad (R = 0,5490) \quad (4.34)$$

$$T_c = 9,852472 (A-1990)^{-0,097738} \quad (R = 0,6803) \quad (4.35)$$



Rys. 4.28. Zmiany średnich wartości czasu usuwania uszkodzeń ( $T_{on}$ ,  $T_n$ ,  $T_o$ ,  $T_c$ ) rurociągów rozdzielczych w Brzegu w latach 1991–2000

Fig. 4.28. Variations in the average values of the time of damage removal ( $T_{on}$ ,  $T_n$ ,  $T_o$ ,  $T_c$ ) for the distribution pipelines of Brzeg in the time span of 1991 to 2000



Rys. 4.29. Zmiany czasu trwania naprawy właściwej ( $T_n$ ) i czasu odnowy ( $T_o$ ) rurociągów rozdzielczych w Brzegu w latach 1991–2000, z uwzględnieniem rodzaju uszkodzeń

Fig. 4.29. Variations in the duration of repair ( $T_n$ ) and rehabilitation time ( $T_o$ ) for the distribution pipelines of Brzeg, including type of damage, observed in the time span of 1991 to 2000

Z rysunku 4.28 widać, że w okresie prowadzonych badań miała miejsce pozytywna tendencja do zmniejszania się wartości czasów  $T_n$ ,  $T_o$  i  $T_c$ , z wyjątkiem czasu organizacji naprawy  $T_{on}$ .

Istotnemu skróceniu uległy czas naprawy właściwej i czas odnowy także w odniesieniu do uszkodzeń złączy rur ( $R_{kr} = 0,5494$ )

$$T_n = 7,574827 (A-1990)^{-0,26287} \quad (R = 0,8311) \quad (4.36)$$

$$T_o = 7,926822 (A-1990)^{-0,161368} \quad (R = 0,5114) \quad (4.37)$$

oraz uszkodzeń wskutek pęknięć i perforacji (rys. 4.29)

$$T_n = 7,88171 (A-1990)^{-0,223431} \quad (R = 0,8043) \quad (4.38)$$

$$T_o = 8,33967 (A-1990)^{-0,121258} \quad (R = 0,5184) \quad (4.39)$$

W Opolu także nastąpiło skrócenie poszczególnych składników czasu naprawy rurociągów rozdzielczych w końcu okresu badań, a zwłaszcza (o ok. 10 godzin) bardzo długiego w pierwszych latach badań czasu organizacji naprawy. Uzyskane korelacje były jednak przeciętne.

Analizując średnie wartości składników całkowitego czasu usuwania uszkodzeń rurociągów magistralnych w badanych systemach wodociągowych, można jedynie stwierdzić, że są one większe od odpowiednich wartości dla rurociągów rozdzielczych (tab. 4.21 i 4.22). Uzyskane wyniki należy traktować jedynie jako orientacyjne z powodu zbyt małej liczby obserwacji, wynikającej z małej liczby awarii rurociągów magistralnych (6 szt. w Brzegu i 7 szt. w Opolu) oraz braku danych dla części z nich.

W rezultacie (przy przeważającym udziale awarii na przewodach rozdzielczych) uzyskane wartości poszczególnych składników całkowitego czasu usuwania uszkodzeń sieci wodociągowej ogółem w Brzegu odpowiadały wartościom dla sieci rozdzielczej, natomiast w Opolu były nieznacznie od nich większe.

#### 4.3.3.3. Czas usuwania uszkodzeń przyłączy domowych

Podstawą analizy były dane z eksploatacji przyłączy o długości 17,2 km w Brzegu w latach 1995–2000 oraz o długości ok. 120 km w Opolu w latach 1996–2001. Średnia podczas badań intensywność uszkodzeń przyłączy wynosiła 0,85 uszk./(km·a) w Brzegu oraz 0,14 uszk./(km·a) w Opolu. Przyczyną większości uszkodzeń (odpowiednio ok. 70% i 60%) była korozja rur i kształtek wykonanych ze stali ocynkowanej. Całkowitej wymiany, głównie na przewody z PE, dokonano w odniesieniu do 55% przyłączy, które uległy uszkodzeniu w Brzegu i 25% w Opolu, a pozostałe naprawiano.

Z analizy średnich wartości składników całkowitego czasu usuwania uszkodzeń przyłączy w poszczególnych latach obserwacji oraz okresach badań (tab. 4.23) wynikają następujące wnioski:

Tabela 4.23. Czasu usuwania uszkodzeń przyłączy domowych w Brzegu i Opolu  
 Table 4.23. Duration of damage removal for plumbing fittings in Brzeg and Opole

Parametr	Brzeg, lata 1995–2000		Opole, lata 1996–2001	
	zakres zmian	wartość średnia	zakres zmian	wartość średnia
Czas organizacji naprawy $T_{on}$ , h	0,7–4,3	1,3 (82)	3,5–26,9	14,2 (97)
Czas naprawy właściwej $T_n$ , h	4,6–6,1	5,1 (82)	–	–
Czas naprawy i prac porządkowych $T_n^*$ , h	–	–	6,2–43,6	22,5 (97)
Czas odnowy $T_o$ , h	5,6–9,4	6,4 (82)	–	–
Czas całkowity $T_c$ , h	7,5–11,4	8,7 (82)	27,7–47,1	36,7 (97)
Czas wypływu wody $T_1$ , h	1,6–5,3	2,8 (82)	–	–
Czas wyłączenia dopływu wody do odbiorców $T_w$ , h	2,8–5,3	3,6 (82)	–	–

Wartości w nawiasach oznaczają liczbę obserwacji.

- W Brzegu czas organizacji naprawy przyłączy oraz całkowity czas naprawy były równe odpowiednim czasom dla przewodów magistralnych i rozdzielczych ogółem, i wynosiły odpowiednio  $T_{on} = 1,3$  h oraz  $T_c = 8,7$  h. Natomiast czas naprawy właściwej ( $T_n = 5,1$  h) i czas odnowy ( $T_o = 6,4$  h) były o 0,5 godziny krótsze. Średnia wartość czasu  $T_n$  w sytuacji, gdy uszkodzone przyłącza wymieniano na nowe (5,3 h) była tylko nieznacznie większa niż w wypadku ich naprawy (4,9 h).

- W Opolu sytuacja była odmienna, gdyż wartości każdego czasu usuwania uszkodzeń przyłączy były większe od odpowiednich dla rurociągów magistralnych i rozdzielczych ogółem i wynosiły średnio: czas organizacji naprawy  $T_{on} = 14,2$  h, czas naprawy właściwej wraz z pracami porządkowymi  $T_n^* = 22,5$  h, czas całkowity  $T_c = 36,7$  h. Średni w latach 1996–2001 czas  $T_n^*$  był ponad sześciokrotnie dłuższy, gdy dokonywano wymiany przyłączy (61,5 h) w porównaniu z czasem ich naprawy (9,7 h).

- Mało istotny, podobnie jak w wypadku rurociągów rozdzielczych, okazał się wpływ rodzaju pokrycia terenu na czas usuwania uszkodzeń przyłączy w Brzegu. Wprawdzie naprawa trwała najdłużej w wypadku nawierzchni asfaltowej (średnio 5,2 h), krócej dla nawierzchni z kostki kamiennej czy płyt chodnikowych (5,1 h), a najkrócej dla nawierzchni gruntowej (5,0 h), to różnice te były nieznaczne.

- Warunki atmosferyczne nie miały znaczącego wpływu na średnie wartości czasu naprawy właściwej przyłączy w Brzegu i Opolu, które w miesiącach zimowych (od grudnia do lutego) były w przybliżeniu równe średnim wartościom z pozostałych miesięcy roku. W okresie zimowym wystąpiło ok. 30% analizowanych przypadków uszkodzeń przyłączy w Brzegu i 25% w Opolu.

• W Brzegu nastąpił spadek o ok. 20% wartości wszystkich czasów usuwania uszkodzeń przyłączy podczas obserwacji ( $1995 < A \leq 2000$ ), ale istotne korelacje dotyczyły tylko czasu naprawy właściwej

$$T_n = 6,1267 - 0,2457 (A - 1994) \quad (R = 0,8526; R_{kr} = 0,7293) \quad (4.40)$$

W Opolu nie stwierdzono takich korelacji, a jedynie tendencję skracania czasu naprawy  $T_n^*$  oraz wydłużenia czasu organizacji naprawy  $T_{on}$  podczas badań.

#### 4.3.3.4. Ocena skutków uszkodzeń przewodów wodociągowych

Z punktu widzenia odbiorców wody istotna jest zarówno częstość występowania uszkodzeń sieci wodociągowej, jak i czas ich trwania. Parametry te wpływają bowiem na niedogodności i straty spowodowane ograniczeniem bądź wstrzymaniem dostawy wody. Celem działań podejmowanych przez przedsiębiorstwa wodociągowe powinno być więc nie tylko ograniczanie awaryjności, ale także skracanie czasu trwania naprawy uszkodzeń, gdyż ma to m.in. wpływ na zmniejszenie niedoboru wody u odbiorców wyrażonego ilością niedostarczonej wody.

Częściowe, a czasem całkowite ograniczenie dopływu wody do użytkowników może wystąpić już w czasie  $T_1$ , tj. od chwili powstania uszkodzenia do czasu wyłączenia odcinka rurociągu z eksploatacji. Zależy to przede wszystkim od rodzaju uszkodzonego przewodu i typu elementu oraz rodzaju i wielkości uszkodzenia. Natomiast całkowite wstrzymanie dostawy wody do odbiorców następuje od momentu zamknięcia aż do ponownego włączenia przepływu wody w rurociągu po jego naprawie (czas  $T_w$ ). Niedobór wody u odbiorców może zatem wystąpić w czasie równym czasowi odnowy  $T_o$ , stanowiącym sumę czasów  $T_1$  i  $T_w$  (wzór (4.31)). Średni czas całkowitego wstrzymania dostawy wody do odbiorców w Brzegu wynosił 4,3 godziny w wypadku awarii rurociągów rozdzielczych (tab. 4.21), w wypadku zaś przyłączy domowych był krótszy o 0,7 godziny i wynosił 3,6 godziny (tab. 4.23). Z pewnością mniejszy był także spowodowany tym niedobór wody, jednak brak informacji o liczbie mieszkańców pozbawionych dopływu wody uniemożliwił ocenę tego wskaźnika. Należy jednak podkreślić, że w ostatnich latach, zarówno w wypadku awarii przewodów rozdzielczych, jak i przyłączy, obserwuje się znaczne skrócenie czasu wstrzymania dostawy wody od odbiorców.

Ograniczenie dopływu wody mogło mieć także miejsce w czasie  $T_1$ , który w Brzegu wynosił średnio 2,2 godziny dla rurociągów rozdzielczych i 2,8 godziny dla przyłączy. Niedostatki i braki wody u odbiorców mogły zatem wystąpić w łącznym w czasie ok. 6,5 godziny.

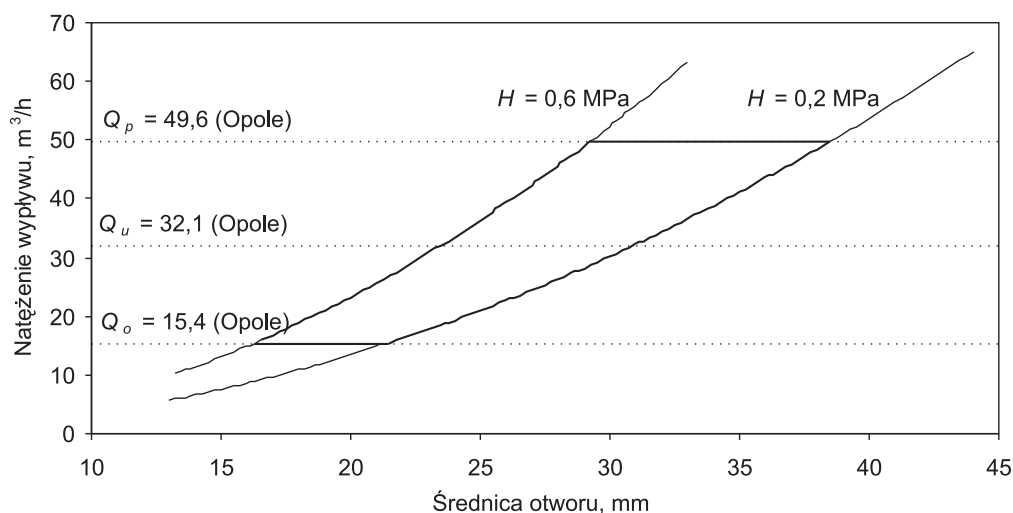
Z punktu widzenia przedsiębiorstw wodociągowych istotny jest, ze względu na koszty eksploatacji systemu, problem wielkości strat wody wskutek nieszczelności oraz uszkodzeń rurociągów i armatury wodociągowej. Znaczne ilości wody traczone są z systemów wodociągowych wskutek występowania tzw. awarii ukrytych, gdy woda



nie pojawia się na powierzchni, lecz znajduje ujście w gruncie lub w kanałach (ciepłowniczych, ściekowych itp.). W takich wypadkach czas wypływu wody jest bardzo trudny, a często niemożliwy do ustalenia. Na sieci wodociągowej w Opolu odnotowano (w rejestrze awarii za lata 1996–2001) osiem tego typu awarii. Objętość wody, która wyciekła do kanałów lub do gruntu wskutek pojedynczych nieszczelności złączy czy pęknięć rur oszacowano na ok. 300 m<sup>3</sup> (pęknięcie poprzeczne rurociągu  $\phi 80$  mm) do ok. 9200 m<sup>3</sup> (pęknięcie poprzeczne  $\phi 150$  mm). Czas wypływu, a więc i straty wody można w takich przypadkach zmniejszyć lub wyeliminować dzięki systematycznej kontroli kanałów i powierzchni terenu oraz terenowym pomiarom szczelności rurociągów.

Objętość przecieków zależy przede wszystkim od rodzaju i wielkości uszkodzenia, czasu trwania wypływu wody oraz od ciśnienia w sieci w rejonie awarii. Z oszacowanych w opolskim przedsiębiorstwie wielkości przecieków wynika, że w latach 1996–2001 podczas jednej awarii rurociągów rozdzielczych wypłynęło średnio 160 m<sup>3</sup> wody w czasie 3,6 godziny, a więc przy średnim natężeniu wypływu równym ok. 44 m<sup>3</sup>/h (nie dysponowano informacjami o wysokości ciśnień w sieci). Średnie jednostkowe wskaźniki objętości straconej wody ( $V$ ), czasu wypływu ( $T_1$ ) i natężenia wypływu ( $Q$ ) dla poszczególnych rodzajów uszkodzeń rurociągów wynosiły:

- pęknięcie rury  $V_p = 185 \text{ m}^3$   $T_1 = 3,7 \text{ h}$   $Q_p = 49,6 \text{ m}^3/\text{h}$ ,
- nieszczelność złącza  $V_u = 114 \text{ m}^3$   $T_1 = 3,5 \text{ h}$   $Q_u = 32,1 \text{ m}^3/\text{h}$ ,
- perforacja rury  $V_o = 38 \text{ m}^3$   $T_1 = 2,5 \text{ h}$   $Q_o = 15,4 \text{ m}^3/\text{h}$ .



Rys. 4.30. Poglądowy wykres zmian natężenia wypływu wody ( $Q$ ) przez otwór ostrobrzeżny w zależności od średnicy otworu ( $d_o$ ) i ciśnienia ( $H$ )  
Fig. 4.30. Water outflow rate ( $Q$ ) related to hole diameter ( $d_o$ ) and pressure ( $H$ )

Natężenie wypływu wody z pękniętego rurociągu było największe, co przy przeważającym udziale pęknięć (ok. 65% uszkodzeń rurociągów rozdzielczych w Opolu) i długim czasie  $T_1$  powodowało znaczne straty wody. W Brzegu nie dysponowano danymi o objętości przecieków wody z sieci wodociągowej podczas awarii. Obliczono natomiast średni czas wypływu wody ( $T_1$ ), który dla przyłączy wynosił 2,8 godziny (tab. 4.23), a dla rurociągów magistralnych i rozdzielczych 2,2 godziny (tab. 4.21). Niekiedy czas zgłoszenia awarii nie pokrywał się z czasem jej wystąpienia, więc czas wypływu wody mógł być dłuższy. Większość (prawie 80%) uszkodzeń sieci wodociągowej w Brzegu spowodowana była pęknięciami rurociągów. Należy zatem podkreślić, że zmniejszenie strat wody można uzyskać dzięki skróceniu czasu wypływu wody przez uszkodzenie, ograniczeniu awaryjności sieci poprzez modernizację zdekaptalizowanych przewodów żeliwnych (ulegają głównie pęknięciom i korozji), a także dzięki racjonalizacji wysokości i zmian ciśnienia w sieci. Zagadnienie to będzie przedmiotem rozważań w rozdziale 6. Wysokość ciśnienia i jego zmiany w cyklu dobowym wpływają zarówno na intensywność uszkodzeń przewodów, co wykazano w rozdziale 4.3.2, jak i na natężenie wypływu wody z uszkodzonych elementów sieci bez względu na przyczyny, które te uszkodzenia powodują.

Z poglądowych wykresów na rys. 4.30 wynika, że natężenie wypływu wody ( $Q = \alpha F(2gH)^{1/2}$ ) przez otwór ostrobrzeźny o określonej średnicy pod ciśnieniem 0,60 MPa jest o ok. 70% większe niż przy ciśnieniu 0,20 MPa. Przy stałym ciśnieniu natężenie wypływu wody rośnie proporcjonalnie wraz ze wzrostem pola powierzchni ( $F$ ) powstałego uszkodzenia.

Dodatkowe straty wody, związane z występowaniem awarii sieci wodociągowej, wynikają z konieczności płukania rurociągów po ich naprawie. Zużycie wody zależy od średnicy i długości rurociągu oraz czasu jego płukania. Oszacowana w Opolu ilość wody zużytej do płukania przewodów, w zależności od ich średnicy, wynosiła średnio: 65 m<sup>3</sup> dla rurociągów  $\phi 80$  mm, ok. 90 m<sup>3</sup> dla  $\phi 100$  mm i  $\phi 150$  mm, ok. 100 m<sup>3</sup> dla  $\phi 200$  mm, 130 m<sup>3</sup> dla  $\phi 250$  mm oraz 260 m<sup>3</sup> dla przewodów  $\phi 300$  mm.

#### 4.3.4. Poziom niezawodności sieci wodociągowych

Do opisu poziomu niezawodności systemu zaopatrzenia w wodę (SZW) (podsystemu lub elementów składowych) wykorzystuje się szereg wskaźników, z których powszechne zastosowanie znalazł stacjonarny wskaźnik gotowości  $K_g$ , określający prawdopodobieństwo tego, że system będzie sprawny w dowolnej chwili eksploatacji. Wartość wskaźnika  $K_g$  określa się m.in. na podstawie częstości występowania niesprawności systemu i czasów ich trwania. Parametry te są najistotniejsze z punktu widzenia odbiorców wody. Ocena poziomu niezawodności SZW polega na określeniu wartości wskaźnika gotowości na podstawie badań eksploatacyjnych i porównaniu z wymaganym poziomem niezawodności systemu  $K_w$ (SZW). Według [125] wskaźnik  $K_w$  oznacza poziom, przy którym system spełnia swoje zadania w sposób zadowalają-

cy użytkowników, a chwilowe przerwy w pracy lub okresy pracy ze zmniejszonym zakresem zadań lub obniżonymi parametrami technologicznymi zdarzają się stosunkowo rzadko. W wypadku gdy poziom niezawodności systemu jest niezadowalający, należy podjąć działania zmierzające do jego zwiększenia.

#### 4.3.4.1. Wymagany poziom niezawodności systemu zaopatrzenia w wodę

Określenie wymaganego poziomu niezawodności systemu zaopatrzenia w wodę  $K_w$ (SZW) jest bardzo trudne, gdyż wymaga wszechstronnej analizy pracy systemu z uwzględnieniem jego struktury, kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych oraz strat wynikających z nieprzewidzianych przestoju. Jedną z metod wyznaczania poziomu  $K_w$ (SZW) jest analizowanie zachowania się istniejących systemów (badanie uszkodzeń i ich skutków w postaci strat wody, szkód na zdrowiu itp.) i wykorzystanie wieloletnich doświadczeń płynących z obserwacji ich działania [106, 125]. Wartości wskaźnika  $K_w$  określone przez M. Romana [106], po przyjęciu dopuszczalnych częstości ( $c$ ) i czasów trwania odnowy ( $T_o$ ) uszkodzeń oraz ich skutków, zestawiono w tabeli 4.24. Kryterium przyjęcia wartości wskaźników  $c$ ,  $T_o$  i  $K_w$  stanowiły postulaty dotyczące niezawodności dostawy wody do gospodarstw domowych. Zaproponowane wartości  $K_w$ (SZW) dotyczą trzech kategorii niezawodności systemów zaopatrzenia w wodę – ze względu na liczbę mieszkańców ( $M$ ), z uwzględnieniem trzech przypadków wielkości dostawy wody ( $Q$ ) w porównaniu do całkowitego zapotrzebowania na wodę ( $Q_n$ ).

Tabela 4.24. Propozycje wartości wymaganego poziomu niezawodności SZW według M. Romana [104]  
Table 4.24. Postulated reliability indices for  $K_w$ (SZW) by M. Roman [104]

Kategoria niezawodności SZW	Użytkownicy systemu zaopatrzenia w wodę	Wielkość dostawy wody $Q$	$c_{\max}$ 1/a	$T_o \max$ h	$K_w$ (SZW)
I	Wodociągi duże dla terenów o liczbie mieszkańców $M > 50\ 000$	$Q \approx Q_n$	3	24	0,9917809
		$Q \geq 0,7Q_n$	2	24	0,9945206
		$Q > 0$	0,02	24	0,9999453
II	Wodociągi średnie $500 < M \leq 50\ 000$	$Q \approx Q_n$	6	24	0,9835617
		$Q \geq 0,7Q_n$	3	24	0,9917809
		$Q > 0$	0,2	24	0,9994542
III	Wodociągi małe $M \leq 500$	$Q \approx Q_n$	12	24	0,9671233
		$Q \geq 0,7Q_n$	6	24	0,9835617
		$Q > 0$	1	24	0,9972603

Wychodząc z podobnych założeń, A. Wieczysty zaproponował [123] wartości  $K_w$ (SZW) dla wyróżnionych sześciu kategorii niezawodności systemów i trzech przypadków dostawy wody  $Q$  (tab. 4.25). W obydwu wypadkach przyjęto, że wyższym poziomem niezawodności powinny się charakteryzować duże systemy wodociągowe,

a gwarancja dostawy powinna wzrastać przy zmniejszającym się stopniu pokrycia zapotrzebowania na wodę. Należy zauważyć, że wartości wskaźnika  $K_w(\text{SZW})$  proponowane przez Wieczystego są mniejsze od wartości proponowanych przez Romana tylko w wypadku  $Q = Q_n$ .

Tabela 4.25. Propozycje wartości wymaganego poziomu niezawodności SZW według A. Wieczystego [121]

Table 4.25. Postulated reliability indices for  $K_w(\text{SZW})$  by A. Wieczysty[121]

Kategoria niezawodności SZW	Użytkownicy systemu zaopatrzenia w wodę	Wielkość dostawy wody $Q$	$c$ 1/a	$T_o$ d	$K_w(\text{SZW})$
I	Zakłady przemysłowe, w których przerwa w dostawie wody prowadzi do szkód o charakterze katastroficznym	$Q = Q_n$	wymagane prowadzenie odrębnej analizy niezawodnościowej		
		$Q_g \leq Q < Q_n$			
		$Q < Q_g$			
II	Aglomeracje miejsko-przemysłowe i miasta o liczbie mieszkańców $M > 500\ 000$ ( $Q_g = 0,35Q_n$ )	$Q = Q_n$	–	–	0,9827329
		$0,7Q_n \leq Q < Q_n$	3	2	0,9991713
		$Q_g \leq Q < 0,7Q_n$	0,4	0,75	0,9999932
III	Miasta o $50000 < M \leq 500\ 000$ ( $Q_g = 0,3Q_n$ )	$Q = Q_n$	–	–	0,9740959
		$0,7Q_n \leq Q < Q_n$	3	3	0,9987534
		$Q_g \leq Q < 0,7Q_n$	0,6	0,75	0,9999863
IV	Miasta i osiedla o $1000 < M \leq 50\ 000$ ( $Q_g = 0,25Q_n$ )	$Q = Q_n$	–	–	0,9150137
		$0,7Q_n \leq Q < Q_n$	3	10	0,9972055
		$Q_g \leq Q < 0,7Q_n$	1	1	0,9999452
V	Osiedla o $M \leq 1000$ ( $Q_g = 0,2Q_n$ )	$Q = Q_n$	–	–	0,8706849
		$0,7Q_n \leq Q < Q_n$	3	15	0,9939726
		$Q_g \leq Q < 0,7Q_n$	2	1	0,9994521

#### 4.3.4.2. Wymagany poziom niezawodności systemu dystrybucji wody

Na system zaopatrzenia w wodę składa się podsystem dostawy wody (PsDoW) (ujęcia wody, pompownie, stacje uzdatniania, przewody przesyłowe) i podsystem dystrybucji wody (PsDyW) (sieć wodociągowa, pompownie sieciowe, zbiorniki wyrównawcze). Znając wymagany poziom niezawodności całego systemu zaopatrzenia w wodę można określić wymagany poziom niezawodności wyróżnionych podsystemów oraz ich części składowych. Przedstawione w literaturze [123, 124, 125, 129] metody obliczeń opracowane zostały przy założeniu, że główne składowe SZW tworzą szeregową strukturę niezawodnościową i mogą być stosowane zarówno w odniesieniu do systemów zrównoważonych (zdolność produkcyjna systemu jest w przybli-

zeniu równa nominalnej wydajności systemu), jak i w systemach z nadwyżką produkcji. Metody te mają zastosowanie w wypadku pełnej sprawności systemu ( $Q \approx Q_n$ ) oraz częściowej sprawności SZW ( $Q < Q_n$ ). Opierają się przy tym na założeniu niezawodnościowej równorzędności podsystemu dostawy wody (PsDoW) oraz podsystemu dystrybucji wody (PsDyW), co oznacza, iż

$$K_w(\text{PsDoW}) = K_w(\text{PsDyW}) \quad (4.41)$$

Wymagany poziom niezawodności systemu dystrybucji wody wynosi zatem

$$K_w(\text{PsDyW}) = \sqrt{K_w(\text{SZW})} \quad (4.42)$$

#### 4.3.4.3. Analiza poziomu niezawodności wybranych sieci wodociągowych

Podsystem dystrybucji wody obejmuje sieć przewodów (magistralnych i rozdzielczych) oraz obiekty zasilające (pompownie, zbiorniki). Niezawodność systemu dystrybucji wody ma znaczący wpływ na funkcjonowanie całego systemu wodociągowego, gdyż jest końcowym ogniwem w uogólnionej szeregowej strukturze SZW, bezpośrednio dostarczającym wodę do odbiorców. Praktyka eksploatacyjna wskazuje, że o poziomie niezawodności systemu dystrybucji wody decyduje poziom niezawodności sieci przewodów, gdyż zdecydowana większość uszkodzeń dotyczy rurociągów i ich uzbrojenia. Pompownie i zbiorniki wodociągowe charakteryzują się na ogół bardzo wysokim poziomem niezawodności [72, 128, 129]. Można zatem przyjąć, że wymagany poziom niezawodności sieci wodociągowej powinien odpowiadać wartości tego wskaźnika określonego dla systemu dystrybucji wody według wzoru (4.42).

Analizę poziomu niezawodności, z wykorzystaniem stacjonarnego wskaźnika gotowości, przeprowadzono na podstawie wyników badań uzyskanych z eksploatacji sieci wodociągowych w Brzegu (w latach 1991–2000) i Opolu (w latach 1996–2001), gdyż tylko w tych systemach można było ocenić czas trwania odnowy przewodów (rozdział 4.3.3) [32]. Czas pracy między uszkodzeniami sieci obliczono (ze wzoru (4.4)) w oparciu o analizę częstości uszkodzeń rurociągów (rozdział 4.3.2.1), z pominięciem uszkodzeń armatury, które nie powodowały zakłóceń w dostawie wody do odbiorców. Średnie wartości wskaźnika gotowości w poszczególnych latach i okresach badań obliczono dla sieci ogółem (rurociągi magistralne i rozdzielcze) i dla sieci magistralnej. Oszacowano (bez uwzględnienia struktury niezawodnościowej sieci rurociągów) wartości wskaźnika gotowości  $K_g$  (wzór (4.9) lub (4.10)) w odniesieniu do całkowitej długości rurociągów oraz wartości wskaźnika  $K_{gj}$  (wzór (4.11)) w odniesieniu do rurociągów o długości 1 km. Uzyskane wyniki analizy zestawiono w tabeli 4.26.

Z porównania wartości wskaźników  $K_g$ , w odniesieniu do sieci rurociągów ogółem, jak i rurociągów magistralnych wynika, że wyższym poziomem niezawodności charakteryzowała się sieć wodociągowa w Brzegu, a niższym sieć w Opolu. Średnie wartości wskaźnika gotowości wynosiły:

Tabela 4.26. Wartości wskaźników niezawodności sieci wodociągowych  
w Brzegu i Opolu (obliczone ze wzorów (4.2)–(4.11))  
Table 4.26. Reliability indices of the water-pipe networks  
in Brzeg and Opole ((4.2)–(4.11))

Rok/okres obserwacji	$c$ uszk./a	$L_{sr}$ km	$\lambda$ uszk./km·a	$T_p$ d	$T_o$		$\mu$ odn./a	$K_g$	$K_{gj}$
					h	d			
Rurociągi magistralne i rozdzielcze w Brzegu									
1991	20	68,909	0,29	18,25	9,4	0,3917	932	0,978990	0,999689
1992	19	71,511	0,27	19,26	5,7	0,2375	1541	0,987819	0,999825
1993	18	73,105	0,25	20,28	6,6	0,2750	1327	0,986621	0,999812
1994	23	73,873	0,31	15,87	6,3	0,2625	1390	0,983728	0,999777
1995	26	74,426	0,35	14,04	7,8	0,3250	1123	0,977375	0,999688
1996	27	74,426	0,36	13,56	8,2	0,3417	1071	0,975423	0,999664
1997	13	74,426	0,17	28,08	6,2	0,2583	1413	0,990885	0,999880
1998	18	74,426	0,24	20,28	5,9	0,2458	1485	0,988025	0,999838
1999	11	74,503	0,15	33,18	6,4	0,2667	1369	0,992026	0,999890
2000	16	74,581	0,21	22,81	6,0	0,2500	1464	0,989159	0,999856
Średnio w I okresie	21,7	72,608	0,30	16,81	7,5	0,3125	1168	<b>0,981749</b>	0,999743
Średnio w II okresie	15,7	74,480	0,21	23,25	6,2	0,2583	1413	<b>0,989011</b>	0,999851
Rurociągi magistralne w Brzegu (średnice 400 mm i 500 mm)									
Średnio w I okresie	0,706	9,936	0,07	517	11,0	0,4583	796	<b>0,999114</b>	0,999912
Średnio w II okresie	0,46	9,936	0,05	790,8	7,5	0,3125	1168	<b>0,999605</b>	0,999957
Rurociągi magistralne i rozdzielcze w Opolu									
1996	43	250,023	0,17	8,51	28,4	1,1833	309	0,877926	0,999451
1997	53	257,119	0,21	6,89	19,50	0,8125	449	0,894515	0,999533
1998	23	261,065	0,09	15,87	15,2	0,6333	576	0,961626	0,999844
1999	30	266,199	0,11	12,17	31,9	1,3292	275	0,901535	0,999599
2000	42	269,600	0,15	8,71	12,3	0,5125	714	0,944429	0,999790
2001	37	270,692	0,14	9,86	10,7	0,4458	819	0,956743	0,999829
Średnio 1996–2001	38	262,450	0,14	9,60	19,6	0,8166	447	<b>0,921606</b>	0,999687
Rurociągi magistralne w Opolu (średnice 500–1000 mm)									
Średnio 1996–2001	1,17	29,101	0,04	313	44,4	1,85	197	<b>0,994124</b>	0,999797

– dla sieci rozdzielczej i magistralnej:

w Brzegu  $K_g = 0,981749$  w I okresie badań (I 1991–VIII 1996),  
 $K_g = 0,989011$  w II okresie badań (IX 1996–XII 2000),  
 w Opolu  $K_g = 0,921606$  w latach 1996–2001,

– dla sieci magistralnej:

w Brzegu  $K_g = 0,999114$  w I okresie badań,  
 $K_g = 0,999605$  w II okresie badań,  
 w Opolu  $K_g = 0,994124$  w latach 1996–2001.

Niski poziom niezawodności (wskaźnik  $K_g$ ) sieci wodociągowej w Opolu spowodowany był zarówno długim czasem odnowy ( $T_o$ ) rurociągów, jak i krótkim czasem pracy ( $T_p$ ) między uszkodzeniami. Powodem była większa częstość ( $c$ ) uszkodzeń rurociągów w Opolu niż w Brzegu (mimo prawie 2-krotnie mniejszej intensywności uszkodzeń  $\lambda$ ), ze względu na ponadtrzykrotnie większą ich długość. Rurociągi w obydwu systemach wodociągowych charakteryzowały się dużymi wartościami wskaźnika gotowości ( $K_{gj}$ ) w odniesieniu do 1 km ich długości, przy czym mniejsze wartości – ze względu na dłuższy czas odnowy – stwierdzono w Opolu.

Należy jednocześnie podkreślić, że w obydwu systemach wodociągowych sieć rurociągów magistralnych charakteryzowała się znacznie wyższym poziomem niezawodności niż sieć rurociągów magistralnych i rozdzielczych ogółem. Wynikało to z bardzo małej awaryjności, a więc długiego czasu pracy rurociągów magistralnych między kolejnymi uszkodzeniami.

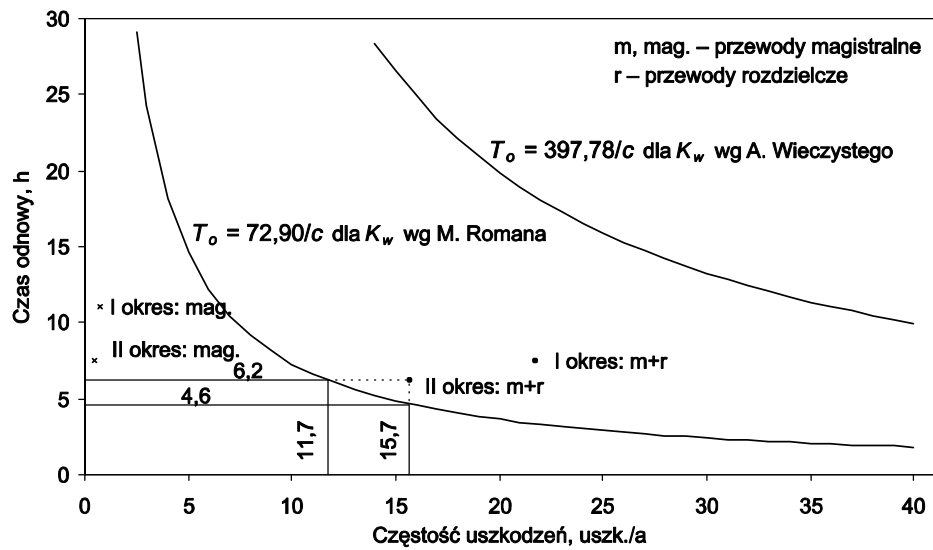
W Brzegu znaczący wzrost poziomu niezawodności sieci wodociągowej wystąpił w II okresie eksploatacji, dzięki zmniejszeniu częstości uszkodzeń (wskutek ograniczenia  $\Delta H$  i  $H_{\max}$ ) oraz skróceniu czasu trwania odnowy, w porównaniu z poziomem w I okresie eksploatacji z nadmiernym ciśnieniem w sieci.

Poziom niezawodności badanych sieci porównano także z wymaganym poziomem  $K_w$  obliczonym ze wzoru (4.42). Porównania dokonano, przyjmując wartości wymaganego poziomu niezawodności systemu zaopatrzenia w wodę ( $K_w(SZW)$ ) proponowane przez Romana (tab. 4.24) oraz Wieczystego (tab. 4.25), po określeniu kategorii niezawodności badanych systemów oraz przy założeniu  $Q \approx Q_n$ .

Wymagany poziom niezawodności sieci wodociągowej w Brzegu (ok. 40 tys. mieszkańców) powinien wynosić:

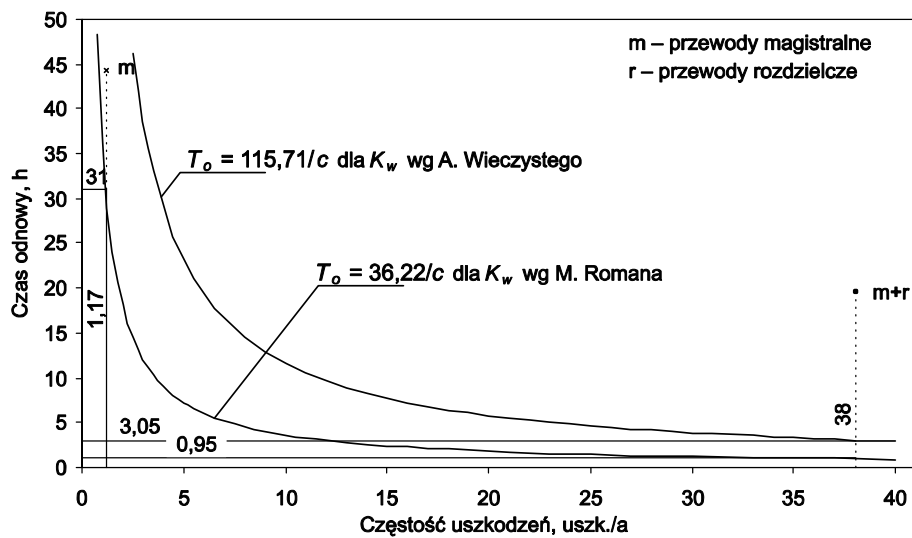
$K_w \geq 0,991747$  według kryterium Romana (dla II kategorii niezawodności),  
 $K_w \geq 0,956563$  według kryterium Wieczystego (dla IV kategorii).

Na podstawie wzorów (4.9) i (4.4) obliczono graniczne (maksymalne) wartości częstości uszkodzeń ( $c$ ) rurociągów oraz czasu ( $T_o$ ) ich odnowy, dla których poziom niezawodności ( $K_g$ ) byłby równy powyższym wartościom wymaganego poziomu  $K_w$  sieci wodociągowej. Z ilustracji na rys. 4.31 widać, że średni (w analizowanych okresach eksploatacji) poziom niezawodności wszystkich rodzajów sieci w Brzegu był znacznie wyższy od proponowanego przez Wieczystego, natomiast ostrzejsze kryterium, proponowane przez Romana, spełniała tylko sieć rurociągów magistralnych.



Rys. 4.31. Graniczne (maksymalne) wartości częstości uszkodzeń ( $c$ ) i czasu odnowy ( $T_o$ ) sieci wodociągowej w Brzegu, dla których poziom niezawodności ( $K_g$ ) jest równy wartości wymaganej ( $K_w$ )

Fig. 4.31. Admissible frequency ( $c$ ) and duration of failure ( $T_o$ ) for the Brzeg water-pipe network with a reliability index ( $K_g$ ) equal to the required one ( $K_w$ )



Rys. 4.32. Graniczne (maksymalne) wartości częstości uszkodzeń ( $c$ ) i czasu odnowy ( $T_o$ ) sieci wodociągowej w Opole, dla których poziom niezawodności ( $K_g$ ) jest równy wartości wymaganej ( $K_w$ )

Fig. 4.32. Admissible frequency ( $c$ ) and duration of failure ( $T_o$ ) for the Opole water-pipe network with a reliability index ( $K_g$ ) equal to the required one ( $K_w$ )



W wypadku rurociągów magistralnych i rozdzielczych ogółem poziom  $K_w = 0,991747$  można osiągnąć, zmniejszając częstość i skracając czas odnowy rurociągów. I tak – biorąc pod uwagę średnie wartości tych wskaźników z II okresu eksploatacji rurociągów w Brzegu (tab. 4.26) – należałoby:

- skrócić średni czas odnowy do maksymalnie 4,6 godziny (z 6,2 godz.) przy założeniu niezmiennej częstości uszkodzeń równej 15,7 awarii średnio w roku,
- ograniczyć częstość uszkodzeń do maksymalnie 11,75 awarii średnio w roku (z 15,7) przy stałym czasie trwania odnowy równym średnio 6,2 godziny,
- dążyć do jednoczesnego zmniejszenia wartości wskaźników  $c$  i  $T_o$ .

Wymagany poziom niezawodności sieci wodociągowej w Opolu (131 tys. mieszkańców) powinien wynosić:

$K_w \geq 0,995882$  według kryterium Romana (dla I kategorii niezawodności),

$K_w \geq 0,986963$  według kryterium Wieczystego (dla III kategorii).

Średni w okresie badań poziom niezawodności ( $K_g$ ) sieci rurociągów ogółem (magistralnych i rozdzielczych) w Opolu był niewystarczający według obydwu kryteriów. Natomiast sieć rurociągów magistralnych charakteryzowała się wyższym poziomem niezawodności od wymaganego według propozycji Wieczystego, ale nieznacznie niższym od wartości proponowanej przez Romana. Wymaganą wartość  $K_w = 0,995882$  w odniesieniu do rurociągów magistralnych można uzyskać przez skrócenie bardzo długiego średniego czasu odnowy (44,4 godz. – tab. 4.26) do maksymalnie ok. 31 godzin (rys. 4.32). W wypadku sieci rurociągów ogółem zapewnienie wymaganego poziomu niezawodności według obydwu kryteriów – dla wyznaczonej liczby 38 awarii średnio w roku – wymagałoby skrócenia czasu ich odnowy do około 3 godzin i 1 godziny, co jest praktycznie niemożliwe. Warunkiem spełnienia tych kryteriów niezawodności powinny więc być działania zmierzające do jednoczesnego zmniejszenia częstości uszkodzeń oraz skrócenia czasu ich odnowy.

Przy założeniu średniej wartości czasu  $T_o$  równego na przykład 8 godzin, średnia częstość uszkodzeń rurociągów rozdzielczych i magistralnych w Opolu nie powinna przekraczać  $c = 14,5$  uszk./a według kryterium Wieczystego (co odpowiada wartości  $\lambda = 0,055$  uszk./(km·a)) i wartości  $c = 4,5$  uszk./a według kryterium Romana ( $\lambda = 0,017$  uszk./(km·a)) (rys. 4.30). W praktyce będzie to trudne do zrealizowania, gdyż rurociągi w Opolu charakteryzowały się i tak stosunkowo małą intensywnością uszkodzeń (średnio  $\lambda = 0,14$  uszk./(km·a)) w porównaniu z innymi miejskimi systemami dystrybucji wody.

W podsumowaniu przeprowadzonej analizy poziomu niezawodności dwóch różnej wielkości systemów dystrybucji wody należy zwrócić uwagę na konieczność kontynuowania wszechstronnych badań eksploatowanych systemów oraz prowadzenia prac studialnych w celu opracowania metodyki i ustalenia wartości wymaganego poziomu niezawodności systemów zaopatrzenia w wodę i ich elementów. Proponowane bowiem przez różnych autorów wartości  $K_w$ (SZW) są obecnie bardzo zróżnicowane. Ponadto w wypadku oceny poziomu niezawodności systemu dystrybucji wody dysku-

syjne jest, które przewody (magistralne, rozdzielcze, czy sieć ogółem) należy uwzględnić w analizie, gdyż jak wykazano na przykładzie Brzegu i Opola wyniki i wnioski z oceny mogą być bardzo różne dla określonego systemu w zależności od przyjętych założeń i kryteriów.

Należy także podkreślić, że dokonywana ocena wartości wskaźnika  $K_g$  według wzoru (4.9) lub (4.10) powoduje, iż w wypadku różnej wielkości systemów charakteryzujących się jednakowymi średnimi wartościami intensywności ( $\lambda$ ) uszkodzeń i czasu odnowy ( $T_o$ ) ocena taka wypada na niekorzyść dużych systemów, gdyż większa jest ich częstość ( $c$ ) uszkodzeń (a więc krótszy czas pracy  $T_p$ ) z powodu dłuższej sieci przewodów. Bardziej miarodajna wydaje się więc ocena poziomu niezawodności sieci za pomocą wskaźnika  $K_{gj}$ , odnoszącego się do jednostki długości przewodów (wzór (4.11)).

Określenie wartości wskaźników  $K_g$  i  $K_w$  powinno być ponadto poprzedzone szczegółową analizą skutków zawodnego działania systemu wodociągowego dla odbiorców wody i przedsiębiorstw wodociągowych oraz rachunkiem ekonomicznym uwzględniającym koszty zawodnego działania i koszty zapewniające uzyskanie wymaganego poziomu niezawodności systemu. Metody stosowane dotychczas nie uwzględniają rachunku ekonomicznego, głównie ze względu na trudności w ocenie kosztów zawodnego działania SZW. Możliwe do oceny i przewidzenia są koszty usuwania uszkodzeń przewodów (według metodyki przedstawionej przez autorkę w rozdziale 5.) oraz koszty wody traconej wskutek przecieków. Problematiczne jest natomiast określenie skutków ekonomicznych, np. długotrwałego spożywania wody o obniżonej jakości, czy zmniejszenia komfortu odbiorców wody w wypadku niezaspokojenia w odpowiednim stopniu ich potrzeb wodnych.

## **4.4. Sieć wodociągowa na terenach oddziaływania eksploatacji górniczej**

### **4.4.1. Wpływ eksploatacji górniczej na środowisko**

Na skutek eksploatacji górniczej pokładów węgla i innych kopalin powstają w głębi górotworu wyrobiska, których stropy z czasem zawałają się, powodując deformacje powierzchni ziemi. Deformacje mogą być rozległe (ciągłe) i przyjmować postać tzw. niecek górniczych, powstających na skutek powolnego uginania się warstw zalegających nad wyrobiskiem. Deformacje mogą być także lokalne (nieciągłe) i przyjmować postać zapadlisk, lejów, progów lub szczelin, powstających m.in. wówczas, gdy wybierane pokłady kopalin zalegają na małej głębokości. Obszary, na których możliwe jest powstawanie deformacji rozległych mogą być wykorzystywane pod zabudowę, natomiast te, na których mogą powstawać deformacje lokalne w większości wypadków nie nadają się pod zabudowę, zwłaszcza obiektami liniowymi. Zawałaniu się

stropów wyrobisk towarzyszą wstrząsy (tąpnięcia), które zależnie od intensywności i częstości mają, podobnie jak deformacje, duży wpływ na uszkodzenia obiektów posadowionych na powierzchni i pod powierzchnią gruntu, w tym obiektów liniowych, jak: sieci wodociągowe, kanalizacyjne, gazowe, ciepłownicze itp. [43, 45, 76, 78, 132].

Wznoszenie jakichkolwiek budowli, a także uzbrojenia podziemnego, na terenach występowania szkód górniczych musi być poprzedzone górnictwem prognozą odkształceń powierzchni, stanowiącą podstawę do wykonania odpowiednich zabezpieczeń wznoszonych obiektów.

Podstawowymi parametrami charakteryzującymi deformacje rozległe i służącymi do oceny przydatności danego terenu do zabudowy są [52]:

- największe pochylenie stoku niecki do poziomu:  $T_{\max}$ , mm/m,
- najmniejszy promień krzywizny powierzchni terenu:  $R_{\min}$ , km,
- największe jednostkowe przemieszczenie poziome (pełzanie):  $E_{\max}$ , mm/m.

Podstawę do szacowania wpływu drgań (wstrząsów) pochodzenia górniczego na obiekty, lecz tylko budowlane, stanowią wytyczne zawarte w normie PN-85/B-02170 [96]. Stosowanie ich w odniesieniu do obiektów liniowych wymaga dużej ostrożności i doświadczenia, ze względu na ich odmienność.

Obiekty liniowe ułożone na terenach szkód górniczych narażone są wielokrotnie w okresie użytkowania na wspomniane wcześniej niekorzystne wpływy eksploatacji górniczej. Najgroźniejsze są dla nich poziome odkształcenia terenu, których kierunek może być zarówno zgodny z podłużną osią obiektów, jak i do niej prostopadły. W pierwszym wypadku występują zmiany długości obiektu, w drugim zmiany parcia gruntu na jego ścianach. W rezultacie tych zmian dochodzi głównie do:

- rozszczelniania złączy rur, zwłaszcza kielichowych, na skutek rozpełzania i ugięcia gruntu wypukłością ku górze,
- kruszenia kielichów rur na skutek spełzania i ugięcia gruntu wypukłością ku dołowi,
- pęknięcia poprzecznego i podłużnego rur na skutek ugięć powierzchni, zaniku odporu bocznego gruntu i wstrząsów parasejsmicznych.

Zabezpieczenie przewodów przed powstaniem wymienionych uszkodzeń stanowią odpowiednio rozmieszczone kompensatory o konstrukcji umożliwiającej, w określonych granicach, zarówno zmiany długości, jak i odchylenia kątowe odcinków rurociągów rozdzielonych kompensatorami. Istotne znaczenie dla poziomu uszkodzalności przewodów na terenach szkód górniczych ma rodzaj materiału i sposób połączeń rur i kształtek, rodzaj i sposób wykonania podsypki, obsypki i zasypki rurociągów oraz zastosowanie innych zabezpieczeń, zgodnie z przyjętymi zasadami budowy sieci przewodów na terenach szkód górniczych. Aby zmniejszyć szkody, górnictwo stosuje m.in.: pozostawienie tzw. filarów ochronnych pod miastami (z pozostawieniem pełnej lub przeważającej części kopaliny w ziemi), eksploatację pasami (z pozostawieniem części kopaliny w ziemi), podsadzkę piaskową, tj. wypełnienie wyrobisk piaskiem.

Należy jednak pamiętać, że uszkodzenia sieci wodociągowych na terenach podziemnej eksploatacji górniczej powstają również z przyczyn niezależnych od górnictwa, które szczegółowo omówiono w rozdziale 4.3.2. Wielorakość przyczyn powstawania uszkodzeń sieci wodociągowych w dużym stopniu utrudnia ocenę niezawodności ich działania, w tym ocenę udziału górnictwa w uszkodzalności sieci, a tym samym w kosztach naprawy lub wymiany przewodów o dużej uszkodzalności.

#### **4.4.2. Intensywność uszkodzeń przewodów wodociągowych na przykładzie osiedla Sienkiewicza w Polkowicach**

*System wodociągowy Polkowic* zasilany jest w wodę pitną pochodzącą z zakupu, z której korzysta ok. 25 tysięcy mieszkańców miasta. Badania sieci wodociągowej w osiedlu Sienkiewicza obejmowały okres od początku 1986 r. do końca 1999 r. W latach 1990–1999 ilość wody wtłoczonej do sieci wodociągowej Polkowic uległa zmniejszeniu o 34%, a obciążenie sieci zmniejszyło się w 1999 r. o prawie 57% ( $91,5 \text{ m}^3/(\text{km}\cdot\text{d})$ ) w porównaniu z 1990 r. ( $212 \text{ m}^3/(\text{km}\cdot\text{d})$ ) [47]. Długość sieci magistralnej i rozdzielczej zwiększyła się w tym czasie o ok. 50%. Nie dysponowano danymi o wysokości ciśnienia w sieci wodociągowej.

Podziemną eksploatację górniczą złóż rudy miedzi w obrębie filara ochronnego Polkowic rozpoczęto w końcu lat siedemdziesiątych XX wieku. Eksploatacja ta spowodowała, że już na początku lat osiemdziesiątych cały obszar miasta został objęty wpływem górnictwem, odpowiadającym w większości deformacjom charakterystycznym dla I kategorii przydatności terenu do zabudowy, a w części – II kategorii. Obszar ten narażony był ponadto na występowanie wstrząsów parasejsmicznych o energii od  $10^6$ – $10^7$ J. Konieczność wzmocnienia konstrukcji budowli naziemnych spowodowała wstrzymanie w połowie lat osiemdziesiątych eksploatacji rudy miedzi z filara ochronnego, którą wznowiono w 1991 r. Narastający i zmienny, zarówno co do intensywności, jak i kierunków oddziaływania, wpływ górniczej eksploatacji spowodował, że w połowie lat dziewięćdziesiątych maksymalne obniżenie terenu w obrębie miasta wynosiło 1,65 m, poza miastem zaś 1,75 m. W prognozie na 2010 r. przewiduje się w obrębie miasta maksymalne obniżenie terenu rzędu 2,30 m (zachodnia część osiedla Sienkiewicza).

Przewody sieci wodociągowej w Polkowicach, w większości wybudowane przed rozpoczęciem eksploatacji złóż rudy miedzi z filara ochronnego, głównie z żeliwa szarego i stali, nie były zabezpieczone przed górnictwem deformacjami terenu. Spowodowało to zwiększoną uszkodzalność przewodów, co szczególnie uwidoczniło się na obszarze osiedla Sienkiewicza, które znalazło się w zasięgu pełnych wartości oddziaływań górnictwem właściwych dla II kategorii górnictwem i narażone było także na wstrząsy parasejsmiczne o różnej energii i częstotliwości [43].

Duża uszkodzalność sieci wodociągowej w osiedlu Sienkiewicza była głównie powodem wymiany w 1994 r. żeliwnych i stalowych przewodów na przewody z two-

rzyw sztucznych. Umożliwiło to ocenę wpływu rodzaju materiałów i zabezpieczeń zastosowanych do budowy przewodów wodociągowych w warunkach eksploatacji górniczej na niezawodność działania sieci. Wyróżniono dwa okresy eksploatacji sieci w osiedlu Sienkiewicza:

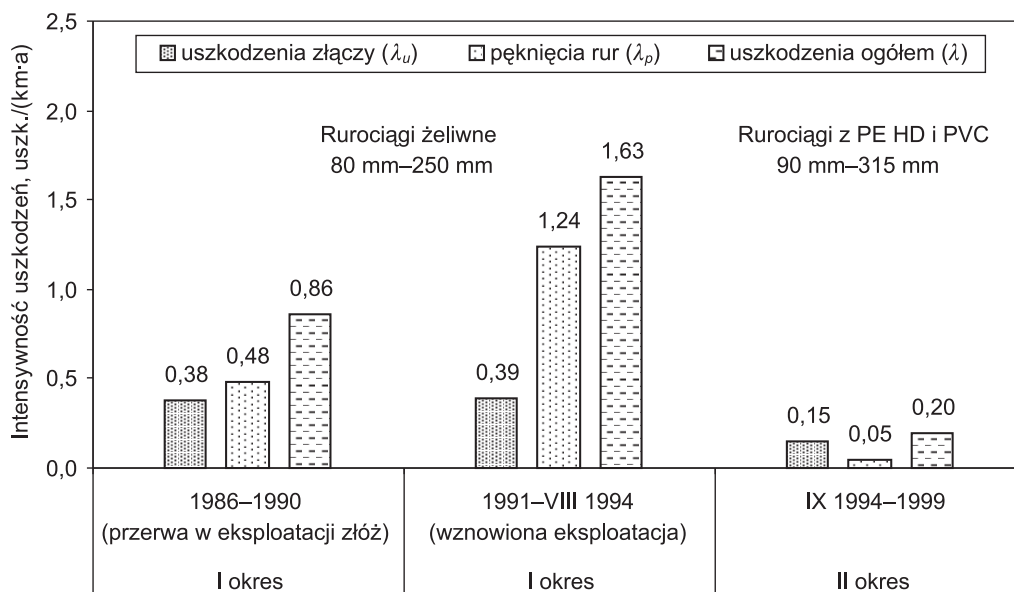
- I okres badań dotyczył przewodów żeliwnych o średnicach od 80 mm do 250 mm (długość 4183 m) i przyłączy stalowych (długość 970 m), niezabezpieczonych przed górnictwem deformacjami terenu. Obejmował okres od początku 1986 r. do sierpnia 1994 r. (do czasu wymiany przewodów na rurociągi z tworzyw sztucznych), przy czym w latach 1986–1990 trwała przerwa w eksploatacji złóż rudy miedzi, którą wznowiono w 1991 r.

- II okres dotyczył badań przewodów z PE HD o średnicach 110–315 mm (długość 2045 m), z PVC o średnicach 90–160 mm (długość 1872 m) oraz przyłączy z PVC (długość 1053 m) poczynawszy od września 1994 r. do końca 1999 r.

Wyniki prowadzonych od 1993 r. badań niezawodności działania wymienionej sieci wodociągowej prezentowano w trakcie ich realizacji, m.in. w pracach [41, 43, 49, 78, 79]. Analizie i ocenie poddano średnie wartości intensywności uszkodzeń rurociągów (nie dysponowano danymi o uszkodzeniach armatury) określone w poszczególnych latach i okresach obserwacji, z uwzględnieniem materiału i średnicy rurociągów oraz rodzaju ich uszkodzeń. Dokonano także oceny z uwzględnieniem lokalizacji przewodów, od której w dużym stopniu zależy awaryjność rurociągów na terenach eksploatacji górniczej. Przewody ułożone w poszczególnych ulicach narażone są bowiem na zmieniające się w czasie zarówno wielkości obniżen, jak i kierunek przebiegu izolacji obniżen terenu względem trasy przewodów. W dalszym ciągu zaprezentowane zostaną najważniejsze wnioski z przeprowadzonych badań.

#### **4.4.2.1. Intensywność uszkodzeń rurociągów z żeliwa i stali**

Ogólna intensywność ( $\lambda$ ) uszkodzeń żeliwnych rurociągów magistralnych i rozdzielczych w osiedlu Sienkiewicza (średnice 80–250 mm) podczas badań (I 1986–VIII 1994) wynosiła średnio 1,19 uszk./ $(\text{km}\cdot\text{a})$  (tab. 4.3). Prawie 70% awarii spowodowanych było pęknięciem rur i kielichów. Najmniejszą wartość wskaźnika  $\lambda$  (0,24 uszk./ $(\text{km}\cdot\text{a})$ ) stwierdzono w ostatnim roku przerwy w eksploatacji złóż z filara ochronnego (1990 r.), a największą (2,87 uszk./ $(\text{km}\cdot\text{a})$ ) w trzecim roku po wznowieniu eksploatacji (1993 r.) [41]. Świadczy to o narastającej w czasie intensywności wpływów górniczych na wzrost awaryjności sieci wodociągowej. Potwierdzeniem był także prawie dwukrotny wzrost średniej wartości ogólnej intensywności uszkodzeń rurociągów żeliwnych w latach (1991–VIII 1994) po wznowieniu eksploatacji w porównaniu ze średnią wartością w okresie (1986–1990) trwania przerwy w eksploatacji złóż rudy miedzi. Wartości  $\lambda$  wynosiły odpowiednio 1,63 uszk./ $(\text{km}\cdot\text{a})$  oraz 0,86 uszk./ $(\text{km}\cdot\text{a})$  (rys. 4.33).



Rys. 4.33. Intensywność uszkodzeń ( $\lambda_u$ ,  $\lambda_p$ ,  $\lambda$ ) rurociągów żeliwnych i z tworzyw sztucznych, z uwzględnieniem rodzaju uszkodzeń, w osiedlu Sienkiewicza w Polkowicach

Fig. 4.33. Failure rate ( $\lambda_u$ ,  $\lambda_p$ ,  $\lambda$ ) for cast iron pipes and plastic pipes, including type of damage, in Sienkiewicz housing estate, Polkowice

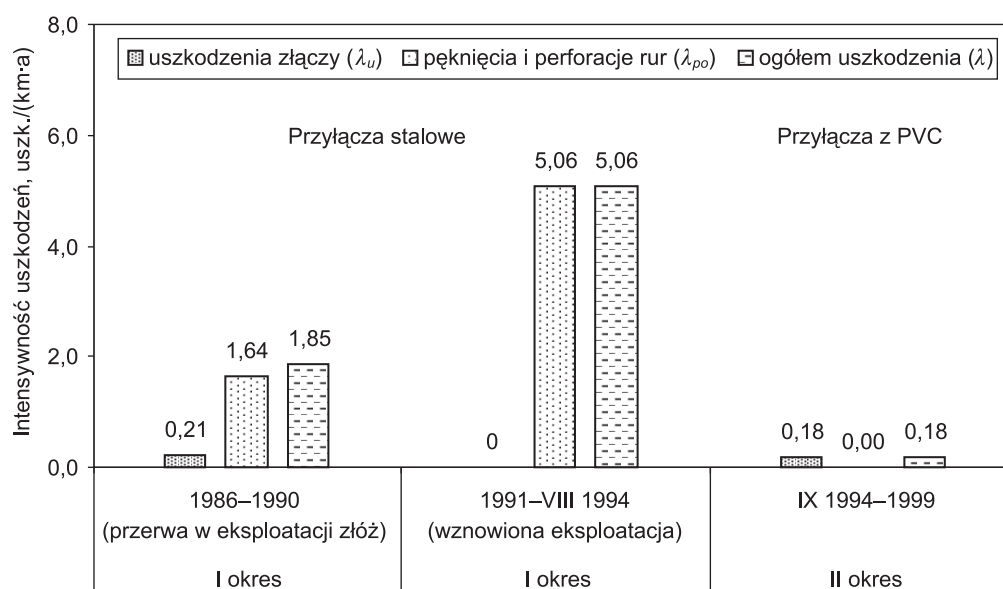
Oceniając uszkadzalność obiektów liniowych na terenach eksploatacji górniczej należy uwzględnić wpływ wielkości obniżenia terenu oraz przebieg izolacji obniżenia względem podłużnej osi obiektów. Przeprowadzona w odniesieniu do rurociągów żeliwnych analiza wykazała wprawdzie, że średnia intensywność  $\lambda$  uszkodzeń rurociągów w niektórych ulicach była 2–4-krotnie większa od wartości średniej dla sieci w I okresie badań, ale nie dała jednoznacznych wniosków. Wynikało to z faktu, że w długim (prawie dziewięcioletnim) okresie obserwacji rurociągi w poszczególnych ulicach narażone były na narastające i zmienne w czasie i przestrzeni wielkości obniżenia terenu, jak i kierunki przebiegu izolacji tych obniżenia względem tras przewodów. Trudny był także do jednoznacznego określenia wpływ wstrząsów górniczych na uszkadzalność rurociągów, ze względu na możliwe przesunięcie czasowe przyczyn i skutków uszkodzeń.

Z wymienionych powodów nie stwierdzono także korelacji pomiędzy awaryjnością rurociągów a ich średnicą, co miało miejsce w odniesieniu do większości sieci na terenach nieobjętych wpływami eksploatacji górniczej, gdzie wartości  $\lambda$  malały wraz ze wzrostem średnicy rur (rozdział 4.3.2.1).

W osiedlu Sienkiewicza największą intensywnością uszkodzeń ( $\lambda = 2,52$  uszk./km·a – tab. 4.9 i 4.10) charakteryzował się rurociąg o największej średnicy 250 mm ułożo-

ny w ulicy, która najwcześniej znalazła się w zasięgu deformacji odpowiadających II kategorii górniczej.

*Stalowe przyłącza domowe* charakteryzowały się bardzo dużą awaryjnością, zwłaszcza w okresie po wznowieniu wydobycia złóż rudy miedzi z filara ochronnego pod miastem (I 1991–VIII 1994). Ogólna intensywność uszkodzeń przyłączy w tym okresie wynosiła średnio 5,06 uszk./(km·a) i była prawie trzykrotnie większa od średniej wartości (1,85 uszk./(km·a)) w czasie trwania przerwy w eksploatacji (rys. 4.34). Większość uszkodzeń (90–100% ogólnej liczby) stanowiły pęknięcia i perforacje i perforacje wskutek korozji materiału rur [41].



Rys. 4.34. Intensywność uszkodzeń ( $\lambda_u$ ,  $\lambda_{po}$ ,  $\lambda$ ) przyłączy domowych, z uwzględnieniem rodzaju uszkodzeń, w osiedlu Sienkiewicza w Polkowicach  
 Fig. 4.34. Failure rate ( $\lambda_u$ ,  $\lambda_{po}$ ,  $\lambda$ ) for plumbing fittings, including type of damage, in Sienkiewicz housing estate, Polkowice

Duża awaryjność analizowanej sieci przewodów magistralnych, rozdzielczych i przyłączy domowych spowodowana była w dużej mierze brakiem zabezpieczeń przed niekorzystnymi wpływami eksploatacji górniczej.

#### 4.4.2.2. Intensywność uszkodzeń rurociągów z tworzyw sztucznych

W celu zwiększenia niezawodności działania całą sieć przewodów w osiedlu Sienkiewicza wymieniono na rurociągi z tworzyw sztucznych (PE HD i PVC). Zastosowa-

no także dodatkowe, profilaktyczne zabezpieczenia (obudowy studzienne zasuw począwszy od  $\phi 150$  mm, żelbetowe kręgi i zbrojone fundamenty do obudów studziennych zasuw, bloki oporowe w niektórych węzłach sieci) ze względu na położenie sieci wodociągowej w zasięgu oddziaływań górniczych odpowiadających II kategorii przydatności terenu do zabudowy.

Działania te spowodowały, że znacznie zmniejszyła się awaryjność wszystkich przewodów w osiedlu. W ciągu prawie 5,5 lat eksploatacji (II okres badań) wystąpiły jedynie cztery uszkodzenia rurociągów magistralnych i rozdzielczych, w tym trzy awarie złączy (wymieniono wadliwe uszczelki) rurociągów z PVC i jedno pęknięcie trójnika na rurociągu z PE HD. Wystąpiło także jedno uszkodzenie złącza na przyłączy z PVC. Uszkodzenia wystąpiły w początkowym 1,5-rocznym okresie eksploatacji; część naprawiono w ramach gwarancji.

Analiza wykazała, że wykonanie przewodów wodociągowych z tworzyw sztucznych, zgodnie z wymogami obowiązującymi na terenach eksploatacji górniczej, spowodowało wielokrotny spadek intensywności uszkodzeń zarówno rurociągów magistralnych i rozdzielczych, jak i przyłączy – do poziomu odpowiadającego intensywności uszkodzeń rurociągów z tworzyw sztucznych na terenach nieobjętych działalnością górniczą (tab. 4.13). Ogólna intensywność uszkodzeń rurociągów w II okresie badań (od września 1994 r. do końca 1999 r.) wynosiła średnio (rys. 4.33 i 4.34):

- rurociągi z PE HD i PVC (średnice 90–315 mm)  $\lambda = 0,20$  uszk./ $(\text{km}\cdot\text{a})$ ,
- przyłącza domowe z PVC  $\lambda = 0,18$  uszk./ $(\text{km}\cdot\text{a})$ ,
- sieć ogółem  $\lambda = 0,19$  uszk./ $(\text{km}\cdot\text{a})$ .

Reasumując, można stwierdzić, że ponadpięcioletnia eksploatacja przewodów wodociągowych wykonanych z PVC i PE HD potwierdziła przydatność ich stosowania na terenach objętych deformacjami odpowiadającymi II kategorii górniczej.

#### 4.4.3. Wpływ szkód górniczych na sieć wodociągową

Ocena niezawodności działania systemów wodociągowych na terenach objętych działalnością górniczą jest trudna i problematyczna, gdyż z jednej strony istniejące systemy charakteryzują się różnym stopniem i rodzajem stosowanych zabezpieczeń, a z drugiej – bardzo zróżnicowany jest zakres i rodzaj deformacji powierzchni terenu w zależności od sposobu eksploatacji złóż, ich miąższości i głębokości zalegania itp. Uogólnianie wyników badań uszkodzalności sieci wodociągowych wymagałoby zatem przeprowadzenia wszechstronnych badań w różnych warunkach, aby było możliwe powiązanie intensywności uszkodzeń również z rodzajem i wielkością deformacji terenu spowodowanych eksploatacją górniczą pokładów surowców mineralnych.

Prowadzenie tego typu badań jest także konieczne ze względu na możliwość oceny udziału górnictwa w uszkodzalności sieci, a tym samym w kosztach naprawy lub wymiany przewodów oraz w kosztach wynikających ze wzrostu wielkości sieciowych strat wody.



#### 4.4.3.1. Metody oceny udziału szkód górniczych w uszkodzalności sieci wodociągowej

Preferowaną przez górnictwo metodą jest każdorazowe protokolarne stwierdzenie, przy udziale przedstawicieli górnictwa podczas wizji lokalnej na miejscu awarii, że określone uszkodzenie stanowi bezpośrednie następstwo robót górniczych. Ten sposób, bardzo korzystny dla górnictwa, nie jest zadowalający, gdyż w niektórych wypadkach uszkodzenie ujawnia się po dłuższym czasie od chwili zaistnienia przyczyny (np. wstrząsu). Wówczas trudno jest udowodnić związek przyczynowo-skutkowy eksploatacji górniczej z uszkodzeniem przewodu.

Udział szkód górniczych w uszkodzalności sieci wodociągowej, według powyższej metody, można wyrazić w postaci procentowego wskaźnika uszkodzeń górniczych  $G$ , który oblicza się jako stosunek liczby uszkodzeń  $n_G$  (lub intensywności uszkodzeń  $\lambda_G$ ) wyodrębnionych jako wynik eksploatacji górniczej do całkowitej liczby wszystkich uszkodzeń  $n$  (lub ogólnej intensywności uszkodzeń  $\lambda$ )

$$G = (n_G/n) \cdot 100 = (\lambda_G/\lambda) \cdot 100, \% \quad (4.43)$$

Wartość wskaźnika  $G$  może być obliczona bądź dla poszczególnych przewodów z uwzględnieniem ich położenia w stosunku do kierunku poziomych odkształceń terenu, bądź w odniesieniu do wydzielonej części sieci wodociągowej.

Obiektywne określenie udziału szkód górniczych w uszkodzalności sieci wodociągowej zapewnia zaproponowana przez H. Hotłoś i E. Mielcarzewicza [46] oryginalna *metoda porównawcza*. Polega ona na porównaniu wartości średnich intensywności uszkodzeń  $\lambda$  przewodów, obliczonych na podstawie wieloletnich obserwacji w mieście narażonym na oddziaływanie eksploatacji górniczej, ze średnimi wartościami granicznej intensywności uszkodzeń  $\lambda_{gr}$  obliczonymi na podstawie wieloletnich obserwacji w miastach nienarażonych na szkody górnicze lub wziętymi z literatury. Intensywność uszkodzeń  $\lambda_{gr}$  jest to największa wartość spośród średnich intensywności uszkodzeń (z wieloletnich okresów obserwacji) z kilkunastu miast nienarażonych na szkody górnicze. Bardzo ważne jest, aby wartość  $\lambda_{gr}$  określić w zależności od średnicy i materiału rurociągów oraz innych cech charakteryzujących sieć wodociagową.

W metodzie porównawczej przyjęto, że wskaźnik intensywności uszkodzeń górniczych  $\lambda_G$  przewodów wynosi

$$\lambda_G = \lambda - \lambda_{gr}, \text{ uszk./}(\text{km} \cdot \text{a}) \quad (4.44)$$

Znając wartość  $\lambda_G$ , wskaźnik uszkodzeń górniczych  $G$  można obliczyć ze wzoru (4.43).

Korzystając z wartości wskaźników  $G$  obliczonych dla poszczególnych przewodów o długości  $l$ , z uwzględnieniem m.in. materiału i średnicy rur, można określić średni wskaźnik uszkodzeń górniczych  $G_s$  w odniesieniu do wydzielonej części sieci wodociągowej ze wzoru

$$G_s = \Sigma G_i l_i / \Sigma l_i, \% \quad (4.45)$$

W szacunkowych ocenach udziału szkód górniczych w uszkodzalności sieci wodociągowej wybranego miasta (lub jego części) można przyjmować wartości wskaźników  $\lambda$  i  $\lambda_{gr}$  równe średnim wartościom intensywności uszkodzeń, odpowiednio w mieście narażonym na oddziaływanie eksploatacji górniczej i w miastach niepodlegających wpływowi górniczym, uwzględniając przede wszystkim materiał rurociągów.

#### 4.4.3.2. Ocena wpływu szkód górniczych na sieć wodociągową w Polkowicach

W Polkowicach od początku 1991 r. – po wznowieniu eksploatacji złóż rudy miedzi z filara ochronnego – do końca 1994 r. wystąpiło 106 awarii rurociągów sieci magistralnej i rozdzielczej, w tym 24 awarie (22,6%) górnictwo zakwalifikowało jako szkody górnicze. Natomiast według eksploatatora sieci wodociągowej liczba uszkodzeń  $n_G$  górniczych wynosiła 33 szt., co oznacza iż w 31% przypadków (wskaźnik  $G$ ) przyczyną uszkodzeń rurociągów był wpływ prowadzonej eksploatacji górniczej pod miastem. Jako wynik szkód górniczych uznano, co jest znamienne, jedynie pęknięcia kielicha lub rury (większość pęknięć poprzecznych z przemieszczeniem elementów w poziomie i pionie), nie uwzględniając uszkodzeń uszczelnienia złączy rur oraz przyłączy domowych.

W odniesieniu do żeliwnych rurociągów i stalowych przyłączy w osiedlu Sienkiewicza, od początku 1991 r. do sierpnia 1994 r. (do czasu ich wymiany), średnia wartość wskaźnika ( $G$ ) uszkodzeń górniczych, określona na podstawie liczby ( $n_G$ ) uszkodzeń górniczych ze wzoru (4.43), wynosiła:

- żeliwne rurociągi  $G = 36\%$  według górnictwa oraz  $52\%$  według eksploatatora,
- stalowe przyłącza  $G = 0\%$  według górnictwa i eksploatatora sieci,
- ogółem  $G = 21\%$  według górnictwa oraz  $30\%$  według eksploatatora.

Ocenę udziału szkód górniczych w uszkodzalności sieci wodociągowej w osiedlu Sienkiewicza według *metody porównawczej* poprzedzono szczegółową analizą wartości intensywności uszkodzeń rurociągów w miastach nienarażonych na szkody górnicze, uzyskanych z badań własnych (tab. 4.9 i 4.10) oraz z dostępnej literatury (tab. 2.2). Na ich podstawie przyjęto wartości średniej granicznej  $\lambda_{gr}$  intensywności uszkodzeń w zależności od materiału i średnicy rurociągów, po czym, korzystając ze wzorów (4.44) i (4.45), obliczono średnie wartości wskaźnika uszkodzeń górniczych w okresie 1991–VIII 1994, które wynosiły [41, 43]:

- żeliwne rurociągi  $G_s \approx 27\%$ ,
- stalowe przyłącza  $G_s \approx 58\%$ ,
- ogółem  $G_s \approx 33\%$ .

W dużym zakresie zmieniały się średnie wartości wskaźników  $\lambda$ ,  $\lambda_G$  i  $G$  obliczone z uwzględnieniem średnic rurociągów oraz ich trasy (ulic) (tab. 4.27).

Tabela 4.27. Zakres zmian średnich wartości wskaźników uszkodzeń rurociągów, z uwzględnieniem średnic i ulic, w okresie I 1991–VIII 1994 w osiedlu Sienkiewicza w Polkowicach

Table 4.27. Range of variations in the mean values of pipe damage indices (including pipe diameters and relevant streets) in Sienkiewicz housing estate of Polkowice, over the time span of Jan. 1991 to Aug. 1994

Rodzaj rurociągów	Wartości wskaźników obliczone wg metody porównawczej		
	Ogólna intensywność uszkodzeń $\lambda$ uszk./km·a	Intensywność uszkodzeń górniczych $\lambda_G$ uszk./km·a	Wskaźnik uszkodzeń górniczych $G$ %
Żeliwne rurociągi $\phi 80$ – $\phi 250$ mm	0–6,95	0–6,06	0–87,2
Stalowe przyłącza	0–10,75	0–9,97	0–92,7

W II okresie badań sieci wodociągowej w osiedlu Sienkiewicza, tj. w czasie eksploatacji rurociągów z PE HD i PVC, żadne z uszkodzeń nie zostało zakwalifikowane jako wpływ szkód górniczych. Można zatem przyjąć, że według metody preferowanej przez górnictwo  $\lambda_G = G = 0$ .

Nie przeprowadzono oceny rurociągów z tworzyw sztucznych według metody porównawczej, gdyż za mało jest jeszcze danych z wieloletniej eksploatacji tych rurociągów na terenach nieobjętych eksploatacją górnictwem. Z analizy uzyskanych wartości intensywności  $\lambda$  rurociągów w osiedlu (rozdz. 4.4.2.2) można jednak wnosić, iż wynik oceny powinien być taki jak w powyższej metodzie.

Autorską *metodę porównawczą* zastosowano ponadto do oceny udziału górnictwa w uszkodzalności sieci wodociągowej w innych rejonach Polkowic. Podyktowane to było koniecznością oszacowania udziału górnictwa w kosztach przebudowy (wymiany głównie rurociągów żeliwnych i częściowo stalowych na przewody z PE HD) sieci o długości około 10 km. Na podstawie wyników badań średniej w latach 1991–1995 intensywności uszkodzeń rurociągów – z podziałem na materiał, średnice i lokalizację (ulicę) rurociągów – ustalono, iż średni wskaźnik uszkodzeń górniczych ( $G_s$ ) wynosił prawie 25% [78]. Wartość ta mogła być punktem wyjścia w rozmowach przedstawicieli przedsiębiorstwa wodociągowego z przedstawicielami górnictwa odnośnie do wielkości partycypacji kopalni w kosztach wymiany analizowanej sieci wodociągowej.

Przeprowadzona wymiana żeliwnych i stalowych przewodów, niezabezpieczonych przed wpływami eksploatacji górnictwa, na przewody z tworzyw sztucznych spowodowała wielokrotny spadek uszkodzalności sieci w osiedlu Sienkiewicza, a w konsekwencji znaczne zmniejszenie kosztów jej naprawy. W rozdziale 5.4 pracy porównano średnie wartości wskaźników kosztów naprawy rurociągów magistralnych i rozdzielczych wykonanych z żeliwa (w I okresie badań) i z tworzyw sztucznych (w II okresie badań) w analizowanym osiedlu. Obliczeń dokonano przy założeniu stałych w czasie kosztów naprawy poszczególnych rodzajów uszkodzeń rurociągów,

przyjętych z obserwacji we Wrocławiu w 1999 r. (z powodu na braku danych dla Polkowic).

Z danych zamieszczonych w tab. 5.9 jednoznacznie wynika, że dzięki modernizacji (wymianie) sieci wodociągowej w osiedlu ośmiokrotnie spadła średnia intensywność uszkodzeń rurociągów (z wartości  $\lambda = 1,63$  uszk./ $(\text{km}\cdot\text{a})$  do  $\lambda = 0,20$  uszk./ $(\text{km}\cdot\text{a})$ ), wskutek czego jedenastokrotnie zmniejszyły się koszty naprawy uszkodzeń w przeliczeniu na 1 kilometr sieci średnio w roku (z  $\kappa_{sr} = 8486$  zł/ $(\text{km}\cdot\text{a})$  do  $\kappa_{sr} = 768$  zł/ $(\text{km}\cdot\text{a})$ ).

Negatywnym skutkiem eksploatacji górniczej były także większe straty wody przez przecieki z sieci przewodów. Na wielkość sieciowych strat wody wpływa wiele czynników, w tym w istotny sposób intensywność uszkodzeń przewodów (rozdział 6), która na terenach szkód górniczych osiąga znacznie większe wartości niż na pozostałych terenach. W Polkowicach w czasie przed modernizacją sieci przewodów (lata 1991–1994) straty wody wraz z zużyciem na potrzeby własne systemu ( $S_w$ ) (określone na podstawie własnych badań ankietowych) wynosiły średnio 18,4% ilości wody wtłoczonej do sieci oraz 25,0 m<sup>3</sup>/ $(\text{km}\cdot\text{d})$ . Po wymianie przewodów w osiedlu Sienkiewicza i podczas sukcesywnie prowadzonej modernizacji sieci w innych rejonach Polkowic (lata 1995–1999) średnie wartości wskaźnika  $S_w$  zmniejszyły się do 15,4% i 13,4 m<sup>3</sup>/ $(\text{km}\cdot\text{d})$ .

## **5. Badania i metody prognozy kosztów naprawy uszkodzeń przewodów wodociągowych**

Znajomość kosztów naprawy uszkodzeń jest konieczna do oceny wpływu uszka-  
dzalności sieci wodociągowej na koszty jej eksploatacji oraz do prognozowania kosz-  
tów naprawy elementów sieci wodociągowej na podstawie przewidywanej intensywno-  
ści uszkodzeń.

### **5.1. Metodyka i zakres badań**

W większości miast naprawy uszkodzeń przewodów wodociągowych dokonywane są przez własne brygady przedsiębiorstw wodociągowych. Koszty prowadzonych w ten sposób napraw są trudne do określenia i nie są rejestrowane. Wykorzystano więc dane z Wrocławia, gdzie ze względu na długą sieć przewodów MPWiK sp. z o.o. zleca część napraw uszkodzeń specjalistycznym firmom. Na podstawie udostępnionych przez przedsiębiorstwo kosztorysów powykonawczych, sporządzonych przez firmy dokonujące napraw, określono koszty robocizny oraz ilość i rodzaj użytych do naprawy materiałów, które zapewnił zleceniodawca. Po uwzględnieniu kosztów materiałów możliwe było obliczenie całkowitych kosztów naprawy uszkodzeń, z podziałem na średnice i rodzaj uszkodzeń rurociągów i armatury.

Badania obejmowały koszty naprawy (systemem zleconym) przewodów magistralnych i rozdzielczych (średnice od 80 mm do 1200 mm) we Wrocławiu w 1993 r., 1996 r. i 1999 r. Przeanalizowano ogółem 680 przypadków uszkodzeń rurociągów i armatury, a do oceny wykorzystano 600 danych (pozostałe były niepełne, bądź dotyczyły skrajnych przypadków awarii), z których ponad 93% dotyczyło naprawy rurociągów żeliwnych kielichowych.

Dane o kosztach naprawy posłużyły do zbadania:

- korelacji między kosztem naprawy a rodzajem uszkodzenia, średnicą i głębokością ułożenia rurociągów,
- korelacji między kosztem naprawy a rodzajem uszkodzenia armatury (zasuw i hydrantów) sieci wodociągowej,
- tendencji zmian kosztów naprawy poszczególnych rodzajów uszkodzeń rurociągów i armatury w czasie badań, z uwzględnieniem zmiany wskaźników cen (inflacji).

Wyniki powyższych badań i analiz zostały wykorzystane do:

- oceny wpływu wysokości ciśnienia na wartości wskaźników intensywności uszkodzeń rurociągów i armatury oraz wartości wskaźników kosztów naprawy sieci w badanych systemach wodociągowych,
- opracowania metodyki prognozowania wartości wskaźników kosztów naprawy sieci wodociągowych, z kilkuletnim wyprzedzeniem.

## 5.2. Średnie koszty naprawy uszkodzeń według ich rodzaju i średnic przewodów

Na ogólny koszt naprawy uszkodzenia składał się koszt użytych materiałów i sprzętu oraz koszt robocizny (prace przygotowawcze – zamontowanie i demontaż oznakowania drogowego oraz zabezpieczenia miejsca prowadzenia prac itp., rozbiórka i odtworzenie nawierzchni, wykonanie wykopu, zasypianie wraz z zagęszczeniem, odwodnienie wykopu, oświetlenie miejsca robót, niekiedy skuwanie lodu, naprawa lub wymiana uszkodzonego elementu, płukanie i odpowietrzenie rurociągu).

Koszt naprawy uszkodzeń sieci wodociągowej zależy od wielu różnorodnych czynników, takich jak:

- rodzaj przewodów (średnica, materiał, stan techniczny),
- typ uszkodzonych elementów,
- rodzaj i wielkość uszkodzeń,
- zagłębienie przewodów,
- warunki gruntowe, wodne i atmosferyczne,
- rodzaj pokrycia terenu,
- czas i miejsce awarii,
- sposób organizacji naprawy itp.

Tabela 5.1. Wskaźniki cen i wzrost cen w latach 1991–2003  
Table 5.1. Price indices and price increase in the time span of 1991 to 2003

WSKAŹNIKI CEN ( $W_i$ ) według GUS [105]								
Rok	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	
Rok odniesienia	rok poprzedni = 100%							
Wskaźniki cen, %	147,4	117,2	124,6	119,7	121,9	119,2	114,2	
Rok	1998	1999	2000	2001	2002	2003		
Rok odniesienia	rok poprzedni = 100%							
Wskaźniki cen, %	112,9	108,6	107,9	103,8	101,2	98,9		
WZROST CEN								
Rok	1993	1996	1999		1998		2002	
Rok odniesienia	1990 = 1	1993 = 1	1993 = 1	1996 = 1	1993 = 1	1996 = 1	1998 = 1	1999 = 1
Wzrost cen	2,152	1,74	2,44	1,40	2,24	1,29	1,23	1,13

Tabela 5.2. Średnie jednostkowe koszty naprawy uszkodzeń rurociągów we Wrocławiu z obserwacji w 1999 r.  
Table 5.2. Average unit costs of pipe damage repair in Wrocław, from observations in 1999

d mm	Średnie jednostkowe koszty naprawy uszkodzeń rurociągów we Wrocławiu w 1999 r., zł											
	Koszt ( $K_m$ ) naprawy złączy dla zagłębienia rurociągów			Koszt ( $K_{np}$ ) naprawy pęknięć lub perforacji dla zagłębienia rurociągów								
				$h \leq 2$ m			$h > 2$ m			ogółem		
	$h \leq 2$ m	$h > 2$ m	ogółem	poprz. i perforacje	podłużne	średnio	poprz. i perforacje	podłużne	średnio	poprz. i perforacje	podłużne	średnio
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
80	b.o.	2441 (1)	2441 (1)	2803 (3)	b.o.	2803 (3)	3410 (6)	4577 (1)	3577 (7)	3208 (9)	4577 (1)	3345 (10)
100	b.o.	b.o.	b.o.	2384 (4)	8499 (1)	3607 (5)	4189 (4)	5165 (16)	4383 (20)	3286 (8)	5361 (17)	3889 (25)
125	3238 (1)	b.o.	3238 (1)	5125 (4)	b.o.	5125 (4)	3644 (24)	6406 (5)	4120 (29)	3856 (28)	6406 (5)	4242 (33)
150	2495 (2)	5317 (4)	4376 (6)	7282 (1)	6642 (1)	6962 (2)	5893 (17)	7939 (8)	6548 (25)	5970 (18)	7795 (9)	6578 (27)
175	b.o.	3422 (1)	3422 (1)	b.o.	b.o.	b.o.	2992 (6)	8710 (4)	5279 (10)	2992 (6)	8710 (4)	5279 (10)
200	b.o.	3053 (2)	3053 (2)	4077 (1)	b.o.	4077 (1)	5665 (5)	5860 (4)	5752 (9)	5400 (6)	5840 (4)	5584 (10)
225	b.o.	6479 (1)	6479 (1)	b.o.	b.o.	b.o.	8450 (3)	b.o.	8450 (3)	8450 (3)	b.o.	8450 (3)
250	b.o.	6435 (1)	6435 (1)	4588 (1)	b.o.	4588 (1)	4814 (1)	17 754 (1)	11 284 (2)	4701 (2)	17 754 (1)	9052 (3)
300	b.o.	9392 (6)	9392 (6)	b.o.	b.o.	b.o.	6195 (1)	9493 (6)	9022 (7)	6195 (1)	9493 (6)	9022 (7)
400	b.o.	6208 (1)	6208 (1)	b.o.	b.o.	b.o.	15055 (1)	b.o.	15 055 (1)	15 055 (1)	b.o.	15 055 (1)
500	b.o.	9193 (1)	9193 (1)	b.o.	b.o.	b.o.	b.o.	b.o.	b.o.	b.o.	b.o.	b.o.
600	b.o.	11 952 (2)	11 952 (2)	b.o.	b.o.	b.o.	b.o.	27 971 (1)	27 971 (1)	b.o.	27 971 (1)	27 971 (1)

Wartości w nawiasach – liczba obserwacji.  
b.o. – brak obserwacji.

Na koszty naprawy uszkodzeń przewodów wpływają także zmiany wskaźników cen (inflacja, deflacja), które na potrzeby analizy przyjęto według danych GUS [105]. Wartości wskaźników cen produkcji budowlano-montażowej w latach 1991–2003 oraz obliczony na ich podstawie wzrost cen w różnych okresach badań zestawiono w tabeli 5.1.

### 5.2.1. Koszty naprawy uszkodzeń rurociągów

Na podstawie danych z obserwacji obliczono średnie, w poszczególnych latach badań (1993, 1996, 1999), jednostkowe koszty naprawy uszkodzeń (tj. koszty naprawy jednego uszkodzenia) z uwzględnieniem średnicy rurociągów oraz rodzaju ich uszkodzeń. Wyróżniono:

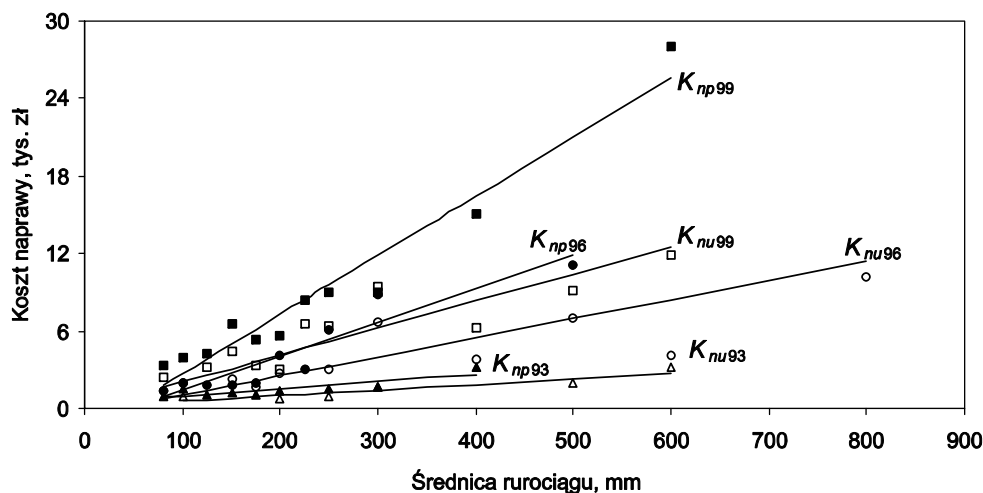
- koszt naprawy uszkodzenia złącza ( $K_{nu}$ ),
- koszt naprawy pęknięcia (poprzecznego, podłużnego) lub perforacji wywołanej korozją materiału rur ( $K_{np}$ ).

Tabela 5.3. Średnie jednostkowe koszty naprawy uszkodzeń rurociągów, z podziałem na średnice i rodzaj uszkodzeń, na podstawie obserwacji oraz po potrąceniu inflacji – we Wrocławiu w 1993 r., 1996 r. i 1999 r.

Table 5.3. Average unit costs of pipe damage repair (grouped according to pipe diameter and type of damage), those based on observations and those after subtraction of inflation rate, for the city of Wrocław in 1993, 1996 and 1999

d mm	Koszt naprawy rurociągów, zł/uszkodzenie											
	w 1993 r.				w 1996 r.				w 1999 r.			
	uszkodzenie złącza $K_{nu}$		pęknięcie rury $K_{np}$		uszkodzenie złącza $K_{nu}$		pęknięcie rury $K_{np}$		uszkodzenie złącza $K_{nu}$		pęknięcie i perf. rury $K_{np}$	
	wg (5.1)	wg (5.4)	wg (5.7)	wg (5.12)	wg (5.2)	wg (5.5)	wg (5.8)	wg (5.13)	wg (5.3)	wg (5.6)	wg (5.9)	wg (5.14)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
80	(455)	(211)	859	399	742	426	840	483	1661	1186	1787	1276
100	545	253	971	451	1037	596	1363	783	2077	1483	2700	1928
125	658	306	1110	516	1406	808	2015	1158	2596	1854	3843	2745
150	770	358	1250	581	1775	1020	2668	1533	3115	2225	4985	3561
175	882	410	1389	645	2144	1232	3321	1909	3634	2596	6127	4376
200	995	462	1529	710	2513	1444	3973	2283	4153	2966	7269	5192
225	1107	514	1668	775	2883	1657	4626	2659	4673	3338	8412	6008
250	1220	567	1808	840	3251	1868	5278	3033	5192	3708	9554	6824
300	1445	671	2087	970	3989	2292	6584	3784	6230	4450	11838	8456
350	1670	776	2366	1099	4727	2717	7891	4535	7269	5192	14123	10088
400	1895	880	2645	1229	5465	3141	9196	5285	8307	5933	16407	11719
500	2344	1089	(3203)	(1488)	6941	3989	11805	6784	10384	7417	20976	14983
600	2795	1299	–	–	8417	4837	–	–	12460	8900	25545	18246
800	–	–	–	–	11369	6534	–	–	–	–	–	–
1000	–	–	–	–	14321	8231	–	–	–	–	–	–
1200	–	–	–	–	17273	9927	–	–	–	–	–	–





Rys. 5.1. Jednostkowe koszty naprawy uszkodzeń rurociągów ( $K_{nu}$ ,  $K_{np}$ ) z obserwacji we Wrocławiu w 1993 r., 1996 r. i 1999 r.

Fig. 5.1. Unit costs of damage repair for pipelines ( $K_{nu}$ ,  $K_{np}$ ), recorded in Wrocław in 1993, 1996 and 1999

Analizowane przypadki uszkodzeń złączy dotyczyły wyłącznie połączeń kielichowych rurociągów żeliwnych, przypadki zaś pęknięć lub perforacji dotyczyły w 91% rurociągów żeliwnych, a w 9% rurociągów ze stali, PVC i azbestocementu. W tabeli 5.2. podano dla przykładu średnie jednostkowe koszty naprawy uszkodzeń rurociągów we Wrocławiu z obserwacji w 1999 r. Zbadano i stwierdzono korelacje (na poziomie istotności  $\alpha$ ) między kosztami naprawy (dla powyższych rodzajów uszkodzeń) a średnicą rurociągów. W każdym analizowanym roku koszt naprawy ( $K_n$ , zł) wzrastał liniowo wraz ze wzrostem średnicy ( $d$ , mm). Wyniki obliczeń wartości kosztów  $K_{nu}$  i  $K_{np}$  zamieszczono w tabeli 5.3, odpowiednio w kolumnach 2, 6, 10 i 4, 8, 12, oraz zilustrowano na rysunku 5.1.

**Średni jednostkowy koszt naprawy uszkodzenia złącza kielichowego rurociągów żeliwnych ( $K_{nu}$ )** rósł wraz ze wzrostem średnicy, niezależnie od głębokości ułożenia, według zależności

w 1993 r.:

$$K_{nu} = 4,4985 \cdot d + 95,33, \quad d = 100\text{--}600 \text{ mm} \quad (R = 0,9261; R_{kr} = 0,7293) \quad (5.1)$$

w 1996 r.:

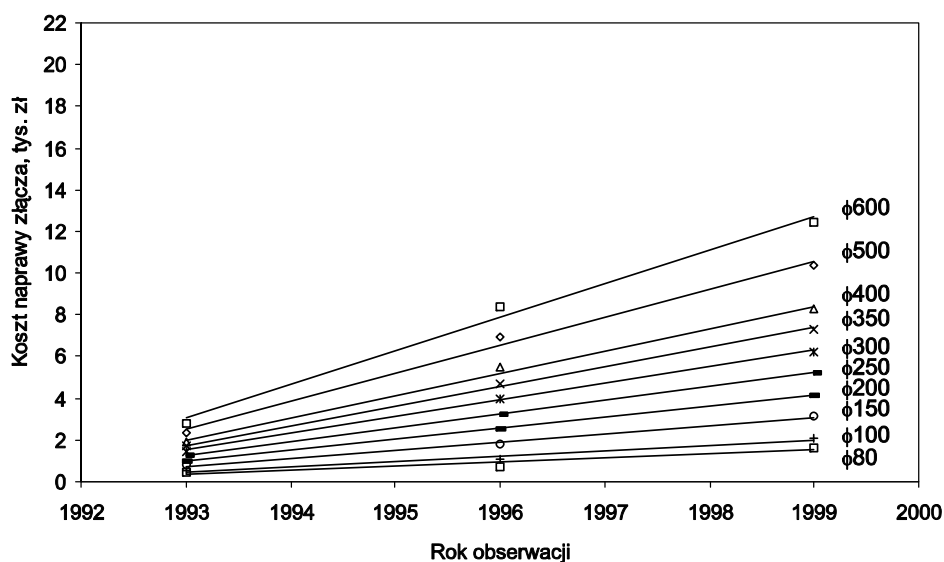
$$K_{nu} = 14,76 \cdot d - 438,512, \quad d = 80\text{--}1200 \text{ mm} \quad (R = 0,9341; R_{kr} = 0,4973) \quad (5.2)$$

w 1999 r.:

$$K_{nu} = 20,76764 \cdot d, \quad d = 80\text{--}600 \text{ mm} \quad (R = 0,8612; R_{kr} = 0,5214) \quad (5.3)$$

Dla wspólnego (w trzech latach badań) zakresu średnic przewodów koszty naprawy złączy rurociągów o średnicy 500 mm były kilkakrotnie większe od kosztów naprawy rurociągów o średnicy 100 mm i wynosiły: w 1993 r.  $K_{nu500} = 4,3K_{nu100}$ , w 1996 r.  $K_{nu500} = 6,7K_{nu100}$ , w 1999 r.  $K_{nu500} = 5,0K_{nu100}$ . Koszt materiałów użytych podczas usuwania uszkodzeń złączy, tj. głównie doszczelniaczy połączeń kielichowych, wynosił średnio 5–14% całkowitych kosztów naprawy złączy w 1996 r. i 1999 r. Największy udział w ogólnych kosztach stanowiły koszty wykopów, które rosły wraz ze wzrostem średnicy przewodów i stanowiły od 20% do ponad 80% tych kosztów.

Ocena wpływu głębokości ułożenia przewodów ( $h$ ) na koszty naprawy złączy ( $K_{nu}$ ) w 1993 r. i w 1999 r. nie była możliwa z powodu zbyt małej liczby obserwacji z uwzględnieniem głębokości ułożenia przewodów. Jedynie analiza danych z 1996 r. wykazała, że średnie koszty naprawy złączy rurociągów ułożonych na głębokości większej niż 2 m p.p.t. ( $K_{nu\ h>2}$ ) były wyższe od kosztów naprawy dla głębokości do 2 m ( $K_{nu\ h\leq 2}$ ). Dla rurociągów o średnicach 80–800 mm stwierdzono, że  $K_{nu\ h>2} = (1,0-1,60)K_{nu\ h\leq 2}$ .



Rys. 5.2. Jednostkowe koszty naprawy uszkodzeń złączy ( $K_{nu}$ ) w zależności od średnicy rurociągów w czasie obserwacji  
 Fig. 5.2. Unit costs of damage repair for pipe connections ( $K_{nu}$ ), recorded over the period of observations and related to pipe diameter

W okresie prowadzonych badań wystąpił znaczący wzrost kosztów naprawy uszkodzeń złączy rur (rys. 5.2). Szczegółowa analiza wykazała, że głównym tego powodem były wysokie wskaźniki cen produkcji budowlano-montażowej (tj. inflacja), zwłaszcza w pierwszej połowie lat 90. Do oceny wpływu inflacji na wzrost kosztów

naprawy złączy rurociągów wykorzystano dane o kosztach uzyskane z obserwacji i obliczone ze wzorów (5.1)–(5.3) (tab. 5.3, kolumny 2, 6, 10) oraz dane o wskaźnikach cen według GUS (tab. 5.1). Na tej podstawie obliczono wartości kosztów naprawy złączy z uwzględnieniem (potrąceniem) wskaźników cen, które odniesiono do poprzedniego roku badań. Uzyskane w ten sposób wartości kosztów w 1993 r., 1996 r. i 1999 r. (tab. 5.3, kolumny 3, 7, 11) były odpowiednio 2,15-, 1,74- i 1,40-krotnie mniejsze od kosztów wynikających z obserwacji i rosły liniowo wraz ze wzrostem średnicy przewodów według następujących zależności (współczynnik korelacji  $R \approx 1$ ) w 1993 r.:

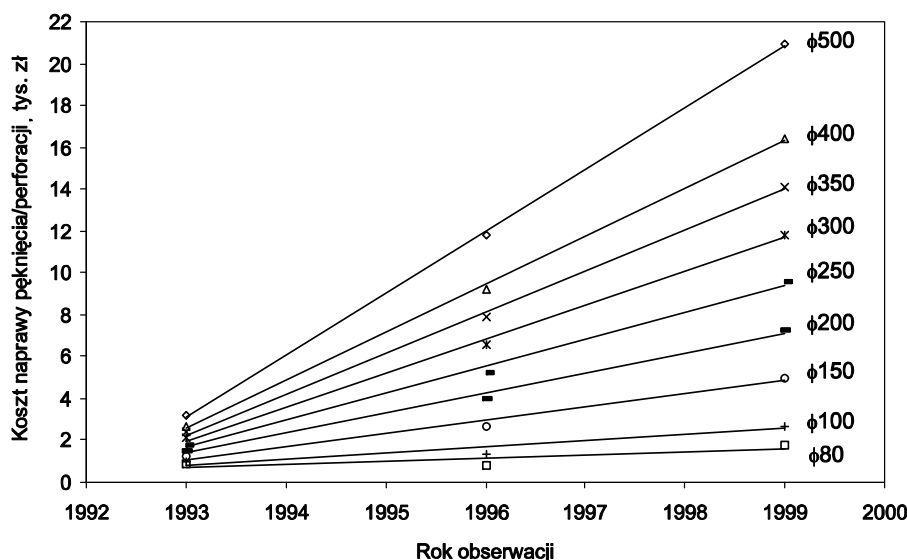
$$K_{nu} = 2,09054 \cdot d + 44,12, \quad d = 100\text{--}600 \text{ mm} \quad (5.4)$$

w 1996 r.:

$$K_{nu} = 8,483 \cdot d - 252,439, \quad d = 80\text{--}1200 \text{ mm} \quad (5.5)$$

w 1999 r.:

$$K_{nu} = 14,833 \cdot d, \quad d = 80\text{--}600 \text{ mm} \quad (5.6)$$



Rys. 5.3. Jednostkowe koszty naprawy pęknięć lub perforacji ( $K_{np}$ ) w zależności od średnicy rurociągów w czasie obserwacji

Fig. 5.3. Unit costs of crack or perforation repair ( $K_{np}$ ), recorded over the period of observations and related to pipe diameter

Następnie określono tendencje zmian kosztów naprawy rurociągów podczas obserwacji. Stwierdzono liniowy wzrost kosztów naprawy w czasie ( $A = 1993, 1996$  i  $1999$ ) zarówno w wypadku kosztów uzyskanych z badań (wyniki obliczeń parametrów

Tabela 5.4. Parametry funkcji opisujących zmiany jednostkowych kosztów naprawy uszkodzeń podczas obserwacji  
 Table 5.4. Parameters of the functions describing the variations in the unit costs of pipe damage repair during observation

Postać zależności: $K_n = a + b(A - 1992)$			Badany przedział: $A = 1993-1999$				
Wartość krytyczna współczynnika korelacji [130]: $R_{kr} = 0,99692$ dla $\alpha = 0,05$ ; $R_{kr} = 0,98769$ dla $\alpha = 0,1$							
Średnica mm	Rodzaj naprawy: złącza $K_{nu}$ pęknięcia $K_{np}$	Parametry funkcji dla kosztów z obserwacji w 1993 r., 1996 r., 1999 r.			Parametry funkcji dla kosztów po potrąceniu inflacji		
		$a$	$b$	$r$	$a$	$b$	$r$
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>RUROCIĄGI</b>							
80	$K_{nu}$	148,66	201	0,957149	- 42,33	162,5	0,951668
	$K_{np}$	543,33	154,667	0,857117	134,66	146,1667	0,906153
100	$K_{nu}$	198,33	255,333	0,979336	- 42,66	205	0,968911
	$K_{np}$	525,33	288,1667	0,953646	69,33	246,1667	0,953031
125	$K_{nu}$	261,33	323	0,991441	0	250,2424	0,979422
	$K_{np}$	500,66	455,5	0,981515	- 13	371,5	0,971325
150	$K_{nu}$	323,33	390,833	0,996615	- 43,66	311,1667	0,986193
	$K_{np}$	477,66	622,5	0,990481	- 95	496,667	0,978954
175	$K_{nu}$	385,33	458,667	0,998857	- 44,33	364,333	0,989982
	$K_{np}$	453,66	789,667	0,994376	- 177,33	621,833	0,983110
200	$K_{nu}$	444,33	526,33	0,999751	- 12	400,667	0,994463
	$K_{np}$	430,33	956,667	0,996348	- 259,66	747	0,985512
250	$K_{nu}$	573	662	0,999914	- 46,33	523,5	0,995127
	$K_{np}$	382,66	1291	0,998200	- 423,66	997,333	0,988322
300	$K_{nu}$	698	797,5	0,999332	- 48,33	629,833	0,996651
	$K_{np}$	335,66	1625,1667	0,998997	- 587,33	1247,667	0,989888
350	$K_{nu}$	822,66	933,1667	0,998592	- 49	736	0,997571
	$K_{np}$	288,66	1959,5	0,999397	- 752	1498,1667	0,990882
400	$K_{nu}$	947,66	1068,667	0,997858	- 50,66	842,1667	0,998164
	$K_{np}$	241,33	2293,667	0,999616	- 915,667	1748,333	0,991543
500	$K_{nu}$	1196,33	1340	0,996584	- 53,667	1054,667	0,998841
	$K_{np}$	146	2962,1667	0,999829	- 1245	2249,17	0,992375
600	$K_{nu}$	1447,33	1610,833	0,995581	- 55,33	1266,833	0,999205
<b>ARMATURA</b>							
Naprawa zasuw $K_{ZN}$		- 103,33	428,333	0,990132	- 246	323,833	0,977092
Wymiana zasuw $K_{ZW}$	$\phi$ 80	- 227,33	639,5	0,970773	- 416,33	485,333	0,958509
	$\phi$ 100	- 187,33	693,333	0,972426	- 425,33	528,1667	0,960184
	$\phi$ 125	- 119,66	766,333	0,974547	- 432	587	0,962391
	$\phi$ 150	- 26	845,833	0,976663	- 429,66	651,667	0,964510
	$\phi$ 200	262	1026,833	0,980743	- 393,66	801,833	0,968877
	$\phi$ 250	747	1238,333	0,984692	- 286,33	982,833	0,973167
Naprawa hydrantów $K_{HN}$		1,33	433,333	0,998935	- 182,66	326,1667	0,997182
Wymiana hydr. $K_{HW}$		201,33	471	0,999997	- 121,66	364,5	0,993880

Tabela 5.5. Jednostkowe koszty naprawy uszkodzeń rurociągów oraz naprawy i wymiany armatury określone z zależności opisujących zmiany kosztów naprawy podczas obserwacji  
 Table 5.5. Unit costs of pipe damage repair, as well as those of the repair and exchange of fittings, derived from the relations describing the variations in the repair costs in the course of observation

Średnica mm	Rodzaj naprawy: złącza $K_{nu}$ pęknięcia $K_{np}$	Koszt naprawy dla danych z obserwacji, zł				Koszt naprawy po potrąceniu inflacji zł			
		1993 r.	1996 r.	1999 r.	prognoza w 2002 r.	1993 r.	1996 r.	1999 r.	prognoza w 2002 r.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>RUROCIĄGI</b>									
80	$K_{nu}$	350	953	1557	2159	120	608	1095	1583
	$K_{np}$	698	1162	1626	2090	281	719	1158	1596
100	$K_{nu}$	454	1220	1986	2752	162	777	1392	2007
	$K_{np}$	813	1678	2542	3407	315	1054	1792	2531
125	$K_{nu}$	584	1553	2522	3491	250	1001	1752	2502
	$K_{np}$	956	2323	3689	5056	358	1473	2587	3702
150	$K_{nu}$	714	1887	3059	4232	267	1201	2134	3068
	$K_{np}$	1100	2968	4835	6703	402	1892	3382	4872
175	$K_{nu}$	844	2220	3596	4972	320	1413	2506	3599
	$K_{np}$	1243	3612	5981	8350	444	2310	4175	6041
200	$K_{nu}$	975	2554	4133	5712	389	1591	2793	3995
	$K_{np}$	1387	4257	7127	9997	487	2728	4969	7210
250	$K_{nu}$	1235	3221	5207	7193	477	2047	3618	5187
	$K_{np}$	1674	5547	9420	13293	574	3566	6558	9549
300	$K_{nu}$	1495	3888	6280	8673	581	2471	4360	6250
	$K_{np}$	1960	6836	11711	16587	660	4403	8146	11889
350	$K_{nu}$	1756	4555	7355	10154	687	2895	5103	7311
	$K_{np}$	2248	8127	14005	19884	746	5241	9735	14230
400	$K_{nu}$	2016	5222	8428	11634	791	3318	5844	8371
	$K_{np}$	2535	9416	16297	23178	833	6078	11323	16568
500	$K_{nu}$	2536	6556	10576	14596	1001	4165	7329	10493
	$K_{np}$	3108	11995	20881	29768	1004	7752	14499	21247
600	$K_{nu}$	3058	7891	12723	17556	1211	5012	8812	12613
<b>ARMATURA</b>									
Naprawa zasuw $K_{ZN}$		325	1610	2895	4180	78	1049	2021	2992
Wymiana zasuw $K_{ZW}$	φ 80	412	2331	4249	6168	69	1525	2981	4437
	φ 100	506	2586	4666	6746	103	1687	3272	4856
	φ 125	647	2946	5245	7544	155	1916	3677	5438
	φ 150	820	3357	5895	8432	222	2177	4132	6087
	φ 200	1289	4369	7450	10530	408	2814	5219	7625
	φ 250	1985	5700	9415	13130	696	3645	6593	9542
Naprawa hydrantów $K_{HN}$		435	1735	3035	4335	143	1122	2100	3079
Wymiana hydr. $K_{HW}$		672	2085	3498	4911	243	1336	2450	3523

funkcji zestawiono w tab. 5.4, kol. 3–5), jak i kosztów po potrąceniu inflacji (tab. 5.4, kol. 6–8). Na podstawie określonych w ten sposób kosztów naprawy w poszczególnych latach (tab. 5.5) obliczono wzrost kosztów naprawy oraz udział inflacji w przyroście kosztów w okresie badań w odniesieniu do poszczególnych średnic rurociągów. Stwierdzono, że w latach 1993–1999 średni wzrost kosztów naprawy uszkodzeń złączy (niezależnie od średnicy przewodów) wynosił 4,27 i był prawie dwukrotnie większy od wzrostu cen produkcji wynoszącego 2,44 (tab. 5.1). Wzrost kosztów naprawy złączy w tym okresie spowodowany był w ok. 70% inflacją, a w ok. 30% prawdopodobnie większym wzrostem kosztów materiałów i usług związanych z naprawą elementów sieci wodociągowej niż uwzględnianym przez GUS wzrostem cen „reprezentantów robót realizowanych przez dobrane w sposób celowy podmioty gospodarcze zaliczane do sekcji Budownictwo” [105].

**Średni jednostkowy koszt naprawy pęknięcia lub perforacji ( $K_{np}$ )** rósł wraz ze wzrostem średnicy ( $d$ ) rurociągów (rys. 5.1), niezależnie od głębokości ich ułożenia, według zależności:

w 1993 r.:

$$K_{np} = 5,5792 \cdot d + 413,11, \quad d = 80\text{--}400 \text{ mm} \quad (R = 0,8564; R_{kr} = 0,5822) \quad (5.7)$$

w 1996 r.:

$$K_{np} = 26,11 \cdot d - 1247,90, \quad d = 80\text{--}500 \text{ mm} \quad (R = 0,9398; R_{kr} = 0,5494) \quad (5.8)$$

w 1999 r.:

$$K_{np} = 45,689 \cdot d - 1868,4, \quad d = 80\text{--}600 \text{ mm} \quad (R = 0,9741; R_{kr} = 0,5822) \quad (5.9)$$

Dla wspólnego (w trzech latach badań) zakresu średnic przewodów koszty ( $K_{np}$ ) naprawy rurociągów o średnicy 400 mm były wielokrotnie większe od kosztów naprawy rurociągów o średnicy 80 mm i wynosiły: w 1993 r.  $K_{np400} = 3,1K_{np80}$ , w 1996 r.  $K_{np400} = 10,9K_{np80}$ , w 1999 r.  $K_{np400} = 9,2K_{np80}$ . Koszt materiałów użytych do naprawy pęknięć poprzecznych czy wżerów korozyjnych rur, tj. nasuwek naprawczych, wynosił średnio 5–15% kosztów całkowitych w 1996 r. i 3–7% w 1999 r. W wypadku pęknięć podłużnych, których naprawa polegała na wymianie uszkodzonego odcinka rury i założeniu dwóch nasuwek, koszt materiałów był większy i stanowił średnio 25–40% całkowitych kosztów ( $K_{np}$ ) w 1996 r. oraz 7–35% w 1999 r. Koszt wykopów stanowił 20–60% kosztów całkowitych.

Powyższa analiza dotyczyła kosztów naprawy wszystkich uszkodzeń wskutek pęknięć i perforacji rurociągów, niezależnie od głębokości ich ułożenia. Teoretycznie, wraz ze wzrostem głębokości ułożenia rośnie koszt naprawy przewodu o określonej średnicy, gdyż rosną koszty wykopów, które mają decydujący wpływ na koszty ogólne. Potwierdziły to częściowo dane z obserwacji w 1999 r. (tab. 5.2, kol. 7 i 10), z których wynika, że w wypadku większości średnic rurociągów koszty naprawy pęknięć były większe dla głębokości ułożenia przewodów  $h > 2$  m p.p.t. niż dla  $h \leq 2$  m p.p.t.

Nie uzyskano jednak istotnych korelacji między kosztami a głębokością ułożenia rurociągów, gdyż nie dysponowano odpowiednią liczbą obserwacji, po uwzględnieniu średnicy, rodzaju uszkodzenia i zagłębienia przewodów, a także w niektórych przypadkach koszty naprawy były większe przy mniejszym zagłębieniu. Dotyczyło to uszkodzeń, których usunięcie wymagało dodatkowych kosztów związanych na przykład z kilkakrotnym poszukiwaniem miejsca uszkodzenia lub zamrożeniem gruntu.

Na koszt naprawy rurociągów ma także wpływ rodzaj pęknięcia, tzn. czy jest ono poprzeczne czy podłużne. Z powodów wymienionych wyżej, istotne zależności ( $R_{kr} = 0,5822$ ) stwierdzono jedynie dla obserwacji z 1999 r. (tab. 5.2, kol. 11 i 12):

– koszt naprawy pęknięcia poprzecznego lub perforacji

$$K_{np} = 2163 + 15,32 \cdot d, \quad d = 80\text{--}300 \text{ mm} \quad (R = 0,6173) \quad (5.10)$$

– koszt naprawy pęknięcia podłużnego

$$K_{np} = 1808 + 37,2967 \cdot d, \quad d = 80\text{--}300 \text{ mm} \quad (R = 0,6683) \quad (5.11)$$

Porównując wartości obliczone z tych wzorów, można stwierdzić, że niezależnie od głębokości ułożenia koszty naprawy pęknięć podłużnych rurociągów o średnicach 80–300 mm były 1,4–2-krotnie większe od kosztów naprawy pęknięć poprzecznych (lub perforacji) rur, głównie z powodu konieczności wykonania większego wykopu.

W okresie objętym badaniami wielokrotnie wzrosły koszty naprawy pęknięć rurociągów, niezależnie od głębokości ich ułożenia oraz rodzaju pęknięcia (rys. 5.3). Decydujący wpływ na to miała inflacja. Obliczone w każdym roku obserwacji koszty naprawy ( $K_{np}$ , zł) (tab. 5.3, kol. 5, 9, 13), po uwzględnieniu (potrąceniu) wzrostu cen (z tab. 5.1 – odniesionego do poprzedniego roku badań), były znacznie mniejsze od uzyskanych z obserwacji (tab. 5.3, kol. 4, 8, 12) i rosły liniowo wraz ze wzrostem średnicy ( $d$ , mm) rurociągów według zależności ( $R \approx 1$ )

w 1993 r.:

$$K_{np} = 2,5932 \cdot d + 191,63, \quad d = 80\text{--}400 \text{ mm} \quad (5.12)$$

w 1996 r.:

$$K_{np} = 15,004 \cdot d - 717,38, \quad d = 80\text{--}500 \text{ mm} \quad (5.13)$$

w 1999 r.:

$$K_{np} = 32,64 \cdot d - 1334,83, \quad d = 80\text{--}600 \text{ mm} \quad (5.14)$$

Z analizy zmian zachodzących w czasie badań (w latach 1993–1999) wartości kosztów  $K_{np}$  uzyskanych z obserwacji (tab. 5.5, kol. 3–5; rys. 5.3) oraz obliczonych z potrąceniem inflacji (tab. 5.5, kol. 7–9) wynika, że:

- wzrost kosztów naprawy pęknięć rurociągów o średnicy 400 mm wynosił 6,4 i był prawie 3-krotnie większy od wzrostu kosztów naprawy rurociągów o średnicy 80 mm, wynoszącego 2,3,

- wzrost kosztów naprawy pęknięć rurociągów był prawie w każdym przypadku większy od wzrostu cen według GUS, który w latach 1993–1999 wynosił 2,44,

• przyrost kosztów naprawy pęknięć rurociągów w badanym okresie spowodowany był w 98% dla rur o średnicy 80 mm i w 60% dla rur o średnicy 400 mm wzrostem wskaźników cen, czyli inflacją,

• analizując zmiany struktury udziału inflacji oraz innych czynników we wzroście kosztów naprawy w latach 1993–1996 i 1996–1999, można zauważyć zwiększenie udziału inflacji (pomimo spadku jej wielkości) w przyroście kosztów naprawy omawianych uszkodzeń rurociągów.

Podsumowując analizę kosztów naprawy rurociągów, należy stwierdzić, że zależały one przede wszystkim od rodzaju uszkodzenia, średnicy i zagłębienia przewodów oraz od inflacji.

Średnie koszty naprawy pęknięć rurociągów we Wrocławiu były większe od kosztów naprawy uszkodzeń złączy i dla przewodów o średnicach 100–500 mm wynosiły  $K_{np} = (1,3-2,0)K_{nu}$ .

### 5.2.2. Koszty naprawy uszkodzeń armatury przewodów

W wypadku uszkodzeń armatury wyróżniono:

- koszt naprawy  $K_{ZN}$  i wymiany  $K_{ZW}$  zasuwy,
- koszt naprawy  $K_{HN}$  i wymiany  $K_{HW}$  hydrantu.

Tabela 5.6. Średnie jednostkowe koszty naprawy i wymiany armatury przewodów we Wrocławiu w 1993 r., 1996 r. i 1999 r.

Table 5.6. Average unit costs of the repair and exchange of fittings for the city of Wrocław in 1993, 1996 and 1999

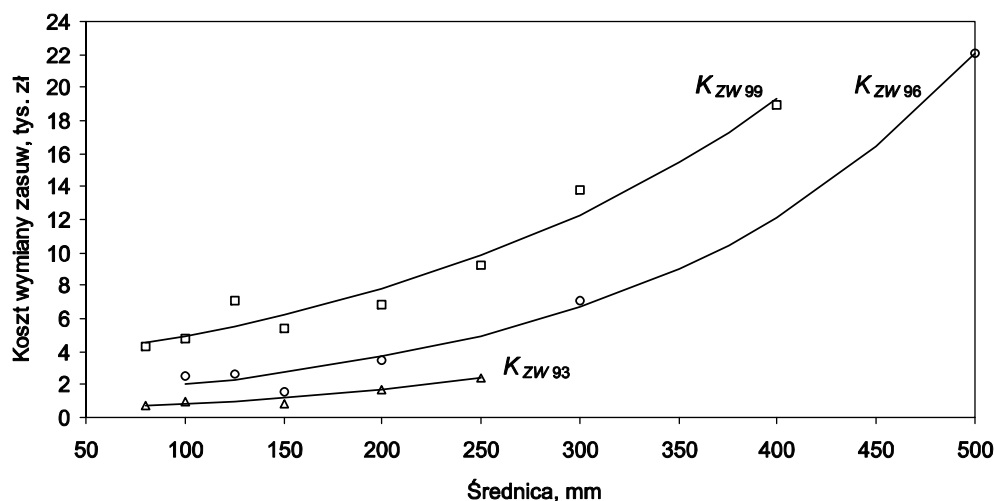
Rok	Sposób usunięcia uszkodzenia	Jednostkowy koszt naprawy $K_{ZN}$ lub wymiany $K_{ZW}$ zasuwy zł								Koszt naprawy $K_{HN}$ lub wymiany $K_{HW}$ hydrantów zł	
		φ80	φ100	φ150	φ200	φ250	φ300	φ400	φ500		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1993	Naprawa	b.d.	383–469; średnio 430 (200) <sup>1)</sup>							b.d.	400 (186) <sup>1)</sup>
	Wymiana (wg (5.15))	686	794	1142	1643	2365	b. d.	b. d.	b.d.	674 (313)	
	Wymiana (wg (5.18))	319	369	531	763	1099	b. d.	b. d.	b.d.	–	
1996	Naprawa	b.d.	895–2392; średnio 1400 (805)							b.d.	1804 (1037)
	Wymiana (wg (5.16))	(1783)	2010	2713	3661	4941	6670	12 148	22132	2082 (1196)	
	Wymiana (wg (5.19))	(1025)	1155	1559	2104	2840	3833	6982	12719	–	
1999	Naprawa	2006–4875; średnio 3000 (2143)								b.d.	~3000 (2143)
	Wymiana (wg (5.17))	4523	4954	6217	7804	9795	12 294	19 367	b.d.	3500 (2500)	
	Wymiana (wg (5.20))	3231	3538	4441	5574	6996	8781	13 833	b.d.	–	

b.d. – brak danych z obserwacji

<sup>1)</sup> wartości w nawiasach oznaczają koszty po uwzględnieniu inflacji



Jednostkowy koszt naprawy zasuw ( $K_{ZN}$ ) o średnicach 80–400 mm w poszczególnych latach badań w niewielkim stopniu zależał od ich średnicy (brak istotnej zależności) i wynosił średnio 430 zł, 1400 zł i 3000 zł, odpowiednio w 1993 r., 1996 r. i 1999 r. (tab. 5.6). Wzrost (7-krotny) kosztów naprawy zasuw w czasie badań był prawie 3-krotnie większy od wzrostu (2,44) cen produkcji budowlano-montażowej, a udział inflacji w przyroście kosztów naprawy stanowił 56%. Koszt materiałów użytych do naprawy zasuw stanowił od ułamka % do 10% całkowitych kosztów ( $K_{ZN}$ ).



Rys. 5.4. Jednostkowe koszty wymiany zasuw ( $K_{ZW}$ ) z obserwacji we Wrocławiu w 1993 r., 1996 r. i 1999 r.  
Fig. 5.4. Unit costs of revalving ( $K_{ZW}$ ), recorded in Wrocław over the period of observations in 1993, 1996 and 1999

Jednostkowy koszt wymiany zasuw ( $K_{ZW}$ , zł) w poszczególnych latach obserwacji rósł wraz ze wzrostem średnicy ( $d$ , mm) według funkcji (rys. 5.4) w 1993 r.:

$$K_{ZW} = \exp(5,94861 + 0,00728 \cdot d), \quad d = 80\text{--}250 \text{ mm} \quad (R = 0,9664; R_{kr} = 0,8054) \quad (5.15)$$

w 1996 r.:

$$K_{ZW} = \exp(7,00609 + 0,005997 \cdot d), \quad d = 100\text{--}500 \text{ mm} \quad (R = 0,9969; R_{kr} = 0,7293) \quad (5.16)$$

w 1999 r.:

$$K_{ZW} = \exp(8,05338 + 0,004545 \cdot d), \quad d = 80\text{--}400 \text{ mm} \quad (R = 0,9818; R_{kr} = 0,6215) \quad (5.17)$$

Koszt wymiany zasuw o średnicy 250 mm był 2–3,5-krotnie większy od kosztu wymiany dla średnicy 80 mm. Po uwzględnieniu wzrostu cen (2,152, 1,74, 1,40 odpowiednio w 1993 r., 1996 r. i 1999 r. – tab. 5.1) koszty wymiany były mniejsze (tab. 5.6.) i rosły wykładniczo wraz ze zwiększaniem średnicy zasuw według zależności ( $R \approx 1$ )

w 1993 r.:

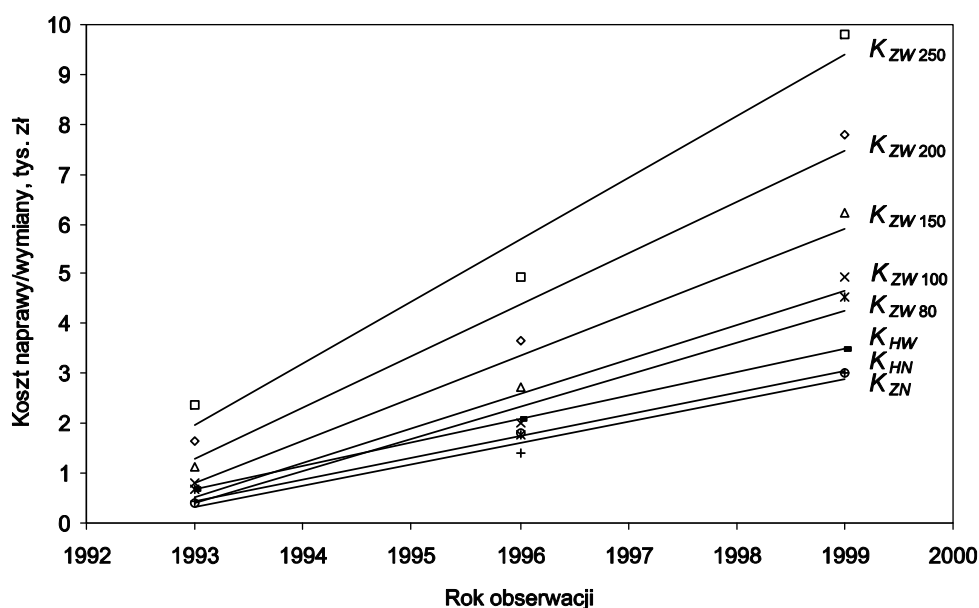
$$K_{ZW} = \exp(5,182831 + 0,00728 \cdot d), \quad d = 80\text{--}250 \text{ mm} \quad (5.18)$$

w 1996 r.:

$$K_{ZW} = \exp(6,452219 + 0,005997 \cdot d), \quad d = 100\text{--}500 \text{ mm} \quad (5.19)$$

w 1999 r.:

$$K_{ZW} = \exp(7,716912 + 0,004545 \cdot d), \quad d = 80\text{--}400 \text{ mm} \quad (5.20)$$



Rys. 5.5. Jednostkowe koszty naprawy i wymiany zasuw ( $K_{ZN}$ ,  $K_{ZW}$ ) oraz hydrantów ( $K_{HN}$ ,  $K_{HW}$ ) w czasie obserwacji

Fig. 5.5. Unit costs of valve repair and revalving ( $K_{ZN}$ ,  $K_{ZW}$ ), as well as hydrant repair ( $K_{HN}$ ,  $K_{HW}$ ), recorded in Wrocław over the period of observations

Koszty wymiany zasuw o średnicach 80–250 mm w badanym okresie wzrosły 6,6–4,1-krotnie (tab. 5.5, rys. 5.5), głównie z powodu wysokiej inflacji, której udział w przyroście kosztów  $K_{ZW}$  stanowił 54–66% oraz wysokich kosztów zakupu zasuw, zwłaszcza od zagranicznych producentów. Koszt materiałów (przede wszystkim zasuw) stanowił 20–50% (dla średnic 80–400 mm) całkowitych kosztów wymiany zasuw.

Jednostkowy koszt naprawy hydrantów ( $K_{HN}$ ) był porównywalny z kosztem naprawy zasuw w danym roku obserwacji i wynosił średnio 400 zł, 1800 zł, 3000 zł, odpowiednio w 1993 r., 1996 r. i 1999 r. (tab. 5.6). W okresie badań koszt  $K_{HN}$  wzrósł ponad 7-krotnie (tab. 5.5, rys. 5.5). Udział inflacji zarówno we wzroście kosztów naprawy, jak i wymiany hydrantów wynosił ok. 60%.

Jednostkowy koszty wymiany hydrantów ( $K_{HW}$ ) był większy od kosztu naprawy średnio o wartość (cenę) hydrantu i wynosił około 670 zł, 2080 zł, 3500 zł, odpowiednio w 1993 r., 1996 r. i 1999 r. (tab. 5.6). Koszt materiałów stanowił średnio 24% całkowitych kosztów wymiany hydrantów.

### 5.3. Metodyka określania wskaźników strumienia kosztów naprawy uszkodzeń przewodów

Metodyka określenia wskaźników strumienia kosztów naprawy uszkodzeń przewodów, zaproponowana w pracach [25, 44], a obecnie częściowo zmodyfikowana, polega na określeniu wskaźnika  $\kappa$ , nazwanego wskaźnikiem strumienia kosztów naprawy, który oznacza koszt naprawy uszkodzeń przewodów w przeliczeniu na jednostkę długości sieci w jednostce czasu, i jest wyrażany w zł/(km·a). Wskaźnik ten jest iloczynem intensywności uszkodzeń ( $\lambda$ ) i kosztu naprawy ( $K_n$ ) określonego rodzaju uszkodzenia rozważanych elementów.

Znając intensywność uszkodzeń oraz jednostkowe koszty naprawy uszkodzeń, według ich rodzaju i średnic przewodów, można określić (w odniesieniu do jednego roku) strumień kosztów naprawy przewodu o średnicy  $d$  i długości  $l$

$$\kappa = \kappa_r + \kappa_a \quad (5.21)$$

przy czym:

$\kappa_r$  oznacza strumień kosztów naprawy rurociągu, który jest sumą wskaźników usuwania uszkodzeń złączy  $\kappa_u$  oraz pęknięć i perforacji rury  $\kappa_p$ ,

$\kappa_a$  określa strumień kosztów usuwania uszkodzeń armatury przewodu, tj. głównie zasuw  $\kappa_z$  i hydrantów  $\kappa_H$ ,

zatem

$$\kappa = \kappa_r + \kappa_a = \kappa_u + \kappa_p + \kappa_z + \kappa_H \quad (5.22)$$

jednocześnie

$$\kappa_u = \lambda_u K_{nu} \quad (5.23)$$

$$\kappa_p = \lambda_{po} K_{np} \quad (5.24)$$

$$\kappa_z = N_z (\lambda_{zN} K_{zN} + \lambda_{zW} K_{zW}) / l \quad (5.25)$$

$$\kappa_H = N_H (\lambda_{HN} K_{HN} + \lambda_{HW} K_{HW}) / l \quad (5.26)$$

( $N_z, N_H$  – ogólna liczba zasuw i hydrantów na określonym odcinku przewodu).

Całkowity roczny koszt  $K_i$  (zł/a) naprawy uszkodzeń przewodu  $i$ -tego o średnicy  $d$  i długości  $l$  (km) wyniesie

$$K_i = K_{ri} + K_{ai} = \kappa_{ri} l_i + \kappa_{ai} l_i = \kappa_i l_i \quad (5.27)$$

Całkowity ogólny koszt  $K_c$  (zł/a) naprawy uszkodzeń sieci zbudowanej z  $n$  odcinków przewodów o różnych średnicach wynosi

$$K_c = \sum_{i=1}^n K_i = \sum_{i=1}^n K_{ri} + \sum_{i=1}^n K_{ai} = K_r + K_a \quad (5.28)$$

Średnie wartości wskaźników strumienia kosztów ( $\kappa_s$ , zł/(km·a)) naprawy uszkodzeń sieci wodociągowej ogółem określają zależności:

– wskaźnik strumienia kosztów naprawy wszystkich uszkodzeń

$$\kappa_s = K_c / \sum_{i=1}^n l_i \quad (5.29)$$

– strumień kosztów naprawy uszkodzeń złączy

$$\kappa_{su} = \sum_{i=1}^n \kappa_{ui} l_i / \sum_{i=1}^n l_i \quad (5.30)$$

– strumień kosztów naprawy pęknięć i perforacji rur

$$\kappa_{sp} = \sum_{i=1}^n \kappa_{pi} l_i / \sum_{i=1}^n l_i \quad (5.31)$$

– strumień kosztów naprawy uszkodzeń zasuw

$$\kappa_{sZ} = \sum_{i=1}^n \kappa_{Zi} l_i / \sum_{i=1}^n l_i \quad (5.32)$$

– strumień kosztów naprawy uszkodzeń hydrantów

$$\kappa_{sH} = \sum_{i=1}^n \kappa_{Hi} l_i / \sum_{i=1}^n l_i \quad (5.33)$$

Określenie wskaźników intensywności uszkodzeń armatury ( $\lambda_Z$ ,  $\lambda_H$ ), zarówno dla poszczególnych przewodów, jak i dla całej sieci, jest możliwe tylko wtedy, gdy istnieją dane o ogólnej liczbie zainstalowanych zasuw i hydrantów. W przeciwnym razie można określić jedynie średnie wskaźniki  $\kappa_s$  naprawy armatury w odniesieniu do całej sieci przewodów o długości  $L$ , obliczając najpierw średnie roczne koszty naprawy armatury

$$K_Z = \left( a_{ZN} K_{ZN} + \sum_{i=1}^n (a_{ZWi} K_{ZWi}) \right) / \Delta t, \quad \text{zł/a} \quad (5.34)$$

$$K_H = (a_{HN} K_{HN} + a_{HW} K_{HW}) / \Delta t, \text{ zł/a} \quad (5.35)$$

( $a_{ZN}$ ,  $a_{ZW}$  – liczba naprawionych i wymienionych zasuw w latach  $\Delta t$ ,  
 $a_{HN}$ ,  $a_{HW}$  – liczba naprawionych i wymienionych hydrantów w latach  $\Delta t$ ),  
 a następnie średnie wskaźniki strumienia kosztów naprawy zasuw

$$\kappa_{sZ} = K_Z / L \quad (5.36)$$

hydrantów

$$\kappa_{sH} = K_H / L \quad (5.37)$$

armatury ogółem

$$\kappa_{sa} = \kappa_{sZ} + \kappa_{sH} \quad (5.38)$$

#### 5.4. Analiza wskaźników kosztów naprawy uszkodzeń sieci wodociągowych

Znajomość intensywności uszkodzeń rurociągów i armatury wodociągowej oraz jednostkowych kosztów naprawy różnych rodzajów uszkodzeń przewodów umożliwia określenie wskaźników kosztów naprawy uszkodzeń całej sieci lub jej części.

Przeprowadzona analiza ma głównie na celu:

1. Ocenę wpływu wysokości ciśnienia w badanych systemach wodociągowych na uszkadzalność i koszty naprawy sieci.
2. Zbadanie tendencji zmian wskaźników uszkodzeń i wskaźników kosztów naprawy oraz opracowanie metody prognozowania kosztów naprawy sieci z kilkuletnim wyprzedzeniem na potrzeby planowania budżetu przedsiębiorstw wodociągowych.

##### 5.4.1. Założenie stałych jednostkowych kosztów naprawy uszkodzeń

Oceny wpływu zmiany wysokości tłoczenia pompowni, a więc i ciśnienia w sieci wodociągowej, na koszty naprawy uszkodzeń przewodów w Brzegu, Kłodzku, Oleśnicy i w wybranych rejonach Wrocławia dokonano przez porównanie średnich wartości wskaźnika kosztów naprawy uszkodzeń ( $\kappa_s$ ) w I okresie eksploatacji sieci, w którym utrzymywane było wysokie ciśnienie, ze średnimi wartościami tego wskaźnika w II okresie eksploatacji, tj. w warunkach obniżonego ciśnienia.

Założenia wyjściowe przyjęte do obliczeń wskaźników strumienia kosztów naprawy:

- intensywność uszkodzeń rurociągów ( $\lambda$ ), z uwzględnieniem ich średnicy i rodzaju uszkodzeń, przyjęto równą wartościom średnim w poszczególnych okresach eksploatacji z tabeli 4.16,

- liczbę uszkodzeń armatury (ze względu na brak możliwości oceny intensywności uszkodzeń w większości analizowanych miast) w dwóch okresach badań przyjęto z tabeli 4.19,

- jednostkowe koszty naprawy uszkodzeń rurociągów ( $K_n$ ) oraz naprawy ( $K_N$ ) i wymiany ( $K_W$ ) armatury, w rozbiciu na średnice i rodzaj uszkodzeń, przyjęto stałe w obydwu okresach eksploatacji badanych systemów i równe wartościom z obserwacji we Wrocławiu w 1999 r. (dla rurociągów – z tab. 5.3, kol. 10 i 12; dla armatury – z tab. 5.6), ze względu na brak rejestracji kosztów w pozostałych miastach objętych programem badań.

Przykładowe obliczenia wskaźników kosztów naprawy rurociągów, według metodyki przedstawionej w rozdziale 5.3, dla sieci wodociągowej rejonu 1 we Wrocławiu zawarto w tab. 5.7 w odniesieniu do I okresu badań i w tab. 5.8 w odniesieniu do II okresu. Natomiast wyniki obliczeń wartości wskaźnika kosztów naprawy rurociągów ( $\kappa_{sr}$ ) we wszystkich systemach wodociągowych zawarto w tab. 5.9, a dodatkowo dla armatury ( $\kappa_{sa}$ ) i przewodów ogółem ( $\kappa_s = \kappa_{sr} + \kappa_{sa}$ ) – w tab. 5.10.

Stwierdzono, że skutek znaczącego obniżenia ogólnej intensywności uszkodzeń rurociągów ( $\lambda$ ) (dzięki ograniczeniu nadwyżek ciśnienia i jego dobowych wahań) nastąpił także istotny spadek wartości średniego wskaźnika strumienia kosztów ich naprawy ( $\kappa_{sr}$ ) (tab. 5.9). Większy spadek wartości  $\kappa_{sr}$  niż wartości  $\lambda$  wynikał głównie z faktu, że w II okresie znacznemu ograniczeniu uległa uszkodzalność rurociągów o większych średnicach, których jednostkowy koszt naprawy był większy.

Można zatem stwierdzić, że zmniejszenie ciśnienia tłoczenia o 10–40% (rozdział 4.3.2.1.4.1) oraz jego wahań dobowych w badanych systemach dystrybucji wody spowodowało spadek intensywności uszkodzeń rurociągów o 30–58% oraz strumienia kosztów naprawy o 42–58% (tab. 5.9).

Na koszty naprawy sieci wodociągowej składają się także koszty naprawy uszkodzeń armatury. Mimo iż koszt naprawy jednego uszkodzenia zasuw czy hydrantu jest z reguły mniejszy od kosztu naprawy uszkodzenia rurociągu (zwłaszcza o dużej średnicy), to przy dużym udziale uszkodzeń armatury w ogólnej liczbie uszkodzeń sieci wpływ kosztów tych napraw może być znaczny. Przykładem może być Wrocław, gdzie uszkodzenia zasuw i hydrantów stanowiły 40–57% ogólnej liczby uszkodzeń przewodów, a wartość wskaźnika strumienia kosztów ( $\kappa_{sa}$ ) ich naprawy i wymiany wynosiła 27–55% wartości wskaźnika ogólnego. W pozostałych systemach wodociągowych wskaźnik  $\kappa_{sa}$  był niewielki i stanowił 7–15% wartości wskaźnika  $\kappa_s$  (tab. 5.10). Sieć wodociągowa we Wrocławiu (rejon 1 i 2) charakteryzowała się ponadto największymi wartościami wskaźnika  $\kappa_s$  spośród badanych systemów wodociągowych. Wynikało to z dużej intensywności uszkodzeń zarówno rurociągów (tab. 5.9), jak i armatury (tab. 5.10). Powyższą analizę przeprowadzono przy założeniu stałych w czasie kosztów naprawy poszczególnych rodzajów uszkodzeń przewodów.

Tabela 5.7. Średnie wartości intensywności uszkodzeń i wskaźników kosztów naprawy rurociągów (poziom kosztów z 1999 r.) w I okresie eksploatacji sieci wodociągowej rejonu I we Wrocławiu (100% żeliwo)  
Table 5.7. Average values of pipe failure rate and pipe repair cost indices (cost level of 1999) over period I of service for region 1 in the city of Wrocław (all pipes are made of cast iron)

d mm	L <sub>śr</sub> km	Jednostkowy koszt naprawy zł		Intensywność uszkodzeń uszk./(km·a)		Strumień kosztów naprawy zł/(km·a)			Średni roczny koszt naprawy uszkodzeń rurociągów zł/a		
		K <sub>nu</sub>	K <sub>np</sub>	λ <sub>u</sub>	λ <sub>po</sub>	κ <sub>u</sub>	κ <sub>p</sub>	κ <sub>r</sub>	K <sub>u</sub>	K <sub>p</sub>	K <sub>r</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
80	4,596	1661	1787	0	1,14	0	2037	2037	0	9363	9363
100	4,711	2077	2700	0,05	1,17	104	3159	3263	490	14882	15372
125	6,477	2596	3843	0,08	1,20	208	4612	4820	1347	29869	31216
150	3,820	3115	4985	0,52	0,65	1620	3240	4860	6188	12378	18566
175	3,019	3634	6127	0,33	2,32	1199	14215	15414	3620	42914	46534
200	1,360	3973	7269	0,74	0,18	2940	1308	4248	3998	1779	5777
225	0,754	4673	8412	0	1,66	0	13964	13964	0	10529	10529
300	3,655	6230	11838	0,48	0,20	2990	2368	5358	10928	8654	19582
400	2,505	8307	16407	0,50	0	4153	0	4153	10403	0	10403
500	9,914	10384	20976	0,58	0,10	6023	2098	8121	59712	20796	80508
Σ	40,811	–	–	–	–	–	–	–	96686	151164	247850
Średnio w roku		–	–	0,33	0,77	2369	3704	6073	–	–	–

Tabela 5.8. Średnie wartości intensywności uszkodzeń i wskaźników kosztów naprawy rurociągów (poziom kosztów z 1999 r.) w II okresie eksploatacji sieci wodociągowej rejonu I we Wrocławiu (100% żeliwo)  
Table 5.8. Average values of pipe failure rate and pipe repair cost indices (cost level of 1999) over period II of service for region 1 in the city of Wrocław (all pipes are made of cast iron)

d mm	L <sub>śr</sub> km	Jednostkowy koszt naprawy zł		Intensywność uszkodzeń uszk./(km·a)		Strumień kosztów naprawy zł/(km·a)			Średni roczny koszt naprawy uszkodzeń rurociągów zł/a		
		K <sub>nu</sub>	K <sub>np</sub>	λ <sub>u</sub>	λ <sub>po</sub>	κ <sub>u</sub>	κ <sub>p</sub>	κ <sub>r</sub>	K <sub>u</sub>	K <sub>p</sub>	K <sub>r</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
80	4,596	1661	1787	0	0,61	0	1090	1090	0	5010	5010
100	4,756	2077	2700	0,08	0,51	166	1377	1543	789	6549	7338
125	6,477	2596	3843	0,06	1,05	156	4035	4191	1010	26136	27146
150	3,999	3115	4985	0,50	0,20	1557	997	2554	6226	3987	10213
175	3,019	3634	6127	0,26	0,53	945	3247	4192	2853	9804	12657
200	1,360	4153	7269	0	0	0	0	0	0	0	0
225	0,754	4673	8412	0	0,53	0	4458	4458	0	3362	3362
300	3,655	6230	11838	0,55	0,11	3426	1302	4728	12522	4759	17281
400	2,505	8307	16407	0,32	0	2658	0	2658	6658	0	6658
500	9,914	10384	20976	0,40	0	4154	0	4154	41183	0	41183
Σ	41,035	–	–	–	–	–	–	–	71241	59607	130848
Średnio w roku		–	–	0,25	0,37	1736	1453	3189	–	–	–

Tabela 5.9. Średnie wartości intensywności uszkodzeń i wskaźników kosztów naprawy rurociągów ogółem (bez armatury) w dwóch okresach eksploatacji badanych sieci wodociagowych (poziom kosztów z 1999 r. we Wrocławiu)  
 Table 5.9. Average values of failure rate and pipe repair cost indices for all the pipelines irrespective of the material used (excluding fittings) over period I and period II of service (cost level of 1999 in Wrocław)

Miasto	Okres badań	Intensywność uszkodzeń uszk./km-a			Strumień kosztów naprawy zł/(km-a)			Całkowity roczny koszt naprawy uszkodzeń rurociągów, zł/a		
		złącza $\lambda_u$	pęknięcia $\lambda_{po}$	ogółem $\lambda$	złącza $\kappa_{su}$	pęknięcia $\kappa_{sp}$	ogółem $\kappa_{sr}$	złącza $K_u$	pęknięcia $K_p$	ogółem $K_r$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Brzeg	I (1991–VIII 1996)	0,06	0,24	0,30	206	1002	1208	14935	72741	87676
	II (IX 1996–2000)	0,05	0,16	0,21	176	528	704	13083	39362	52445
	stos. wartości II/I	0,83	0,67	0,70	0,85	0,53	0,58	0,87	0,54	0,60
Kłodzko	I (1992–VIII 1997)	0,05	0,28	0,33	174	1144	1318	11029	72530	83559
	II (IX 1997–1999)	0,02	0,18	0,20	78	680	758	5340	46407	51747
	stos. wartości II/I	0,40	0,64	0,61	0,45	0,59	0,57	0,48	0,64	0,62
Oleśnica	I (1981–1992)	0,64	0,24	0,88	2391	1332	3723	120709	67248	187957
	II (1993–2000)	0,14	0,23	0,37	581	974	1555	37900	63519	101419
	stos. wartości II/I	0,22	0,96	0,42	0,24	0,73	0,42	0,31	0,94	0,54
Wrocław rejon 1	I (1990–1994)	0,33	0,77	1,10	2369	3704	6073	96686	151164	247850
	II (1995–VI 1997)	0,25	0,37	0,62	1736	1453	3189	71241	59607	130848
	stos. wartości II/I	0,76	0,48	0,56	0,73	0,39	0,52	0,74	0,39	0,53
Wrocław rejon 2	I (1990–1994)	0,30	0,57	0,87	2253	2925	5178	77762	100974	178736
	II (1995–1998)	0,14	0,47	0,61	506	1841	2347	17806	64781	82587
	stos. wartości II/I	0,47	0,82	0,70	0,22	0,63	0,45	0,23	0,64	0,46
Opole	1996–2001	0,03	0,11	0,14	120	507	627	31393	133177	164570
Polkowice	I (1986–VIII 1994)	0,39	0,80	1,19	1518	4907	6425	6350	20528	26878
	cz. I (1991–VIII 1994)	0,39	1,24	1,63	1625	6861	8486	6798	28701	35499
	II (IX 1994–1999)	0,15	0,05	0,20	409	359	768	1557	1363	2920
	stos. wartości II/I	0,38	0,06	0,17	0,27	0,07	0,12	0,24	0,07	0,11
		0,38	0,04	0,12	0,25	0,05	0,09	0,23	0,05	0,08



Tabela 5.10. Liczba uszkodzeń i średni strumień kosztów naprawy rurociągów i armatury w dwóch okresach eksploatacji badanych sieci wodociagowych (poziom kosztów z 1999 r. we Wrocławiu)  
 Table 5.10. Number of failure events and average repair cost pattern for all pipelines and fittings, irrespective of the material used, over period I and period II (cost level of 1999 in Wrocław)

Miasto	Okres badań	Liczba uszkodzeń w okresie badań szt.			Średni strumień kosztów naprawy zł/(km·a)		
		rurociągi ( $u + p + o$ )	armatura ( $a_Z + a_H$ )	ogółem	rurociągi $\kappa_{sr}$	armatura $\kappa_{sa}$	ogółem $\kappa_s = \kappa_{sr} + \kappa_{sa}$
Brzeg	I	123 (91)	12 (9)	135	1208 (92)	107 (8)	1315
	II	68 (86)	11 (14)	79	704 (85)	120 (15)	824
Kłodzko	I	119 (88)	16 (12)	135	1318 (89)	155 (11)	1473
	II	32 (97)	1 (3)	33	758 (92)	68 (8)	826
Oleśnica	I	530	b.d.	–	3723	–	–
	II	191 (91)	18 (9)	209	1555 (93)	107 (7)	1662
Wrocław rejon 1	I	179 (60)	117 (40)	296	6073 (73)	2266 (27)	8339
	II	64 (45)	78 (55)	142	3189 (54)	2671 (46)	5860
Wrocław rejon 2	I	120 (43)	161 (57)	281	5178 (59)	3620 (41)	8798
	II	86 (44)	111 (56)	197	2347 (45)	2818 (55)	5165
Opole	1996–2001	228 (90)	26 (10)	254	627 (92)	54 (8)	681
Polkowice	1986–VIII 1994	43	b.d.	–	6425	–	–
	IX 1994–1999	4	b.d.	–	768	–	–

Wartości w nawiasach – udział w ogólnej liczbie uszkodzeń przewodów lub w ogólnym wskaźniku kosztów naprawy (%).

#### 5.4.2. Założenie zmiennych jednostkowych kosztów naprawy uszkodzeń

Ponieważ koszty naprawy uszkodzeń zmieniają się w czasie, więc w celu oceny i porównania zmian intensywności uszkodzeń i rzeczywistych wskaźników kosztów naprawy sieci w czasie obserwacji, obliczono wartości odpowiednich wskaźników ( $\lambda$ ,  $\kappa_s$  i  $K_s$ ) dla sieci wodociagowej rejonu 2 we Wrocławiu w odniesieniu do 1993 r., 1996 r. i 1998 r. Wyniki zestawiono w tabelach 5.11–5.13. Jednostkowe koszty naprawy poszczególnych rodzajów uszkodzeń z obserwacji w 1993 r. i 1996 r. wzięto dla rurociągów z tab. 5.3, dla armatury z tab. 5.6, natomiast w odniesieniu do 1998 r. określono je z zależności opisujących zmiany kosztów naprawy poszczególnych rodzajów uszkodzeń w czasie obserwacji (tab. 5.4, kol. 1–4).

Charakterystyczne wartości wskaźników dla rurociągów:

w 1993 r.: $\lambda = 0,83$ uszk./km·a	$\kappa_{sr} = 1077$ zł/(km·a)	$K_{sr} = 37705$ zł
w 1996 r.: $\lambda = 0,65$ uszk./km·a	$\kappa_{sr} = 1498$ zł/(km·a)	$K_{sr} = 52688$ zł
w 1998 r.: $\lambda = 0,94$ uszk./km·a	$\kappa_{sr} = 2697$ zł/(km·a)	$K_{sr} = 94909$ zł

Charakterystyczne wartości wskaźników dla armatury:

w 1993 r.: $\lambda_a = 0,148$ uszk./a	$\kappa_{sa} = 900$ zł/(km·a)	$K_{sa} = 31486$ zł
w 1996 r.: $\lambda_a = 0,058$ uszk./a	$\kappa_{sa} = 1564$ zł/(km·a)	$K_{sa} = 55025$ zł
w 1998 r.: $\lambda_a = 0,042$ uszk./a	$\kappa_{sa} = 1863$ zł/(km·a)	$K_{sa} = 65560$ zł

Z porównania wartości powyższych wskaźników wynika, że we Wrocławiu, pomimo spadku lub niewielkiego wzrostu intensywności uszkodzeń rurociągów i armatury, w latach 1993–1998 nastąpił znaczny wzrost wartości strumienia i całkowitych kosztów naprawy, głównie z powodu ponaddwukrotnego (2,24) wzrostu wskaźników cen (inflacji) (tab. 5.1). Na przykład w 1998 r. intensywność uszkodzeń rurociągów wynosiła  $\lambda_{98} = 1,13\lambda_{93}$ , a strumień kosztów naprawy wzrósł do wartości  $\kappa_{sr98} = 2,50\kappa_{sr93}$ . W wypadku armatury wartość wskaźnika  $\kappa_{sa}$  wzrosła dwukrotnie, pomimo 3,5-krotnego spadku wartości wskaźnika  $\lambda_a$ . Przyrost wartości wskaźników kosztów naprawy w analizowanym okresie spowodowany był dla rurociągów w 63% inflacją, a w 37% innymi czynnikami, natomiast dla armatury – wyłącznie inflacją.

Tabela 5.11. Średnie wartości intensywności uszkodzeń i wskaźników kosztów naprawy przewodów ogółem sieci rejonu 2 we Wrocławiu w 1993 r.

Table 5.11. Average values of pipe failure and pipe repair cost indices for all the pipelines of region 2, irrespective of the material used, in the city of Wrocław in 1993

d mm	$L_{sr}$ km	Jednostkowy koszt naprawy zł		Intensywność uszkodzeń uszk./km·a		Strumień kosztów naprawy zł/(km·a)			Roczny koszt naprawy uszkodzeń zł/a		
		$K_{nu}$	$K_{np}$	$\lambda_u$	$\lambda_{po}$	$\kappa_u$	$\kappa_p$	$\kappa_r$	$K_u$	$K_p$	$K_r$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>RUROCIĄGI</b>											
80	3,659		859	0	0,82	0	704	704	0	2576	2576
100	7,429	545	971	0,13	1,08	73	1049	1122	542	7793	8335
125	6,414		1110	0	0,62	0	688	688	0	4413	4413
150	2,002		1250	0	0,50	0	625	625	0	1251	1251
175	2,345		1389	0	0,85	0	1181	1181	0	2769	2769
200	2,041		1529	0	1,47	0	2248	2248	0	4588	4588
250	1,727			0	0	0	0	0	0	0	0
300	1,31			0	0	0	0	0	0	0	0
350	1,795	1670		1,67	0	2789	0	2789	5006	0	5006
400	3,555	1895	2645	0,56	0,28	1061	741	1802	3772	2634	6406
500	2,723	2344		0,37	0	867	0	867	2361	0	2361
$\Sigma$	35,000	–	–	–	–	–	–	–	11681	26024	37705
Średnio w 1993		1670	1179	0,20	0,63	334	743	<b>1077</b>	–	–	–
Średni koszt naprawy uszkodzenia: $K_n = 1297$ zł											
<b>ARMATURA</b>											
Rodzaj armatury	Koszt naprawy $K_N$ , zł	Koszt wymiany $K_W$ , zł	Liczba szt.		Strumień kosztów zł/(km·a)			Koszt naprawy zł/a			
			napraw	wymian	$\kappa_N$	$\kappa_W$	$\kappa_a$	$K_N$	$K_W$	$K_a$	
Zasuwy	430	686 ( $\phi$ 80)	21	1	258	20	<b>278</b>	9030	686	9716	
Hydranty	400	674	46	5	526	96	<b>622</b>	18400	3370	21770	
<b>PRZEWODY OGÓLEM</b>											
$\kappa_s = \kappa_{sr} + \kappa_{sa} = 1077 + 900 = 1977$ zł/(km·a)						$K_s = K_{sr} + K_{sa} = 37705 + 31486 = 69191$ zł/a					

Tabela 5.12. Średnie wartości intensywności uszkodzeń i wskaźników kosztów naprawy przewodów ogółem sieci rejonu 2 we Wrocławiu w 1996 r.

Table 5.12. Average values of pipe failure and pipe repair cost indices for all the pipelines of region 2, irrespective of the material used, in the city of Wrocław in 1996

d mm	$L_{sr}$ km	Jednostkowy koszt naprawy zł		Intensywność uszkodzeń uszk./(km·a)		Strumień kosztów naprawy zł/(km·a)			Roczny koszt naprawy uszkodzeń zł/a		
		$K_{nu}$	$K_{np}$	$\lambda_u$	$\lambda_{po}$	$\kappa_u$	$\kappa_p$	$\kappa_r$	$K_u$	$K_p$	$K_r$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>RUROCIĄGI</b>											
80	3,726		840	0	0,54	0	454	454	0	1692	1692
100	7,581	1037	1363	0,26	0,53	270	722	992	2047	5473	7520
125	6,381	1406	2015	0,16	1,41	225	2841	3066	1436	18128	19564
150	2,002		2668	0	0,50	0	1334	1334	0	2670	2670
175	2,345			0	0	0	0	0	0	0	0
200	2,041		3973	0	0,49	0	1907	1907	0	3892	3892
250	1,727			0	0	0	0	0	0	0	0
300	1,31			0	0	0	0	0	0	0	0
350	1,795	4727	7891	1,11	0,56	5247	4419	9666	9418	7932	17350
400	3,555			0	0	0	0	0	0	0	0
500	2,723			0	0	0	0	0	0	0	0
$\Sigma$	35,186	–	–	–	–	–	–	–	12901	39787	52688
Średnio w 1996		2621	2218	0,14	0,51	367	1131	<b>1498</b>	–	–	–
Średni koszt naprawy uszkodzenia: $K_n = 2304$ zł											
<b>ARMATURA</b>											
Rodzaj armatury	Koszt naprawy $K_N$ , zł	Koszt wymiany $K_W$ , zł	Liczba szt.		Strumień kosztów zł/(km·a)			Koszt naprawy zł/a			
			napraw	wymian	$\kappa_N$	$\kappa_W$	$\kappa_a$	$K_N$	$K_W$	$K_a$	
Zasuwy	1400	2010 ( $\phi 100$ ) 2713 ( $\phi 150$ )	5	2	199	134	<b>333</b>	7000	4723	11723	
Hydranty	1804	2082	9	13	462	769	<b>1231</b>	16236	27066	43302	
<b>PRZEWODY OGÓŁEM</b>											
$\kappa_s = \kappa_{sr} + \kappa_{sa} = 1498 + 1564 = 3062$ zł/(km·a)						$K_s = K_{sr} + K_{sa} = 52688 + 55025 = 107713$ zł/a					

Tabela 5.13. Średnie wartości intensywności uszkodzeń i wskaźników kosztów naprawy przewodów ogółem sieci rejonu 2 we Wrocławiu w 1998 r.

Table 5.13. Average values of pipe failure and pipe repair cost indices for all the pipelines of region 2, irrespective of the material used, in the city Wrocław in 1998

d mm	$L_{sr}$ km	Jednostkowy koszt naprawy zł		Intensywność uszkodzeń uszk./(km·a)		Strumień kosztów naprawy zł/(km·a)			Roczny koszt naprawy uszkodzeń zł/a		
		$K_{nu}$	$K_{np}$	$\lambda_u$	$\lambda_{po}$	$\kappa_u$	$\kappa_p$	$\kappa_r$	$K_u$	$K_p$	$K_r$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>RUROCIĄGI</b>											
80	3,598	1355	1471	0,55	1,67	745	2456	3201	2681	8837	11518
100	7,465	1730	2254	0,27	0,40	467	902	1369	3487	6733	10220

d mm	L <sub>śr</sub> km	Jednostkowy koszt naprawy zł		Intensywność uszkodzeń uszk./(km·a)		Strumień kosztów naprawy zł/(km·a)			Roczny koszt naprawy uszkodzeń zł/a		
		K <sub>nu</sub>	K <sub>np</sub>	λ <sub>u</sub>	λ <sub>po</sub>	κ <sub>u</sub>	κ <sub>p</sub>	κ <sub>r</sub>	K <sub>u</sub>	K <sub>p</sub>	K <sub>r</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
125	5,771	2199	3234	0,69	2,25	1524	7285	8809	8795	42042	50837
150	2,856			0	0	0	0	0	0	0	0
175	2,345	3137	5192	0,43	0,43	1336	2217	3553	3133	5198	8331
200	2,041			0	0	0	0	0	0	0	0
250	1,727			0	0	0	0	0	0	0	0
300	1,31			0	0	0	0	0	0	0	0
350	1,795			0	0	0	0	0	0	0	0
400	3,555		14003	0	0,28	0	3939	3939	0	14003	14003
500	2,723			0	0	0	0	0	0	0	0
Σ	35,186	–	–	–	–	–	–	–	18096	76813	94909
Średnio w 1998		1977	3210	0,26	0,68	514	2183	<b>2697</b>	–	–	–
Średni koszt naprawy uszkodzenia: K <sub>n</sub> = 2869 zł											
ARMATURA											
Rodzaj armatury	Koszt naprawy K <sub>N</sub> , zł	Koszt wymiany K <sub>W</sub> zł	Liczba szt.		Strumień kosztów zł/(km·a)			Koszt naprawy zł/a			
			napraw	wymian	κ <sub>N</sub>	κ <sub>W</sub>	κ <sub>a</sub>	K <sub>N</sub>	K <sub>W</sub>	K <sub>a</sub>	
Zasuwy	2467	4478 (2 φ125) 3973 (φ100)	1	3	70	367	<b>437</b>	2467	12912	15379	
Hydranty	2601	3027	3	14	222	1204	<b>1426</b>	7803	42378	50181	
PRZEWODY OGÓLEM											
κ <sub>s</sub> = κ <sub>sr</sub> + κ <sub>sa</sub> = <b>2697</b> + <b>1863</b> = 4560 zł/(km·a)						K <sub>s</sub> = K <sub>sr</sub> + K <sub>sa</sub> = 94909 + 65560 = 160469 zł/a					

### 5.5. Prognozowanie wskaźników kosztów naprawy uszkodzeń sieci wodociągowej

Prognozowanie wskaźników i całkowitych kosztów naprawy uszkodzeń sieci wodociągowej (w zależności od parametrów charakteryzujących sieć i od warunków jej eksploatacji) możliwe jest jedynie tam, gdzie prowadzona jest co najmniej kilku czy kilkunastoletnia rejestracja dotycząca:

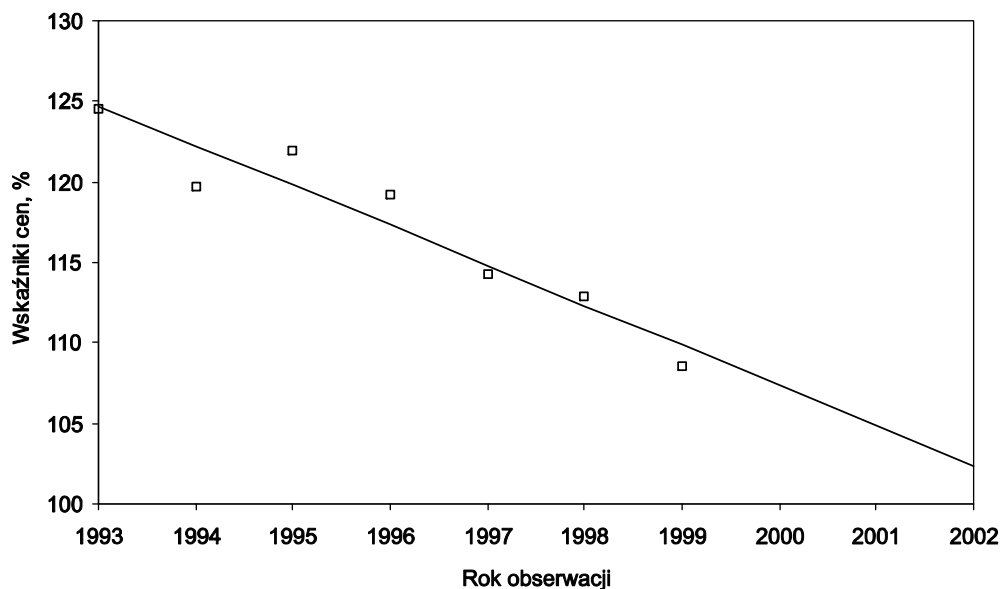
- uszkodzeń sieci wodociągowej, obejmująca przyczyny, skutki i liczbę uszkodzeń elementów sieci (rurociągi, armatura) z uwzględnieniem m.in. materiału i średnicy przewodów, rodzaju uszkodzeń, roku budowy itp.,
- długości rurociągów (z podziałem na materiał i średnice, rok budowy itp.) oraz liczby i rodzaju zabudowanej armatury,
- jednostkowych kosztów naprawy uszkodzeń elementów sieci wodociągowej z uwzględnieniem rodzaju i wielkości elementów oraz rodzaju ich uszkodzeń.

Na podstawie uzyskanych danych można określić zmiany intensywności uszkodzeń (rozdział 4.) oraz zmiany jednostkowych kosztów naprawy uszkodzeń (rozdział 5.2)

w czasie eksploatacji, co umożliwi określenie wskaźników ( $\kappa$ ) kosztów naprawy i całkowite roczne koszty ( $K$ ) naprawy uszkodzeń sieci wodociągowej nawet z kilkuletnim wyprzedzeniem.

Prognoza kosztów naprawy sieci wodociągowej musi uwzględniać także wzrost (lub spadek) wskaźników cen, tj. inflację (lub deflację). Inflacja w Polsce w latach dziewięćdziesiątych XX w. była bardzo wysoka i jak wykazano w rozdziale 5.2 jej wpływ na koszty naprawy przewodów był znaczący i zmienny w analizowanych przedziałach czasu. Dlatego prognozując koszty naprawy uszkodzeń przewodów po 1999 r. należy uwzględnić:

- tendencje zmian w wieloleciu jednostkowych kosztów naprawy (różne rodzaje uszkodzeń wyróżnionych elementów sieci), określonych z uwzględnieniem (potrąceniem) wskaźników cen,
- prognozowane wartości wskaźnika cen ( $W_i$ ) (inflacja, deflacja).



Rys. 5.6. Zmiany wskaźników cen ( $W_i$ ) w latach 1993–1999 i prognoza do 2002 r.

Fig. 5.6. Variations in price indices ( $W_i$ ) in the time span of 1993 to 1999 and forecasts till the year 2002

Zakładając, że koszty naprawy można prognozować z maksymalnym wyprzedzeniem od 2 do 4 lat, prognoza dotyczyć będzie 2002 r. Obecnie znane są już rzeczywiste wartości inflacji w okresie po 1999 r. Z danych GUS (tab. 5.1) wynika, że inflacja w 2002 r. – odniesiona do 1999 r. – wynosiła 113,3% (wzrost cen: 1,13). Zakładając jednak, że nie są znane wartości wskaźnika cen po 1999 r. i korzystając z danych GUS

z obserwacji w latach 1993–1999 (tab. 5.1, rys. 5.6) określono następującą postać zmian wartości  $W_i$  (%) w czasie badań

$$W_i = 127,2 - 2,475(A - 1992) \quad (R = 0,9539; R_{kr} = 0,6694) \quad (5.39)$$

Obliczone ze wzoru (5.39) prognozowane wskaźniki cen w 2000 r., 2001 r. i 2002 r. wyniosły odpowiednio 107,4%, 104,9% i 102,4% (licząc rok do roku). Prognozowany wzrost cen w 2002 r., odniesiony do 1999 r., wynosi zatem 1,15, natomiast błąd prognozy, w stosunku do rzeczywistego wzrostu cen w tym okresie (1,13), wynosi niecałkowicie 2%.

### 5.5.1. Metody prognozowania kosztów naprawy uszkodzeń sieci wodociągowej

**Metoda I** opiera się na prognozie zmian średnich wartości wskaźnika strumienia kosztów ( $\kappa_s$ ) naprawy sieci wodociągowej i polega na:

- obliczeniu wartości wskaźnika  $\kappa_s$  w poszczególnych latach co najmniej kilkuletniego okresu obserwacji, w stałych warunkach eksploatacji sieci wodociągowej (według metodyki przedstawionej w rozdziałach 5.3 i 5.4),
- obliczeniu wartości wskaźnika  $\kappa_s$  z potrąceniem inflacji,
- określeniu zależności funkcyjnych zmian wartości wskaźnika  $\kappa_s$  w czasie obserwacji,
- określeniu (z powyższych zależności) wartości wskaźnika  $\kappa_s$  dla roku dotyczącego prognozy, a następnie obliczeniu jego wartości z uwzględnieniem prognozowanego wzrostu (spadku) cen (obliczonego w oparciu o prognozowane zmiany wskaźnika cen  $W_i$ ),
- obliczeniu całkowitych kosztów naprawy sieci w roku prognozy, które przy założeniu całkowitej długości sieci  $L$  wyniosą

$$K_c = \kappa_s L \quad (5.40)$$

**Metoda II** opiera się na prognozie zmian intensywności uszkodzeń ( $\lambda$ ) rurociągów i armatury oraz zmian jednostkowych kosztów ( $K_n$ ) ich naprawy. W metodzie tej należy:

- określić zależności funkcyjne zmian intensywności uszkodzeń oraz jednostkowych kosztów naprawy, po uwzględnieniu inflacji (deflacji), w czasie obserwacji,
- obliczyć (z powyższych zależności) wartości parametrów  $\lambda$  i  $K_n$  dla roku prognozy,
- obliczyć wartość strumienia kosztów naprawy sieci ( $\kappa_s$ ) (iloczyn wartości  $\lambda$  i  $K_n$ ), a następnie z uwzględnieniem prognozowanego wzrostu (spadku) cen,
- ze wzoru (5.40) obliczyć całkowite prognozowane koszty naprawy sieci wodociągowej.

Należy podkreślić, że obliczenia według obu metod, w zależności od potrzeb, można przeprowadzić:

- dla sieci przewodów ogółem, uwzględniając jedynie podział na rurociągi i armaturę,
- dla poszczególnych rodzajów (średnic) rurociągów i armatury.

### 5.5.2. Prognoza kosztów naprawy wybranych sieci wodociągowych

Koszty naprawy uszkodzeń sieci wodociągowej można prognozować w miastach, w których prowadzone są systematyczne badania i analizy zarówno występujących uszkodzeń, jak i kosztów ich usuwania. Dlatego jest to możliwe we Wrocławiu, gdzie znane są wartości jednostkowych kosztów naprawy (systemem zleconym) w 1993 r., 1996 r. i 1999 r.

#### 5.5.2.1. Prognoza kosztów naprawy sieci wodociągowej we Wrocławiu w rejonie 2

Wartości wskaźnika strumienia kosztów naprawy uszkodzeń przewodów w 2002 r. określono według metody I. Korzystając z obliczonych w rozdziale 5.4.2 (tab. 5.11–5.13) średnich z obserwacji w 1993 r., 1996 r. i 1998 r. wartości wskaźnika strumienia kosztów naprawy rurociągów ( $\kappa_{sr}$ ), armatury ( $\kappa_{sa}$ ) oraz przewodów ogółem ( $\kappa_s = \kappa_{sr} + \kappa_{sa}$ ), wyznaczono odpowiednie ich wartości po uwzględnieniu wielkości wzrostu cen (odpowiednio 2,152, 1,74 i 1,29), odniesionych do poprzedniego roku badań. Uzyskano następujące wartości strumienia kosztów naprawy (zł/(km·a)):

w 1993 r.:  $\kappa_{sr} = 501$        $\kappa_{sa} = 418$        $\kappa_s = 919$

w 1996 r.:  $\kappa_{sr} = 861$        $\kappa_{sa} = 899$        $\kappa_s = 1760$

w 1998 r.:  $\kappa_{sr} = 2091$        $\kappa_{sa} = 1444$        $\kappa_s = 3535$

Następnie określono korelacje ( $R_{kr} = 0,9877$ ) między tymi wskaźnikami kosztów a czasem obserwacji (dla  $A = 1993, 1996$  i  $1998$ )

$$\kappa_{sr} = 42,3 + 302,368 (A - 1992) \quad (R = 0,9127) \quad (5.41)$$

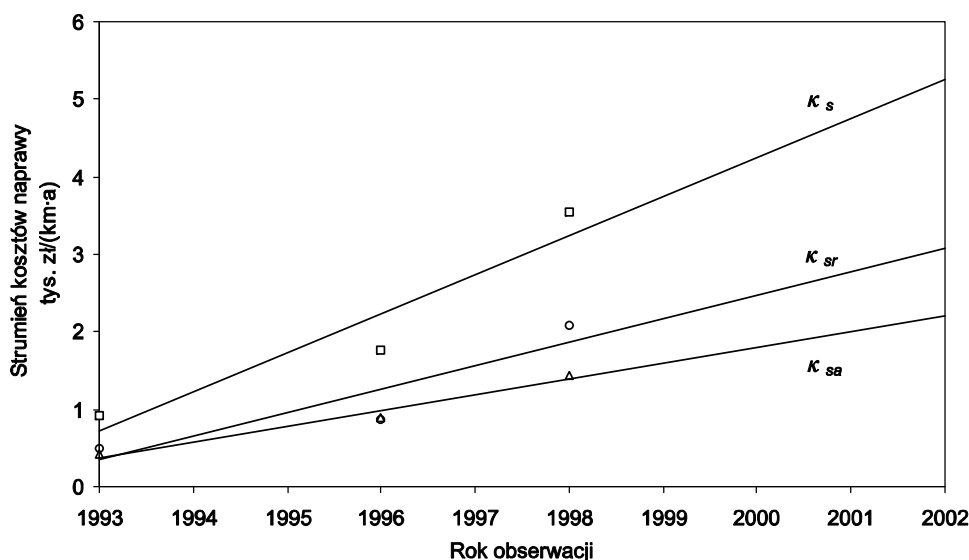
$$\kappa_{sa} = 180,9 + 201,658 (A - 1992) \quad (R = 0,9886) \quad (5.42)$$

$$\kappa_s = 223,2 + 504,026 (A - 1992) \quad (R = 0,9498) \quad (5.43)$$

z których dla 2002 r. (rok prognozy) uzyskano  $\kappa_{sr} = 3066$  zł/(km·a),  $\kappa_{sa} = 2197$  zł/(km·a) oraz  $\kappa_s = 5263$  zł/(km·a) (rys. 5.7).

Prognozowany w latach 1998–2002 wzrost cen (dla wartości  $W_i$  obliczonych z (5.39)) wyniósł 1,27. Prognozowane w 2002 r. wartości strumienia kosztów naprawy wyniosły zatem ostatecznie  $\kappa_{sr} = 3894$  zł/(km·a),  $\kappa_{sa} = 2790$  zł/(km·a) oraz  $\kappa_s = 6684$  zł/(km·a).

Jeśli się założy, że długość sieci przewodów nie ulegnie zmianie od 1998 r. i w 2002 r. będzie równa  $L = 35,2$  km, to całkowite prognozowane koszty  $K_c$  (obliczone według wzoru (5.40)) wyniosą ok. 235 tys. złotych.



Rys. 5.7. Zmiany strumienia kosztów naprawy (z potrąceniem inflacji) rurociągów ( $\kappa_{sr}$ ), armatury ( $\kappa_{sa}$ ) i przewodów ogółem ( $\kappa_s$ ) w czasie obserwacji i prognoza do 2002 r. we Wrocławiu (rejon 2)

Fig. 5.7. Variations in repair cost patterns (with subtraction of inflation rate) for pipes ( $\kappa_{sr}$ ), fittings ( $\kappa_{sa}$ ) and all the pipelines ( $\kappa_s$ ) over the period of observations in Wrocław (region 2), including forecasts till the year 2002

W 1998 r. strumień kosztów naprawy analizowanej części sieci wodociągowej we Wrocławiu wyniósł  $\kappa_s = 4560$  zł/(km·a), stąd wniosek, że w latach 1999–2002 prognozowany wzrost jego wartości wyniesie 46%. Prognoza dla 2002 r. powinna być obecnie zweryfikowana, gdyż oparta była na obserwacji intensywności uszkodzeń ( $\lambda$ ) w dwóch różnych okresach eksploatacji (1993 r. – okres nadmiernego ciśnienia, 1996 r. i 1998 r. – okres obniżonego ciśnienia). Ponadto możliwa obecnie ocena rzeczywistych wartości wskaźników uszkodzeń ( $\lambda$ ) i jednostkowych kosztów naprawy ( $K_n$ ) w latach 1999–2004 może stanowić podstawę do prognozowania kosztów naprawy sieci po 2004 r. Obecnie można zweryfikować jedynie prognozę wielkości wzrostu cen (1,27), którego rzeczywista wartość w latach 1998–2002 wyniosła 1,23 (według danych GUS – tab. 5.1). Błąd prognozy wyniósł ok. 3%.

### 5.5.2.2. Prognoza kosztów naprawy sieci wodociągowej w Oleśnicy

Obliczenia prognozowanych wskaźników kosztów naprawy według zaproponowanych metod przedstawiono także na przykładzie Oleśnicy, gdzie podczas badań jed-



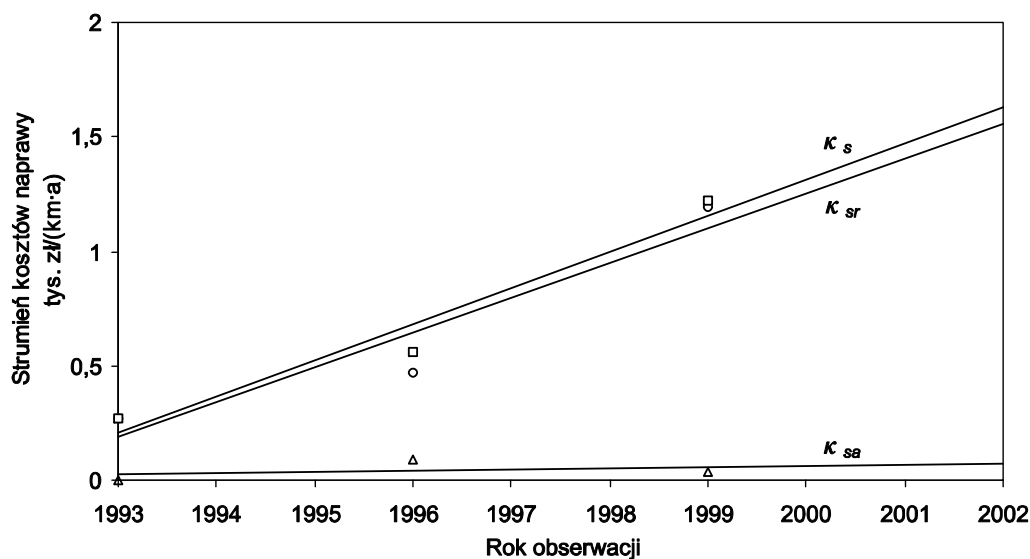
nostkowych kosztów naprawy uszkodzeń, tj. w 1993 r., 1996 r. i 1999 r., warunki eksploatacji sieci wodociągowej, ze względu na ciśnienie, były jednakowe (II okres eksploatacji w warunkach obniżonego ciśnienia). Zachowanie niezmiennych parametrów pracy i warunków eksploatacji sieci w okresie badań poprzedzającym prognozę jest bardzo ważne, gdyż wpływa na poprawność oceny, a więc i prognozy wskaźników intensywności uszkodzeń.

Z konieczności do prognozy wykorzystano dane o jednostkowych kosztach naprawy uszkodzeń we Wrocławiu (brak danych dla Oleśnicy). Prognoza dotyczyła 2002 r.

**Metoda Ia – prognoza z wykorzystaniem wskaźników strumienia kosztów naprawy ( $\kappa_s$ ) przewodów ogółem:**

• Obliczenie średnich z obserwacji wartości strumienia kosztów naprawy rurociągów, armatury i przewodów ogółem w 1993 r., 1996 r. i 1999 r. (tab. 5.14–5.16), które po potrąceniu inflacji wyniosły (zł/(km·a))

w 1993 r.:	$\kappa_{sr} = 276$	$\kappa_{sa} = 0$	$\kappa_s = 276$
w 1996 r.:	$\kappa_{sr} = 471$	$\kappa_{sa} = 86$	$\kappa_s = 557$
w 1999 r.:	$\kappa_{sr} = 1191$	$\kappa_{sa} = 32$	$\kappa_s = 1223$



Rys. 5.8. Zmiany strumienia kosztów naprawy (z potrąceniem inflacji) rurociągów ( $\kappa_{sr}$ ), armatury ( $\kappa_{sa}$ ) i przewodów ogółem ( $\kappa_s$ ) w czasie obserwacji i prognoza do 2002 r. w Oleśnicy

Fig. 5.8. Variations in repair cost patterns (with subtraction of inflation rate) for pipes ( $\kappa_{sr}$ ), fittings ( $\kappa_{sa}$ ) and all the pipelines ( $\kappa_s$ ) over the period of observations in Oleśnica, including forecasts till the year 2002

• Określenie zależności zmian powyższych wskaźników  $\kappa_s$  w czasie obserwacji (dla  $A = 1993, 1996$  i  $1999$ ) ( $R_{kr} = 0,9877$ ; korelacja przeciętna dla  $\kappa_{sa}$ )

$$\kappa_{sr} = 36 + 152,50(A - 1992) \quad (R = 0,9493) \quad (5.44)$$

$$\kappa_{sa} = 18 + 5,33(A - 1992) \quad (R = 0,3680) \quad (5.45)$$

$$\kappa_s = 54 + 157,83(A - 1992) \quad (R = 0,9735) \quad (5.46)$$

• Obliczone ze wzorów (5.44)–(5.46) wartości wskaźników kosztów w 2002 r. (rok prognozy) wyniosły  $\kappa_{sr} = 1561$  zł/(km·a),  $\kappa_{sa} = 71$  zł/(km·a) oraz  $\kappa_s = 1632$  zł/(km·a) (rys. 5.8).

• Zakładając prognozowany wzrost cen w latach 1999–2002 równy 1,15 (dla wartości  $W_i$  obliczonych z (5.39)), prognozowane wartości strumienia kosztów naprawy uszkodzeń rurociągów, armatury i przewodów ogółem ostatecznie wyniosły  $\kappa_{sr} = 1795$  zł/(km·a),  $\kappa_{sa} = 82$  zł/(km·a) oraz  $\kappa_s = 1877$  zł/(km·a).

Tabela 5.14. Wskaźniki uszkodzeń i kosztów naprawy przewodów wodociągowych w Oleśnicy w 1993 r.

Table 5.14. Indices of pipe damage and pipe repair costs for the water-pipe network of Oleśnica in 1993

$d$ mm	$L_{sr}$ km	Jednostkowy koszt naprawy zł		Intensywność uszkodzeń uszk./(km·a)		Strumień kosztów naprawy zł/(km·a)			Roczny koszt naprawy uszkodzeń zł/a		
		$K_{nu}$	$K_{np}$	$\lambda_u$	$\lambda_{po}$	$\kappa_u$	$\kappa_p$	$\kappa_r$	$K_u$	$K_p$	$K_r$
RUROCIĄGI											
80	0,923	~ 455	859	0	0	0	0	0	0	0	0
100	25,795	545	971	0,19	0,16	104	155	259	2683	3998	6681
150	21,856	770	1250	0,23	0,41	177	512	689	3871	11190	15061
200	5,579	995	1529	0,18	0,18	179	275	454	999	1534	2533
300	2,610	1445	2087	1,53	0,77	2211	1607	3818	5771	4194	9965
400	2,153	1895	2645	0,46	0	872	0	872	1877	0	1877
500	1,768	2344	3203	0	0	0	0	0	0	0	0
$\Sigma$	60,684	–	–	–	–	–	–	–	15201	20916	36117
Średnio		947	1307	0,264	0,264	250	345	<b>595</b>	–	–	–
Średni koszt naprawy uszkodzenia $K_n = 1127$ zł											
ARMATURA											
Rodzaj armatury	Jednostkowy koszt zł		Liczba szt.		Strumień kosztów zł/(km·a)			Koszt naprawy zł/a			
	naprawy $K_N$	wymiany $K_W$	napraw	wymian	$\kappa_N$	$\kappa_W$	$\kappa_a$	$K_N$	$K_W$	$K_a$	
Zasuwy	430	–	0	0	0	0	0	0	0	0	
Hydranty	400	674	0	0	0	0	0	0	0	0	
PRZEWODY OGÓŁEM											
$\kappa_s = \kappa_{sr} + \kappa_{sa} = 595 + 0 = 595$ zł/(km·a)						$K_s = K_{sr} + K_{sa} = 36117 + 0 = 36117$ zł/a					

Tabela 5.15. Wskaźniki uszkodzeń i kosztów naprawy przewodów wodociągowych w Oleśnicy w 1996 r.

Table 5.15. Indices of pipe damage and pipe repair costs for the water-pipe network of Oleśnica in 1996

d mm	L <sub>śr</sub> km	Jednostkowy koszt naprawy zł		Intensywność uszkodzeń uszk./km·a		Strumień kosztów naprawy zł/(km·a)			Roczny koszt naprawy uszkodzeń zł/a		
		K <sub>nu</sub>	K <sub>np</sub>	λ <sub>u</sub>	λ <sub>po</sub>	κ <sub>u</sub>	κ <sub>p</sub>	κ <sub>r</sub>	K <sub>u</sub>	K <sub>p</sub>	K <sub>r</sub>
RUROCIĄGI											
80	0,923	742	840	0	0	0	0	0	0	0	0
100	28,527	1037	1363	0	0,49	0	668	668	0	19056	19056
150	22,722	1775	2668	0,04	0,09	71	240	311	1613	5453	7066
200	6,062	2513	3973	0,33	0	829	0	829	5025	0	5025
300	3,330	3989	6584	0,30	0,60	1197	3950	5147	3986	13153	17139
400	2,153	5465	9196	0,46	0	2514	0	2514	5413	0	5413
500	1,860	6941	11805	0	0	0	0	0	0	0	0
Σ	65,577	–	–	–	–	–	–	–	16037	37662	53699
Średnio		3224	2095	0,076	0,274	245	574	<b>819</b>	–	–	–
Średni koszt naprawy uszkodzenia K <sub>n</sub> = 2340 zł											
ARMATURA											
Rodzaj armatury	Jednostkowy koszt zł		Liczba szt.		Strumień kosztów zł/(km·a)			Koszt naprawy zł/a			
	naprawy K <sub>N</sub>	wymiany K <sub>W</sub>	napraw	wymian	κ <sub>N</sub>	κ <sub>W</sub>	κ <sub>a</sub>	K <sub>N</sub>	K <sub>W</sub>	K <sub>a</sub>	
Zasuwy	1400	–	3	0	64	0	64	4200	0	4200	
Hydranty	1804	2082	2	1	55	32	87	3608	2082	5690	
PRZEWODY OGÓLEM											
κ <sub>s</sub> = κ <sub>sr</sub> + κ <sub>sa</sub> = 819 + 151 = 970 zł/(km·a)						K <sub>s</sub> = K <sub>sr</sub> + K <sub>sa</sub> = 53699 + 9890 = 63589 zł/a					

**Metoda Ib – prognoza z wykorzystaniem wskaźnika strumienia kosztów naprawy rurociągów (κ<sub>r</sub>) z uwzględnieniem ich średnicy:**

• Na podstawie wartości wskaźnika κ<sub>r</sub> dla rurociągów o średnicach 80–500 mm z obserwacji w 1993 r., 1996 r. i 1999 r. (tab. 5.14–5.16) obliczono ich wartości po potrąceniu inflacji, a następnie określono zmiany w czasie obserwacji (R<sub>kr</sub> = 0,9877; korelacja bardzo wysoka dla φ100, φ150, φ300):

dla φ100:

$$\kappa_r = 40 + 84(A - 1992) \quad (R = 0,9996) \quad (5.47)$$

dla φ150:

$$\kappa_r = -73 + 173(A - 1992) \quad (R = 0,8061) \quad (5.48)$$

Tabela 5.16. Wskaźniki uszkodzeń i kosztów naprawy przewodów wodociągowych w Oleśnicy w 1999 r.

Table 5.16. Indices of pipe damage and pipe repair costs for the water-pipe network of Oleśnica in 1999

$d$ mm	$L_{sr}$ km	Jednostkowy koszt naprawy zł		Intensywność uszkodzeń uszk./(km·a)		Strumień kosztów naprawy zł/(km·a)			Roczny koszt naprawy uszkodzeń zł/a		
		$K_{nu}$	$K_{np}$	$\lambda_u$	$\lambda_{po}$	$\kappa_u$	$\kappa_p$	$\kappa_r$	$K_u$	$K_p$	$K_r$
RUROCIĄGI											
80	0,923	1661	1787	0	0	0	0	0	0	0	0
100	29,379	2077	2700	0,07	0,27	145	729	874	4260	21417	25677
150	22,677	3115	4985	0,05	0,35	156	1745	1901	3538	39571	43109
200	5,909	4153	7269	0	0	0	0	0	0	0	0
300	4,049	6230	11838	1,23	0,25	7663	2960	10623	31027	11985	43012
400	2,153	8307	16407	0	0	0	0	0	0	0	0
500	1,952	10384	20976	0	0	0	0	0	0	0	0
$\Sigma$	67,042	–	–	–	–	–	–	–	38825	72973	111798
Średnio		4865	4283	0,119	0,254	579	1088	<b>1667</b>	–	–	–
Średni koszt naprawy uszkodzenia $K_r = 4469$ zł											
ARMATURA											
Rodzaj armatury	Jednostkowy koszt zł		Liczba szt.		Strumień kosztów zł/(km·a)			Koszt naprawy zł/a			
	naprawy $K_N$	wymiany $K_W$	napraw	wymian	$\kappa_N$	$\kappa_W$	$\kappa_a$	$K_N$	$K_W$	$K_a$	
Zasowy	3000	–	0	0	0	0	0	0	0	0	
Hydranty	3000	3500	1	0	45	0	45	3000	0	3000	
PRZEWODY OGÓŁEM											
$\kappa_s = \kappa_{sr} + \kappa_{sa} = 1667 + 45 = 1712$ zł/(km·a)						$K_s = K_{sr} + K_{sa} = 111798 + 3000 = 114798$ zł/a					

dla  $\phi 200$ :

$$\kappa_r = 369,7 - 35,17(A - 1992) \quad (R = 0,4423) \quad (5.49)$$

dla  $\phi 300$ :

$$\kappa_r = 230,7 + 969(A - 1992) \quad (R = 0,9461) \quad (5.50)$$

dla  $\phi 400$ :

$$\kappa_r = 886,7 - 67,5(A - 1992) \quad (R = 0,2717) \quad (5.51)$$

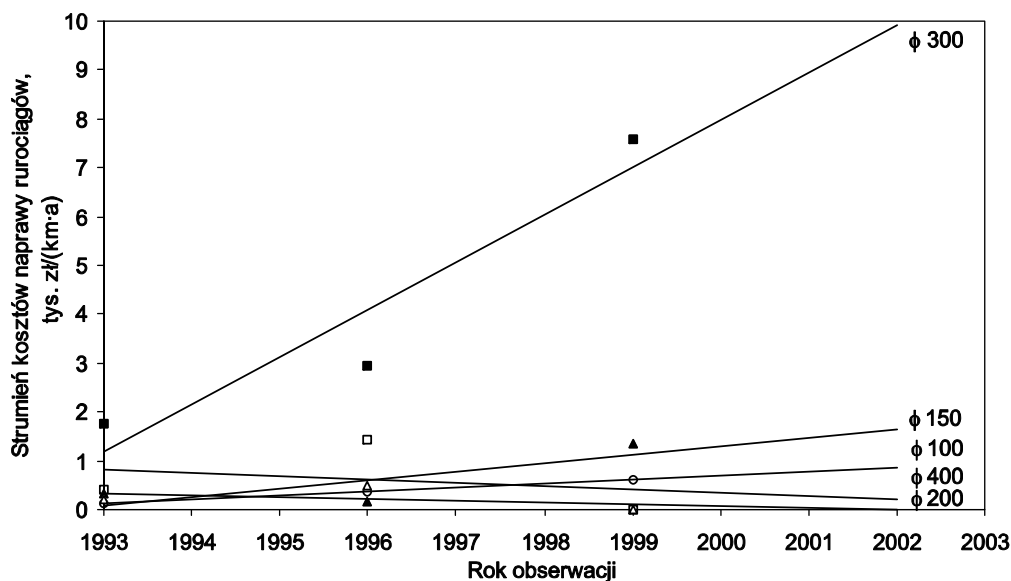
Wartości wskaźnika kosztów ( $\kappa_r$ ) w 2002 r. wyniosły dla średnicy 80 mm – 0 zł/(km·a), dla średnicy 100 mm – 880 zł/(km·a), dla średnicy 150 mm – 1657 zł/(km·a), dla średnicy 200 mm – 18 zł/(km·a), dla średnicy 300 mm –

9921 zł/(km·a), dla średnicy 400 mm – 212 zł/(km·a) oraz dla średnicy 500 mm – 0 zł/(km·a) (rys. 5.9).

- Zakładając długość przewodów o określonych średnicach równą długości w 2000 r., obliczono całkowity roczny koszt naprawy w 2002 r. (wzory (5.27) i (5.28)) oraz średni strumień kosztów naprawy rurociągów (wzór (5.29)), który wyniósł  $\kappa_{sr} = 1548$  zł/(km·a).

- Prognozowany strumień kosztów naprawy rurociągów w 2002 r., po uwzględnieniu prognozowanego wzrostu cen (1,15), wyniósł  $\kappa_{sr} = 1780$  zł/(km·a).

- Dla armatury, ze względu na brak możliwości obliczeń, a zatem i prognozy intensywności uszkodzeń (brak danych o ogólnej liczbie zainstalowanej armatury), wartość wskaźnika  $\kappa_{sa}$  można określić na podstawie prognozy liczby uszkodzeń (z uwzględnieniem rodzaju armatury i jej uszkodzeń), korzystając ze wzorów (5.34)–(5.38). Natomiast tam, gdzie koszty naprawy armatury stanowią niewielki udział w ogólnych kosztach naprawy przewodów, można założyć ich wartość. Jeśli się przyjmie, że dla Oleśnicy wartość średniego wskaźnika  $\kappa_{sa}$  stanowi ok. 7% wartości wskaźnika  $\kappa_{sr}$  rurociągów (co wynika z danych w tab. 5.10), prognozowany w 2002 r. strumień kosztów naprawy uszkodzeń przewodów ogółem wyniesie  $\kappa_s = 1,07 \cdot \kappa_{sr} = 1,07 \cdot 1780 = 1905$  zł/(km·a).



Rys. 5.9. Zmiany strumienia kosztów naprawy (z potrąceniem inflacji) rurociągów ( $\kappa_{sr}$ ) o średnicach 100–400 mm w czasie obserwacji i prognoza do 2002 r. w Oleśnicy  
 Fig. 5.9. Variations in repair cost patterns (with subtraction of inflation rate) for pipes ( $\kappa_{sr}$ ) with 100–400 mm diameters over the period of observations in Oleśnica, including forecasts till the year 2002

**Metoda II – prognoza z wykorzystaniem wskaźników intensywności uszkodzeń ( $\lambda$ ) i jednostkowych kosztów naprawy ( $K_n$ ) przewodów ogółem:**

- Zbadanie zmiany ogólnej intensywności uszkodzeń rurociągów ogółem (tab. 4.14, kol. 8) w czasie obserwacji w II okresie eksploatacji (lata  $A = 1993$ – $2000$ ):

$$\lambda = 0,475(A - 1992)^{-0,2008} \quad (R = 0,7547; R_{kr} = 0,6215) \quad (5.52)$$

z której dla 2002 r. wartość wskaźnika  $\lambda = 0,299$  uszk./ $(\text{km}\cdot\text{a})$  (rys. 5.10).

- Określenie korelacji między średnim rocznym kosztem naprawy ( $K_n$ ) jednego uszkodzenia rurociągu (niezależnie od rodzaju uszkodzenia – tab. 5.14–5.16), obliczonym z potrąceniem inflacji, a czasem obserwacji:

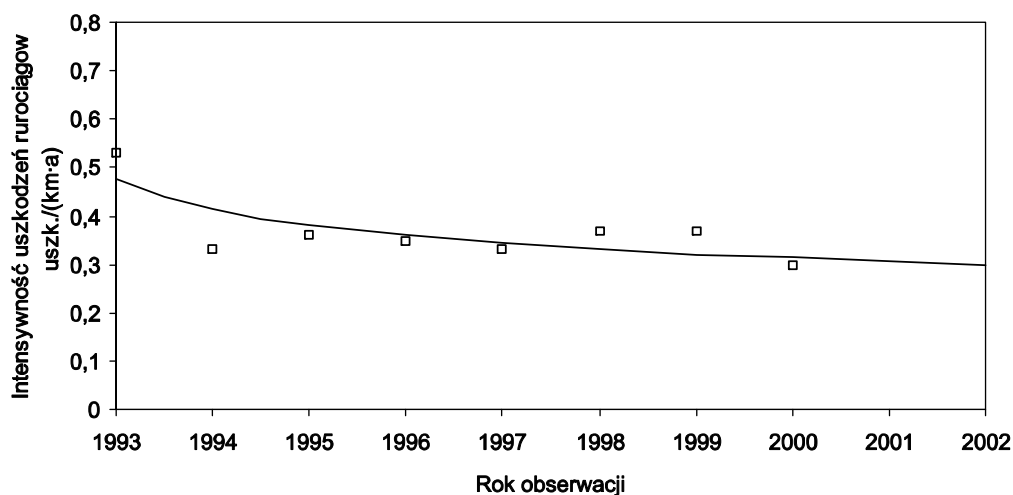
$$K_n = -91,7 + 444,67(A - 1992) \quad (R = 0,9762; R_{kr} = 0,9877) \quad (5.53)$$

z której dla 2002 r. średni jednostkowy koszt  $K_n = 4355$  zł/uszk. (rys. 5.11).

- Wskaźnik strumienia kosztów naprawy rurociągów wyniósł  $\kappa_{sr} = \lambda K_n = 0,299 \cdot 4355 = 1302$  zł/ $(\text{km}\cdot\text{a})$ , a z uwzględnieniem prognozy wzrostu cen otrzymano wartość  $\kappa_{sr} = 1,15 \cdot 1302 = 1497$  zł/ $(\text{km}\cdot\text{a})$ .

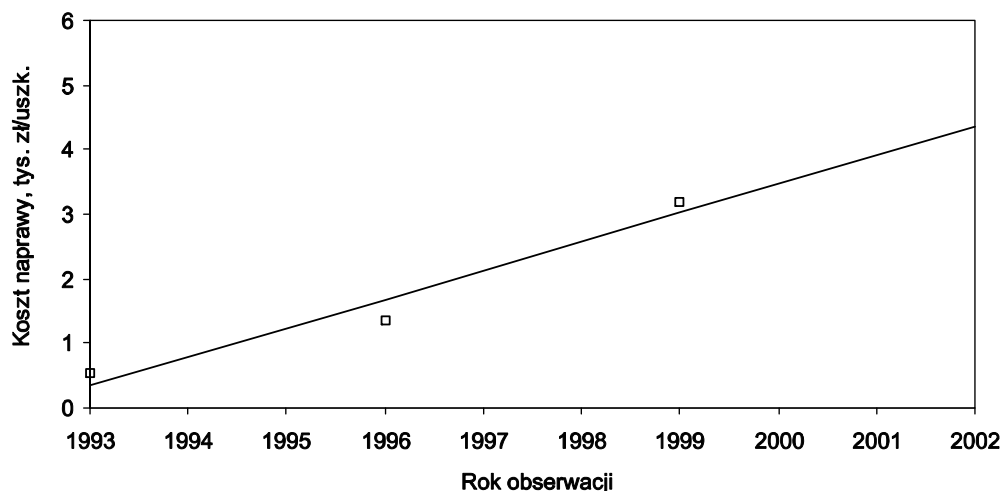
- Wartość wskaźnika kosztów  $\kappa_s$  dla sieci ogółem przyjęto (jak w metodzie Ib) równą  $\kappa_s = 1,07 \kappa_{sr} = 1,07 \cdot 1497 = 1602$  zł/ $(\text{km}\cdot\text{a})$ .

Weryfikacji wymaga obecnie ocena wartości intensywności uszkodzeń  $\lambda$  i jednostkowych kosztów naprawy  $K_n$ . Błąd prognozy wzrostu cen (1,15) w porównaniu z wartością rzeczywistą (1,13) wyniósł niecałe 2%.



Rys. 5.10. Zmiany intensywności uszkodzeń rurociągów ( $\lambda$ ) w czasie obserwacji i prognoza do 2002 r. w Oleśnicy

Fig. 5.10. Variations in failure rate ( $\lambda$ ) for pipelines over the period of observations in Oleśnica, including forecasts till the year 2002



Rys. 5.11. Średni koszt naprawy (z potrąceniem inflacji) jednego uszkodzenia rurociągów ( $K_n$ ) w czasie obserwacji i prognoza do 2002 r. w Oleśnicy

Fig. 5.11. Average repair cost (after subtraction of inflation rate) for single pipe damage ( $K_n$ ) over the period of observations in Oleśnica, including forecasts till the year 2002

W podsumowaniu należy stwierdzić, że jeśli się uwzględni pracochłonność obliczeń według zaproponowanych obydwu metod oraz błędy, jakimi obarczone mogą być prognozy wartości poszczególnych wskaźników, to optymalna do wykorzystania w przedsiębiorstwach wodociągowych przy planowaniu środków finansowych na naprawę sieci wydaje się metoda Ia, która dotyczy szacowania wartości strumienia kosztów naprawy ( $\kappa_s$ ) całej sieci wodociągowej lub jej wycinka.

## 5.6. Wnioski

Prognoza kosztów naprawy uszkodzeń określonej sieci wodociągowej lub jej wycinka, z kilkuletnim wyprzedzeniem, może być przydatna w praktyce do:

- planowania środków finansowych na naprawę sieci,
- podejmowania optymalnych decyzji w zakresie eksploatacji i modernizacji sieci wodociągowej, z uwzględnieniem rachunku ekonomicznego,
- szacowania kosztów osiągnięcia wymaganego poziomu niezawodności systemu dystrybucji wody.

Należy podkreślić, choć nie jest to przedmiotem pracy, że znajomość i możliwość prognozowania intensywności uszkodzeń przewodów oraz jednostkowych kosztów ich naprawy jest konieczna m.in. do opracowania strategii odnowy sieci wodociągowej, polegającej na określeniu górnej granicy opłacalności ekonomicznej naprawy uszkodzeń, powyżej której bardziej opłacalna jest renowacja lub wymiana przewodów

i armatury wodociągowej. W tym celu niezbędna jest także znajomość jednostkowych kosztów wymiany i renowacji przewodów, między którymi relacje zależą głównie od metody renowacji oraz średnicy i długości odnawianych odcinków przewodów.

Jak wynika między innymi z badań własnych, najtańszą i najczęściej stosowaną metodą renowacji jest metoda cementacji, której koszty we Wrocławiu stanowiły 40–70% kosztów budowy nowych rurociągów o średnicach 100–300 mm [50]. Decyzje o zakresie i sposobie modernizacji sieci wodociągowej muszą być ponadto oparte na wynikach wszechstronnych badań i analiz stanu technicznego i sprawności hydraulicznej sieci przewodów, wysokości ciśnień, sieciowych strat wody i jakości wody dostarczanej użytkownikom [75, 81, 115]. Jak wykazuje praktyka, podstawowym kryterium podjęcia decyzji o odnowie przewodów wodociągowych w Polsce było dotychczas (w 51% przypadków) kryterium ich uszkodzalności [70].

Do powszechnie znanych korzyści wynikających z renowacji lub wymiany przewodów i armatury wodociągowej należą:

- zmniejszenie ich uszkodzalności (z analiz przeprowadzonych w MPWiK we Wrocławiu wynika, że czterokrotnie zmalała średnia w roku liczba uszkodzeń przewodów po ich renowacji metodą cementacji),
- ograniczenie sieciowych strat wody (rozdział 6. pracy), a w konsekwencji zmniejszenie ilości wody ujmowanej oraz kosztów budowy i eksploatacji systemu wodociągowego,
- poprawa jakości wody dostarczanej odbiorcom, m.in. dzięki wyeliminowaniu możliwości jej wtórnego zanieczyszczenia,
- zmniejszenie strat hydraulicznych i stabilizacja ciśnienia wody w sieci,
- zmniejszenie kosztów naprawy uszkodzeń przewodów oraz eksploatacji pompowni,
- zwiększenie niezawodności działania systemu dystrybucji wody.

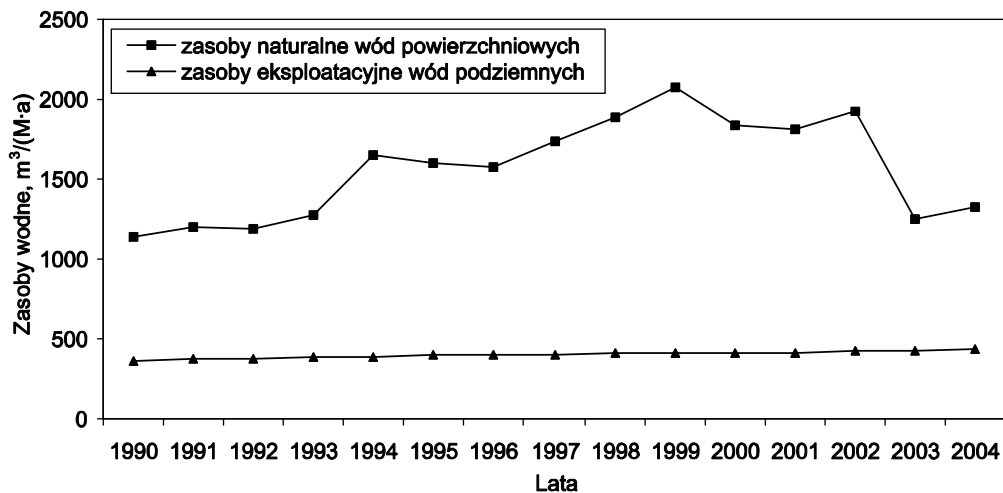
Znajomość kosztów naprawy uszkodzeń przewodów i armatury, jak wspomniano wyżej, jest także niezbędna do wyznaczenia wymaganego poziomu niezawodności systemu wodociągowego z uwzględnieniem rachunku ekonomicznego. Aby osiągnąć ten cel, konieczne jest dysponowanie informacjami o nakładach finansowych zapewniających uzyskanie wymaganego poziomu niezawodności systemu oraz informacjami o kosztach zawodnego jego działania. Zagadnienie to nie jest przedmiotem rozważań w tej pracy.



## 6. Badania wskaźników zużycia wody i wskaźników sieciowych strat wody

### 6.1. Zasoby wodne Polski i ich wykorzystanie

Polska należy do najuboższych w zasoby wodne krajów Europy. Naturalne zasoby wód powierzchniowych, określane jako średni roczny odpływ z wielolecia, wynosiły ok. 1600 m<sup>3</sup> w odniesieniu do jednego mieszkańca kraju w latach 1990–2004 (wraz z dopływami z zagranicy stanowiącymi ok. 13%). W Europie wskaźnik ten był prawie trzykrotnie, a na świecie ponadczterokrotnie większy niż w Polsce. Niewielkie są także zatwierdzone zasoby eksploatacyjne wód podziemnych, które na przykład w 2004 r. wynosiły 432 m<sup>3</sup> na jednego mieszkańca (rys. 6.1). Spośród krajów należących do Unii Europejskiej jedynie w Danii, na Cyprze i Malcie wskaźniki ogólnych zasobów wody są mniejsze niż w Polsce [105].

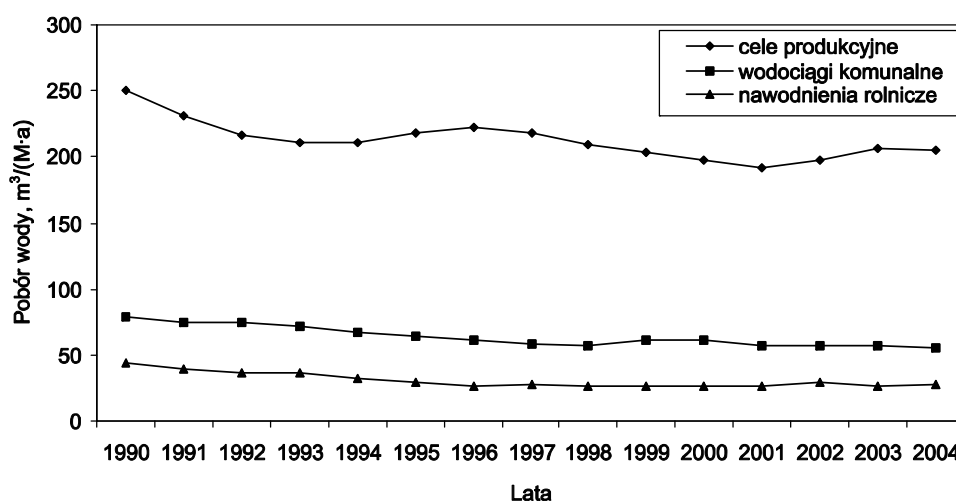


Rys. 6.1. Jednostkowe zasoby wodne Polski w latach 1990–2004 [105]

Fig. 6.1. Unit water resources in Poland in the time span of 1990 to 2004 [105]

Niekorzystne są ponadto relacje między zasobami a poborem wody. Uważa się, że deficyt wody i trudności z zaopatrzeniem w wodę pojawiają się w wypadku konieczności korzystania z ponad 10% zasobów dynamicznych, a stają się poważne przy przekroczeniu 20% ich wielkości. Sytuacja taka ma miejsce w Polsce. W latach 1990–1996 pobór wody wynosił od 20% do ponad 30% zasobów, a obecnie jest nieco

mniej i wynosi ok. 18% (wskutek zmniejszania się poboru wody od początku lat dziewięćdziesiątych XX w. i jednoczesnego wzrostu wielkości zasobów w drugiej połowie lat dziewięćdziesiątych). W krajach Unii Europejskiej (średni wskaźnik ujęcia wód wynosi ok. 15% zasobów) korzystna sytuacja występuje w Irlandii, Luksemburgu, Holandii, Austrii, Finlandii i w Szwecji, gdzie wykorzystuje się jedynie kilka procent zasobów dynamicznych wody. Ponad 30% zasobów zużywane są natomiast w Belgii, Hiszpanii i we Włoszech [105].



Rys. 6.2. Jednostkowy pobór wody w Polsce w latach 1990–2004 [105]  
 Fig. 6.2. Unit water supply in Poland in the time span of 1990 to 2004 [105]

Ograniczona wielkość zasobów wodnych w Polsce oraz duża ich zmienność występowania w czasie i przestrzeni wymusza konieczność racjonalnego gospodarowania wodą [35]. Od 1990 r. sytuacja znacznie się poprawiła, gdyż wraz z wprowadzeniem gospodarki rynkowej nastąpił bardzo duży spadek wielkości poboru i zużycia wody przez wszystkie grupy jej odbiorców. Z danych statystycznych GUS [105] wynika, że w latach 1990–2004 jednostkowy ogólny wskaźnik poboru wody w Polsce zmalał o 23% (z 373 m<sup>3</sup>/(M·a) do 288 m<sup>3</sup>/(M·a)). Zmniejszenie poboru wody dla przemysłu wynosiło 18%, na cele eksploatacji sieci wodociągowej 30%, a do nawodnień w rolnictwie i leśnictwie 36% (rys. 6.2). Z pobranej w 2004 r. ilości wody (10,99 km<sup>3</sup>) zużyto 95%, a 5% stanowiły straty wody i zużycie na potrzeby technologiczne ujęć i zakładów oczyszczania wody. Od kilkudziesięciu lat największym użytkownikiem wody w Polsce jest przemysł, na potrzeby którego (w 2004 r.) zużyto 75% wody, natomiast na potrzeby wodociągów komunalnych oraz do nawodnień zużyto odpowiednio 15% i 10%.

Od początku lat dziewięćdziesiątych, wraz ze spadkiem zużycia wody przez wymienione grupy jej odbiorców, obserwuje się jednocześnie tendencję wzrostową zużycia na potrzeby własne systemu wodociągowo-kanalizacyjnego i rejestrowanych strat

wody w sieci wodociągowej. Wynika to m.in. z większej obecnie dbałości o jakość wody i sieć wodociągową (częste płukanie rurociągów itp.) oraz dekapitalizacji przewodów. Ponadto usamodzielnione przedsiębiorstwa wodociągowe wykazują obecnie faktyczne wielkości strat wody, w przeciwieństwie do okresu gospodarki planowej, kiedy istniejący system rozliczeń zachęcał do zaniżania danych o stratach wody.

Problem strat wody występuje we wszystkich wodociągach na świecie. Straty stanowią znaczącą część wyprodukowanej wody, a w skrajnych warunkach mogą osiągnąć 50% i więcej objętości wody włączanej do sieci wodociągowej, dochodzą niekiedy do  $100 \text{ dm}^3/(\text{M}\cdot\text{d})$ , co w przybliżeniu odpowiada obecnemu poziomowi jednostkowego zużycia wody w gospodarstwach domowych. Podstawowymi przyczynami przecieków wody z sieci wodociągowej są niewłaściwy stan techniczny oraz nadmierne ciśnienia występujące w sieci. Miernikiem stanu technicznego sieci wodociągowej w tym względzie jest przede wszystkim jej awaryjność, w której uwzględnia się zarówno częstość, jak i rodzaj uszkodzeń oraz czas ich trwania. Na wysoki poziom strat wody w Polsce wpływają wieloletnie zaniedbania w modernizacji, remontach i rozbudowie systemów wodociągowych, prowadzące do ich degradacji, a także niedbałe wykonawstwo sieci w okresie gospodarki planowej.

Ograniczanie strat wody powinno być jednym z najważniejszych zadań przedsiębiorstw wodociągowych, gdyż nie tylko obniża koszty sprzedawanej wody, ale też chroni niewielkie dyspozycyjne zasoby wodne Polski.

## 6.2. Metodyka i zakres badań

Zmiany wskaźników zużycia i wskaźników strat wody w systemach wodociągowych zaprezentowano na przykładzie różnej wielkości miast Polski leżących na terenach nieobjętych działalnością górniczą.

Źródłem danych dotyczących poboru i zużycia wody (w skali roku), liczby mieszkańców zaopatrywanych w wodę i długości przewodów wodociągowych były przeprowadzone trzykrotnie badania ankietowe. Ankietyzacja, którą objęto dwadzieścia miast, dotyczyła danych z eksploatacji sieci wodociągowych w latach 1988–1992, 1993–1996 i 1997–2000. W niektórych wypadkach nie uzyskano odpowiedzi, bądź uzyskane dane nie kwalifikowały się do wykorzystania. Wyniki badań prezentowano sukcesywnie w czasie ich realizacji, m.in. w pracach [31, 33, 35, 37, 39, 47, 48, 64, 65, 80].

Obecnie przedstawiono wyniki i wnioski z badań w dziesięciu miastach objętych trzykrotną ankietyzacją w okresie od 1990 r. do 2000 r. W analizowanych miastach z wodociągu zaopatrywanych było 12,5–131,0 tys. mieszkańców poprzez sieć dystrybucji wody o długości 20–270 km. Na jeden kilometr sieci przypadało 210–480 mieszkańców. Badane miasta, ze względu na liczbę mieszkańców, należały do czterech grup: I grupa o liczbie mieszkańców do 20 tysięcy (Trzebnica, Chojnów, Wołów), II grupa o liczbie mieszkańców od 20 tys. do 50 tys. (Kłodzko, Oleśnica, Brzeg),

III grupa o liczbie mieszkańców od 50 tys. do 100 tys. (Świdnica) oraz IV grupa o liczbie mieszkańców od 100 tys. do 200 tys. (Legnica, Zielona Góra, Opole).

Na podstawie uzyskanych danych określono:

1. Wskaźniki zużycia wody, średnie w poszczególnych latach obserwacji, wyrażone w  $\text{dm}^3/\text{d}$  i jednego mieszkańca zaopatrywanego z wodociągu:

- jednostkowe zużycie wody w gospodarstwach domowych,
- jednostkowe zużycie wody przez przemysł (z wodociągów miejskich) i na inne cele komunalne (instytucje i zakłady usługowe, komunikacja, utrzymanie czystości ulic, podlewanie zieleni),
- jednostkowe ilości wody wtłoczonej do sieci wodociągowej, określające ogólne zużycie wody przez wszystkich odbiorców wraz ze stratami w sieci i zużyciem własnym w systemach wodociągowo-kanalizacyjnych.

2. Wskaźniki strat wody i zużycia na potrzeby technologiczne ujęcia i zakładu oczyszczania wody, wyrażone w procentach ilości ujmowanej wody.

3. Wskaźniki całkowitych strat wody w sieci wodociągowej, tj. strat wody (rzeczywistych i pozornych) wraz z zużyciem wody na potrzeby własne systemów wodociągowo-kanalizacyjnych.

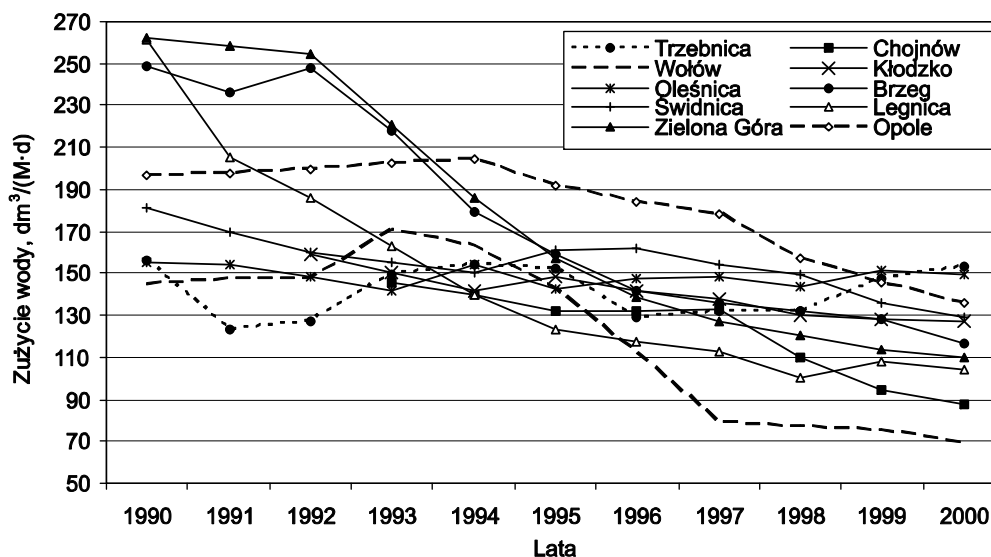
4. Wskaźniki strat wody w sieci wodociągowej.

### 6.3. Analiza wskaźników zużycia wody

Obserwowany od 1990 r. spadek poboru i zużycia wody w Polsce spowodowany był w początkowym okresie restrukturyzacją przemysłu i zamknięciem wielu jego gałęzi. Jednocześnie zaczęto racjonalnie gospodarować wodą, ograniczając jej zużycie przez wprowadzanie wodooszczędnych i bezwodnych technologii, wielokrotne wykorzystanie wody technologicznej, czy odzyskiwanej ze ścieków bytowo-gospodarczych. Istotnym powodem oszczędnego gospodarowania wodą w przemyśle był wielokrotny wzrost opłat za wodę i odprowadzane ścieki oraz konieczność obniżania kosztów produkcji ze względów konkurencyjnych. Zmniejszenie poboru wody do celów komunalnych spowodowane było przede wszystkim wzrostem opłat za wodę i ścieki, masową instalacją wodomierzy, a w konsekwencji ograniczaniem marnotrawstwa, oszczędzaniem wody i dbałością o jakość oraz stan urządzeń i instalacji przez użytkowników wody. Po kilkuletnim okresie dość dynamicznego spadku zużycia wody obecnie obserwuje się pewną jego stabilizację.

Jednostkowe zużycie wody w gospodarstwach domowych w analizowanych miastach uległo obniżeniu, przy czym spadek był zróżnicowany (rys. 6.3). Niewiele zmieniło się zużycie wody w dwóch miastach (Trzebnicy i Oleśnicy) i kształtowało się na poziomie  $140\text{--}150 \text{ dm}^3/(\text{M}\cdot\text{d})$ . W pozostałych miastach zużycie wody w gospodarstwach domowych w 2000 r. w stosunku do 1990 r. zmniejszyło się o 30–60%. W latach 1997–2000 wartość tego wskaźnika ustabilizowała się i wynosiła  $70\text{--}150 \text{ dm}^3/(\text{M}\cdot\text{d})$ ,

a przeważnie 90–135 dm<sup>3</sup>/(M·d). Obecny poziom zużycia wody w gospodarstwach domowych odpowiada zużyciu wody w większości krajów europejskich i wydaje się, że możliwości jego obniżenia są już niewielkie.



Rys. 6.3. Jednostkowe zużycie wody w gospodarstwach domowych  
Fig. 6.3. Unit consumption of water by households

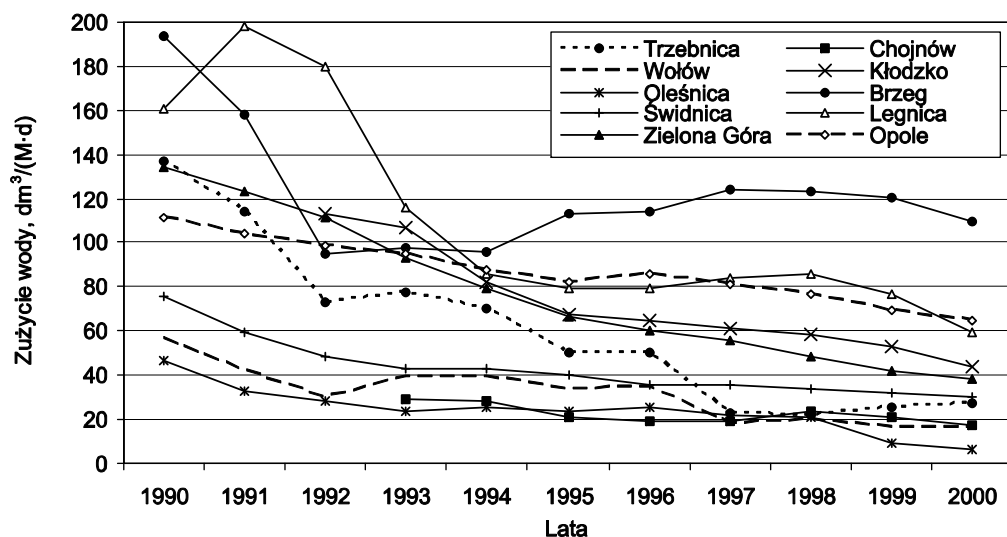
W analizowanym okresie, szczególnie w latach 1990–1993, wystąpił bardzo istotny spadek ilości wody użytej przez przemysł z wodociągów miejskich oraz ilości wody użytej na inne cele komunalne (rys. 6.4). W 2000 r. wskaźnik zużycia wody ogółem na te cele obniżył się o 40–85% w stosunku do 1990 r. i wynosił przeważnie 15–65 dm<sup>3</sup>/(M·d), w tym zużycie wody przez przemysł wynosiło od kilku do kilkunastu dm<sup>3</sup>/(M·d).

Jednostkowe zużycie wody przez wszystkich odbiorców (ilość wody sprzedanej z wodociągów miejskich) w latach 1990–2000 zmniejszyło się o 23–63%, z powodu spadku zużycia wody w gospodarstwach domowych, przemyśle i na inne cele komunalne. W 2000 r. wskaźnik ilości wody sprzedanej odbiorcom wynosił 85–227 dm<sup>3</sup>/(M·d), a w większości miast 150–180 dm<sup>3</sup>/(M·d).

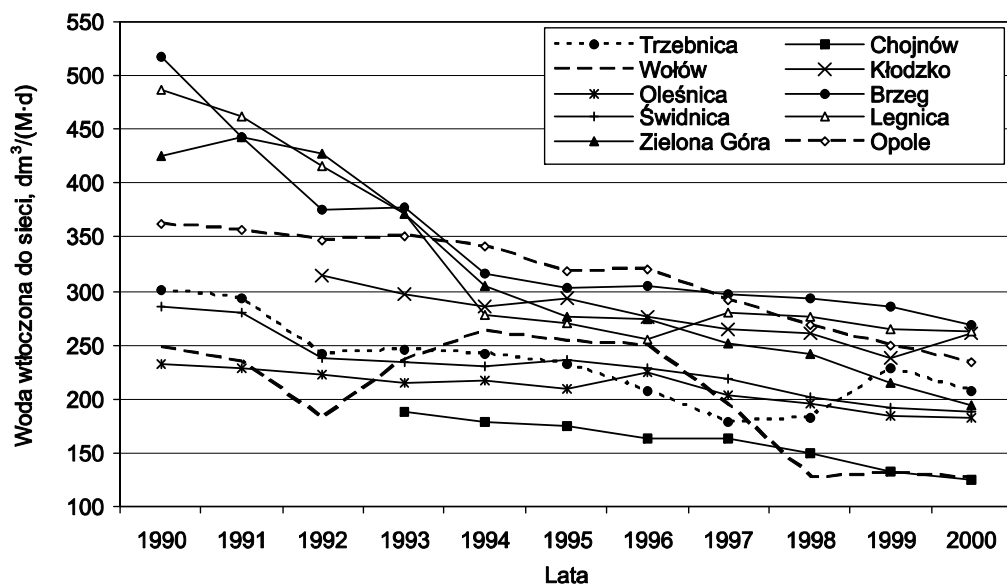
Jednostkowa ilość wody wtłoczonej do sieci wodociągowej, na którą składa się zużycie wody przez wszystkich odbiorców oraz straty wody w sieci wodociągowej i zużycie własne systemów wodociągowo-kanalizacyjnych, obniżyła się w analizowanych miastach o 21–54% w latach 1990–2000. Dla większości miast wartość wskaźnika w 2000 r. mieściła się w zakresie 180–265 dm<sup>3</sup>/(M·d) (rys. 6.5).

Spadek zużycia wody przez wszystkie grupy jej odbiorców wpłynął na zmianę struktury zużycia wody w badanych systemach wodociągowych. W 2000 r. udział zużycia wody w gospodarstwach domowych wynosił 64–96% ogólnego zużycia i był

większy niż w 1990 r., kiedy zawierał się w przedziale 53–77%. Jedynie w Brzegu nastąpiło nieznaczne obniżenie z 56% do 52%.



Rys.6.4. Jednostkowe zużycie wody przez przemysł i na inne cele komunalne  
Fig. 6.4. Unit consumption of water by the industry and by other municipal users

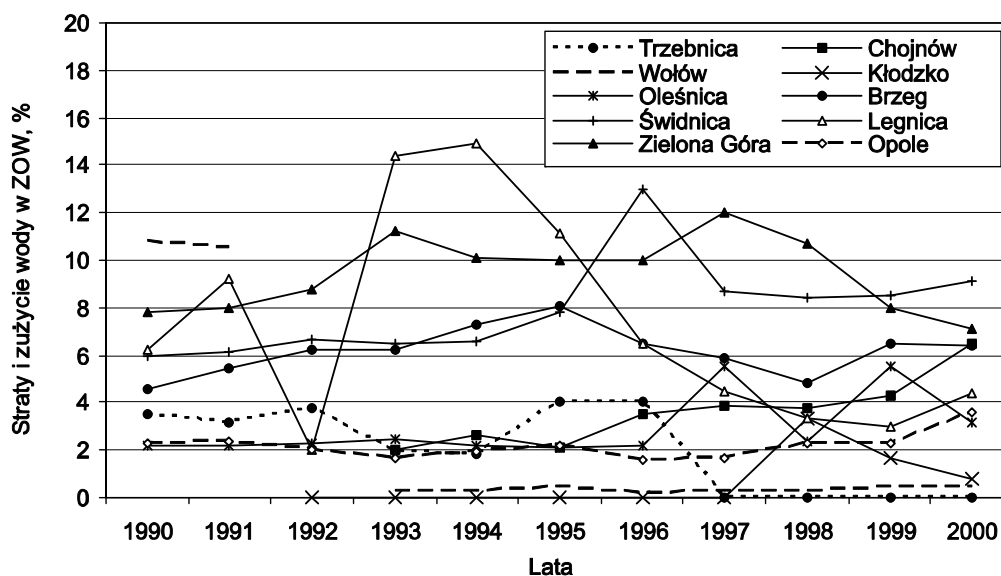


Rys. 6.5. Jednostkowa ilość wody wtłoczonej do sieci wodociągowej  
Fig. 6.5. Unit quantity of water pumped into the water-pipe network

#### 6.4. Analiza wskaźników strat i zużycia wody na cele technologiczne ujęcia i zakładu oczyszczania wody

W sześciu miastach, spośród dziesięciu objętych analizą, do celów komunalnych ujmowane były wody podziemne, w pozostałych w przeważającej ilości ujmowane były wody powierzchniowe i infiltracyjne.

Straty i zużycie wody na potrzeby technologiczne ujęcia i zakładu oczyszczania wody w 2000 r. wynosiły 1–9% wydajności ujęć wody, a przeważnie 3–6,5%. Wartości wskaźnika w latach 1990–2000 utrzymywały się w większości systemów na prawie stałym poziomie lub nieznacznie rosły (rys. 6.6).



Rys. 6.6. Procentowe straty wody i zużycie na cele technologiczne ujęcia i zakładu oczyszczania wody  
Fig. 6.6. Water loss and water consumption (%) at the intake and water treatment plant

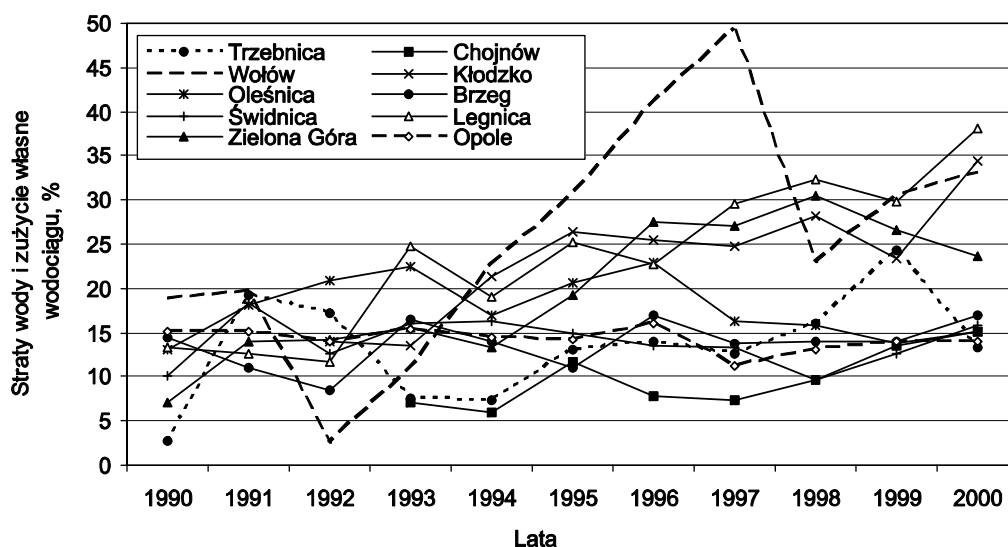
#### 6.5. Analiza wskaźników strat i zużycia wody na potrzeby własne systemów wodociągowych

Na całkowite zapotrzebowanie (brutto) na wodę w mieście składa się zużycie wody (netto) przez różnych jej użytkowników oraz tzw. całkowite straty wody, rozumiane jako suma rzeczywistych i pozornych strat wody oraz ilości wody zużywanej na potrzeby własne systemu wodociągowo-kanalizacyjnego. Przyczyną powstawania rzeczywistych strat wody są przecieki z sieci przewodów i armatury oraz z nieszczelnych instalacji wewnętrznych (poniżej progu rozruchu wodomierzy), przelewy wody ze

zbiorników wyrównawczych oraz kradzieże wody. Pozorne straty wody wynikają m.in. z niedokładności i niejednoczesności pomiaru wielkości dostawy i zużycia wody i nie stanowią faktycznych wycieków wody z systemu.

Całkowite straty wody ( $S_w$ ) określa się na podstawie rocznego bilansu (stanowią różnicę między objętością wody wtłoczonej do sieci wodociągowej i zużyciem wody przez odbiorców), natomiast straty wody ( $S$ ) (suma strat rzeczywistych i pozornych) można określić:

- na podstawie rocznego bilansu wody, z różnicy całkowitych strat i zużycia wody na potrzeby własne systemu,
- na podstawie badań terenowych, m.in. przez pomiar i analizę przepływów i poboru wody w godzinach nocnych (1<sup>00</sup>–4<sup>00</sup>) w wydzielonych obszarach sieci wodociągowej, obejmujących maksymalnie 20 tys. mieszkańców ( $M$ ) lub 30 km sieci wodociągowej w zależności od gęstości zabudowy [22, 122].



Rys. 6.7. Procentowe straty wody i zużycie na potrzeby własne wodociągu ( $S_w$ )

Fig. 6.7. Percentage of water losses, together with water consumption, for the needs of the network ( $S_w$ )

Straty wody ( $S_w$ ,  $S$ ) wyrażane są w postaci:

- procentowego udziału w ilości wody wtłoczonej do sieci wodociągowej,
- objętości odniesionej do jednego mieszkańca zaopatrywanego z wodociągu w jednostce czasu ( $\text{dm}^3/(\text{M}\cdot\text{d})$ ),
- objętości przypadającej na jednostkę długości sieci wodociągowej (bez przyłączy domowych) w jednostce czasu ( $\text{m}^3/(\text{km}\cdot\text{h})$ ,  $\text{m}^3/(\text{km}\cdot\text{d})$ ).

W większości analizowanych miast w latach 1990–2000 stwierdzono tendencję wzrostową wartości wskaźnika całkowitych strat wody ( $S_w$ ), wyrażonych w procen-



tach ilości wody wtłoczonej do sieci (rys. 6.7). Wynikało to zarówno z większej dbałości o jakość wody dostarczanej odbiorcom (częstsze płukanie rurociągów, zbiorników), jak i z dekapitalizacji rurociągów (wzrost strat wody wskutek przecieków). Większe straty i zużycie wody na potrzeby własne, odpowiadające wielkościom faktycznym, wykazywane były przez niektóre przedsiębiorstwa wodociągowe począwszy od 1991 r., a przez większość od 1995 r. Wcześniej wielkości te były prawdopodobnie zaniżane, głównie ze względu na ryczałtowy sposób rozliczeń z odbiorcami wody.

W 2000 r. wartości wskaźnika całkowitych strat  $S_w$  mieściły się przeważnie w zakresie 15–35% ilości wody wtłoczonej do sieci wodociągowej, co stanowiło 18–50% ogólnego zużycia przez odbiorców wody w miastach. Wartości wskaźnika strat wody i zużycia własnego systemu odniesione do długości sieci wodociągowej wynosiły w większości rozważanych miast 13–22 m<sup>3</sup>/(km·d).

Straty wody stanowią znaczącą część wyprodukowanej wody w Polsce i w większości wodociągów na świecie. Dla ilustracji tego problemu w tabeli 2.3 zestawiono wskaźniki całkowitych ( $S_w$ ) i sieciowych ( $S$ ) strat wody (bez uwzględnienia potrzeb własnych systemu) w wybranych krajach i miastach świata. Jak można zauważyć, wskaźniki strat wody w Polsce są porównywalne ze wskaźnikami strat w Rumunii, na Słowacji, Węgrzech i we wschodnich landach (i miastach) Niemiec, a wyższe niż w zachodnich landach (i miastach) Niemiec i w innych państwach zachodnich.

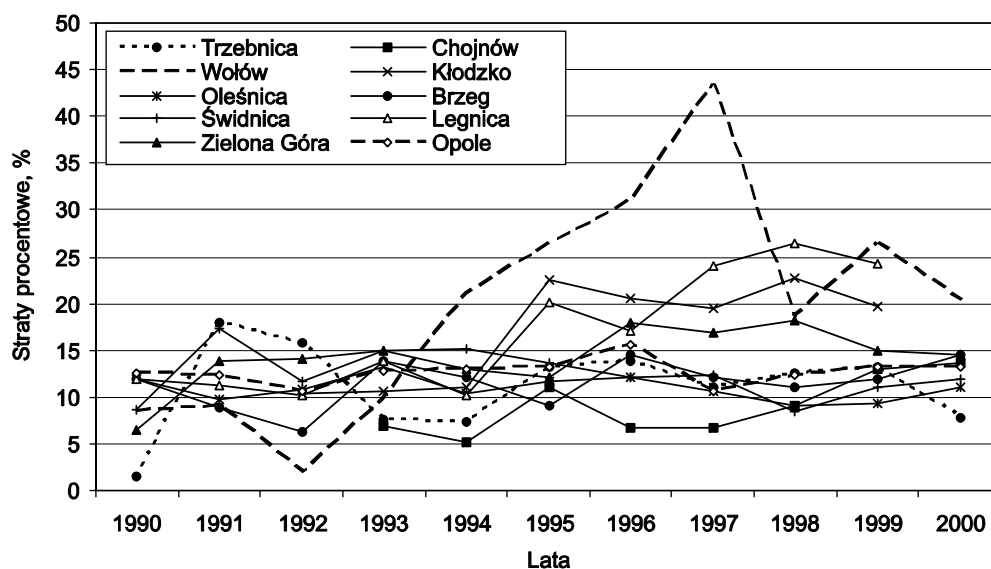
## 6.6. Analiza wskaźników strat wody w sieciach wodociągowych

Straty wody w sieci wodociągowej mają podstawowy wpływ na wielkość strat całkowitych. Udział strat wody ( $S$ ) (rzeczywistych i pozornych) w całkowitych ( $S_w$ ) stratach wody w systemach wodociągowych polskich miast wynosił od około 50% (dla niskich całkowitych strat) do ponad 80% (dla wysokich całkowitych strat). Podobne relacje pomiędzy tymi parametrami stwierdzono w Niemczech [22, 74, 112].

Na rzeczywiste straty wody składają się głównie przecieki z zewnętrznej sieci wodociągowej do gruntu oraz woda tracona w czasie awarii rurociągów i armatury. Według badań niemieckich wycieki te stanowią 80–100% rzeczywistych strat wody oraz 60–80% strat rzeczywistych i pozornych [121]. Rzeczywiste straty wody występują także w instalacjach wewnętrznych wskutek przecieków mniejszych od progu rozruchu wodomierzy. Według badań niemieckich [112] wynosiły one 2,4–4,8 m<sup>3</sup>/(km·d), a w innym wypadku 4,7% ilości wody wtłoczonej do sieci. Powodem występowania rzeczywistych strat wody są ponadto przelewy wody ze zbiorników sieciowych [112, 116] i kradzieże wody.

W rejestrowanych stratach wody mają także udział straty pozorne, które wynikają z niedokładności i niejednoczesności pomiarów dostawy wody i zużycia u odbiorców, i nie stanowią faktycznych wycieków wody z systemu. Ocenia się [15], że wpływ

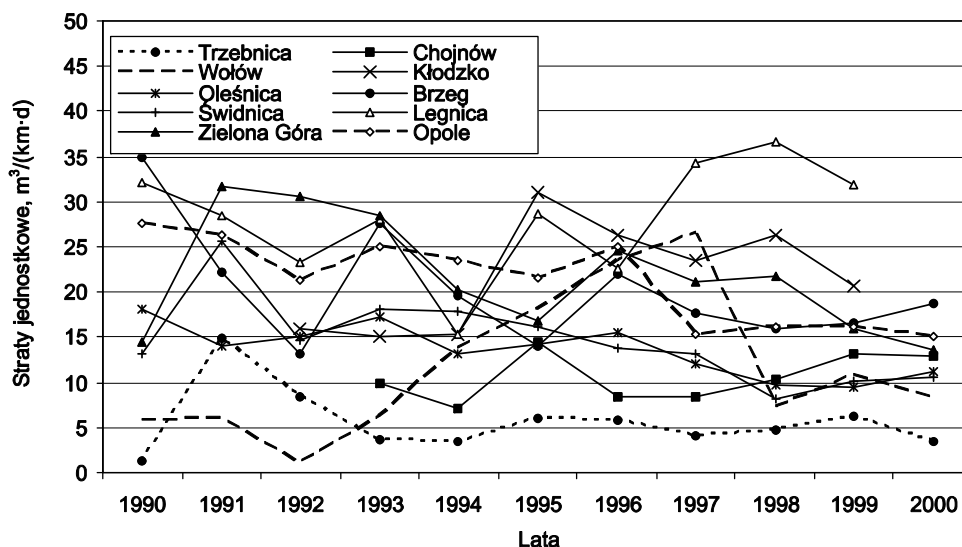
niejednoczesności odczytów wskazań przyrządów pomiarowych, przy rocznym bilansowaniu objętości wody, nie przekracza  $\pm 1\%$ . Straty pozorne wynikające z niedokładności pomiarów można oszacować [15, 16, 116], uwzględniając rodzaj i klasę dokładności stosowanych przyrządów pomiarowych, co nie było przedmiotem badań autorki. Wielkość strat pozornych można zredukować dzięki systematycznej kontroli i kalibracji urządzeń pomiarowych. Przykładem są wieloletnie działania, opisane w pracy [9], dzięki którym znacznie zmniejszono rejestrowane straty wody wynikające z niedokładności pomiaru zużywanej wody.



Rys. 6.8. Procentowe straty wody ( $S$ ) w sieci wodociągowej  
Fig. 6.8. Percentage of water losses ( $S$ ) in the water-pipe network

Ze względu na duże trudności ilościowej oceny wielkości przecieków, do analiz i porównań wykorzystuje się – zarówno w kraju, jak i za granicą [21, 22, 54, 74, 114, 121] – szacunkowe wielkości strat ( $S$ ) określone na podstawie rocznych bilansów wody. Wiarygodność tych danych, uzyskiwanych z polskich przedsiębiorstw wodociągowych, znacznie wzrosła w ostatnich latach. Wynika to m.in. z prawie pełnego opomiarowania odbiorców wody oraz stosowania urządzeń pomiarowych o wysokiej klasie dokładności. Straty wody obliczone na podstawie rocznych bilansów mogą zatem, bez popełnienia większego błędu, służyć do szacunkowej oceny wielkości przecieków wody z przewodów i armatury sieci wodociągowej, co potwierdzają wyniki badań terenowych [17, 110, 116].

Badania terenowe przecieków wody są jednak niezbędne, gdyż na ich podstawie możliwe jest zlokalizowanie nieszczelności (szczególnie niewielkich, nie ujawniających się na powierzchni) oraz podjęcie działań umożliwiających ich eliminację.



Rys. 6.9. Jednostkowe straty wody ( $S_j$ ) w sieci wodociągowej  
 Fig. 6.9. Unit water losses ( $S_j$ ) in the water-pipe network

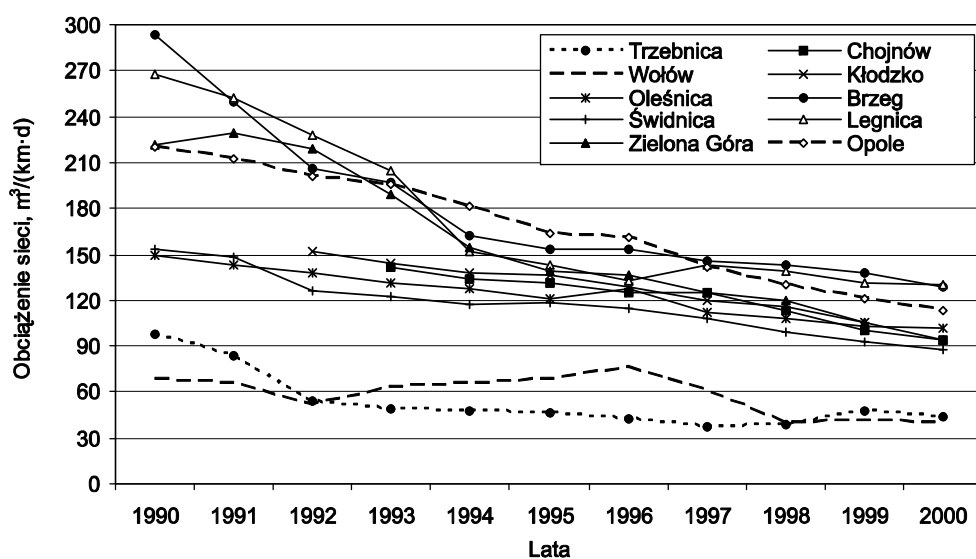
Zmiany procentowych strat wody ( $S$ ) w latach 1990–2000, obliczonych na podstawie rocznych bilansów w systemach wodociągowych dziesięciu badanych miast, zilustrowano na rys. 6.8. W 2000 r. tylko w jednym z miast straty  $S$  wynosiły mniej niż 10% ilości wody wtłoczonej do sieci wodociągowej. W większości miast wskaźnik ten wynosił 10–15%, a w trzech przypadkach ok. 20%.

Straty wody odniesione do jednego mieszkańca zaopatrywanego z wodociągu w większości miast w 2000 r. wynosiły 16–35  $dm^3/(M \cdot d)$ , co stanowiło 10–40% jednostkowego zużycia wody w gospodarstwach domowych.

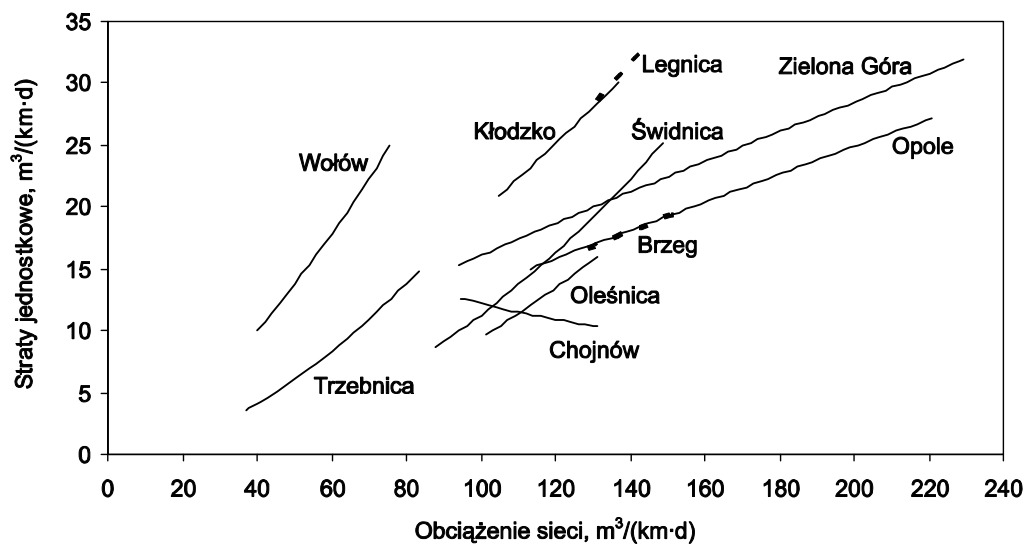
Do oceny i porównań stanu technicznego i sposobu eksploatacji sieci wodociągowej wykorzystywany jest także wskaźnik określający wielkość strat wody w przeliczeniu na jednostkę długości sieci (bez przyłączy domowych), wyrażony w  $m^3/(km \cdot d)$ , nazywany dalej wskaźnikiem strat jednostkowych  $S_j$ . Wartość tego wskaźnika w 2000 r. wynosiła 3,4–18,8  $m^3/(km \cdot d)$  (rys. 6.9).

### 6.6.1. Wpływ obciążenia sieci wodociągowej na straty wody

Przy ocenie jednostkowych strat wody należy uwzględnić obciążenie sieci ( $O_s$ ,  $m^3/(km \cdot d)$ ), które oznacza średnią dobową ilość wody wtłoczonej do sieci w odniesieniu do jednostki długości przewodów wodociągowych (bez przyłączy domowych). W każdym systemie wodociągowym jednostkowe straty  $S_j$  zmieniają się m.in. wraz ze zmianą obciążenia  $O_s$ . Jest to bardzo istotne, gdyż od 1990 r. w większości systemów dystrybucji wody w Polsce obciążenie sieci ulega ciągłemu obniżaniu wskutek spadku zużycia i produkcji wody (rys. 6.10).



Rys. 6.10. Obciążenie ( $O_s$ ) sieci wodociągowych w latach 1990–2000  
 Fig. 6.10. Average daily volume of water pumped into the networks per unit length (load factor) in the time span of 1990 to 2000



Rys. 6.11. Zmiany jednostkowych strat wody ( $S_j$ ) wraz ze zmianami obciążenia ( $O_s$ ) sieci wodociągowych w poszczególnych miastach  
 Fig. 6.11. Variations in unit water loss ( $S_j$ ) and loading ( $O_s$ ) variations for the water-pipe networks of particular municipalities under study

W 2000 r. obciążenie sieci w dwóch spośród badanych miast wynosiło ok.  $40 \text{ m}^3/(\text{km}\cdot\text{d})$ , a w pozostałych  $90\text{--}130 \text{ m}^3/(\text{km}\cdot\text{d})$  i stanowiło  $50\text{--}70\%$  wartości z 1990 r.

Jednostkowe straty wody w sieciach wodociągowych poszczególnych miast (w analizowanym okresie) malały (z wyjątkiem Chojnowa) wraz ze spadkiem obciążenia sieci wodociągowej (rys. 6.11) według zależności (przeciętne korelacje stwierdzono w Chojnowie, Brzegu, Legnicy)

w Trzebnicy (1991–2000):

$$S_j = 0,00626 O_s^{1,75688} \quad (R = 0,9145; R_{kr} = 0,5494) \quad (6.1)$$

w Chojnowie (1995–2000):

$$S_j = 204,661 O_s^{-0,6125} \quad (R = 0,3421; R_{kr} = 0,7293) \quad (6.2)$$

w Wołowie (1995–2000):

$$S_j = 0,050041 O_s^{1,43532} \quad (R = 0,8469; R_{kr} = 0,7293) \quad (6.3)$$

w Kłodzku (1995–1999):

$$S_j = 0,035678 O_s^{1,369691} \quad (R = 0,9035; R_{kr} = 0,8054) \quad (6.4)$$

w Oleśnicy (1993–2000):

$$S_j = 0,001327 O_s^{1,92667} \quad (R = 0,8926; R_{kr} = 0,6215) \quad (6.5)$$

w Brzegu (1996–2000):

$$S_j = 0,15465 O_s^{0,962324} \quad (R = 0,4349; R_{kr} = 0,8054) \quad (6.6)$$

w Świdnicy (1991–2000):

$$S_j = 0,001005 O_s^{2,02467} \quad (R = 0,9312; R_{kr} = 0,5494) \quad (6.7)$$

w Legnicy (1995–1999):

$$S_j = 0,017955 O_s^{1,51137} \quad (R = 0,4509; R_{kr} = 0,8054) \quad (6.8)$$

w Zielonej Górze (1991–2000):

$$S_j = 0,361039 O_s^{0,824315} \quad (R = 0,9150; R_{kr} = 0,5494) \quad (6.9)$$

w Opolu (1990–2000):

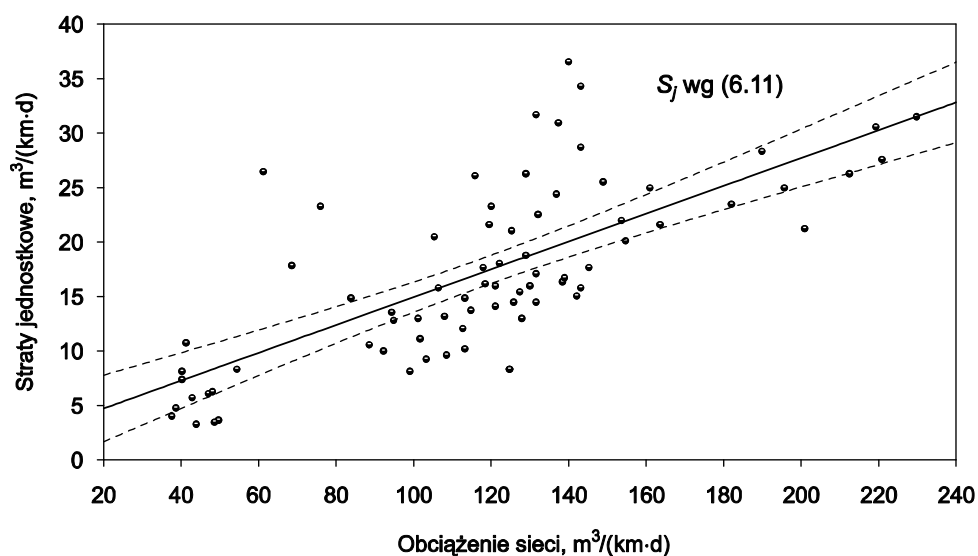
$$S_j = 0,22664 O_s^{0,886815} \quad (R = 0,8931; R_{kr} = 0,5214) \quad (6.10)$$

Analizując straty wody, nie można pomijać wielkości obciążenia sieci, gdyż dla tych samych wartości jednostkowych strat  $S_j$ , lecz przy różnych wartościach obciążenia  $O_s$ , procentowe straty wody będą przyjmowały różne wartości. Jeśli na przykład jednostkowe straty wynosiły  $S_j = 20 \text{ m}^3/(\text{km}\cdot\text{d})$ , to w systemie o obciążeniu  $O_s = 157 \text{ m}^3/(\text{km}\cdot\text{d})$  (Brzeg) stanowiły one około 13%, a w systemie o  $O_s = 102 \text{ m}^3/(\text{km}\cdot\text{d})$  (Kłodzko) około 20% objętości wody wtłoczonej do sieci (rys. 6.11).

Należy zatem podkreślić, że jednostkowe straty wody można uznać za miarodajne jedynie w wypadku oceny i porównań stanu technicznego sieci wodociągowych o jednakowym lub zbliżonym obciążeniu sieci. W przeciwnym razie podstawą oceny powinny być procentowe straty wody, które wyrażają stosunek strat jednostkowych do obciążenia sieci wodociągowej.

Z analizy strat wody w sieciach wodociągowych poszczególnych miast (rys. 6.11), występujących przy tym samym obciążeniu sieci, wynika:

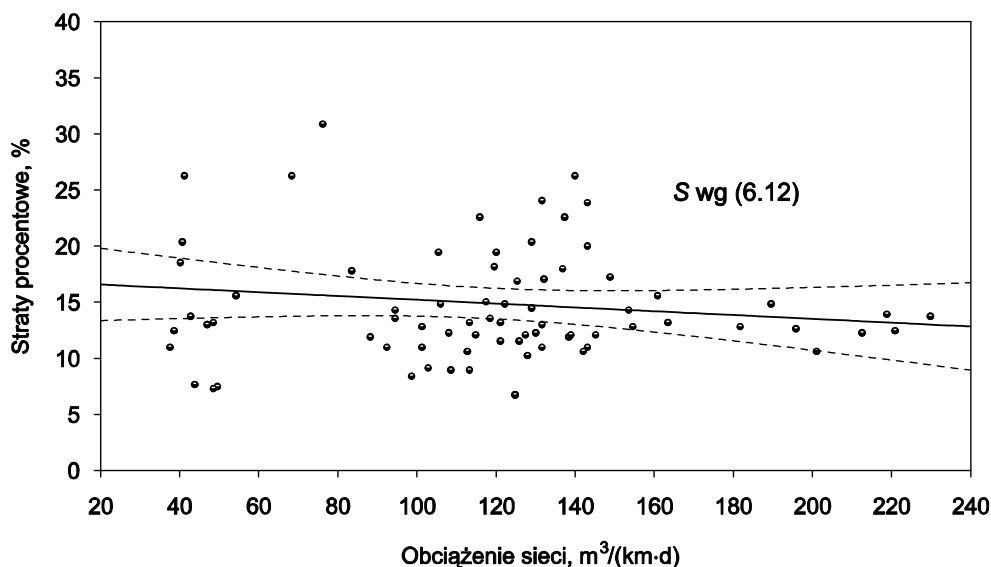
- w miastach o małym obciążeniu sieci (dla  $O_s = 65 \text{ m}^3/(\text{km}\cdot\text{d})$ ) straty jednostkowe były znacznie większe w Wołowie ( $20,0 \text{ m}^3/(\text{km}\cdot\text{d})$ ) niż w Trzebnicy ( $9,6 \text{ m}^3/(\text{km}\cdot\text{d})$ ),
- pozostałe miasta o większym obciążeniu sieci (dla  $O_s = 130 \text{ m}^3/(\text{km}\cdot\text{d})$ ) można uporządkować w kolejności zmniejszających się strat jednostkowych następująco: Legnica (28,1), Kłodzko (28,0), Zielona Góra (20,0), Świdnica (19,1), Opole (17,0), Brzeg (16,7), Oleśnica (15,7), Chojnów (10,4).



Rys. 6.12. Zmiany jednostkowych strat wody ( $S_j$ ) wraz ze zmianami obciążenia ( $O_s$ ) sieci wodociągowych w badanych miastach ogółem

Fig. 6.12. Variations in unit water loss ( $S_j$ ) and loading ( $O_s$ ) variations for the water-pipe networks of all the municipalities under study

Przyjmując natomiast jako kryterium wielkość strat procentowych (średnie wartości  $S$  z okresów obserwacji – jak we wzorach (6.1)–(6.10)), badane miasta można uszeregować następująco: Wołów (29%), Legnica (22,4%), Kłodzko (21,1%), Zielona Góra (14,9%), Świdnica (13,1%), Brzeg (12,8%), Opole (12,7%), Trzebnica (12,1%), Oleśnica (11%), Chojnów (10,1%).



Rys. 6.13. Zmiany procentowych strat wody ( $S$ ) wraz ze zmianami obciążenia ( $O_s$ ) sieci wodociągowych w badanych miastach ogółem

Fig. 6.13. Variations in the percentage of water loss ( $S$ ) and loading ( $O_s$ ) variations for the water-pipe networks of all the municipalities under study

Z analizy obejmującej badane sieci ogółem wynika, że straty jednostkowe malały istotnie wraz ze zmniejszaniem się obciążenia sieci wodociągowych z  $229,5 \text{ m}^3/(\text{km}\cdot\text{d})$  do  $37,1 \text{ m}^3/(\text{km}\cdot\text{d})$  według funkcji (granice przedziałów ufności dla  $\alpha = 0,05$ )

$$S_j = 2,16802 + 0,127695 O_s \quad (R = 0,7207; R_{kr} = 0,1954) \quad (6.11)$$

natomiast pomiędzy stratami procentowymi a obciążeniem sieci istotnej korelacji nie stwierdzono

$$S = 16,9138 - 0,01699 O_s \quad (R = 0,1302; R_{kr} = 0,1954) \quad (6.12)$$

Średnio jednostkowe straty wody zmniejszyły się 4,5-krotnie, z  $31,5 \text{ m}^3/(\text{km}\cdot\text{d})$  do  $6,9 \text{ m}^3/(\text{km}\cdot\text{d})$  (rys. 6.12), natomiast procentowe straty wynosiły 13,0% do 16,3% (rys. 6.13).

Zaprezentowane wyniki badań jednoznacznie wykazały, że naturalną konsekwencją spadku zużycia wody, a więc i spadku ilości wody włączanej do sieci wodociągowej polskich miast w okresie transformacji, było zmniejszenie natężenia wypływu wody przez nieszczelności przewodów, odniesionego do jednostki ich długości, czyli zmniejszenie jednostkowych strat wody. Dokonywana zatem przez wielu badaczy ocena stanu technicznego sieci przewodów na podstawie wskaźników strat jednostkowych, bez uwzględnienia wpływu zmian obciążenia sieci, nie jest pełna, i może prowadzić do mylnych wniosków odnośnie do wpływu innych czynników na jednostkowe straty wody.

W Niemczech, gdzie od dwudziestu lat realizowana jest strategia redukcji nadmiernych strat wody, opracowywane są zalecenia dotyczące granicznych wielkości przecieków wody w zależności m.in. od rodzaju gruntu czy obciążenia sieci wodociągowej. Dla stosunkowo niedużego obciążenia sieci w zakresie 7–13 tys. m<sup>3</sup> na kilometr przewodów w roku (19,2–35,6 m<sup>3</sup>/(km·d)), jako małe wielkości proponuje się uznawać straty jednostkowe stanowiące mniej niż 12,5–13,5% obciążenia sieci, a jako dopuszczalne – stanowiące maksymalnie 25–27% wartości  $O_s$ . Odpowiada to jednostkowym stratom wody  $S_j = 4,8\text{--}9,6 \text{ m}^3/(\text{km}\cdot\text{d})$  [111].

### 6.6.2. Wpływ intensywności uszkodzeń przewodów i wysokości tłoczenia pompowni na straty wody

Podstawowymi przyczynami przecieków wody z sieci wodociągowej są zły stan techniczny sieci oraz nadmierne ciśnienia występujące w sieci. Miernikiem stanu technicznego sieci jest w tym względzie przede wszystkim jej awaryjność, w której uwzględnia się nie tylko częstość, ale także rodzaj i czas trwania uszkodzeń. Przecieki wody występują na skutek nieszczelności złączy, uszkodzeń rurociągów, kształtek i armatury. Przyczyny powstawania uszkodzeń (i przecieków wody) omówiono szczegółowo w rozdziale 4. Na wysoki poziom strat wody w Polsce wpływają także wieloletnie zaniedbania w modernizacji, remontach i rozbudowie systemów wodociągowych, prowadzące do ich degradacji, a także niedbałe wykonanie sieci w okresie gospodarki planowej.

Podobnie było m.in. we wschodnich landach Niemiec, gdzie przez dziesiątki lat ograniczano się jedynie do usuwania bieżących awarii, czego skutkami są zły stan techniczny sieci wodociągowej i znaczne straty wody. Po zjednoczeniu Niemiec podjęto działania modernizacyjne, dzięki którym częściowo zmniejszono awaryjność, ale i tak była ona prawie trzykrotnie większa niż w landach zachodnich. We wschodnich landach uszkodzalność sieci magistralnej i rozdzielczej wynosiła średnio 0,38 uszkodzenia na kilometr w ciągu roku, a przyłączy – 12 uszkodzeń na 1000 przyłączy w ciągu roku, w zachodnich landach natomiast była niższa i wynosiła odpowiednio 0,15 uszk./(km·a) i 4,5 uszk./(1000 przył.·a) [114]. Wskutek tego we wschodnich landach straty wody były ponadtrzykrotnie większe niż w zachodnich (tab. 2.3). Podobnie sytuacja wyglądała w części wschodniej i zachodniej Berlina [87].

Strategię redukcji nadmiernych strat wody realizują Niemcy już od dwudziestu lat, opracowując i wprowadzając w życie odpowiednie wytyczne zawierające informacje o metodach kontroli szczelności sieci oraz przyczynach i wielkości przecieków. W wytycznych z 1986 r. zawarto na przykład dane o granicznych jednostkowych stratach wody w zależności od rodzaju gruntu (1,2–3,6 m<sup>3</sup>/(km·d) dla gruntów piaszczystych, 2,4–6,0 m<sup>3</sup>/(km·d) dla gruntów żwirowych i 4,8–14,4 m<sup>3</sup>/(km·d) dla gruntów skalistych spękanych). Oprócz bieżącej aktualizacji opracowywane są nowe zalecenia, uwzględniające również wpływ obciążenia sieci. Wprowadzone zostały także instrukcje dotyczące sposobu rejestracji uszkodzeń poszczególnych elementów systemów wodociągo-



wych, z uwzględnieniem przyczyn i rodzaju uszkodzeń. Choć dotychczas nie ustalono granicznych wartości intensywności uszkodzeń sieci, to normą w dużych przedsiębiorstwach wodociągowych jest dążenie do osiągnięcia poziomu poniżej 0,1 uszkodzenia na kilometr sieci rurociągów w ciągu roku. Za wartość krytyczną, powyżej której należy podjąć odpowiednie zabiegi renowacyjne, przyjmuje się wielkość 0,5 uszk./(km·a). Dla przyłączy wodociągowych dopuszcza się wystąpienie czterech uszkodzeń w ciągu roku na 1000 przyłączy, co przy średniej długości przyłączy 12–15 m odpowiada intensywności uszkodzeń około 0,3 uszk./(km·a) [6, 63]. Z doświadczeń niemieckich wynika, że aby uzyskać wymierne efekty w postaci znaczącego obniżenia awaryjności przewodów, strat wody i kosztów eksploatacji sieci, konieczna jest odnowa co najmniej 2% długości sieci wodociągowej rocznie we wschodnich landach i 1% w zachodnich [21].

Eksploatowane obecnie w polskich miastach sieci wodociągowe wykonane są w przeważającej większości z rur z żeliwa szarego, bez odpowiednich powłok zabezpieczających. Jak wynika z przeprowadzonych badań i analiz, w niektórych miastach (rozdział 4.3.2.1.1) charakteryzowała je duża awaryjność wynosząca średnio nawet do 1,10 uszkodzenia na kilometr w roku. Przewody żeliwne stanowiły przy tym znaczący udział (57–100%) w ogólnej długości sieci wodociągowych, co świadczy, że wycieki wody z tych przewodów były główną przyczyną znacznych strat wody w rozważanych systemach dystrybucji wody. Wpłynął na to zły stan techniczny zarówno przewodów wybudowanych przed II wojną światową, jak i w latach 60.–80. XX wieku.

Stare rurociągi żeliwne (sprzed 1940 r.) stanowiły nawet do 60% ogólnej długości sieci rurociągów i były w znacznym stopniu zdekapitalizowane. Świadczyła o tym bardzo duża intensywność ich uszkodzeń wskutek pęknięć i perforacji materiału rur, stanowiąca 73–100% ogólnej intensywności uszkodzeń tych rurociągów, jak i nieznaczny wpływ ograniczenia wysokości ciśnienia i jego dobowych wahań na zmniejszenie awaryjności. Zmniejszenie średniej intensywności uszkodzeń ( $\lambda$ ) starych rurociągów wynosiło 0–45%, natomiast nowszych nawet do 83% (tab. 4.3). Uwzględniając powyższe oraz fakt, że średnie natężenie wypływu wody z pękniętych rurociągów jest większe niż w wypadku uszkodzeń złączy czy perforacji rur (o czym mowa w rozdziale 4.3.3.4), należy podkreślić, że znaczną redukcję wielkości strat wody można uzyskać m.in. dzięki modernizacji starych zdekapitalizowanych przewodów żeliwnych.

Uszkodzenia i wycieki wody z nowszych przewodów żeliwnych występowały przede wszystkim na połączeniach rur. W okresie po modernizacji systemów wodociągowych średnia intensywność uszkodzeń złączy rur zmniejszyła się o 40–83%, co wraz z obniżeniem ciśnienia w sieci wpłynęło z pewnością na zmniejszenie wielkości wycieków wody.

Podstawową przyczyną uszkodzeń i przecieków wody z przewodów stalowych jest korozja materiału rur. W systemach wodociągowych badanych miast przewody stalowe stanowiły od kilku do 25% długości sieci, a ich awaryjność była z reguły mniejsza niż przewodów żeliwnych.

Szczególnie wysokimi wskaźnikami awaryjności i strat wody charakteryzowały się sieci wodociągowe w miastach Górnego Śląska, w których udział rur stalowych wy-

nosił nawet do 80% (średnio 55%), a żywotność nie przekraczała 10–12 lat [68, 89]. Głównym powodem był wpływ działalności górniczej oraz wzmożonej korozji wywołanej skażeniem wody podziemnej i gruntu wskutek dużej koncentracji przemysłu ciężkiego. Wpływ korozji zewnętrznej spowodował, że awaryjność i straty wody w miastach Górnego Śląska, leżących poza terenami szkód górniczych, były większe niż w innych tego typu rejonach w Polsce (tab. 2.1, tab. 2.3).

Korozja materiału rurociągów może być przyczyną znacznych strat wody, gdy przewody ułożone są w gruntach naturalnych wykazujących właściwości korozyjne, do których należą grunty rodzime organiczne (humus, torf, namuły) i grunty nasypowe. Z własnych obserwacji wynika, że zdarzały się przypadki zasypywania rurociągów żużlem, co prowadziło do ich uszkodzeń wskutek korozji.

Znaczne ilości wody tracone są z systemów wodociągowych wskutek występowania niewielkich nieszczelności złączy, uszkodzeń rurociągów, kształtek i armatury (awarii ukrytych), gdy woda nie pojawia się na powierzchni, lecz znajduje ujście w gruncie (żwirowym, skalistym spękanym itp.) lub w kanałach (ściekowych, ciepłowniczych, telekomunikacyjnych i in.). W takich wypadkach o wielkości strat (przykład w rozdziale 4.3.3.4) decyduje głównie czas wypływu wody, który jest trudny, a często niemożliwy do ustalenia. Powstające w ten sposób straty wody można znacznie ograniczyć lub wyeliminować, m.in. prowadząc systematyczną kontrolę kanałów i powierzchni terenu oraz terenowe pomiary szczelności rurociągów [17, 116].

Straty wody występują we wszystkich wodociągach w kraju i na świecie. Powstają one, co częściowo już wykazano, w wyniku oddziaływania na sieć wodociagową różnych czynników, których stopień wpływu jest bardzo zróżnicowany w poszczególnych systemach wodociagowych. Dlatego jedynie na podstawie systematycznych i wieloletnich badań eksploatacyjnych możliwa jest ocena działania sieci i wyodrębnienie podstawowych przyczyn powstawania uszkodzeń i strat wody. Umożliwi to podejmowanie odpowiednich działań w zakresie eksploatacji i modernizacji istniejących systemów, dzięki którym możliwe będzie obniżenie strat wody do minimalnego poziomu, uzasadnionego względami technicznymi i ekonomicznymi w określonych warunkach funkcjonowania systemów dystrybucji wody.

Z przeprowadzonych badań eksploatacyjnych sieci wodociagowych w Brzegu, Kłodzku, Oleśnicy i wybranych rejonach Wrocławia wynika, że zmniejszenie strat wody można uzyskać przede wszystkim dzięki ograniczeniu awaryjności sieci poprzez modernizację zdekapitalizowanych przewodów żeliwnych, skróceniu czasu wypływu wody przez uszkodzenia, a także dzięki racjonalizacji wysokości i zmian ciśnienia wody. Wysokość ciśnienia i jego zmiany w cyklu dobowym wpływają zarówno na intensywność uszkodzeń przewodów, co wykazano w rozdziale 4.3.2, jak i na natężenie wypływu wody z uszkodzonych elementów sieci bez względu na przyczyny, które te uszkodzenia powodują. Jak widać na poglądowych wykresach na rys. 4.28, natężenie wypływu przez otwór o określonej średnicy przy ciśnieniu 0,60 MPa jest o ok. 70% większe niż przy ciśnieniu 0,20 MPa, natomiast przy stałym ciśnieniu natężenie

wypływu wody rośnie proporcjonalnie wraz ze wzrostem pola powierzchni powstałego uszkodzenia.

Podjęte przed kilku laty pod kierunkiem prof. E. Mielcarzewicza badania *in situ* wpływu wysokości i zmian ciśnienia na uszkodzalność przewodów (rozdział 4.3.2), koszty naprawy uszkodzeń rurociągów i armatury (rozdział 5) oraz sieciowe straty wody nie były i jak dotychczas nie są prowadzone w innych ośrodkach naukowych w Polsce.

Do zbadania związków ilościowych pomiędzy maksymalną wysokością tłoczenia pompowni a uszkodzalnością przewodów i stratami sieciowymi wody wykorzystano wyniki badań w Brzegu, Oleśnicy i Kłodzku. W analizie uwzględniono ogólną intensywność ( $\lambda$ ) uszkodzeń rurociągów magistralnych i rozdzielczych (z pominięciem uszkodzeń armatury), a straty wody ( $S$ ) określono na podstawie rocznych bilansów dostawy i zużycia wody. Niemożliwe było oszacowanie strat wody w badanych rejonach Wrocławia, dlatego pominięto je w ocenie. Parametry eksploatacyjne sieci wodociągowych w Oleśnicy, Brzegu i Kłodzku zamieszczono w tabeli 6.1.

Badane miasta należą do średniej wielkości o zbliżonej liczbie mieszkańców (30–40 tys.) i długości sieci wodociągowej (68–75 km bez przyłączy), w których na 1 km sieci przypadło 440–560 mieszkańców. Sieci wodociągowe w Kłodzku i Oleśnicy charakteryzowały się zbliżonymi wartościami obciążenia sieci, natomiast w Brzegu było nieco większe (rys. 6.10). Podczas badań wartości  $O_s$  uległy obniżeniu o 31–48%, a w ostatnim roku obserwacji wynosiły około  $100 \text{ m}^3/(\text{km}\cdot\text{d})$  w Oleśnicy i Kłodzku oraz około  $130 \text{ m}^3/(\text{km}\cdot\text{d})$  w Brzegu.

Badane systemy wodociągowe różniły się wartościami maksymalnej wysokości tłoczenia pompowni, przy czym najniższa była w Oleśnicy, nieco wyższa w Brzegu, a najwyższa w Kłodzku (tab. 4.1, tab. 6.1).

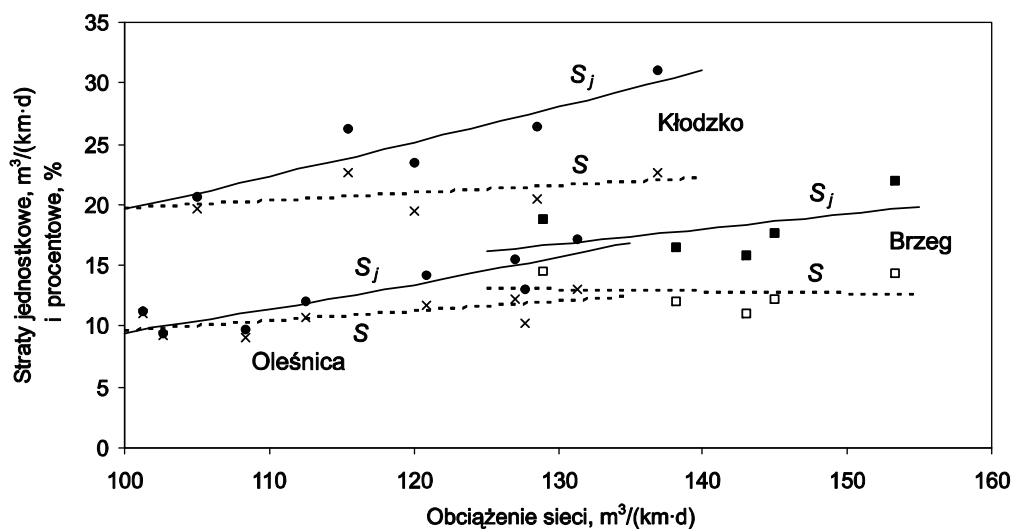
Biorąc pod uwagę średnie wartości wysokości tłoczenia ( $H_{\max}$ ) i ogólnej intensywności uszkodzeń rurociągów ( $\lambda$ ) z dwóch okresów eksploatacji sieci, tj. przy nadmiernym ciśnieniu (I okres badań) i przy obniżonym ciśnieniu (II okres badań) stwierdzono, że po zmniejszeniu wahań ciśnienia oraz jego wysokości o około 20% w Oleśnicy, około 10% w Brzegu i około 15% w Kłodzku, nastąpił spadek intensywności uszkodzeń rurociągów w tych miastach odpowiednio o 58%, 30% i 39% (tab. 4.15).

Badanie związków ilościowych pomiędzy wysokością tłoczenia pompowni i stratami wody przeprowadzono dla sieci wodociągowych w Oleśnicy na podstawie danych z lat 1993–2000, w Brzegu z lat 1996–2000 i w Kłodzku z lat 1995–1999. Wiarygodne dane o stratach wody w Oleśnicy i Brzegu pochodzą tylko z okresu eksploatacji sieci przy obniżonym ciśnieniu (II okres badań), natomiast w Kłodzku – częściowo z okresu eksploatacji przy nadmiernym ciśnieniu (ok. 2,5 roku) i częściowo (2,5 roku) z okresu obniżonego ciśnienia w sieci. Z tego powodu nie można było ocenić wpływu zmian wysokości tłoczenia w rozważanych miastach na występujące w nich straty wody. Porównano zatem tylko wskaźniki strat wody występujące w systemach wodociągowych poszczególnych miast, gdyż warunki ich eksploatacji były zbliżone, a zasadnicze różnice dotyczyły jedynie wysokości ciśnienia.

Tabela 6.1. Parametry eksploatacyjne sieci wodociągowych w Oleśnicy, Brzegu i Kłodzku

Table 6.1. Service parameters of water-pipe networks in Oleśnica, Brzeg and Kłodzko

Parametr, jednostka	Rok obserwacji											
	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	
<b>Oleśnica</b>												
Okres eksploatacji sieci	nadmierne ciśnienie (I)			obniżone ciśnienie (II okres)								
Obciążenie sieci ( $O_s$ ), $m^3/(km \cdot d)$	150,0	143,2	138,3	131,3	127,7	120,9	127,0	112,5	108,4	102,7	101,2	
Straty i zużycie własne ( $S_w$ ), %	13,0	18,2	20,8	22,5	17,0	20,6	22,9	16,3	15,8	13,8	15,1	
Straty procentowe ( $S$ ), %	12,0	9,8	10,9	13,1	10,3	11,7	12,2	10,7	9,0	9,2	11,0	
Straty jednostkowe ( $S_j$ ), $m^3/(km \cdot d)$	18,0	14,0	15,1	17,2	13,1	14,2	15,5	12,1	9,7	9,4	11,2	
Intensywność uszk. ( $\lambda$ ), uszk./ $(km \cdot a)$	0,91	1,17	0,99	0,53	0,33	0,36	0,35	0,33	0,37	0,37	0,30	
Średnia intensywność $\lambda$ , uszk./ $(km \cdot a)$	$\lambda = 0,88$ ( $\lambda_u = 0,64$ , $\lambda_p = 0,24$ )			$\lambda = 0,37$ ( $\lambda_u = 0,14$ , $\lambda_p = 0,23$ )								
Ciśnienie maksymalne ( $H_{max}$ ), MPa	0,50			0,40								
<b>Brzeg</b>												
Okres eksploatacji sieci	–	nadmierne ciśnienie (I okres)					obniżone ciśnienie (II okres)					
Obciążenie sieci ( $O_s$ ), $m^3/(km \cdot d)$	–	249,7	206,3	197,0	161,6	153,4	153,3	145,0	143,0	138,1	128,9	
Straty i zużycie własne ( $S_w$ ), %	–	10,9	8,4	16,5	13,9	10,9	16,9	13,7	14,1	14,0	16,9	
Straty procentowe ( $S$ ), %	–	8,8	6,3	13,9	12,2	9,1	14,4	12,2	11,1	12,0	14,6	
Straty jednostkowe ( $S_j$ ), $m^3/(km \cdot d)$	–	22,1	13,1	27,5	19,7	14,0	22,0	17,7	15,9	16,5	18,8	
Intensywność uszk. ( $\lambda$ ), uszk./ $(km \cdot a)$	–	0,29	0,27	0,25	0,31	0,35	0,36	0,17	0,24	0,14	0,21	
Średnia intensywność $\lambda$ , uszk./ $(km \cdot a)$	–	$\lambda = 0,30$ ( $\lambda_u = 0,06$ , $\lambda_p = 0,24$ )					$\lambda = 0,21$ ( $\lambda_u = 0,05$ , $\lambda_p = 0,16$ )					
Ciśnienie maksymalne ( $H_{max}$ ), MPa	–	0,538	0,51	0,496	0,483	0,505	0,464	0,452	0,451	0,45	0,443	
Dobowe zmiany ciśnienia ( $\Delta H$ ), MPa	–	0,146	0,123	0,107	0,106	0,141	0,108	0,089	0,092	0,093	0,09	
<b>Kłodzko</b>												
Okres eksploatacji sieci	–	–	nadmierne ciśnienie (I okres)					obniżone ciśnienie (II)				
Obciążenie sieci ( $O_s$ ), $m^3/(km \cdot d)$	–	–	152,0	143,6	137,9	136,9	128,5	120,0	115,4	105,0	–	
Straty i zużycie własne ( $S_w$ ), %	–	–	13,9	13,6	21,4	26,4	25,4	24,8	28,1	23,5	–	
Straty procentowe ( $S$ ), %	–	–	10,4	10,5	11,0	22,6	20,5	19,5	22,7	19,6	–	
Straty jednostkowe ( $S_j$ ), $m^3/(km \cdot d)$	–	–	15,9	15,0	15,2	31,0	26,4	23,4	26,2	20,6	–	
Intensywność uszk. ( $\lambda$ ), uszk./ $(km \cdot a)$	–	–	0,24	0,40	0,42	0,39	0,20	0,30	0,31	0,09	–	
Średnia intensywność $\lambda$ , uszk./ $(km \cdot a)$	–	–	$\lambda = 0,33$ ( $\lambda_u = 0,05$ , $\lambda_p = 0,28$ )					$\lambda = 0,20(0,02; 0,18)$				
Ciśnienie maksymalne ( $H_{max}$ ), MPa	–	–	0,70					$\leq 0,60$				



Rys. 6.14. Zmiany procentowych ( $S$ ) i jednostkowych ( $S_j$ ) strat wody wraz ze zmianami obciążenia ( $O_s$ ) sieci w Kłodzku, Oleśnicy i Brzegu  
 Fig. 6.14. Variations in the percentage of water loss ( $S$ ), unit water loss ( $S_j$ ) and loading ( $O_s$ ) for the water-pipe networks of Kłodzko, Oleśnica and Brzeg

Zmiany jednostkowych strat wody wraz ze zmianami obciążenia sieci wodociagowych w Kłodzku, Oleśnicy i Brzegu (w latach objętych oceną) określono wzorami (6.4)–(6.6), natomiast zmiany procentowych strat opisano poniższymi zależnościami (istotną korelację stwierdzono w Oleśnicy):  
 w Kłodzku (1995–1999):

$$S = 13,660 + 0,0604 O_s \quad (R = 0,4691; R_{kr} = 0,8054) \quad (6.13)$$

w Oleśnicy (1993–2000):

$$S = 1,2607 + 0,082767 O_s \quad (R = 0,6906; R_{kr} = 0,6215) \quad (6.14)$$

w Brzegu (1996–2000):

$$S = 15,3868 - 0,01784 O_s \quad (R = 0,1032; R_{kr} = 0,8054) \quad (6.15)$$

Z ilustracji tych wyników na rys. 6.14 widać, że jednostkowe straty wody malały wraz ze spadkiem obciążenia sieci wodociagowych, a dla jednakowej we wszystkich sieciach wartości obciążenia  $O_s$  równego  $130 \text{ m}^3/(\text{km} \cdot \text{d})$  najmniejsze straty  $S_j$  stwierdzono w Oleśnicy ( $15,6 \text{ m}^3/(\text{km} \cdot \text{d})$ ), nieco większe w Brzegu ( $16,8$ ), a największe w Kłodzku ( $28,0$ ).

Straty procentowe natomiast ulegały bardzo nieznacznym zmianom, ale relacje pomiędzy ich wartościami w rozważanych miastach były analogiczne, gdyż straty

wynosiły 12,0% w Oleśnicy, 13,1% w Brzegu i 21,5% w Kłodzku. Stąd wniosek, że najistotniejszy wpływ na straty wody miało ciśnienie  $H_{\max}$ , które było najniższe w Oleśnicy (0,4 MPa), wyższe w Brzegu (0,45 MPa), a najwyższe w Kłodzku (0,6–0,7 MPa, średnio 0,65 MPa).

W celu określenia wpływu wysokości ciśnienia w pompowni na poziom strat wody wskutek wycieków, w kolejnym etapie analizy zbadano, czy istnieją korelacje pomiędzy intensywnością uszkodzeń rurociągów i stratami wody. Uwzględniono przy tym średnie roczne wartości ogólnej intensywności uszkodzeń rurociągów ( $\lambda$ , uszk./(km·a)) oraz procentowych strat wody ( $S$ , %), które ujmują wpływ obciążenia sieci wodociągowej (ze względu na wyższe wartości  $O_s$  sieci w Brzegu niż w Kłodzku i Oleśnicy). Uzyskano zależności (o przeciętnej i wysokiej korelacji parametrów):  
w Oleśnicy:

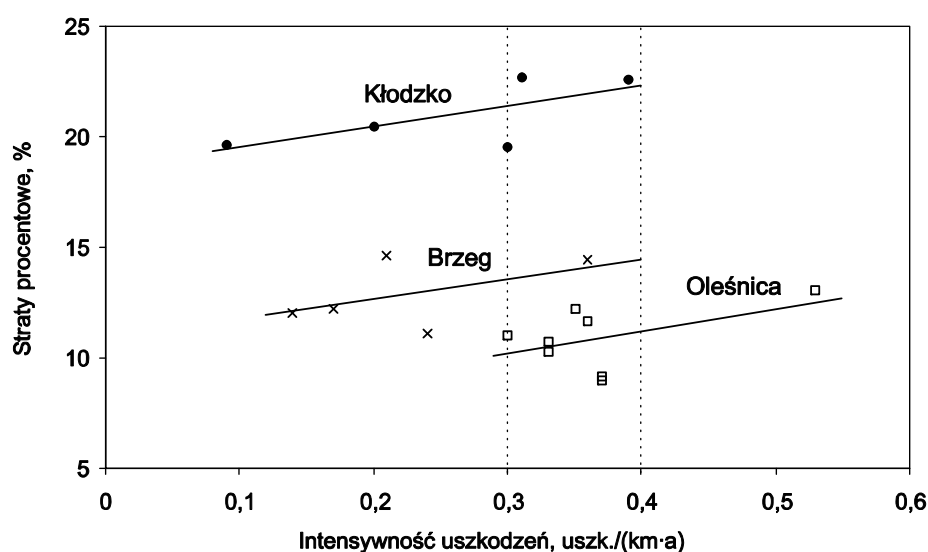
$$S = 7,209 + 10,044 \lambda \quad (R = 0,4946; R_{kr} = 0,6215) \quad (6.16)$$

w Brzegu:

$$S = 10,809 + 9,156 \lambda \quad (R = 0,5007; R_{kr} = 0,8054) \quad (6.17)$$

w Kłodzku:

$$S = 18,564 + 9,364 \lambda \quad (R = 0,6880; R_{kr} = 0,8054) \quad (6.18)$$



Rys. 6.15. Zmiany procentowych strat wody ( $S$ ) w zależności od intensywności uszkodzeń ( $\lambda$ ) rurociągów w Kłodzku, Oleśnicy i Brzegu

Fig. 6.15. Variations in the percentage of water loss ( $S$ ) related to failure rate ( $\lambda$ ) for the water-pipe networks of Kłodzko, Oleśnica and Brzeg

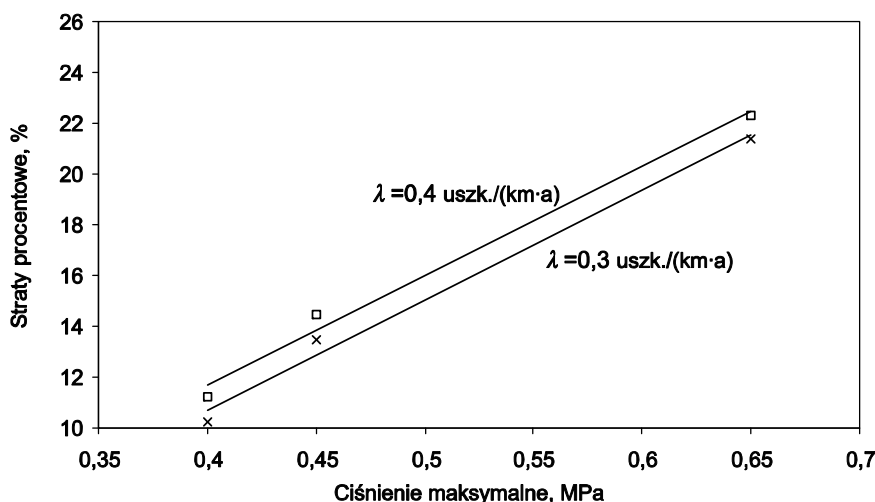
Z ilustracji powyższych zależności na rys. 6.15 widać, że w analizowanych systemach wodociągowych o zbliżonej uszkodzalności rurociągów procentowe straty wody były zróżnicowane.

Dokonano więc porównania wartości wskaźników strat wody (obliczonych ze wzorów (6.16)–(6.18)) odpowiadających tym samym wskaźnikom uszkodzeń ( $\lambda = 0,3$  uszk./ $(\text{km}\cdot\text{a})$  i  $\lambda = 0,4$  uszk./ $(\text{km}\cdot\text{a})$ ) w systemach o odmiennych warunkach ciśnieniowych (dla średnich wartości  $H_{\text{max}}$  równych 0,4 MPa (Oleśnica 1993–2000), 0,45 MPa (Brzeg 1996–2000) i 0,65 MPa (Kłodzko 1995–1999)). Procentowe straty wody rosły liniowo wraz ze wzrostem maksymalnej wysokości tłoczenia pompowni: dla  $\lambda = 0,30$  uszk./ $(\text{km}\cdot\text{a})$ :

$$S = -6,609 + 43,286 H_{\text{max}} \quad (R = 0,9949; R_{\text{kr}} = 0,9877) \quad (6.19)$$

dla  $\lambda = 0,40$  uszk./ $(\text{km}\cdot\text{a})$ :

$$S = -5,429 + 42,857 H_{\text{max}} \quad (R = 0,9946; R_{\text{kr}} = 0,9877) \quad (6.20)$$



Rys. 6.16. Zmiany procentowych strat wody ( $S$ ) w sieciach wodociągowych o różnym ciśnieniu ( $H_{\text{max}}$ ), dla jednakowej intensywności uszkodzeń ( $\lambda$ ) rurociągów

Fig. 6.16. Variations in the percentage of water loss ( $S$ ) in water-pipe networks which show the same rate of pipe failure ( $\lambda$ ) but differ in the  $H_{\text{max}}$  value

Z analizy powyższych zależności przedstawionych na rys. 6.16 oraz wyników dotychczas przeprowadzonych badań i porównań parametrów eksploatacyjnych rozwiązanych sieci wodociągowych jednoznacznie wynika, że podstawową przyczyną zwiększonych strat wody było wyższe ciśnienie. Przykładowo: przy ogólnej intensywności uszkodzeń rurociągów równej 0,3 uszk./ $(\text{km}\cdot\text{a})$  w Oleśnicy, gdzie ciśnienie w pompowni było najniższe (0,4 MPa), straty wody wynosiły 10,2%, w Kłodzku zaś,

gdzie ciśnienie było najwyższe (0,65 MPa), straty wody były ponaddwukrotnie większe i wynosiły 21,4%.

Wpływ na straty wody i relacje między ich wielkościami w badanych sieciach miały także z pewnością rodzaj i wielkość uszkodzeń rurociągów oraz czas wypływu wody. We wszystkich systemach wodociagowych przeważały pęknięcia i perforacje rurociągów, których udział w ogólnej liczbie uszkodzeń był najmniejszy w Oleśnicy (62%), a największy w Kłodzku (89%). Brak danych o wielkości uszkodzeń oraz czasie wypływu przez nie wody (z wyjątkiem Brzegu – rozdział 4.3.3) uniemożliwił ocenę i porównanie wpływu tych czynników na sieciowe straty wody.

## 6.7. Wnioski

W trosce o ochronę bardzo małych dyspozycyjnych zasobów wodnych Polski należy prowadzić wszelkie działania zmierzające do ograniczenia dużych strat wody w systemach dystrybucji, których główną przyczyną powstawania są przecieki z sieci przewodów.

Należy podkreślić, że spośród wielu czynników największy wpływ na wielkość rzeczywistych strat wody ma zły stan techniczny sieci przewodów oraz wysokość ciśnienia w sieci i jego zmiany w cyklu dobowym. Parametry ciśnienia wpływają zarówno na awaryjność, jak i na natężenie wypływu wody z uszkodzonych elementów, niezależnie od przyczyn wywołujących uszkodzenia. Szczególną uwagę i środki należy zatem poświęcić na renowację zdekapitalizowanych sieci oraz na kontrolę i analizę wysokości ciśnienia. Z tego względu konieczne jest podejmowanie przedsięwzięć i rozwiązań minimalizujących wysokość ciśnienia i znaczne jego wahania w cyklu dobowym w eksploatowanych i projektowanych systemach wodociagowych.



## 7. Podsumowanie, uwagi i wnioski końcowe

Podstawą projektowania, eksploatacji i modernizacji współczesnych systemów wodociągowych powinna być, i jest w coraz większym zakresie, nie tylko analiza techniczno-ekonomiczna, ale i niezawodnościowa. Zwłaszcza w obecnej sytuacji, gdy zdolność produkcyjna większości przedsiębiorstw wodociągowych przekracza bieżące zapotrzebowanie na wodę, problem zapewnienia wymaganego poziomu niezawodności działania systemów nabiera szczególnej wagi. Chodzi przede wszystkim o poprawę jakości wody produkowanej, a zwłaszcza dostarczanej do użytkowników oraz zapewnienie ciągłości jej dostawy.

Najwięcej problemów eksploatacyjnych przysparza system dystrybucji wody. Istniejące obecnie w polskich miastach sieci wodociągowe wykonane są w przeważającej większości z rur z żeliwa szarego, bez odpowiednich powłok zabezpieczających. Charakteryzuje je duża awaryjność, wynikająca zarówno z kilkudziesięcioletniej eksploatacji, jak i z ograniczeń technologii produkcji i jakości wykonawstwa rur oraz ich połączeń w okresie gospodarki planowej. Ponadto występujące uszkodzenia przewodów, jak wykazano w pracy, powstają w wyniku oddziaływania na sieć wodociągową wielu różnych czynników, których stopień wpływu jest także bardzo zróżnicowany w poszczególnych systemach dystrybucji wody. Sieci wodociągowe mają złożoną strukturę, są przy tym zróżnicowane technicznie, ciągle modernizowane i pracują ze zmiennym natężeniem przepływu wody i ciśnieniem w przewodach. Dlatego ocena niezawodności działania poprzez analizę przyczyn, rodzaju i skutków uszkodzeń sieci jest możliwa jedynie na podstawie wyników systematycznych, kompleksowych i wieloletnich badań eksploatacyjnych prowadzonych oddzielnie w każdym systemie dystrybucji wody.

Pomimo tych obiektywnych trudności podjęto próbę uogólnienia wpływu wybranych, najistotniejszych czynników na koszty i niektóre parametry eksploatacyjne miejskich sieci wodociągowych. Miarodajne wyniki i wnioski z badań uzyskano zwłaszcza w odniesieniu do przewodów wykonanych z żeliwa szarego, które stanowiły największy udział w ogólnej długości eksploatowanych sieci.

W wyniku przeprowadzonych badań wskaźników niezawodności sieci wodociągowych na terenach nieobjętych działalnością górnictwem, w dwóch okresach eksploatacji ze względu na wysokość ciśnienia wody, wykazano:

1. Zmniejszenie dobowych wahań ciśnienia i ograniczenie maksymalnej wysokości tłoczenia pompowni (o 10% do około 40%) w systemach wodociągowych w Brzegu, Kłodzku, Oleśnicy i wybranych rejonach Wrocławia spowodowało znaczący, bo 1,5–2,3-krotny spadek średniej ogólnej intensywności uszkodzeń ( $\lambda$ ) rurociągów ze-

liwnych (rozdział 4.3.2.1.1.1) oraz 1,4–2,4-krotny spadek wartości  $\lambda$  rurociągów ogółem (rozdział 4.3.2.1.4.1). W większym stopniu zmniejszyła się intensywność uszkodzeń złączy ( $\lambda_u$ ) przewodów żeliwnych oraz sieci ogółem (spadek 1,2–4,6-krotny), niż intensywność pęknięć i perforacji ( $\lambda_{po}$ ) materiału rur (spadek 1,2–2,1-krotny).

Na przykładzie sieci wodociągowej w Brzegu wykazano, że istotne zmniejszenie intensywności uszkodzeń rurociągów można uzyskać zwłaszcza dzięki ograniczeniu dobowych wahań ciśnienia ( $\Delta H$ ). Spadek ogólnej intensywności uszkodzeń rurociągów żeliwnych (o ok. 40%) i rurociągów ogółem (o 30%) uzyskano po zmniejszeniu (o 25%) dobowych zmian wysokości tłoczenia i jednoczesnym obniżeniu (o 10%) maksymalnej wysokości tłoczenia pompowni (dla średnich wartości tych parametrów w dwóch okresach eksploatacji sieci).

2. Dla większości z analizowanych systemów nie stwierdzono korelacji pomiędzy intensywnością uszkodzeń rurociągów żeliwnych a okresem ich budowy, uwzględniając podział na przewody budowane przed 1940 r. (stanowiły 13–57% ogólnej długości sieci) i budowane w latach 1952–1996 (rozdział 4.3.2.1.1.2). Świadczy to niekoniecznie o dobrym stanie technicznym starych rurociągów, ale przede wszystkim o złym stanie technicznym i dużej awaryjności większości nowszych rurociągów (przewaga uszkodzeń złączy rur), budowanych w okresie gospodarki planowej. Na znaczną dekapitalizację rurociągów żeliwnych budowanych przed 1940 r. wskazuje jednak przewaga uszkodzeń wskutek pęknięć i perforacji materiału rur (po kilkudziesięcioletniej eksploatacji), jak i nieznaczny spadek liczby tych uszkodzeń po obniżeniu wahań i wysokości ciśnienia wody. Wnioski te powinny stanowić istotne kryterium w podejmowaniu działań modernizacyjnych, tym bardziej jeśli uwzględni się skutki pęknięć rur, tj. większe koszty naprawy i straty wody niż w wypadku uszkodzeń złączy rur.

3. Trudno jest o uogólnienie wpływu czasu trwania eksploatacji (wieku) rurociągów żeliwnych na ich stan techniczny, którego jedną z miar jest podatność na uszkodzenia. Powodem jest najczęściej brak możliwości jednoznacznego wskazania głównej przyczyny awarii lub niepodjęcie takiej próby (przez eksploatatorów). Statystycznie istotne zależności pomiędzy czasem trwania eksploatacji a średnimi wartościami intensywności uszkodzeń  $\lambda$ ,  $\lambda_u$  i  $\lambda_{po}$  w obydwu okresach eksploatacji sieci wykazano dla rurociągów żeliwnych budowanych od 1980 r. w Oleśnicy (rozdział 4.3.2.1.1.3, wzory (4.14)–(4.21)). Wskazują one na zwiększenie wartości  $\lambda$ ,  $\lambda_u$  i  $\lambda_{po}$  wraz z czasem eksploatacji w każdym z okresów badań (rys. 4.13 i 4.14). Wyniki analizy z Oleśnicy w odniesieniu do rurociągów żeliwnych o określonych średnicach i z uwzględnieniem rodzaju ich uszkodzeń wykazały różny stopień korelacji pomiędzy intensywnością uszkodzeń a czasem eksploatacji, a także różne tendencje zmian, choć dla większości rurociągów był to wzrost ich uszkadzalności wraz z wiekiem. Analogiczna analiza przeprowadzona w odniesieniu do rejonu 1 sieci wodociągowej we Wrocławiu nie wykazała istotnych zależności, zarówno w poszczególnych latach, jak i okresach eksploatacji sieci.

4. Ilościowa ocena zmian intensywności uszkodzeń rurociągów żeliwnych w czasie obserwacji (w warunkach nadmiernego ciśnienia oraz po jego obniżeniu) wykazała w większości wypadków brak statystycznie istotnych korelacji (z wyjątkiem częściowo Oleśnicy i Wrocławia) między tymi parametrami (rozdział 4.3.2.1.1.4). Można to wytłumaczyć m.in. zbyt krótkim czasem trwania poszczególnych okresów badawczych przy dużej losowości i różnorodności czynników wpływających na awaryjność rurociągów. Dla sieci wodociągowej w Oleśnicy wartości intensywności uszkodzeń  $\lambda$ ,  $\lambda_u$  i  $\lambda_{po}$  zwiększały się w poszczególnych latach obserwacji w warunkach podwyższonego ciśnienia (wzory (4.22)–(4.24)). Po modernizacji systemu dystrybucji wody i obniżeniu wysokości i dobowych wahań ciśnienia tłoczenia nastąpiło zmniejszenie awaryjności rurociągów żeliwnych, z tendencją zmniejszania wartości  $\lambda$  i  $\lambda_u$  podczas obserwacji, przy prawie nieziennej wartości  $\lambda_{po}$  (wzory (4.25)–(4.27)).

Badanie tendencji zmian intensywności uszkodzeń przewodów w czasie trwania eksploatacji jest bardzo ważne, gdyż na podstawie uzyskanych wyników można prognozować intensywność uszkodzeń z kilkuletnim wyprzedzeniem, pod warunkiem że dysponuje się danymi z wieloletnich (ok. 10-letnich) obserwacji sieci w jednakowych warunkach jej eksploatacji.

5. Analiza intensywności i rodzaju uszkodzeń rurociągów żeliwnych o średnicach w zakresie 80–600 mm oraz sieci rurociągów ogółem (niezależnie od rodzaju materiału) o średnicach 80–1000 mm wykazała w większości wypadków (oceniając dane w dwóch okresach eksploatacji sieci w badanych miastach) statystycznie istotne relacje między zmniejszeniem wartości intensywności  $\lambda$ ,  $\lambda_u$ ,  $\lambda_{po}$  i zwiększeniem średnicy rurociągów (rozdziały 4.3.2.1.1.5 i 4.3.2.1.4.2). Rurociągi o większych średnicach charakteryzowały się mniejszą awaryjnością – spowodowaną głównie uszkodzeniami złączy rur – niż przewody o mniejszych średnicach, których awaryjność była większa i wynikała przede wszystkim z pęknięć i perforacji wskutek korozji materiału rur.

Średnica rurociągu, rodzaj i wielkość powstałego uszkodzenia mają znaczący wpływ na koszt naprawy, wielkość strat wody oraz niedobór wody u jej odbiorców podczas naprawy uszkodzenia.

6. Oceniając uszkadzalność przewodów wodociągowych należy wziąć pod uwagę zarówno wyżej omówione czynniki i parametry, jak i lokalizację (trasę, ulicę) przewodów, czego nie uwzględniano w dotychczasowych opracowaniach. Wykonana w ten sposób analiza (w odniesieniu do sieci wodociągowej w Oleśnicy i Wrocławiu) pozwoliła na wyodrębnienie rurociągów, których zwiększona uszkadzalność spowodowana była m.in. dużymi obciążeniami dynamicznymi wskutek zwiększonego ruchu kołowego, czy pracami ziemnymi prowadzonymi wzdłuż trasy rurociągu (rozdział 4.3.2.1.1.6).

7. Uszkodzenia przewodów występują częściej w okresie zimowym, szczególnie na płytko posadowionych odcinkach sieci i o małych prędkościach przepływu wody. We wszystkich systemach wodociągowych, z wyjątkiem Kłodzka, stwierdzono 1,2–5,0-krotnie większą awaryjność sieci rurociągów w okresie jesienno-zimowym w po-

równaniu z okresem wiosenno-letnim (rozdział 4.3.2.1.4.3). Oszacowano, że ok. 16–80% awarii w miesiącach jesienno-zimowych stanowiły pęknięcia rur wskutek zamarznięcia gruntu, a często także wody w przewodach.

8. Przewody wodociągowe wykonane z innych materiałów niż żeliwo (tworzywa sztuczne, stal, azbestocement) stanowiły niewielki udział w długości analizowanych sieci. Średnia ogólna intensywność ich uszkodzeń była mniejsza niż rurociągów z żeliwa szarego. W wypadku rurociągów z PVC i PE HD (rozdział 4.3.2.1.3) nie stwierdzono jednoznacznego wpływu zmian ciśnienia tłoczenia na ich awaryjność, jak w odniesieniu do rurociągów żeliwnych i stalowych.

9. Uszkodzenia armatury przewodów, tj. zasuw odcinających i hydrantów, stanowiły niewielki udział (3–14%) w ogólnej liczbie uszkodzeń przewodów w badanych miastach, z wyjątkiem wybranych rejonów Wrocławia (40–57%). Analiza intensywności uszkodzeń zasuw i hydrantów (z podziałem na rodzaj ich uszkodzeń w dwóch okresach eksploatacji) we Wrocławiu (rozdział 4.3.2.2) nie wykazała jednoznacznego wpływu warunków eksploatacji (zmian ciśnienia) i pory roku na awaryjność armatury, jak to było w wypadku rurociągów.

Sieci wodociągowe położone na terenach szkód górniczych narażone są dodatkowo na niekorzystne wpływy eksploatacji górniczej. Dokonano oceny uszkadzalności sieci wodociągowej w osiedlu Sienkiewicza w Polkowicach (teren oddziaływań właściwych dla II kategorii górniczej). Wykazano (rozdział 4.4.2), że wymiana rurociągów z żeliwa szarego i stali, niezabezpieczonych przed wpływami eksploatacji górniczej, na przewody z tworzyw sztucznych (PE HD i PVC) spowodowała wielokrotne zmniejszenie intensywności uszkodzeń rurociągów magistralnych i rozdzielczych oraz przyłączy domowych do poziomu odpowiadającego wartościom wskaźników uszkodzeń rurociągów z tworzyw sztucznych na terenach nieobjętych działalnością górnictwem. Znacznemu obniżeniu uległy dzięki temu także koszty naprawy uszkodzeń i sieciowe straty wody. Zaproponowano *metodę porównawczą* do ilościowej oceny wpływu szkód górniczych na uszkadzalność przewodów wodociągowych oraz podano przykłady jej zastosowania (rozdział 4.4.3).

W monografii wykazano, że o poziomie niezawodności sieci wodociągowej decyduje nie tylko częstość uszkodzeń, ale także czas trwania uszkodzeń przewodów. Dokonano analizy i porównania całkowitego czasu usuwania uszkodzeń rurociągów oraz jego składników: czasu organizacji naprawy, czasu naprawy właściwej uszkodzenia, czasu odnowy i czasu trwania prac porządkowych w dwóch różnej wielkości systemach wodociągowych (Brzeg i Opole). Wykazano, że wielkość tych parametrów zależy przede wszystkim od rodzaju sieci (magistralna, rozdzielcza, przyłącza), rodzaju uszkodzenia (pęknięcia i perforacje rur, uszkodzenia złączy), rodzaju pokrycia terenu w miejscu awarii (nawierzchnia utwardzona lub nieutwardzona), głębokości ułożenia przewodów i sposobu organizacji naprawy w przedsiębiorstwie. W obydwu systemach stwierdzono pozytywną tendencję do skracania poszczególnych składników czasu naprawy rurociągów w czasie obserwacji, a statystycznie istotne korelacje uzyskano

dla sieci rozdzielczej (wzory (4.33)–(4.39)) i częściowo przyłączy (wzór (4.40)) w Brzegu (rozdział 4.3.3).

Wyniki analizy wskaźników częstości i intensywności uszkodzeń oraz czasu odnowy rurociągów wykorzystano do oceny poziomu niezawodności sieci wodociągowych w Brzegu i Opolu, w oparciu o stacjonarną wartość wskaźnika gotowości (rozdział 4.3.4). Wyższym poziomem niezawodności charakteryzowały się rurociągi magistralne oraz rurociągi ogółem w Brzegu. Stosunkowo małe wartości wskaźnika gotowości sieci w Opolu spowodowane były długim czasem odnowy rurociągów i krótkim czasem ich pracy między uszkodzeniami. W Brzegu znaczący wzrost poziomu niezawodności sieci wodociągowej wystąpił w II okresie eksploatacji – dzięki zmniejszeniu częstości uszkodzeń (wskutek ograniczenia dobowych wahań i maksymalnej wysokości tłoczenia pompowni) oraz skróceniu czasu trwania odnowy rurociągów, w porównaniu z I okresem eksploatacji.

Porównano poziom niezawodności analizowanych sieci z wymaganym poziomem niezawodności proponowanym przez różnych autorów, wskazano na konieczność podejmowania działań ograniczających liczbę awarii oraz umożliwiających szybkie ich wykrywanie i sprawne usuwanie.

Wymiernym skutkiem uszkodzeń sieci wodociągowej jest m.in. wzrost kosztów eksploatacji związany z koniecznością naprawy zaistniałych uszkodzeń. W literaturze brak jest doniesień o tego rodzaju kosztach. Dokonana w pracy (rozdział 5) analiza i ocena dotyczyła kosztów naprawy (systemem zleconym) przewodów magistralnych i rozdzielczych (średnice od 80 mm do 1200 mm) we Wrocławiu w 1993 r., 1996 r. i 1999 r. Jednostkowe koszty naprawy (jednego uszkodzenia) w poszczególnych latach badań określono oddzielnie dla rurociągów i armatury przewodów (zasuw i hydrantów), uwzględniając ich średnice i rodzaj występujących uszkodzeń.

W odniesieniu do rurociągów uzyskano istotne korelacje wzrostu (liniowego) jednostkowych kosztów naprawy złączy rur ((5.1)–(5.3)) i jednostkowych kosztów naprawy pęknięć lub perforacji ((5.7)–(5.9)) wraz ze zwiększaniem średnicy rurociągów. Statystycznie istotny był także wzrost jednostkowych kosztów naprawy rurociągów o określonych średnicach, dla powyższych rodzajów uszkodzeń, w czasie badań (tab. 5.4 i 5.5). Wzrost kosztów spowodowany był głównie wysoką inflacją. Z powodów wymienionych w rozdziale 5.2, nie stwierdzono istotnych zależności pomiędzy jednostkowymi kosztami naprawy a głębokością ułożenia rurociągów.

W wypadku armatury jedynie jednostkowe koszty wymiany zasuw rosły wraz ze zwiększaniem ich średnicy ((5.15)–(5.17)), natomiast koszty naprawy zasuw oraz koszty naprawy i wymiany hydrantów były stałe w poszczególnych latach badań. Określono korelacje pomiędzy jednostkowymi kosztami naprawy oraz wymiany zasuw i hydrantów w czasie badań, stwierdzono przy tym wielokrotny wzrost ich wartości w latach 1993–1999 wskutek wysokiej inflacji (rys. 5.4 i 5.5).

W pracy przedstawiono także metodykę określania wskaźnika ( $\kappa_s$ , zł/(km·a)) strumienia kosztów naprawy uszkodzeń całej sieci lub jej części w oparciu o znajomość

intensywności uszkodzeń rurociągów i armatury wodociągowej oraz jednostkowych kosztów naprawy różnych rodzajów ich uszkodzeń (rozdział 5.3).

Wyniki powyższych badań i analiz intensywności uszkodzeń oraz jednostkowych kosztów naprawy rurociągów i armatury wykorzystano do oceny wpływu zmniejszenia wysokości i wahań ciśnienia tłoczenia pompowni na wartości strumienia kosztów naprawy przewodów wodociągowych w Brzegu, Kłodzku, Oleśnicy i wybranych rejonach Wrocławia (rozdział 5.4). Obliczono i porównano średnie wartości strumienia kosztów naprawy w dwóch okresach eksploatacji systemów – z nadmiernym ciśnieniem i po jego obniżeniu – przy założeniu stałych w czasie jednostkowych kosztów naprawy poszczególnych rodzajów uszkodzeń rurociągów i armatury z obserwacji we Wrocławiu w 1999 r. Wykazano, że wskutek zmniejszenia dobowych wahań ciśnienia i jego maksymalnej wysokości o 10–40% w badanych systemach dystrybucji wody wystąpił spadek średniej intensywności uszkodzeń rurociągów o 30–58%, a w konsekwencji zmniejszeniu uległy średni strumień kosztów naprawy rurociągów o 42–58% i średni strumień kosztów naprawy przewodów (rurociągów i armatury) o 30–44%.

W pracy przedstawiono ponadto metodykę prognozowania kosztów naprawy uszkodzeń sieci wodociągowej (rozdział 5.5.1), opartą na znajomości tendencji zmian intensywności uszkodzeń i jednostkowych kosztów naprawy uszkodzeń sieci w czasie eksploatacji, a także wskaźników wzrostu (spadku) cen. Koszty naprawy sieci wodociągowej można prognozować w miastach, w których prowadzone są systematyczne i wieloletnie badania i analizy uszkodzeń (w zależności od parametrów charakteryzujących sieć i warunki jej eksploatacji) oraz kosztów ich usuwania. Przykładowe obliczenia prognozowanych (z trzyletnim wyprzedzeniem) kosztów naprawy podano (rozdział 5.5.2) dla sieci wodociągowych w Oleśnicy i Wrocławiu (w rejonie 2). Jako optymalną (ze względu na pracochłonność obliczeń i możliwe błędy prognozy) do wykorzystania w przedsiębiorstwach wodociągowych – przy planowaniu środków finansowych na naprawę sieci – zaproponowano metodę szacowania wartości strumienia kosztów naprawy całej sieci wodociągowej lub jej wycinka.

Zły stan techniczny sieci wodociągowych, spowodowany kilkudziesięcioletnią eksploatacją i wieloletnimi zaniedbaniami w ich remontach, modernizacji i rozbudowie, a także ograniczeniami technologii produkcji i jakości wykonawstwa rur oraz ich połączeń w okresie gospodarki planowej, jest podstawową przyczyną występowania znacznych strat wody na skutek nieuszczelności złączy, uszkodzeń rurociągów, kształtek i armatury. Na wielkość sieciowych strat wody w istotny sposób wpływa także wysokość ciśnienia w systemach dystrybucji wody. Wykazano (rozdział 6), na podstawie badań ankietowych, że w okresie gospodarki rynkowej wystąpił znaczący spadek zużycia wody przez wszystkie grupy jej odbiorców i jednoczesny wzrost zużycia na potrzeby własne systemu wodociągowo-kanalizacyjnego oraz rejestrowanych strat wody w sieci wodociągowej. Stwierdzono, że naturalną konsekwencją spadku obciążenia sieci wodociągowych ( $O_s$ ,  $m^3/(km \cdot d)$ ), tj. jednostkowej ilości wody włączanej

do sieci, było zmniejszanie się jednostkowych strat wody ( $S_j$ ,  $\text{m}^3/(\text{km}\cdot\text{d})$ ) (wzory (6.1)–(6.11)), przy prawie niezmiennych stratach procentowych ( $S$ , %).

Na podstawie ilościowej oceny i porównania strat wody w sieciach wodociągowych w Oleśnicy, Brzegu i Kłodzku wykazano (rozdział 6.6.2), że procentowe straty wody rosły wraz ze wzrostem intensywności uszkodzeń rurociągów (wzory (6.16)–(6.18)) oraz maksymalnej wysokości tłoczenia pompowni w analizowanych systemach ((6.19), (6.20)). Dla tych samych intensywności uszkodzeń rurociągów ( $\lambda = 0,3$  uszk./ $(\text{km}\cdot\text{a})$  i  $\lambda = 0,4$  uszk./ $(\text{km}\cdot\text{a})$ ), w systemach wodociągowych różniących się głównie wysokością ciśnienia wody, procentowe straty wody były dwukrotnie większe w systemie o ciśnieniu  $H_{\text{max}} = 0,65$  MPa niż w systemie o ciśnieniu  $H_{\text{max}} = 0,4$  MPa.

Prezentowana praca, oparta na wynikach badań parametrów i kosztów eksploatacyjnych miejskich sieci wodociągowych, wnosi nowe elementy mające duże znaczenie zarówno dla rozwoju dyscypliny naukowej w zakresie niezawodności działania systemów dystrybucji wody, jak i dla praktyki inżynierskiej:

1. Wyszczególniono i omówiono najistotniejsze czynniki wpływające na parametry eksploatacyjne sieci wodociągowych, których analiza powinna stanowić podstawę działań podejmowanych podczas projektowania, budowy, modernizacji i eksploatacji sieci w celu zwiększenia niezawodności ich działania. Wskazano jednocześnie na braki w prowadzonej przez przedsiębiorstwa dokumentacji, uniemożliwiające dokonanie pełnej oceny działania systemów dystrybucji wody.

2. Ujednolicono klasyfikację występujących uszkodzeń rurociągów i armatury przewodów, która wynika z oceny wpływu określonego rodzaju uszkodzeń na skutki awarii – koszty naprawy, straty wody wskutek przecieków itp. Ma to na celu umożliwienie dokonywania porównań i uogólnień wyników badań sieci wodociągowych w różnych miastach.

3. Dokonano ilościowej oceny wpływu wysokości i dobowych zmian wysokości tłoczenia pompowni na uszkadzalność rurociągów magistralnych i rozdzielczych w miastach położonych na terenach nieobjętych działalnością górnictwem. Wskazano na konieczność kontroli i analizy ciśnienia oraz ograniczania nadwyżek i dobowych wahań ciśnienia w istniejących i projektowanych systemach wodociągowych, w celu zmniejszenia awaryjności przewodów.

4. Zaproponowano *metodę porównawczą* ilościowej oceny wpływu szkód górniczych na uszkadzalność przewodów wodociągowych. Może mieć ona zastosowanie do oceny udziału górnictwa w kosztach naprawy lub wymiany przewodów na terenach oddziaływania eksploatacji górnictwa.

5. Dokonano szczegółowej oceny składników całkowitego czasu usuwania uszkodzeń rurociągów magistralnych, rozdzielczych i przyłączy domowych oraz wskazano na konieczność skracania czasu ich trwania w celu zmniejszenia skutków uszkodzeń (skrócenia czasu wstrzymania dostawy wody do odbiorców, zmniejszenia strat wody, zwiększenia poziomu niezawodności sieci itp.).

6. Zbadano i określono tendencje zmian w czasie jednostkowych kosztów naprawy uszkodzeń rurociągów i armatury, z uwzględnieniem ich średnicy, rodzaju uszkodzeń i głębokości ułożenia przewodów.

7. Opracowano metodykę prognozowania kosztów naprawy uszkodzeń sieci wodociągowej z kilkuletnim wyprzedzeniem, która może być przydatna w praktyce do:

- planowania środków finansowych na naprawę sieci,
- podejmowania optymalnych decyzji w zakresie eksploatacji i modernizacji sieci wodociągowej, z uwzględnieniem rachunku ekonomicznego,
- szacowania kosztów osiągnięcia wymaganego poziomu niezawodności systemu dystrybucji wody.

8. Określono wpływ zmniejszenia wysokości i dobowych wahań ciśnienia tłoczenia pompowni na zmniejszenie kosztów naprawy przewodów wodociągowych.

9. Wykazano korelacje pomiędzy wielkością sieciowych strat wody a intensywnością uszkodzeń rurociągów oraz maksymalną wysokością tłoczenia pompowni.

Uzyskane rezultaty potwierdziły celowość i konieczność prowadzenia (kontynuowania) systematycznych i wszechstronnych badań niezawodności systemów dystrybucji wody, obejmujących przyczyny, rodzaj i skutki ich uszkodzeń – w tym ekonomiczne – dla przedsiębiorstw wodociągowych, odbiorców wody i środowiska. Kompleksowe badania wraz z bieżącym monitoringiem i analizą stanu technicznego i sprawności hydraulicznej systemów stanowią bowiem podstawowe źródło informacji niezbędnych przy podejmowaniu optymalnych decyzji w zakresie bieżącej eksploatacji oraz do opracowania i wyboru właściwej strategii odnowy istniejących, w większości zdekapitalizowanych, systemów wodociągowych.

Wynika stąd konieczność prowadzenia także badań i oceny kosztów wymiany i różnych metod renowacji przewodów oraz wpływu tych działań na jakość wody, na zmniejszenie awaryjności przewodów, sieciowych strat wody itp.

Konieczne jest ponadto kontynuowanie badań i prac studialnych w celu określenia wymaganego poziomu niezawodności systemów wodociągowych, w tym z uwzględnieniem rachunku ekonomicznego.



## Literatura

- [1] Abramov N.N., *Nadežnost sistem vodosnabženija*. Stroizdat, Moskva 1979.
- [2] Askew T., Kalinowski M., *Przecieki wody – praktyczna konieczność?* Mat. konf. „Modernizacja komunalnych wodociągów i kanalizacji – aspekty finansowe, organizacyjne i techniczne”, Warszawa 1996 (suplement).
- [3] Babczyński A., Bień J., Pawłaszek E., *Niezawodność działania sieci wodociągu częstochowskiego w zależności od zastosowanych do budowy materiałów*. Mat. konf. „Podstawy projektowania i eksploatacji systemów zaopatrzenia w wodę i usuwania ścieków”, Prace Nauk. Inst. Inż. Ochr. Środ. PWr., Wrocław 1991 nr 67, s. 31–38.
- [4] Berger M., Ways M., *Poszukiwania przecieków sieci wodociągowych*. Poradnik. Wyd. „Seidel-Przywecki”, Warszawa 2003.
- [5] Bittner S., Heine A., *Frostschäden an siedlungswasserwirtschaftlichen Anlagen im Winter 1995/1996 im Land Brandenburg*. Wasser-Abwasser, 1998, Nr. 13, s. 157–165.
- [6] Buckler M., Sattler R., *DVGW-Schadenstatistik Wasser, erste Auswertung und Umsetzung*. GWF Wasser-Abwasser, 1999, Nr. 13, s. 48–53.
- [7] Budziło B., Bajer J., Kraus K., *Analiza zaopatrzenia w wodę miasta Krynica*. Mat. konf. „Problemy gospodarki wodno-ściekowej w regionach rolniczo-przemysłowych”, Białowieża 2005. Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, Nr. 30, s. 35–50.
- [8] Buel H., Ducommun M., *Strategia zapobiegania przeciekom oraz pęknięciom sieci wodociągowych*. Materiały Firmy KREVOX.
- [9] Buie L. M., *Accounting for lost water*. Journal AWWA, 2000, Vol. 92, No. 7, s. 67–71.
- [10] Cole E. S., *Water losses and leakage control*. Mat. z 12<sup>nd</sup> Congress IWSA, Kyoto 1978, Special Subject 7.
- [11] Denczew S., *Wyniki badań niezawodności podsystemu połączeń wodociągowych*. GWiTS, 1997, nr 11, s. 420–427.
- [12] Denczew S., *Wpływ systemu sprawnego usuwania uszkodzeń sieci wodociągowej na jej niezawodność*. Ochrona Środowiska, 2000, nr 2, s. 21–24.
- [13] Denczew S., *Podstawy metodyczne eksploatacji układów dystrybucji wody*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000.
- [14] Denczew S., Królikowski A., *Podstawy nowoczesnej eksploatacji układów wodociągowych i kanalizacyjnych*. Arkady, Warszawa 2002.
- [15] Dohnalik P., *Straty wody w miejskich sieciach wodociągowych*. Polska Fundacja Ochrony Zasobów Wodnych, Bydgoszcz 2000.
- [16] Dohnalik P., *Straty i przecieki wody w sieciach wodociągowych według standardów międzynarodowych i doświadczeń własnych*. GWiTS, 2003, nr 10, s. 335–337.
- [17] Dohnalik P., Zapiór T., *Rzeczywiste straty wody w systemach wodociągowych regionu południowego Polski*. Mat. konf. „Zaopatrzenie w wodę miast i wsi”, PZITS, Poznań 1996, tom 1, s. 509–534.
- [18] Dzienis L., Królikowski A., *Analiza uszkodzeń miejskich sieci wodociągowych*. Mat. konf. „Niezwadność systemów wodociągowych i kanalizacyjnych”, PZITS, Kielce 1986, s. 301–313.
- [19] Dzienis L., Orzechowska M., *Analiza awaryjności sieci wodociągowej w Białymstoku z zastosowaniem teorii niezawodności*. GWiTS, 1987, nr 4, s. 75–78.
- [20] Heidrich Z., Roman M., *Analiza uszkodzeń sieci wodociągowej*. Mat. konf. „Zagadnienia zaopatrzenia w wodę miast i wsi”, PZITS, Poznań 1984, t. IV, s. 187–208.

- [21] Herz R. K., *Erneuerungsbedarf kommunaler Wasser-rohrnetze in den östlichen Bundesländern. Ergebnisse einer Untersuchung*. GWF Wasser-Abwasser, 1999, Nr. 13, s. 54–60.
- [22] Hoch W., *Zonenmessung zur Ermittlung von Wasserverlusten*. GWF Wasser-Abwasser. Wasser Special, 1999, Nr. 13, s. 76–82
- [23] Hoffman Z., *Efektywność gospodarki remontowej sieci wodociągowej na przykładzie m. Poznania*. IGK. Studia i Materiały, zeszyt 16, Warszawa 1967.
- [24] Hotłoś H., *Wpływ czasu eksploatacji i wysokości ciśnienia w sieci wodociągowej wybranego rejonu Wrocławia na uszkodzalność przewodów żeliwnych*. GWiTS, 1999, nr 4, s. 129–132.
- [25] Hotłoś H., *Ograniczenie ciśnienia w sieci wodociągowej jako czynnik zmniejszający uszkodzalność i koszty napraw uszkodzeń przewodów*. GWiTS, 1999, nr 5, s. 180–184.
- [26] Hotłoś H., *Niezawodność sieci wodociągowych w świetle aktualnych warunków ich eksploatacji*. Mat. konf. „Problemy inżynierii środowiska u progu nowego tysiąclecia”. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław–Szklarska Poręba 2000, s. 223–238.
- [27] Hotłoś H., *Badania wpływu warunków eksploatacji sieci wodociągowych na ich wskaźniki niezawodności i wskaźniki kosztów napraw*. Raporty Instytutu Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej serii SPR nr 31, Wrocław 2000.
- [28] Hotłoś H., *Wpływ wysokości ciśnienia na uszkodzalność i koszty napraw sieci wodociągowej*. Ochrona Środowiska, 2001, nr 2, s. 31–34.
- [29] Hotłoś H., *Wpływ modernizacji pompowni na parametry eksploatacyjne sieci wodociągowej*. Ochrona Środowiska, 2002, nr 4, s. 27–31.
- [30] Hotłoś H., *Badania eksploatacyjne wpływu wysokości ciśnienia i materiału rur na uszkodzalność sieci wodociągowej*. GWiTS, 2002, nr 11, s. 402–407.
- [31] Hotłoś H., *Analiza strat wody w systemach wodociągowych*. Ochrona Środowiska, 2003, nr 1, s. 17–24.
- [32] Hotłoś H., *Reliability level of municipal water-pipe network*. Environment Protection Engineering, 2003, No. 2, pp. 141–151.
- [33] Hotłoś H., *Zasoby wodne Polski, zużycie i straty wody w miejskich sieciach wodociągowych*. Mat. konf. „Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód”, PZITS, Poznań 2004, tom II, s. 535–546.
- [34] Hotłoś H., *Czas usuwania uszkodzeń przewodów sieci wodociągowej*. Mat. konf. „Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód”, PZITS, Poznań 2004, tom II, s. 523–534.
- [35] Hotłoś H., *Gospodarowanie zasobami wodnymi w Polsce w latach 1990–2002*. GWiTS, 2004, nr 7/8, s. 262–265.
- [36] Hotłoś H., *Avarijnist' i vartist' remontu vodoprovodnich mrež (na prikladi mist Pol'sci) (Accident rate and cost of repairing of water supply networks (at an example of Polish cities)*, Rinok Instalacij, 2004, No 6, s. 9–12.
- [37] Hotłoś H., *Vtrati vodi v mis'kich vodoprovodnich mrežach u Pol'sci (Water losses in Polish municipal water supply network)*, Rinok Instalacij, 2004, No 9, s. 14–17.
- [38] Hotłoś H., *Analiza kosztów naprawy uszkodzeń przewodów wodociągowych we Wrocławiu*. Ochrona Środowiska, 2005, nr 2, s. 37–43.
- [39] Hotłoś H., Kotowski A., Mielcarzewicz E., *Analiza porównawcza strat wody w sieciach wodociągowych Polkowic i innych miast*. Raporty Instytutu Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej serii SPR nr 24, Wrocław 1993.
- [40] Hotłoś H., Mielcarzewicz E., *Analiza uszkodzeń przewodów sieci wodociągowej w Oleśnicy*. Mat. konf. „Zaopatrzenie w wodę miast i wsi”, PZITS, Poznań 1994, s. 957–966.
- [41] Hotłoś H., Mielcarzewicz E., *Analiza udziału szkód górniczych w przebudowie sieci wodociągowej i kanalizacyjnej w rejonie osiedla Sienkiewicza w Polkowicach*. Raporty Inst. Inż. Ochr. Środ. PWroc., ser. SPR nr 40, Wrocław 1994.

- [42] Hotłoś H., Mielcarzewicz E., *Badania intensywności uszkodzeń przewodów sieci wodociągowej w Oleśnicy*. Mat. konf. „Współczesne problemy gospodarki wodno-ściekowej”, PZITS, Koszalin-Kołobrzeg 1995, s. 217–231.
- [43] Hotłoś H., Mielcarzewicz E., *Uszkodzalność sieci wodociągowej i kanalizacyjnej w warunkach eksploatacji górniczej na przykładzie rejonu osiedla Sienkiewicza w Polkowicach*. GWiTS, 1995, nr 12, s. 429–433.
- [44] Hotłoś H., Mielcarzewicz E., *Intensywność uszkodzeń i koszty napraw przewodów sieci wodociągowych*. GWiTS, 1996, nr 1, s. 25–28.
- [45] Hotłoś H., Mielcarzewicz E., *Badania wskaźników niezawodności sieci wodociągowych oraz ich wpływu na koszty eksploatacji sieci w wybranych miastach*. Raporty Inst. Inż. Ochr. Środ. PWr. serii SPR nr 70, Wrocław 1997.
- [46] Hotłoś H., Mielcarzewicz E., W., *Metody oceny udziału szkód górniczych w uszkodzalności sieci wodociągowych*. Mat. konf. „Rola GPW w systemie zaopatrzenia w wodę dziś i jutro”, GPW Katowice, PZITS, Ustroń-Katowice 1997, s. 73–81.
- [47] Hotłoś H., Mielcarzewicz E., *Dynamika zmian wskaźników zużycia i strat wody w sieciach wodociągowych wybranych miast Polski*. Mat. konf. „Zaopatrzenie w wodę miast i wsi”, PZITS, Poznań 1998, tom 1, s. 61–72. Przegląd Komunalny, dodatek „Zaopatrzenie w wodę miast i wsi”, 1998, nr 10, s. 24–30.
- [48] Hotłoś H., Mielcarzewicz E., *Kształtowanie się zużycia wody w Polsce w okresie gospodarki rynkowej*. GWiTS, 2000, nr 4, s. 135–137.
- [49] Hotłoś H., Mielcarzewicz E., Kluska W., *Sieci wodociągowe na terenach oddziaływania podziemnej eksploatacji górniczej na przykładzie Polkowic*. GWiTS, 2000, nr 11, s. 450–453.
- [50] Hotłoś H., Pełka H., *Analiza kosztów renowacji i budowy przewodów sieci wodociągowej we Wrocławiu*. Mat. konf. „Zaopatrzenie w wodę miast i wsi”, PZITS, Poznań 1996, tom 3, s. 421–432.
- [51] Ilin Ju. A., *Nadzieżność wodoprowadnych sooruzhenij i oborudowanija*. Stroizdat. Moskva 1985.
- [52] Instytut Techniki Budowlanej: *Wymagania techniczno-budowlane dla obiektów budowlanych wznoszonych na terenach podlegających wpływom eksploatacji górniczej*. Warszawa 1975.
- [53] Irle H. J., *Zusammenhänge von Wasserverlusten, Bodenaggressivität und Schadenshäufigkeit in Rohrnetzen erdverlegter Rohrleitungen aus Stahl*. GWF Wasser-Abwasser, 1984, Nr. 4, s. 163–169.
- [54] Irle H. J., Wehr R., *Systematische Reduzierung von Wasserverlusten*. GWF Wasser-Abwasser, 1990, Nr. 5, s. 286–292.
- [55] Iwanejko R., Wieczysty A., *Istniejące i nowe metody oraz wzory stosowane do obliczeń wskaźników niezawodności w badaniach systemów zaopatrzenia w wodę*. Monografie, nr 2, Komitet Inżynierii Środowiska PAN, Kraków 2001, s. 11–44.
- [56] Iwanejko R., Wieczysty A., *Ocena niezawodności systemu zaopatrzenia w wodę*. Monografie, nr 2, Komitet Inżynierii Środowiska PAN, Kraków 2001, s. 437–468.
- [57] Jamska H., *Wstępna ocena parametrów niezawodności sieci wodociągowej i kanalizacyjnej w Krakowie*. Materiały na XII Seminarium Projektantów Wodociągów, PZITS nr 411, Zakopane 1983, s. 209–222.
- [58] Józwik T., *Materiałowa diagnostyka techniczna elementów wodociągowych ze stopów żelaza, po długotrwałej eksploatacji*. GWiTS, 2001, nr 10, s. 348–354.
- [59] Jurczyk B., Kuś K., Piechurski F., *Wpływ rodzaju materiału sieci wodociągowej na jej awaryjność*. Mat. konf. „Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód”, PZITS, Kraków 2000, s. 683–692.
- [60] Kapcia J., *Analiza niezawodności systemów zaopatrzenia w wodę przy wykorzystaniu metody drzewa uszkodzeń*. Monografie, nr 2, Komitet Inżynierii Środowiska PAN, Kraków 2001, s. 417–435.
- [61] Knapik K., *Czasowoprzestrzenna symulacja działania systemu dystrybucji wody i jej zastosowania*. Politechnika Krakowska, Monografia 89, Kraków 1989.

- [62] Knapik K., Wierzbicki R., Wieczysty A., *Metody oceny niezawodności podsystemu dystrybucji wody*. Monografie, nr 2, Komitet Inżynierii Środowiska PAN, Kraków 2001, s. 365–405.
- [63] Kopischke G., *Erneuerungsbedarf öffentlicher Wasserrohrnetze aus Sicht eines Versorgungsunternehmens*. GWF Wasser-Abwasser, 1999, Nr. 13, s. 61–64.
- [64] Kotowski A., Hotłoś H., *Analiza porównawcza struktury i wielkości zużycia wody w wybranych miastach*. GWiTS, 1994, nr 7, s. 199–203.
- [65] Kotowski A., Hotłoś H., *Ocena wielkości strat wody w sieciach wodociągowych wybranych miast*. GWiTS, 1994, nr 8, s. 254–257.
- [66] Kowalewski P., *Rohrbruchuntersuchungen*. GWF Wasser-Abwasser, 1976, Nr. 8, s. 358–363.
- [67] Królikowski A., Piątka W., *Statystyczna ocena niezawodności pracy sieci wodociągowej w aglomeracji miejsko-przemysłowej*. GWiTS, 1981, nr 10, s. 239–241.
- [68] Kuś K., *Podstawy kwalifikacji sieci wodociągowej do wymiany*. Mat. konf. „Modernizacja komunalnych wodociągów i kanalizacji – aspekty finansowe, organizacyjne i techniczne”, Warszawa 1996, s. 119–127.
- [69] Kwietniewski M., *Metodyka badań eksploatacyjnych sieci wodociągowych pod kątem niezawodności dostawy wody do odbiorców*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1999.
- [70] Kwietniewski M., *Stan odnowy komunalnych sieci wodociągowych i kanalizacyjnych w Polsce w latach 1995–2000 w świetle danych z eksploatacji*. Instal, 2003, nr 5, s. 16–21.
- [71] Kwietniewski M., Elżanowski R., *Przykłady zastosowań Geograficznych Systemów Informacji w funkcjonowaniu przedsiębiorstw wodociągów i kanalizacji na świecie*. GWiTS, 1997, nr 2, s. 48–54.
- [72] Kwietniewski M., Roman M., Kłoss-Trębaczewicz H., *Niezawodność wodociągów i kanalizacji*. Arkady, Warszawa 1993.
- [73] Merlo G., *Recent Advances in the rehabilitation and improvement of distribution systems and pipelines*. Mat. z 16nd Congress IWSA, Rzym 1986, General Report 4.
- [74] Meyer C., Wehr R., *Formelmässige Bestimmung der Verlustmengen in Wasser-rohrnetzen als Anteil gemessener minimaler Netzzuflüsse*. GWF Wasser-Abwasser, 1998, Nr. 1, s. 24–31.
- [75] Mielcarzewicz E.W., *Modernizacja sieci wodociągowych i kanalizacyjnych*. Ochrona Środowiska, 1997, nr 2, s. 3–8.
- [76] Mielcarzewicz E.W., *Przewody wodociągowe i kanalizacyjne na terenach szkód górniczych*. Raporty Inst Inż. Ochr. Środ. PWr., ser. SPR nr 32, Wrocław 1999.
- [77] Mielcarzewicz E.W., *Obliczanie systemów zaopatrzenia w wodę*. Arkady, Warszawa 2000.
- [78] Mielcarzewicz E., Hotłoś H. i in., *Analiza uszkodzeń sieci wodociągowej, kanalizacji bytowo-gospodarczej i deszczowej w mieście Polkowice w warunkach podziemnej eksploatacji górniczej złóż miedzi w obrębie miasta*. Raporty Inst Inż. Ochr. Środ. PWr., ser. SPR nr 22, Wrocław 1996.
- [79] Mielcarzewicz E., Hotłoś H., *Przewody wodociągowe i kanalizacyjne na terenach oddziaływania eksploatacji górniczej*. Mat. konf. „Problemy naukowo-badawcze budownictwa”, Dolnośląskie Wyd. Edukacyjne, Wrocław–Krynica 2000, tom 4, s. 101–108.
- [80] Mielcarzewicz E., Hotłoś H., *Water demand management and conservation including water losses control*. National Report Poland. IWSA World Water Congress, Buenos Aires 1999. Water Supply, 2000, Vol. 18, No. 1/2, s. 198–199.
- [81] Mielcarzewicz E., Pełka H., Hotłoś H., Lewicki Z., *Optymalne programowanie eksploatacji (renowacji) sieci wodociągowych ze względu na ich sprawność hydrauliczną i niezawodność działania*. Raporty Inst. Inż. Ochr. Środ. PWr., ser. SPR nr 27, Wrocław 1993.
- [82] Mielcarzewicz E.W., Wartalski J., *Systemy zaopatrzenia w wodę i usuwania ścieków. Wybrane zagadnienia*. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1990.
- [83] Moruzzi L., *Reasons for pipe damage*. Mat. z 16nd Congress IWSA, Rzym 1986, Special Subject 16.

- [84] National Reports, *Water demand management and conservation including water losses control*. IWSA World Water Congress, Buenos Aires 1999. Water Supply 2000, Vol. 18, No. 1/2.
- [85] Osiński A., Lewandowski M., *Ocena działań podjętych w Gdańsku dla ograniczenia strat wody w sieci wodociągowej*. Mat. konf. „Zaopatrzenie w wodę i jakość wód”, PZITS, Poznań–Gdańsk 2002, s. 928–947.
- [86] Pawełek J., Wojdyna M., *Analiza uszkodzeń przewodów rozdzielczych w dużym systemie wodociągowym*. GWiTS, 2001, nr 2, s. 49–54.
- [87] Pawłowski L., *Die Wasserversorgung Berlins. 10 Jahre nach dem Fall der Mauer*. GWF Wasser-Abwasser, 1999, Nr. 11, s. 763–768.
- [88] Petrozolin W., *Uszkodzenia sieci wodociągowej w Warszawie*. Przegląd Informacyjny IGK, Warszawa 1971, nr 1, s. 18–31.
- [89] Piechurski F., *Przyczyny i ocena awaryjności rozdzielczej sieci wodociągowej*. Rynek Instalacyjny, 1999, nr 5, s. 11–17.
- [90] Piechurski F., Kuś K., *Znaczenie wskaźników awaryjności i strat wody w ocenie pracy sieci wodociągowej*. Mat. konf. „Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód”, PZITS, Poznań 2004, tom II, s. 603–617.
- [91] PN-77/N-04005. *Niezawodność w technice. Wskaźniki niezawodności. Nazwy, określenia i symbole*.
- [92] PN-77/N-04010. *Niezawodność w technice. Wybór wskaźników niezawodności*.
- [93] PN-79/N-04031. *Niezawodność w technice. Estymacja wskaźników niezawodności*.
- [94] PN-82/N-04001. *Eksploatacja obiektów technicznych. Terminologia ogólna*.
- [95] PN-84/N 04041/05. *Niezawodność w technice. Zapewnienie niezawodności obiektów technicznych. Ogólne zasady badań*.
- [96] PN-85/B-02170. *Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłozę na budynki*.
- [97] PN-93/N-50191. *Słowniczek terminologiczny elektryki. Niezawodność, jakość, usługi*.
- [98] PN-97/B-10725. *Wodociągi. Przewody zewnętrzne. Wymagania i badania*.
- [99] Praca zbiorowa (pod red. M. Sozańskiego), *Wodociągi i kanalizacja w Polsce, tradycja i współczesność*. Polska Fundacja Ochrony Zasobów Wodnych, Poznań–Bydgoszcz 2002.
- [100] Rak J., *Awaryjność sieci wodociągowych w miastach polskich*. Wodociągi Polskie. Biuletyn Informacyjny Izby Gospodarczej „Wodociągi Polskie”, 2003, nr 3, s. 11–14.
- [101] Rak J. R., *Istota ryzyka w funkcjonowaniu systemu zaopatrzenia w wodę*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2004.
- [102] Rak J., Tchórzewska-Cieślak B., *Intensywność uszkodzeń sieci wodociągowych w miastach województwa podkarpackiego*. Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej „Inżynieria Środowiska”, 2003, Zeszyt nr 16, tom I, s.123–129.
- [103] Rak J., Tunia A., *Awaryjność sieci wodociągowej*. Mat. konf. „Bezpieczeństwo i niezawodność działania systemów gazowych, wodociągowych, kanalizacyjnych i centralnego ogrzewania”, Wyd. PZiTS Kraków, Zakopane 1997, s. 219–229.
- [104] Rak J., Wiczysty A., *Zastosowanie metody Bayesa w ocenie niezawodności podsystemu dystrybucji wody*. Mat. konf. „Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód”, PZITS, Poznań 2004, tom II, s. 631–641.
- [105] Rocznik Statystyczny Rzeczypospolitej Polskiej. GUS, Warszawa 1992–2005.
- [106] Roman M., *Problem kryteriów niezawodności komunalnych systemów wodociągowych i kanalizacyjnych*. Mat. konf. „Niezawodność systemów wodociągowych i kanalizacyjnych”, PZITS, Kielce 1986, s. 13–26.
- [107] Roman M., *Niezawodność przewodów sieci wodociągowej w świetle danych z eksploatacji*. Mat. konf. „Niezawodność systemów wodociągowych i kanalizacyjnych”, PZITS, Kielce 1986, s. 269–284.

- [108] Roscher H., Saitenmacher L., Perdelwitz D., *Frostschäden an Hausanschluss- und Versorgungsleitungen im Winter 1995/1996. 1. Teil*. Wasser-Abwasser, 1997, Nr. 1, s. 1–8.
- [109] Rybicki S.A., Rybicki S.M., *Uszkodzenia rurociągów w wybranych miastach w świetle materiałów statystycznych przedsiębiorstw wodociągowych*. Materiały na XII Seminarium Projektantów Wodociągów, PZITS nr 411, Zakopane 1983, s. 115–130.
- [110] Saitenmacher L., Perdelwitz D., Roscher H., *Frostschäden an Hausanschluss- und Versorgungsleitungen im Winter 1995/1996. 2. Teil*. Wasser-Abwasser, 1997, Nr. 1, s. 10–16.
- [111] Sattler R., *Einführung der bundesweiten DVGW-Schadensstatistik Wasser*. GWF Wasser Special, 1997, Nr. 13, s. 27–31.
- [112] Schimeczek H., *Permanente Rohrnetzüberwachung (PRÜ). Ein Verfahren zur Früherkennung von Lecks in Wasserrohrnetzen*. GWF Wasser-Abwasser, 1993, Nr. 6, s. 322–325.
- [113] Schlicht H., *Technische, hygienische und wirtschaftliche Aspekte bei der Umsetzung von Netzrehabilitationsstrategien*. Wasser-Abwasser, 2003, Nr. 13, s. 71–76.
- [114] Schmidt D., *Zulässige Schadensrate in Wasserrohrnetzen aus Sicht der Wirtschaftlichkeit und Versorgungssicherheit am Beispiel der Versorgungsgebietes Erfurt*. GWF Wasser-Abwasser, 1999, Nr. 1, s. 45–50.
- [115] Siwoń Z., *Wybrane zagadnienia bieżącej eksploatacji miejskich sieci wodociągowych*. Mat. konf. „Nowe materiały i urządzenia w wodociągach i kanalizacji”, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach, Kielce–Cedzyna 2003, s. 11–24.
- [116] Siwoń Z., Cieżak J., Cieżak W., *Praktyczne aspekty badań strat wody w sieciach wodociągowych*. Ochrona Środowiska, 2004, nr 4, s. 25–30.
- [117] Siwoń Z., Łomotowski J., *Problemy modernizacji eksploatowanych układów przesyłu wody wodociągowej*. Mat. konf. „Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód”, PZITS, Poznań 2004, tom I, s. 187–202.
- [118] Speruda S., Radecki R., *Ekonomiczny Poziom Wycieków. Modelowanie strat wody w sieciach wodociągowych*. Translator, Warszawa 2003.
- [119] Speruda S., Radecki R., Wolińska G., *Metodyka wdrażania ekonomicznej redukcji strat wody w przedsiębiorstwach wodociągowych na przykładzie aktywnej kontroli wycieków*. Mat. konf. „Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód”, PZITS, Poznań 2004, tom II, s. 581–590.
- [120] Stroitielnyje Normy i Prawila (SNIP) 2.04.02-84. Wodosnabženije, naružnyje sieti i sooruzenija. Moskva 1985.
- [121] Wehr R., Schnichels B., *Reduzierung der Wasserverluste durch grossräumige Netzüberprüfung am Beispiel der Wasserversorgung Bonn*. GWF Wasser-Abwasser, 1993, Nr. 6, s. 330–335.
- [122] Weimer D., *Technische und wirtschaftliche Bewertungskriterien für Wasserverluste*. GWF Wasser-Abwasser, 1999, Nr. 13, s. 83–90.
- [123] Wiczysty A., *Niezawodność systemów wodociągowych i kanalizacyjnych. Cz. I i II*. Skrypt Politechniki Krakowskiej, Kraków 1990.
- [124] Wiczysty A., Iwanejko R., *Wyznaczenie wymaganego poziomu niezawodności obiektów systemu zaopatrzenia w wodę*. GWiTS, 1996, nr 2, s. 54–58.
- [125] Wiczysty A., Iwanejko R., *Metoda określania wymaganego poziomu niezawodności elementów systemu zaopatrzenia w wodę*. Gospodarka Wodna, 1998, nr 7, s. 268–272.
- [126] Wiczysty A., Iwanejko R., Lubowiecka T., *Podnoszenie niezawodności działania komunalnych systemów zaopatrzenia w wodę*. Monografie, nr 2, Komitet Inżynierii Środowiska PAN, Kraków 2001, s. 469–510.
- [127] Wiczysty A., Lubowiecka T., *Kierunki badań i możliwości zwiększania niezawodności miejskich systemów zaopatrzenia w wodę*. Mat. konf. „Podstawy projektowania i eksploatacji systemów zaopatrzenia w wodę i usuwania ścieków”, Prace Nauk. Inst. Inż. Ochr. Środ. PWr., Wrocław 1991, nr 67, s. 3–16.

- [128] Wiczysty A. i inni, *Niezawodność miejskich systemów zaopatrzenia w wodę*. Monografia 159, Politechnika Krakowska, Kraków 1993.
- [129] Wiczysty A. i inni, *Metody oceny i podnoszenia niezawodności działania komunalnych systemów zaopatrzenia w wodę*. Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, Vol. 2, Kraków 2001.
- [130] Zieliński R., *Tablice statystyczne*. PWN, Warszawa 1972.
- [131] Zimoch I., Żaba T., *Metody oceny niezawodności funkcjonowania systemu dystrybucji wody*. Mat. konf. „Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód”, PZITS, Poznań 2004, tom II, s. 763–775.
- [132] Zuber T., *Wpływ eksploatacji górniczej na uszkodzalność sieci wodociagowych i kanalizacyjnych na obszarze wybranych miast Śląska*. GWiTS, 1999, nr 6, s. 207–213.

## **Quantitative assessment of the effect of some factors on the parameters and operating costs of water-pipe networks**

The monograph presents the results of many years' research onto the water-pipe networks in service of selected municipalities in Poland. The aim of the study was to assess, in quantitative terms, the effect of some factors of choice on the pipe failure rate, repair costs and water loss in the networks. The results were made subject to quantitative analysis and generalization.

The study has demonstrated the following: the reduction in pressure head and daily forcing pressure variations at the pumping stations contributes to a decrease in the failure rate for water pipes (in areas with no mining operations) made from various materials (mostly grey cast iron). The examinations included the diameters of pipes and fittings, the type of damage, duration and year of network construction, duration of being in service, time of observation, location (laying route) of the pipes, and the seasonal pattern.

Failure rate was assessed for water pipes made of cast iron, steel and plastics in an area affected by mining operations. Methods for assessing the contribution of mining damage to the failure of water-pipe networks are presented (consideration being also given to the rate of water-pipe failure in areas with no mining influence).

Analysis was carried out of the total time of damage removal (which included the time of repair organization, time of repair, time of rehabilitation, and time of cleanup) for main conduits, distributing pipelines and plumbing fittings, with special consideration of the type of damage, type of pavement, depth of laying and time of observation. The analysis also covered the effects of pipe damage: duration of discontinuity in water supply to the users, and duration and rate of water leakage from the pipelines.

Based on the rate of failure and time of rehabilitation, the reliability levels for the water distribution systems were assessed; the values of the availability factor obtained were compared with the values of the reliability level required (according to the suggestions by different investigators).

The correlation of the unit repair costs for the mains and distributing pipelines with the damage type, pipe diameter and laying depth of the pipeline and plumbing fittings (valves and hydrants) was examined and analyzed. The trends in repair cost variations for particular types of pipe and fitting damage in the course of the study were made subject to thorough analysis, consideration being given to the price index (inflation). The results of analysis were used to assess the effect of pressure head and pressure variations at the pumping stations on the values of the damage repair price indices for the water supply systems under study. Methods were presented for forecasting the indices of the water pipe repair costs several years in advance.

The effects of pipe damage were also assessed by analyzing water losses in the water-pipe networks. The results provide evidence supporting the correlation of the volume of water losses in the water-pipe network with the water pipe loading, the rate of failure and the maximal forcing at the pumping stations.



## Spis treści

Spis oznaczeń .....	4
1. Wprowadzenie .....	8
2. Przegląd piśmiennictwa .....	10
3. Cel i zakres pracy .....	31
4. Badania wskaźników niezawodności sieci wodociągowych .....	34
4.1. Ilościowa charakterystyka niezawodności sieci wodociągowych .....	34
4.2. Metodyka i zakres badań .....	37
4.3. Sieci wodociągowe na terenach nieobjętych działalnością górniczą .....	41
4.3.1. Charakterystyka badanych systemów dystrybucji wody .....	41
4.3.2. Intensywność uszkodzeń przewodów wodociągowych .....	47
4.3.2.1. Intensywność uszkodzeń rurociągów .....	48
4.3.2.1.1. Wpływ wybranych czynników na intensywność uszkodzeń rurociągów z żeliwa szarego .....	49
4.3.2.1.1.1. Wysokość i zmiany ciśnienia wody .....	49
4.3.2.1.1.2. Okres i rok budowy rurociągów .....	55
4.3.2.1.1.3. Czas trwania eksploatacji (wiek) rurociągów .....	62
4.3.2.1.1.4. Czas trwania obserwacji .....	65
4.3.2.1.1.5. Średnica rurociągów .....	69
4.3.2.1.1.6. Lokalizacja (trasa) rurociągów .....	74
4.3.2.1.2. Intensywność uszkodzeń rurociągów ze stali i azbestocementu .....	76
4.3.2.1.3. Intensywność uszkodzeń rurociągów z tworzyw sztucznych ...	77
4.3.2.1.4. Wpływ wybranych czynników na intensywność uszkodzeń sieci rurociągów .....	78
4.3.2.1.4.1. Wysokość i zmiany ciśnienia wody .....	82
4.3.2.1.4.2. Średnica rurociągów .....	84
4.3.2.1.4.3. Pora roku i głębokość ułożenia rurociągów .....	87
4.3.2.2. Liczba i intensywność uszkodzeń armatury wodociągowej .....	90
4.3.3. Czas usuwania uszkodzeń przewodów wodociągowych .....	95
4.3.3.1. Składniki czasu usuwania uszkodzeń .....	95
4.3.3.2. Czas usuwania uszkodzeń rurociągów magistralnych i rozdzielczych .....	96
4.3.3.3. Czas usuwania uszkodzeń przyłączy domowych .....	101
4.3.3.4. Ocena skutków uszkodzeń przewodów wodociągowych .....	103

4.3.4. Poziom niezawodności sieci wodociągowych .....	105
4.3.4.1. Wymagany poziom niezawodności systemu zaopatrzenia w wodę .....	106
4.3.4.2. Wymagany poziom niezawodności systemu dystrybucji wody .....	107
4.3.4.3. Analiza poziomu niezawodności wybranych sieci wodociągowych ..	108
4.4. Sieć wodociągowa na terenie oddziaływania eksploatacji górniczej .....	113
4.4.1. Wpływ eksploatacji górniczej na środowisko .....	113
4.4.2. Intensywność uszkodzeń przewodów wodociągowych na przykładzie osiedla Sienkiewicza w Polkowicach .....	115
4.4.2.1. Intensywność uszkodzeń rurociągów z żeliwa i stali .....	116
4.4.2.2. Intensywność uszkodzeń rurociągów z tworzyw sztucznych .....	118
4.4.3. Wpływ szkód górniczych na sieć wodociagową .....	119
4.4.3.1. Metody oceny udziału szkód górniczych w uszkodzalności sieci wodociągowej .....	120
4.4.3.2. Ocena wpływu szkód górniczych na sieć wodociagową w Polkowicach .....	121
5. Badania i metody prognozy kosztów naprawy uszkodzeń przewodów wodociagowych .....	124
5.1. Metodyka i zakres badań .....	124
5.2. Średnie koszty naprawy uszkodzeń według ich rodzaju i średnic przewodów .....	125
5.2.1. Koszty naprawy uszkodzeń rurociągów .....	127
5.2.2. Koszty naprawy uszkodzeń armatury przewodów .....	135
5.3. Metodyka określania wskaźników strumienia kosztów naprawy uszkodzeń przewodów .....	138
5.4. Analiza wskaźników kosztów naprawy uszkodzeń sieci wodociagowych .....	140
5.4.1. Założenie stałych jednostkowych kosztów naprawy uszkodzeń .....	140
5.4.2. Założenie zmiennych jednostkowych kosztów naprawy uszkodzeń .....	144
5.5. Prognozowanie wskaźników kosztów naprawy uszkodzeń sieci wodociagowej ....	147
5.5.1. Metody prognozowania kosztów naprawy uszkodzeń sieci wodociagowej .....	149
5.5.2. Prognoza kosztów naprawy wybranych sieci wodociagowych .....	150
5.5.2.1. Prognoza kosztów naprawy sieci wodociagowej we Wrocławiu w rejonie 2 .....	150
5.5.2.2. Prognoza kosztów naprawy sieci wodociagowej w Oleśnicy .....	151
5.6. Wnioski .....	158
6. Badania wskaźników zużycia wody i wskaźników sieciowych strat wody .....	160
6.1. Zasoby wodne Polski i ich wykorzystanie .....	160
6.2. Metodyka i zakres badań .....	162
6.3. Analiza wskaźników zużycia wody .....	163
6.4. Analiza wskaźników strat i zużycia wody na cele technologiczne ujęcia i zakładu oczyszczania wody .....	166
6.5. Analiza wskaźników strat i zużycia wody na potrzeby własne systemów wodociagowych .....	166

	203
6.6. Analiza wskaźników strat wody w sieciach wodociągowych .....	168
6.6.1. Wpływ obciążenia sieci wodociągowej na straty wody .....	170
6.6.2. Wpływ intensywności uszkodzeń przewodów i wysokości tłoczenia pompowni na straty wody .....	175
6.7. Wnioski .....	183
7. Podsumowanie, uwagi i wnioski końcowe .....	184
Literatura .....	192
Streszczenie (w języku angielskim) .....	199

## Contents

List of symbols .....	4
1. Introduction .....	8
2. Review of literature .....	10
3. Aim and scope of the study .....	31
4. Reliability analysis of water-pipe networks .....	34
4.1. Quantitative description of water-pipe network reliability .....	34
4.2. Methods and range of the investigations .....	37
4.3. Water-pipe networks in areas with no mining operations .....	41
4.3.1. Description of water distribution systems .....	41
4.3.2. Rate of water-pipe network failure .....	47
4.3.2.1. Rate of pipeline failure .....	48
4.3.2.1.1. Effect of the factors of choice on the rate of failure of grey cast iron pipes .....	49
4.3.2.1.1.1. Water pressure head and water pressure variations .....	49
4.3.2.1.1.2. Period and year of pipelines construction .....	55
4.3.2.1.1.3. Age of the pipelines in service .....	62
4.3.2.1.1.4. Length of observations .....	65
4.3.2.1.1.5. Pipe diameters .....	69
4.3.2.1.1.6. Location of the pipelines .....	74
4.3.2.1.2. Rate of failure of steel and asbestos cement pipes .....	76
4.3.2.1.3. Rate of failure of plastic pipes .....	77
4.3.2.1.4. Effect of the factors of choice on the rate of failure of the water-pipe network .....	78
4.3.2.1.4.1. Water pressure head and water pressure variations .....	82
4.3.2.1.4.2. Pipe diameters .....	84
4.3.2.1.4.3. Season of the year and depth of pipe-laying .....	87
4.3.2.2. Number and rate of pipe fittings failure .....	90
4.3.3. Duration of damage removal for water pipes .....	95
4.3.3.1. Time components of damage removal .....	95
4.3.3.2. Time of damage removal for main conduits and distributing pipes .....	96
4.3.3.3. Time of damage removal for plumbing fittings .....	101
4.3.3.4. Assessment of the effects of water pipe damage .....	103

4.3.4. Reliability level of water-pipe networks .....	105
4.3.4.1. Reliability level required for the water supply system .....	106
4.3.4.2. Reliability level required for the water distribution system .....	107
4.3.4.3. Reliability analysis of the water-pipe networks chosen .....	108
4.4. Water-pipe network in an area with mining operations .....	113
4.4.1. Environmental impact of mining operations .....	113
4.4.2. Failure rate of water pipes within the Sienkiewicz housing estate of Polkowice as a case in point .....	115
4.4.2.1. Failure rate of water pipes made of cast iron and steel .....	116
4.4.2.2. Failure rate of water pipes made of plastic .....	118
4.4.3. Effect of mine subsidence on the water-pipe network .....	119
4.4.3.1. Methods of assessing the contribution of mine subsidence to the frequency of water- pipe network failure .....	120
4.4.3.2. Assessment of the effect of mine subsidence on the water-pipe network of Polkowice .....	121
5. Investigations into, and methods of predicting, the damage repair costs for water-pipe networks .....	124
5.1. Methods and range of the investigations .....	124
5.2. Average damage repair costs according to the type and diameter of the pipes .....	125
5.2.1. Damage repair costs for pipelines .....	127
5.2.2. Damage repair costs for pipe fittings .....	135
5.3. Methods of determining the indices of the expenditure pattern for pipe damage repair .....	138
5.4. A Analysis of the indices of damage repair costs for water-pipe networks .....	140
5.4.1. Assumption of non-variable unit costs of damage repair .....	140
5.4.2. Assumption of variable unit costs of damage repair .....	144
5.5. Prediction of the repair costs of water-pipe network damage .....	147
5.5.1. Methods of predicting damage repair costs for a water-pipe network .....	149
5.5.2. Prediction of damage repair costs for the water-pipe networks of choice ....	150
5.5.2.1. Prediction of damage repair costs for the water-pipe network of Wroclaw in region 2 .....	150
5.5.2.2. Prediction of damage repair costs for the water-pipe network of Olesnica .....	151
5.6. Conclusions .....	158
6. Indices of water consumption and indices of water loss in the networks .....	160
6.1. Poland's water resources and their utilization .....	160
6.2. Methods and range of the investigations .....	162
6.3. Analysis of water consumption indices .....	163
6.4. Analysis of the indices of water loss and water consumption for the technological purposes of the water treatment plant .....	166
6.5. Analysis of the indices of water loss and water consumption for the needs of the water supply system .....	166

6.6. Analysis of water loss in water-pipe networks .....	168
6.6.1. Effect of water-pipe network loading on water loss .....	170
6.6.2. Effect of pipe failure rate and pressure head in the pumping station on water loss .....	175
6.7. Conclusions .....	183
7. Summarising comments and final conclusions .....	184
Literature .....	192
Summary .....	199