



MARIAN KWIETNIEWSKI, *marian.kwietniewski@is.pw.edu.pl*

Politechnika Warszawska,

Wydział Inżynierii Środowiska,

Zakład Zaopatrzenia w Wodę i Odprowadzania Ścieków,

## AWARYJNOŚĆ INFRASTRUKTURY WODOCIĄGOWEJ I KANALIZACYJNEJ W POLSCE W ŚWIETLE BADAŃ EKSPLOATACYJNYCH

### UNRELIABILITY OF WATER SUPPLY AND WASTEWATER INFRASTRUCTURE IN POLAND BASED ON FIELD TESTS

**Streszczenie** Na wstępie przedstawiono rozwój infrastruktury wodociągowej i kanalizacyjnej w Polsce w ostatnich dwóch dekadach. Obecnie sieci wodociągowe i kanalizacyjne buduje się w większości z tworzyw sztucznych (PE, PVC) a także z żeliwa sferoidalnego (wodociągi). Jednakże większość sieci jest zbudowana z tradycyjnych materiałów co sprawia, że ich stan techniczny jest ogólnie zły. Stwierdza się, że badania eksploatacyjne niezawodności sieci wodociągowych i kanalizacyjnych są podstawą do oceny zawodności tych sieci. Badania te są prowadzone w Polsce od 40 lat. Do oceny zawodności/niezawodności sieci zastosowano jednostkową intensywność uszkodzeń [uszk/km×rok]. Pokazano również możliwości poprawy niezadowalającego stanu technicznego sieci poprzez stosowanie różnych technologii odnowy.

**Abstract** The report starts presentation of the water and wastewater infrastructure development in the last two decades in Poland. It was found that the Polish water and wastewater infrastructure are at present constructed in majority from artificial materials (PE, PVC) as well as from ductile cast iron (water networks). But the most part of networks are made from old materials so the technical state of networks is generally poor. Reliability field tests in the water and wastewater networks are the basis of unreliability assessment. The tests have been leading for 40 years have been presented. The unit intensity failures [failures/km year] was used for pipeline reliability/unreliability assessment. The possibilities of improvement of unsatisfactory technical state of water and wastewater infrastructure by rehabilitation technology have been showed.

## 1. Wprowadzenie

### Rozwój sieci

Systemy zaopatrzenia w wodę (SZW) jak również systemy kanalizacji (SK) są systemami technicznymi o strukturze przestrzennej. Realizują bowiem swoje jednocześnie na określonym obszarze. Systemy w tak dużej skali funkcjonują w sposób zorganizowany w Polsce już od ponad 120 lat a na świecie co najmniej od 140 lat.

W ostatnich 20 latach, obserwuje się w kraju intensywny rozwój infrastruktury wodociągowej i kanalizacyjnej. Głównym miernikiem tego rozwoju jest rozbudowa sieci wodociągowych i kanalizacyjnych. Choć systematycznie modernizuje się także ujęcia wody, pompownie, stacje uzdatniania wody i oczyszczalnie ścieków.

W Polsce eksploatowanych było w 2008 roku ponad 262000 km sieci wodociągowych i blisko 95000 km sieci kanalizacyjnych. Z sieci wodociągowych w zbiorowych systemach

zaopatrzenia w wodę korzystało ok. 84% mieszkańców zaś z sieci kanalizacyjnych tylko ok. 53% mieszkańców kraju.

Z analizy rozwoju sieci w latach 1990–2008 wynika, że w Polsce przybywa średnio rocznie ok. 8900 km sieci wodociągowych i ok. 3600 km sieci kanalizacyjnych. Rozwój infrastruktury kanalizacyjnej w ostatnich latach jest odzwierciedleniem priorytetów w zakresie potrzeb inwestycyjnych, a aktualne tempo rozwoju tej infrastruktury będzie podtrzymywane co najmniej do 2015 roku tj. do ukończenia Krajowego Programu Oczyszczania Ścieków Komunalnych (KPOŚK), który ma kosztować ok. 73 mld zł.

Różnica między wyposażeniem jednostek osadniczych w sieci wodociągowe i kanalizacyjne jest ogromna na korzyść infrastruktury wodociągowej, której jest prawie 3 razy więcej niż sieci kanalizacyjnych. Przy tym stopień wyposażenia w infrastrukturę wodociągową i kanalizacyjną jest bardzo różny w miastach i ośrodkach wiejskich. W przypadku kanalizacji, udział mieszkańców korzystających ze zbiorowych systemów kanalizacyjnych w ośrodkach wiejskich jest ponad 4-krotnie mniejszy, niż w miastach. Natomiast w zakresie zbiorowego zaopatrzenia w wodę różnica już nie jest tak duża i wynosi ok. 21 punktów procentowych.

### Struktura materiałowa sieci

Poza oceną ilościową infrastruktury wodociągowej i kanalizacyjnej warto zwrócić uwagę na strukturę materiałową obu rodzajów sieci, bo ta cecha jest mocno związana z ich stanem technicznym.

Struktura materiałowa sieci wodociągowych i kanalizacyjnych w Polsce zmienia się systematycznie od 1990 roku. Kierunek tych zmian wskazuje na szerokie wykorzystanie w ostatnich latach do budowy sieci głównie rur i kształtek z polietylenu (PE) w wodociągach oraz polichlorku winylu (PVC) – w wodociągach i kanalizacji. Obserwuje się również ciągły, choć w mniejszym zakresie, przyrost sieci wodociągowych budowanych z żeliwa nowej generacji, a mianowicie żeliwa sferoidalnego.

Podobne tendencje obserwuje się w zakresie odnowy (renowacji, wymiany bezwykopowej i wymiany wykopowej) przewodów wodociągowych, gdzie stare przewody stalowe, z żeliwa szarego i azbestowo-cementowe wymienia się głównie na rurociągi z PE i żeliwa sferoidalnego. Również w przypadku sieci kanalizacyjnych, stare kanały wymienia się najczęściej na rurociągi z PVC. W rezultacie, równocześnie z rozwojem sieci budowanych z nowych materiałów widać systematyczne zmniejszanie użycia materiałów tradycyjnych takich jak stal i żeliwo szare do budowy sieci wodociągowych (tabl. 1) oraz kamionki, betonu i żelbetu do budowy kanalizacji (tabl. 2) [23].

Ostatnie badania [26] pokazują, że mimo intensywnej rozbudowy i wymiany starych przewodów na przewody z nowych materiałów, w strukturze materiałowej badanych sieci wodociągowych nadal pozostają w dużej ilości tradycyjne żeliwo szare (36,9%) i stal (12,7%). Istotny udział, ze względu na eksploatację sieci, mają jeszcze rurociągi z azbestocementu (4,4%), które od wielu lat są systematycznie wymieniane na przewody z nowych materiałów takich jak PE i żeliwo sferoidalne. Znaczny udział w strukturze materiałowej mają już przewody z tworzyw sztucznych, które stanowią ok. 27,3% (PVC) i 15,1% (PE) długości badanych sieci wodociągowych. Generalnie można stwierdzić, iż sieci wodociągowe są zbudowane głównie z rur wykonanych z żeliwa szarego, stali, PVC i PE – w sumie przewody wykonane z tych materiałów stanowią 92% długości badanych sieci. W sieciach kanalizacyjnych, tradycyjne rury kamionkowe, betonowe i żelbetowe wraz z nowymi wykonanymi z PVC obejmują aż 94% długości badanych sieci z tym, że znaczący jest udział sieci wykonanych z PVC (23,9% długości).

Tabela 1. Porównanie udziałów procentowych długości badanych sieci wodociągowych budowanych z różnych materiałów w roku 1992 i w roku 2005

<b>Materiał</b>	<b>1992 r.</b>	<b>2005 r.</b>	<b>Zmiana</b>
Stal	35,6	1,9	- 33,7
Żeliwo szare	21,8	2,1	- 19,7
Żeliwo sferoidalne	2,3	23,1	+ 20,8
PVC	35,4	15,1	- 20,3
PE	4,6	57,7	+ 53,1
Inne	0,5	0,1	- 0,5
Razem	100	100	

Tabela 2. Porównanie udziałów procentowych długości badanych sieci kanalizacyjnych budowanych z różnych materiałów w roku 1992 i w roku 2005.

<b>Materiał</b>	<b>1992 r.</b>	<b>2005 r.</b>	<b>Zmiana</b>
Kamionka <sup>1</sup>	50,1	10,6	- 39,5
Żelbet	11,8	0,3	- 11,5
Beton	33,2	0,6	- 32,6
PVC	1,5	80,3	+ 78,8
PE	0,0	0,6	+ 0,6
Kompozyt <sup>2</sup>	0,0	0,7	+ 0,7
Inne <sup>3</sup>	3,4	6,9	+ 3,5
Razem	100	100	

<sup>1)</sup> Kamionka tradycyjna. <sup>2)</sup> Glass Reinforced Plastic – tworzywo sztuczne (żywica) wzmocnione włóknem szklanym; <sup>3)</sup>inne: żeliwo szare, żeliwo sferoidalne, rury strukturalne (typu Duo, Spiro i in.)

Oceniając strukturę materiałową sieci wodociągowych i kanalizacyjnych można generalnie stwierdzić, że jest ona już odzwierciedleniem światowych tendencji w zakresie aplikacji tworzyw termoplastycznych i żeliwa sferoidalnego do budowy wodociągów i kanalizacji.

Z uwagi na duże braki w danych inwentaryzacyjnych trudno jest ustalić dokładnie wiek sieci wodociągowych i kanalizacyjnych w Polsce. Na podstawie wybranych wyników badań można jedynie stwierdzić, że w wielu dużych miastach Polski przewody wodociągowe funkcjonujące ponad 50 lat stanowiły na początku XXI w. nawet 50% całkowitej długości sieci, a w większości tych miast przewody w wieku 25÷50 lat obejmowały 30÷45% długości sieci. Biorąc pod uwagę przyjmowane w kraju okresy trwałości technicznej wodociągowych przewodów stalowych 50 lat i przewodów z żeliwa szarego 75÷80 lat widać, że znaczny odsetek przewodów kwalifikuje się do wymiany [2]. Bardziej zdecydowanie o zaawansowanym stanie zużycia można mówić w tym kontekście o sieciach kanalizacyjnych, w których funkcjonują jeszcze kanały wybudowane pod koniec XIX. i na początku XX. wieku.

Infrastruktura sieciowa, z uwagi na bezpośrednią realizację zadań w stosunku do odbiorców usług wodociągowych (niezawodne dostarczanie wody do spożycia) i kanalizacyjnych (niezawodny odbiór i oczyszczanie ścieków), decyduje o efektywności działania całych systemów zaopatrzenia w wodę i kanalizacji. Tak też odbiorcy postrzegają sieci wodociągowe i kanalizacyjne. Można zatem przyjąć, że sprawność działania sieci jest miernikiem sprawności całego systemu. Jednak problemy związane z dystrybucją wody i odprowadzaniem ścieków nasilają się od kilkunastu lat. W przypadku sieci wodociągowych wzrasta oporność hydrauliczna przewodów i zmniejsza się ich przepływność, a jednocześnie woda rozprowadzana siecią ulega wtórnemu zanieczyszczeniu. Z kolei, w sieciach kanalizacyjnych, przy małych przepływach ścieków, gromadzą się osady, powstają przykre zapachy w otoczeniu kanalizacji, następuje niedociążenie oczyszczalni itp. Sieci stanowią przy tym ogromnej wartości majątek trwałe przedsiębiorstw wodociągów i kanalizacji, nierzadko

przekraczający 70, a nawet 90% wartości całego systemu. Te specyficzne cechy sieci powodują, iż przedsiębiorstwa muszą rozwiązywać na bieżąco wiele problemów eksploatacyjnych, często o charakterze losowym. Jednocześnie zaś oczekuje się od nich, aby realizowały usługi wodociągowe i kanalizacyjne w sposób niezawodny.

Pomimo rozbudowanej infrastruktury wodociągowej i kanalizacyjnej, nie podejmowano dotychczas w Polsce ogólnokrajowych programów badawczych mających na celu ocenę stanu technicznego i funkcjonalnego tej infrastruktury i określenia potrzeb w zakresie jej odnowy. Na podstawie badań i obserwacji prowadzonych w wielu ośrodkach naukowych w kraju można jedynie stwierdzić, iż generalnie stan tej infrastruktury jest zły. Częstym skutkiem złego stanu technicznego są poważne awarie obiektów infrastruktury wodociągowej i kanalizacyjnej. Nierzadko kończą się one katastrofami budowlanymi, w których występuje zagrożenie życia ludzi [24].

## 2. Wybrane wskaźniki niezawodności obiektów infrastruktury wodociągowej i kanalizacyjnej

Awaryjność jest miarą niezawodności infrastruktury wodociągowej i kanalizacyjnej. Niezawodność (pojęcie przeciwstawne zawodność) tych systemów jest definiowana [18, 34] jako właściwość polegająca na zdolności systemu do realizacji swoich funkcji w określonych warunkach istnienia i eksploatacji i w ciągu założonego czasu. W wypadku systemu wodociągowego funkcje te polegają na dostarczaniu wody do miejsc jej użytkowania w niezbędnej ilości, o odpowiedniej jakości, wymaganym ciśnieniu i o każdej porze dogodnej dla użytkownika. Natomiast funkcje systemu kanalizacyjnego obejmują odprowadzenie, z danego obszaru do określonego odbiornika, ścieków (sanitarnych i deszczowych<sup>1</sup>) w przewidywanej ilości po uprzednim ich oczyszczeniu w stopniu wymaganym ze względu na odbiornik (ciek wodny, glebę).

Zdarzenia powodujące obniżenie poziomu funkcjonowania, a nawet okresowe braki wody rozważa się w obszarze tzw. niezawodności funkcjonowania. Natomiast zdarzenia powodujące choroby (zatrucia) lub zgony należą do grupy zdarzeń z obszaru niezawodności bezpieczeństwa [6, 27, 33]. Utrata niezawodności bezpieczeństwa następuje z określonym prawdopodobieństwem (utrata życia lub zdrowia ludzi). Są to przypadki, jeżeli chodzi o utratę życia, spotykane bardzo rzadko.

Obiekty infrastruktury wodociągowej i kanalizacyjnej są w zdecydowanej większości obiektami odnawialnymi lub prościej naprawialnymi, a czasy odnowy tych obiektów są na ogół znaczne i tym samym istotne dla oceny efektywności ich działania. Dlatego niezawodność obiektów wodociągowych i kanalizacyjnych opisuje się z reguły modelem losowego procesu z odnową niezerową. Szczegółowe opisy modeli oraz związanych z nimi miar i metod oceny niezawodności obiektów infrastruktury wodociągowej i kanalizacyjnej można znaleźć między innymi w pracach [18, 34]. Poniżej przedstawiono tylko wybrane podstawowe charakterystyki niezawodnościowe. Główną charakterystyką procesu z odnową niezerową jest wskaźnik gotowości  $K_g(t)$ , który odpowiada prawdopodobieństwu tego, że w dowolnym momencie czasu  $t$  obiekt będzie sprawny. Przy założeniu niezależności czasów pracy i czasów odnowy oraz jednakowych rozkładów prawdopodobieństwa tych czasów, wskaźnik gotowości można opisać wzorem:

---

<sup>1</sup> Zgodnie z ogólnie akceptowaną tendencją, w ostatnich latach dąży się do miejscowego zagospodarowania wód opadowych

$$K_g(t) = P\left(\bigcup_{i=0}^{\infty} A_i\right) \quad (1)$$

gdzie:  $A_i$  jest zdarzeniem polegającym na tym, że obiekt będzie sprawny w dowolnej chwili czasu  $t$ .

Stacjonarna postać tego wskaźnika, ułatwiająca analizy i oceny niezawodności, wyrażona jest zależnością:

$$K_g = \lim_{t \rightarrow \infty} K_g(t) = \frac{T_p}{T_p + T_o} = \frac{\mu}{\mu + \lambda} \quad (2)$$

Obok wskaźnika gotowości, do oceny niezawodności obiektów wodociągowych i kanalizacyjnych stosuje się jeszcze wiele innych wskaźników, z których najczęściej są wykorzystywane: prawdopodobieństwo bezawaryjnej pracy  $P(t)$ , parametr strumienia uszkodzeń  $\omega(t)$  i intensywność uszkodzeń  $\lambda(t)$ , intensywność odnowy  $\mu(t)$ , średni czas pracy bezawaryjnej  $T_p$  i średni czas odnowy  $T_o$  [18, 34]. Na szczególną uwagę zasługuje prawdopodobieństwo bezawaryjnej pracy, które opisane jest następującą ogólną zależnością

$$P(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(t) dt\right] \quad (3)$$

Do oceny zawodności (awaryjności) liniowej infrastruktury wodociągowej i kanalizacyjnej stosuje się najczęściej parametr strumienia uszkodzeń  $\omega(t)$  lub intensywność uszkodzeń  $\lambda(t)$ . Te dwa parametry są sobie równoważne i mają stałe wartości w danym przedziale czasu, jeśli założymy, że strumień uszkodzeń jest strumieniem Poissona. Założenie to było weryfikowane badaniami eksploatacyjnymi niezawodności w odniesieniu do wielu obiektów wodociągowych i kanalizacyjnych. Stąd też dość powszechnie, awaryjność wyraża się wskaźnikiem intensywności uszkodzeń, który również jest zrozumiały dla praktyków. Im mniejsza intensywność uszkodzeń (mniejsza awaryjność) tym oczywiście wyższa niezawodność i odwrotnie. Wartość średniej jednostkowej intensywności uszkodzeń przewodów szacuje się na podstawie danych z eksploatacji, korzystając ze wzoru:

$$\lambda(\Delta t) = \frac{n(\Delta t)}{L \cdot \Delta t} \quad (4)$$

gdzie:  $\lambda(\Delta t)$  – jednostkowa intensywność uszkodzeń; uszk/(km×rok) lub uszk/(km×10 lat) lub uszk/(10 km×rok)

$L$  – długość badanych przewodów w przedziale czasu  $\Delta t$  (średnia w tym przedziale), km  
 $\Delta t$  – rozpatrywany przedział czasu, lata.

Jednostkowa intensywność uszkodzeń jest wygodnym wskaźnikiem do porównania awaryjności różnych przewodów np. wykonanych z różnych materiałów, pełniących różne funkcje, ułożonych w różnych warunkach gruntowych, o różnym wieku, pracujących przy różnym ciśnieniu i przy różnej temperaturze gruntu oraz przesyłanej wody itp.

Trudno obiektywnie ocenić jaki poziom awaryjności przewodów jest zadowalający i akceptowany, zarówno w kraju jak i za granicą. Brakuje bowiem ogólnie zalecanych standardów określających graniczne wartości jednostkowej intensywności uszkodzeń, które ułatwiałyby ocenę stanu technicznego przewodów, a w procesie decyzyjnym byłyby pod-

stawą do wstępnej kwalifikacji przewodów do odnowy. W odniesieniu do przewodów wodociągowych proponuje się kryterialne wartości intensywności uszkodzeń  $\lambda$ , klasyfikujące je na 3 kategorie awaryjności/niezawodności (tabl. 3).

Tabela 3. Propozycje klasyfikacji przewodów wodociągowych pod kątem awaryjności/niezawodności

Kategoria awaryjności/niezawodności	Intensywność uszkodzeń [uszk/km×rok]
A. Niska awaryjność = wysoka niezawodność	$\lambda_A \leq 0,1$
B. Średnia awaryjność/niezawodność	$0,1 < \lambda_B \leq 0,5$
C. Wysoka awaryjność = niska niezawodność	$\lambda_C \geq 0,5$

### 3. Awaryjność obiektów sieciowej infrastruktury wodociągowej i kanalizacyjnej

#### Czynniki wpływające na awaryjność

Głównym źródłem wiedzy o stanie technicznym i awaryjności obiektów wodociągowych i kanalizacyjnych są badania eksploatacyjne niezawodności, prowadzone w naturalnych warunkach funkcjonowania i eksploatacji tych obiektów. Nadrzędnym celem badań jest określenie wartości wskaźników niezawodności, bez których trudno sobie wyobrazić wiarygodną ocenę niezawodności lub też awaryjności obiektów wodociągowych i kanalizacyjnych. Równoległe identyfikuje się też rodzaje i skutki uszkodzeń jak również ich przyczyny.

Wieloletnie doświadczenia nabywane w trakcie prac badawczych umożliwiły opracowanie szczegółowego programu badań eksploatacyjnych niezawodności, na który składa się kilka głównych etapów działań:

1. Etap wstępny – przygotowanie badań,
2. Analiza struktury obiektów oraz procesu ich eksploatacji i funkcjonowania,
3. Pozyskanie i weryfikacja danych z eksploatacji,
4. Przetwarzanie zgromadzonych danych i wyznaczenie charakterystyk zawodności obiektów,
5. Wykorzystanie przetworzonych danych – wyniki badań.

W niniejszym artykule zostaną przedstawione ważniejsze wyniki badań awaryjności sieci wodociągowych i kanalizacyjnych.

Analizy awaryjności, obejmujące rodzaje, przyczyny i skutki uszkodzeń są wyjściowym etapem działań zmierzających do oceny stanu technicznego przewodów. Wyniki tych analiz znajdują wyraz w wartościach liczbowych intensywności uszkodzeń. Na ogół, wysoką awaryjność przewodów, stwierdzoną w wyniku badań, potwierdza się szczegółowymi badaniami technicznymi, które umożliwiają podjęcie racjonalnych działań dotyczących zakresu, sposobu i kolejności odnowy przewodów.

Awaryjność sieci jest procesem, na który ma wpływ wiele czynników. Czynniki te można sklasyfikować w trzech grupach, a mianowicie:

- A. czynniki związane z przewodem i jakością jego wykonania:
  - rodzaj i materiał przewodu oraz sposób jego zabezpieczenia antykorozyjnego,
  - wielkość przekroju lub średnicy przewodu,
  - sposób łączenia elementów przewodu (rur, kształtek, armatury) oraz liczba połączeń,
  - wiek przewodu,
  - ciśnienie w przypadku przewodów ciśnieniowych,
  - prędkość przepływu wody/ścieków,
  - jakość wody/ścieków przesyłanych przewodem, a głównie korozyjność tych mediów w stosunku do materiału (stal, żeliwo, beton, żelbet),

**B. czynniki związane z otoczeniem przewodu**

- rodzaj i wilgotność gruntu (agresywność gruntu),
- charakter obciążeń zewnętrznych (dynamiczne, statyczne),
- niestabilność gruntu np. tereny szkód górniczych,

**C. czynniki związane z eksploatacją przewodu**

- warunki eksploatacji (zakres i intensywność czynności konserwacyjnych, remontowych oraz napraw; zakres monitoringu sieci i związana z tym szybkość lokalizacji i usuwania awarii).

**Infrastruktura wodociągowa**

Awaryjność przewodów wodociągowych jest przedmiotem badań w Polsce od blisko 40 lat (najstarsze wyniki badań [4, 30]). Obejmują one swoim zakresem analizę rodzajów i przyczyn uszkodzeń oraz wyznaczenie różnych parametrów niezawodności. Zróżnicowanie badań przewodów jest ogromne. Są to przewody tranzytowe, magistralne, rozdzielcze i podłączenia domowe, przewody pracujące w różnych warunkach gruntowych (na terenach szkód górniczych i poza nimi), przewody wykonane z różnych materiałów itp. Badane są również całe sieci wodociągowe i układy przewodów tranzytowych.

W wyniku badań zidentyfikowano wiele rodzajów uszkodzeń, z których najczęściej spotykane to: zniszczenie lub wysunięcie materiału uszczelniającego z połączenia, pęknięcie wzdłużne lub poprzeczne rury, pęknięcie spawu na połączeniu odcinków rur, uszkodzenia połączeń elementów wyposażenia technicznego (uzbrojenia), uszkodzenia (na ogół pęknięcia) zasuw przedziałowych i zasuw na podłączeniach, zniszczenie korozyjne rury (najczęściej miejscowe) itp.

Trudno jest jednoznacznie sklasyfikować przyczyny powstawania uszkodzeń. Jest ich znacznie więcej niż rodzajów uszkodzeń, a przy tym nierzadko nakładają się one na siebie jak np. niekorzystne warunki gruntowe i nadmierne ciśnienie w sieci. Generalnie awaryjność rurociągów jest skutkiem wad materiałowych, montażowych, projektowych lub eksploatacyjnych a także incydentalnie, wynikiem działania innych czynników jak np. roboty prowadzone w sąsiedztwie bez podjęcia należytych środków zabezpieczających, nadmierne obciążenia od ruchu kołowego itp. Awaria może wystąpić natychmiast lub po dłuższym czasie. Poniżej wymieniono najczęstsze przyczyny uszkodzeń przewodów wodociągowych zarejestrowane w wodociągach polskich [5, 13, 14, 15, 31, 32, 35]:

- błędy projektowe
- nieprawidłowe wykonawstwo przewodów,
- wady materiałowe rur, kształtek i armatury,
- obciążenia dynamiczne od pojazdów i związana z tym lokalizacja przewodów np. wzdłuż ruchliwych ciągów komunikacyjnych,
- uderzenia hydrauliczne, w szczególności w sieci przewodów rozdzielczych,
- korozyjność gruntu,
- korozyjność wody przesyłanej siecią,
- zmiany temperatury gruntu (w tym przemarzanie gruntu) i wody w sieci,
- niestabilność gruntu w tym głównie wpływ eksploatacji górniczej,
- prądy błądzące, szczególnie w miastach i na terenie zakładów przemysłowych,
- nadmierne ciśnienie i zmiany ciśnienia w sieci,
- niewłaściwe uszczelnienie połączeń kielichowych rur z żeliwa szarego przy użyciu materiałów zastępczych np. folii aluminiowej, żelaza gąbczastego
- wieloletnia eksploatacja i związane z tym naturalne zużycie materiału rur i uszczelnienia złączy,

Niezachowanie minimalnego przykrycia przewodów, zwłaszcza na końcówkach sieci, gdzie w małych przewodach występują niewielkie prędkości przepływu wody, sprzyja również powstawaniu uszkodzeń z powodu zamarzania w nich wody.

W badaniach przeprowadzonych w wielu miastach europejskich zaobserwowano podobne rodzaje uszkodzeń przewodów wodociągowych, wśród których wymienia się najczęściej pęknięcia podłużne i poprzeczne rur, uszkodzenia połączeń, uszkodzenia korozyjne, uszkodzenia związane z robotami ziemnymi. Jako typowe przyczyny uszkodzeń podaje się niewłaściwe wykonanie, wady materiałowe, niestabilność gruntu, korozję, zmiany temperatury gruntu, prace ziemne itp.

Poniżej podano najważniejsze wnioski wynikające z przeprowadzonych dotychczas badań awaryjności infrastruktury wodociągowej.

1. Najniższą awaryjnością odznaczają się przewody tranzytowe i część magistralnych (o średnicy co najmniej 300 mm) pracujących przy stabilnych ciśnieniu i przepływie. Intensywność uszkodzeń tych przewodów zawiera się na ogół w przedziale  $0,04 \div 0,1$  uszk/km $\times$ rok. Przewody sieci wodociągowych, a w szczególności przewody rozdzielcze, które pracują przy dynamicznie zmieniającym się ciśnieniu i przepływie, przewyższają pod względem awaryjności przewody tranzytowe średnio o rząd wielkości. Najwyższą awaryjność spośród wszystkich rodzajów przewodów mają przyłącza wodociągowe (przewody o średnicy najczęściej poniżej 50 mm). Pod tym względem można je porównać z sieciami wodociągowymi ułożonymi na terenach szkód górniczych, gdzie grunt jest niestabilny. Generalnie intensywność uszkodzeń maleje ze wzrostem średnicy przewodu.
2. Niestabilność gruntu wpływa bardzo negatywnie na awaryjność przewodów wodociągowych. Wpływ ten obserwuje się niezależnie od materiału i ciśnienia przy jakim pracują przewody. Awaryjność przewodów ułożonych na terenach szkód górniczych przewyższa średnio ponad dwukrotnie awaryjność przewodów pracujących poza tymi terenami i waha się w granicach od 0,3 do 5,5 uszk/km $\times$ rok, ale w trakcie badań zaobserwowano też dużo wyższe intensywności uszkodzeń, osiągające wartości  $8 \div 10$  uszk/km $\times$ rok.
3. Obniżenie ciśnienia w sieci wodociągowej powoduje znaczny spadek intensywności uszkodzeń przewodów. Prawidłowość tę zaobserwowano niezależnie od wieku i średnicy przewodów np. obniżenie ciśnienia w sieci wodociągowej w zachodnich osiedlach Wrocławia o ok. 40% spowodowało zmniejszenie intensywności uszkodzeń o ok. 41% [5].
4. Wykazano wpływ zmian temperatury gruntu i wody sieciowej (zmiany w zakresie  $0 \div 26^\circ\text{C}$ ) na podwyższenie intensywności uszkodzeń w okresie jesienno-zimowym i częściowo zimowo-wiosennym.
5. Bardzo rzadko występuje korelacja między intensywnością uszkodzeń przewodów wykonanych z żeliwa szarego i stali (najdłużej eksploatowanych w kraju), a ich wiekiem.
5. Generalnie, pod względem awaryjności najkorzystniej oceniane są w kraju przewody z tworzyw termoplastycznych (PE i PVC) i żeliwa sferoidalnego, dla których oszacowano intensywność uszkodzeń na poziomie 0,10 uszk/km $\times$ rok (niska awaryjność lub wysoka niezawodność).
6. Zdecydowanie najwyższą awaryjnością charakteryzują się tradycyjne przewody stalowe przy jednostkowej intensywności uszkodzeń 1,14 uszk/km $\times$ rok i z żeliwa szarego (ok. 0,60 uszk/km $\times$ rok)
7. O awaryjności przewodów wodociągowych decydują w znacznej mierze złącza. Są one najsłabszym ogniwem przewodów. Intensywność uszkodzeń połączeń kielichowych rur z żeliwa szarego była kilka razy wyższa od intensywności uszkodzeń rur. Podobnie można mówić o tradycyjnych połączeniach kielichowych przewodów żelbetowych czy z PVC.



Wyniki najnowszych badań przeprowadzonych na sieciach wodociągowych w 126 miastach Polski w 2009 roku w ramach pracy [26] pokazują, że awaryjność sieci zmniejszyła się istotnie w ostatnich latach. W roku 2008 wynosiła już tylko średnio 0,37 uszk/km×rok. Co oznacza, że w ciągu ostatnich 10 lat nastąpił ponad dwukrotny spadek awaryjności badanych sieci wodociągowych. Jak wynika z analizy danych, ta korzystna zmiana jest pochodną głównie wyraźnego obniżenia uszkodzalności przewodów wykonanych z PE, PVC i żeliwa sferoidalnego.

### Infrastruktura kanalizacyjna

Stan techniczny badanych sieci kanalizacyjnych w Polsce jest niezadowolający. Wynikiem awarii kanałowych są: eksfiltracja ścieków do gruntu oraz infiltracja wody gruntowej do kanałów. Oba te zjawiska są niekorzystne. W przypadku eksfiltracji dochodzi do skażenia ściekami gruntu i wód gruntowych. Natomiast w wyniku infiltracji może nastąpić przeciążenie hydrauliczne kanałów a także oczyszczalni ścieków. Ścieki zmieszane z wodami infiltracyjnymi, dopływające do oczyszczalni są wtedy rozcieńczone co może poważnie zakłócić procesy biologicznego ich oczyszczania. Niezależnie od tego coraz częściej dochodzi do przepełnienia sieci deszczowych i ogólnospławnych w wyniku pojawiania się wyjątkowo intensywnych opadów deszczu a także z powodu znacznego uszczelnienia zlewni, szczególnie miejskich (nowa zabudowa, ulice, parkingi itp.). Nierzadko poważne awarie prowadzą do katastrof kanalizacyjnych.

Badania eksploatacyjne sieci kanalizacyjnych prowadzone w celu oszacowania wskaźników awaryjności są jeszcze bardzo skromne w porównaniu z sieciami wodociągowymi. Większość badań odnosi się do oceny trwałości kanałów [4, 16] oraz analizy rodzajów, przyczyn i skutków awarii sieci kanalizacyjnych [7, 8, 28, 10, 11, 12, 19, 36]

W niektórych z wymienionych prac można znaleźć także wartości wybranych wskaźników niezawodności kanałów, studzienek czy też wpustów deszczowych.

Przyczyny awarii obiektów kanalizacyjnych można ująć w kilku grupach, a mianowicie: błędy na etapie projektowania, niewłaściwe układanie i montaż przewodów, niewłaściwe wykonanie robót ziemnych oraz zaniedbania w eksploatacji.

Skutki awarii w ogólnym ujęciu to: infiltracja wód gruntowych do kanału, eksfiltracja ścieków do gruntu, utrudniony, a nawet niemożliwy przepływ ścieków w kanale oraz utrudnienia w eksploatacji i związane z nimi zwiększenie kosztów utrzymania sieci kanalizacyjnych.

Tabela 4. Przykładowe porównanie jednostkowych intensywności uszkodzeń wybranych obiektów wodociągowych i kanalizacyjnych

Obiekt	Jednostka	Wartość
1. Sieci wodociągowe (głównie rozdzielcze)	[uszk/km×rok]	0,6202 <sup>1)</sup>
2. Sieć kanalizacji sanitarnej	[uszk/km×rok]	0,0172 <sup>2)</sup>
1. Przyłącza wodociągowe	[uszk/km×rok]	1,2700 <sup>3)</sup>
2. Przyłącza kanalizacyjne (przykanaliki)	[uszk/km×rok]	0,0595 <sup>4)</sup>
1. Uzbrojenie przewodów wodociągowych tranzytowych (zasuwy, odwodnienia, odpowietrzenia)	[uszk/jedn×rok]	0,0220 ÷ 0,0510 <sup>5)</sup>
2. Studzienki kanalizacyjne	[uszk/jedn×rok]	0,0018 <sup>4)</sup>
3. Wpusty deszczowe	[uszk/jedn×rok]	0,0115 <sup>6)</sup>

<sup>1)</sup> Wartość średnia z lat 1992÷1996 dla Warszawy [20], <sup>2)</sup> Wartość średnia z lat 1995÷2001 dla Warszawy [19], <sup>3)</sup> Przewody głównie ze stali, Kraków [34], <sup>4)</sup> Wartość średnia z lat 2000÷2002 dla Siedlec [19], <sup>5)</sup> Wartości z lat 1986÷1992 [19], <sup>6)</sup> Wartość średnia 2001÷2002 dla Wołomina [19]

Generalnie należy stwierdzić, iż sieci kanalizacyjne i ich elementy, z uwagi na grawitacyjny charakter pracy, mają dużo niższą awaryjność niż sieci wodociągowe. Na ogół intensywność uszkodzeń przewodów kanalizacyjnych jest kilkadziesiąt razy mniejsza (tabl. 4).

Warto podkreślić, iż wyniki dotychczasowych badań awaryjności odnoszą się głównie do kanałów wykonanych z tradycyjnych materiałów takich jak kamionka, beton i żelbet oraz w niewielkim stopniu do przewodów z PVC.

#### 4. Zakres odnowy technicznej infrastruktury wodociągowej i kanalizacyjnej

Największe uciążliwości dla odbiorców usług wodociągowych i kanalizacyjnych a także dla przedsiębiorstw świadczących te usługi wiążą się obecnie z sieciami wodociągowymi i kanalizacyjnymi. Dlatego infrastruktura ta jest poddawana odnowie. W tym celu stosuje się wiele różnych technologii, które można ująć w kilku grupach:

1. tradycyjna wymiana wykopowa,
2. renowacja,
3. rekonstrukcja,
4. wymiana bezwykopowa.

Renowacja stosowana jest w tych przypadkach, kiedy konstrukcja przewodu zachowuje jeszcze swoją wytrzymałość mechaniczną. W tej technologii stosowanych jest wiele metod polegających na wykorzystaniu wykładzin wewnętrznych jak np.: wykładziny z rur ciągłych, segmentowych, spiralnie zwijanych, ściśle pasowanych, wykładziny elastyczne utwardzane na miejscu, wykładziny tworzone na miejscu jako powłoki ochronne (najczęściej cementowe). W przypadku, gdy przewód utracił wytrzymałość mechaniczną stosuje się technologię rekonstrukcji, która ma na celu wzmocnienie konstrukcji przewodu z jednoczesną poprawą warunków hydraulicznych przepływu wody/ścieków. Technologia wymiany bezwykopowej polega, ogólnie biorąc na niszczeniu starego rurociągu i wciągnięciu w jego miejsce nowego. Stosowane w tym celu metody różnią się sposobem niszczenia starego rurociągu oraz zagospodarowaniem jego odłamków (pozostają w gruncie lub są usuwane na zewnątrz).

W trakcie badań i obserwacji prowadzonych od 1990 roku przez Zakład Zaopatrzenia w Wodę i Odprowadzania Ścieków na Wydziale Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej gromadzone są dane na temat rodzaju i zakresu stosowanych w Polsce technologii odnowy przewodów wodociągowych i kanalizacyjnych. Tendencje w zakresie stosowania różnych technologii odnowy tych przewodów na przestrzeni lat 1990÷2005 zilustrowano w tabl. 5 i 6.

Tabela 5. Porównanie zakresu stosowania różnych technologii odnowy badanych przewodów wodociągowych w latach 1990÷ 2005 [23]

Technologia odnowy	% długości badanych przewodów poddanych odnowie w latach		
	1990÷1995	1995÷2000	2000÷2005
Wymiana wykopowa tradycyjna	62,7	61,1	59,1
Renowacja	33,3	37,8	28,3
Wymiana bezodkrywkowa (Cracking, Burstlining)	4,0	1,1	12,6
RAZEM	100	100	100

Z danych zawartych w tabeli 5 wynika, że przewody sieci wodociągowych odnawia się głównie technologią tradycyjnej wymiany wykopowej. O połowę mniej przewodów odnawiano, stosując renowację. Warto również zauważyć, że w ostatnim okresie badawczym wzrósł istotnie udział przewodów odnawianych technologiami wymiany bezwykopowej.

Najnowsze badania [Kwietniewski i in., 2010a] pokazują, że tradycyjna wymiana wykopowa to nadal wiodąca technologia odnowy przewodów wodociągowych. W latach 2005÷2008 tą technologią odnowiono blisko 81% wszystkich badanych przewodów, a w szczególności, dużą część przewodów azbestowo-cementowych, które są systematycznie wymieniane na rurociągi z nowych materiałów. Stare rurociągi wodociągowe są najczęściej wymieniane na przewody z PE.

Tabel 6. Porównanie zakresu stosowania różnych technologii odnowy badanych przewodów kanalizacyjnych w latach 1990÷2005 [22]

Technologia odnowy	% długości badanych przewodów poddanych odnowie w latach		
	1990÷1995	1995÷2000	2000÷2005
Renowacja	50	64,3	64,2
Wymiana tradycyjna wykopowa	48,2	30,2	32,9
Wymiana bezwykopowa	1,8	5,4	2,9
RAZEM	100	100	100

W przypadku sieci kanalizacyjnych zdecydowanie częściej stosuje się technologie renowacji (tab. 6) niż wymiany wykopowej, odwrotnie niż w sieciach wodociągowych. Można również zauważyć, że w ostatnich dwóch okresach badawczych udział renowacji w odnowie sieci kanalizacyjnych ustabilizował się na wysokim poziomie (ponad 64% długości sieci odnawianych tymi metodami). Generalnie należy stwierdzić, że większość badanych przewodów kanalizacyjnych odnawiana jest bezwykopowo, co świadczy o konkurencyjności nowych technologii odnowy (renowacji i wymiany bezwykopowej) w stosunku do wymiany tradycyjnej.

W Polsce brak jest pełnego określenia potrzeb w zakresie odnowy sieci wodociągowych i kanalizacyjnych oraz związanego z tym poziomu finansowania tych przedsięwzięć. Skalę problemu można jednak dostrzec na przykładzie krajów, w których badania rozpoczęto znacznie wcześniej. Np. szczegółowe analizy stanu technicznego sieci kanalizacyjnych w Niemczech, gdzie inspekcją CCTV (ang. *Close Circuit Television*) objęto 75% długości publicznych sieci kanalizacyjnych pozwalają na stwierdzenie, że natychmiastowej naprawy wymaga w tym kraju około 20% sieci, której łączna długość wraz z przyłączami wynosi około 1 miliona kilometrów. Dotychczasowe nakłady na poprawę stanu technicznego sieci kanalizacyjnych na poziomie 1,64 mld euro rocznie pozwalają jedynie na utrzymanie obecnego stanu wciąż starzejących się sieci. Aby osiągnąć poprawę trzeba będzie przeznaczyć na odnowę infrastruktury podziemnej znacznie więcej środków finansowych. Szacuje się, iż koszty odnowy przewodów kanalizacyjnych przy założeniu doprowadzenia do poprawnego stanu technicznego w ciągu około 10 lat będą się układać na poziomie 4÷6 mld. Euro [9, 29]. Dużo wyższe nakłady na odnowę sieciowej infrastruktury wodociągowej przewiduje się w Stanach Zjednoczonych Ameryki. W ciągu najbliższych dwudziestu lat, według Agencji Ochrony Środowiska (*Environmental Protection Agency* – EPA USA) odnowa sieci wodociągowych ma kosztować ok. 83 mld dolarów co stanowi 55% całej sumy przewidzianej na naprawy, renowacje i odtworzenie wszystkich elementów systemów zaopatrzenia w wodę. Daje to kwotę ponad 4 mld dolarów rocznie [1]

## 5. Podsumowanie

W sieciach wodociągowych i kanalizacyjnych funkcjonujących obecnie w kraju nadal największy udział mają przewody wykonane z tradycyjnych starych materiałów. W przypadku sieci wodociągowych są to przewody z żeliwa szarego i stali, które obejmują blisko 50% dłu-

gości badanych sieci oraz przewody azbestocementowe, ok. 4,5%. Z kolei w kanalizacji, udział przewodów wykonanych z tradycyjnych starych materiałów (kamionka, beton i żelbet) jest jeszcze większy i wynosi ponad 70% długości badanych sieci. Jednocześnie wiek znacznej części obu rodzajów sieci przekroczył już okres trwałości projektowej. Wszystko to wskazuje na ogrom potrzeb w zakresie odnowy infrastruktury wodociągowej i kanalizacyjnej.

Pomimo rozbudowanej infrastruktury (ok. 262 tys. km sieci wodociągowych i blisko 95 tys. km sieci kanalizacyjnych w 2008 r.), nie podejmowano dotychczas w Polsce ogólnokrajowych programów badawczych mających na celu ocenę stanu technicznego i potrzeb w zakresie ich odnowy. Na podstawie dotychczasowych badań i obserwacji można jedynie stwierdzić, iż generalnie stan tej infrastruktury jest zły. Chociaż wyniki najnowszych badań pokazują, że ogólny uśredniony poziom awaryjności badanych sieci wodociągowych obniżył się w ostatnich 10 latach z 1,06 do 0,37 uszk/km×rok, to jednak są to tylko wstępne oceny odnoszące się do sieci jako całości, które powinny być potwierdzone dalszymi szczegółowymi badaniami. W wielu systemach wodociągowych Europy i świata wskaźnik intensywności uszkodzeń jest zbliżony do wartości z przedziału od 0,10 do 0,30 uszk/km×rok.

Generalnie awaryjność sieci kanalizacyjnych, głównie ze względu na grawitacyjny charakter przepływu ścieków, jest dużo niższa niż awaryjność sieci wodociągowych.

Trudno jednoznacznie ocenić poziom awaryjności sieci ze względu na brak kryterialnych wartości wskaźników intensywności uszkodzeń. Dotychczasowe wartości liczbowe tych wskaźników pozwalają jedynie na względną ocenę porównawczą awaryjności przewodów. Niezbędna jest tutaj analiza techniczno-ekonomiczna opłacalności wykonywania napraw i strat wynikających z uszkodzeń sieci. W celu ułatwienia takiej oceny, biorąc jednocześnie pod uwagę doświadczenia z kraju i zagranicy, zaproponowano w odniesieniu do infrastruktury wodociągowej trzy poziomy awaryjności, a mianowicie: niski, średni i wysoki (tab. 3).

Niezadawalający stan techniczny sieci jest wynikiem między innymi niedoinwestowania w wymianę starych przewodów oraz wieloletnie zaniedbania eksploatacyjne w dziedzinie konserwacji i modernizacji sieci.

Postęp jaki się obserwuje w zakresie poprawy stanu technicznego infrastruktury sieciowej jest dalece niezadawalający. Z przeprowadzonych badań wynika bowiem, że w ciągu roku odnowie poddawano ok. 0,9% długości badanych sieci wodociągowych i 0,2% sieci badanych kanalizacyjnych co oznacza, że pełne odnowienie tych sieci mogłoby nastąpić dopiero po 100 latach w przypadku wodociągów i po 500 latach w przypadku kanalizacji.

Nie oszacowano dotąd potrzeb, na tle realnych możliwości przedsiębiorstw, w zakresie odnowy sieci. Skalę problemu widać natomiast wyraźnie z perspektywy innych krajów, gdzie przewidywane nakłady na odnowę sieci osiągają poziom kilku mld euro rocznie.

## Literatura

1. Dąbrowski W.: Porównaj swój wodociąg z innymi. Mat. konf. „Nowe technologie w sieciach i instalacjach wodociągowych i kanalizacyjnych”. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Wiśla. s. 53÷65, 2006.
2. Dohnalik P., Jędrzejewski A: Efektywna eksploatacja wodociągów. Wyd. LEMtech Konsulting Sp. z o.o. Kraków, 2004.
3. Hoffman Z.: Pipeline damage – service and repair cost, Water and Sewage Works, No 2, 1970, pp. 60÷61, 1970.
4. Hoffman Z.: Opłacalność napraw przewodów kanalizacyjnych i kryteria oceny ich wymiany. Daz, Woda i Technika Sanitarna nr. 4.1977, s. 108÷109, 1977.
5. Hotłoś H.: Ilościowa ocena wpływu wybranych czynników na parametry i koszty eksploatacji sieci wodociągowych. Rozprawa habilitacyjna. Politechnika Wroclawska. Wroclaw, 2007.

6. Iwanejko R., Lubowiecka T.: Ryzyko w podejmowaniu decyzji w systemach zaopatrzenia w wodę. Mat. konf. XVII krajowej konferencji „Zaopatrzenie w wodę i jakość wód”. Wydaw. PZITS O/Wielkopolski, Gdańsk – Poznań, s. 1043÷1054, 2002
7. Jamska H.: Wstępna ocena parametrów niezawodności sieci wodociągowej i kanalizacyjnej w Krakowie. Materiały XII Seminarium Szkoleniowego Projektantów Wodociągów. Wydawnictwo PZITS. Zakopane 1983.
8. Karangawa A., Madryas C.: Uszkodzenia i naprawa przelazowych kolektorów żelbetowych. GWiTS nr 12/1997 r.
9. Kolonko A., Przybyła B., Roszkowski A., Rybarski S. Kujawski W.: „Podstawowe zasady planowania i realizacji bezwykopowej rehabilitacji technicznej przewodów wodociągowych i kanalizacyjnych na terenach zurbanizowanych”. Wytyczne Izby Gospodarczej „Wodociągi Polskie (w opracowaniu), 2007.
10. Krzemiński R.: Ocena eksploatacyjna niezawodności działania sieci kanalizacyjnej. Mat. Konf. nt. Niezawodność systemów wodociągowych i kanalizacyjnych. Kielce 1986
11. Kuliczkowski A.: Katastrofy kanalizacyjne. Gaz, Woda i Technika Sanitarna nr 2/1995. Wydawnictwo SIGMA.
12. Kuliczkowski A., Zwierzchowski D.: Analiza uszkodzeń kanałów kamionkowych badanych techniką video. Mat. Konf. nt. Infrastruktura podziemna miast. Wrocław 1999
13. Kusak M., Kwietniewski M., Sudoł M.: Wpływ różnych czynników na uszkadzalność przewodów sieci wodociągowych w świetle eksploatacyjnych badań niezawodności”. Gaz, Woda i Technika Sanitarna nr 10/2002 ss. 366÷371.
14. Kuś K.: Podstawy kwalifikowania sieci wodociągowej do wymiany”, Mat. konf. nt. „Modernizacja komunalnych wodociągów i kanalizacji – aspekty finansowe, organizacyjne i techniczne”, Warszawa, Wyd. ZG PZITS, s. 119÷129, 1996.
15. Kuś K., Witek E.: Badania granicznych wskaźników eksploatacji sieci wodociągowych, Mat. Konf. nt. Zaopatrzenie w wodę miast i wsi, Wyd. PZITS O/Wielkopolski, Poznań 1998.
16. Kuczyński J., Pysznik J., Taszycki H.: Metody badania i ocena trwałości kolektorów na przykładzie kanalizacji Wrocławia. Gaz, Woda i Technika Sanitarna, nr. 2 s. 49÷56, 1972
17. Kuczyński J., Pysznik J., Taszycki H.: Metodyka badań stanu technicznego kolektorów kanalizacyjnych. Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej nr 8, Wrocław, s. 3÷36 1972
18. Kwietniewski M., Roman M., Kłoss-Trębaczekiewicz H.: Niezawodność wodociągów i kanalizacji. Arkady, Warszawa 1993.
19. Kwietniewski M., Leśniewski M.: Niezawodność przewodów kanalizacyjnych w świetle badań eksploatacyjnych. Mat. Konf. nt. Bezpieczeństwo, niezawodność, diagnostyka urządzeń i systemów gazowych, wodociągowych, kanalizacyjnych, grzewczych. Zakopane. S. 205÷219, Wyd. PZITS nr. 797/2001, O/Kraków
20. Kwietniewski M., Sudoł M.: Ocena uszkadzalności przewodów tranzytowych w świetle eksploatacyjnych badań niezawodności”. Gaz, Woda i Technika Sanitarna nr 9/2002 s. 325÷329
21. Kwietniewski M., Leśniewski M.: Materiały przewodów wodociągowych i kanalizacyjnych w aspekcie ich niezawodności. Gospodarka Wodna nr 4/2007 ss. 158÷166
22. Kwietniewski M., Miszta-Kruk K., Osiecka A., Parada J.: Technologie odnowy komunalnych sieci kanalizacyjnych w Polsce w latach 2000÷2005 w świetle danych z eksploatacji. III Międzynarodowa konferencja NO-DIG POLAND 2008. Technologie bezwykopowe w inżynierii środowiska. Kielce IV 2008.
23. Kwietniewski M., Miszta-Kruk K., Osiecka A., Parada J.: Technologie odnowy komunalnych sieci wodociągowych w Polsce w latach 2000÷2005 w świetle danych z eksploatacji”, Materiały XX międzynarodowej konferencji pt. Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód, T II, s. 177÷187, Gniezno-Poznań, VI. 2008.
24. Kwietniewski M., Rak J.: Niezawodność infrastruktury wodociągowej i kanalizacyjnej w Polsce. Wyd. PAN, Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej, Instytut Podstawowych Problemów Techniki. Warszawa 2010.

25. Kwietniewski M., Tłoczek M., Ferszt E., Sobierajski M. Badania struktury materiałowej oraz zakresu stosowania technologii odnowy sieci wodociągowych w Polsce w latach 2005÷2008. Zeszyty Izby Gospodarczej „Wodociągi Polskie” nr 4, Rok VI (2010)
26. Kwietniewski M. (Red.), Tłoczek M.(Red.), Wysocki L. (Red.): Zasady doboru rozwiązań materiałowo-konstrukcyjnych do budowy przewodów wodociągowych. Wyd. Izba Gospodarcza „Wodociągi Polskie”, Bydgoszcz, 2011
27. Lubowiecka T., Wieczysty A.: Ryzyko w systemach zaopatrzenia w wodę. Monografia Komitetu Gospodarki Wodnej PAN „Ryzyko w gospodarce wodnej” (Red. M. Maciejewski), z. 17. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, s. 113÷143, 2000.
28. Madryas C.: Zawodność funkcjonowania sieci uzbrojenia podziemnego jako kryterium oceny rozwiązań. Gaz, Woda i Technika Sanitarna nr 1/1983. Wydawnictwo SIGMA.
29. Pecher R.: Kanalsanierung zwischen Qualitätsanspruch und Wertverfall. Niepublikowany referat wygłoszony w Institut fuer Unterirdische Infrastruktur (IKT). Gelsenkirchen, 1986
30. Petrozolin W.: Uszkodzenia sieci wodociągowej w Warszawie, Przegląd Informacyjny IGK, nr 1/1971
31. Piechurski F.: Przyczyny i ocena awaryjności rozdzielczej sieci wodociągowej. Rynek Instalacyjny nr. 5, s. 11÷17, 1999
32. Piechurski F., Kuś K.: Znaczenie wskaźników awaryjności i strat wody w ocenie pracy sieci wodociągowej. Mat. Konf. Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód. Poznań. Wyd. PZITS O/Wielkopolski, t. II, ss. 603÷617, 2004.
33. Rak J.: Istota ryzyka w funkcjonowaniu systemu zaopatrzenia w wodę. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej. Wyd. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2005
34. Wieczysty A.: Niezawodność systemów wodociągowych i kanalizacyjnych Cz. I i II, Teoria niezawodności i jej zastosowania, Skrypt Politechniki Krakowskiej, Kraków 1990
35. Zakrzewska A.: Wpływ wybranych czynników na niezawodność stalowych i żeliwnych przewodów sieci wodociągowych, Rozprawa doktorska. Politechnika Śląska. Gliwice 2005.
36. Zwierzchowski D.: Analiza wyników badań stanu technicznego sieci kanalizacyjnej w Polsce. Mat. Konf. nt. Nowe materiały i urządzenia w wodociągach i kanalizacji. Kielce-Cedzyna, 2001