

Zesz. Nauk. UEK, 2021, 4(994): 47–65
ISSN 1898-6447
e-ISSN 2545-3238
<https://doi.org/10.15678/ZNUEK.2021.0994.0403>

Nowe wymagania w zakresie jakości usług wodociągowych dotyczące strat wody

New Requirements for the Quality of Water Supply Services to Curb Water Loss

Klara Ramm¹, Jędrzej Bylka²

¹ Izba Gospodarcza Wodociągi Polskie, ul. Jana Kasprowicza 2, 85-073 Bydgoszcz,
e-mail: k.ramm@igwp.org.pl, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1707-4228>

² Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Piotrowo 5, 61-144 Poznań,
e-mail: jedrzej.bylka@put.poznan.pl, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8471-4315>

Artykuł udostępniany na licencji Creative Commons Uznanie autorstwa-Użycie niekomercyjne-Bez utworów zależnych 4.0 (CC BY-NC-ND 4.0); <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>

Sugerowane cytowanie: Ramm K., Bylka J. (2021), *Nowe wymagania w zakresie jakości usług wodociągowych dotyczące strat wody*, „Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego w Krakowie”, nr 4(994), 47–65, <https://doi.org/10.15678/ZNUEK.2021.0994.0403>.

STRESZCZENIE

Cel: Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2020/2184 w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi oraz Europejski Zielony Ład wprowadzają nowe wymagania w zakresie oceny jakości usług wodociągowych i obowiązek redukcji wycieków wody. Celem artykułu jest porównanie metod określania strat wody wykorzystywanych w Polsce ze standardami międzynarodowymi, a także określenie gotowości polskich przedsiębiorstw wodociągowych do wdrażania obowiązkowych standardów szacowania wycieków.

Metodyka badań: W artykule dokonano przeglądu literatury na temat metod oceny strat wody w Polsce i za granicą. Przedstawiono dane dotyczące strat wody pochodzące z Głównego Urzędu Statystycznego oraz dane literaturowe dla wybranych 11 systemów zaopatrzenia w wodę, na podstawie których dokonano analizy porównawczej wybranych podmiotów.

Wyniki badań: Utworzono ranking przedsiębiorstw, a także przeanalizowano wpływ danych wejściowych oraz przyjętej metodyki obliczeń na miejsce danego przedsiębiorstwa w rankingu.

Wykazano, że założenia przyjęte do obliczania wskaźników oraz wybór metody ewaluacji mają istotne znaczenie, jeśli chodzi o ocenę przedsiębiorstwa.

Wnioski: Porównując zakres danych zbieranych na poziomie krajowym oraz wymagania dotyczące standardów międzynarodowych, można stwierdzić, że w Polsce dane te nie są wystarczające do obliczania wartości wskaźnika ILI (*infrastructure leakage index*). Choć wskaźnik ten jest w Polsce znany, jego zastosowanie jest ograniczone do poziomu lokalnego. Wprowadzenie nowych wymagań dotyczących obliczania ILI na poziomie krajowym będzie wiązało się z koniecznością wdrożenia metod zbierania dużej liczby danych z wielu przedsiębiorstw wodociągowych.

Wkład w rozwój dyscypliny: Ze względu na istotną rolę, jaką wodociągi odgrywają w funkcjonowaniu społeczeństw, niezbędna jest ciągła kontrola poziomu utrzymania infrastruktury w systemach zaopatrzenia. Jednym z podstawowych wskaźników oceny stanu sieci wodociągowej są straty wody. Wnioski z artykułu mogą być wykorzystane przez eksploratorów systemów zaopatrzenia w wodę w celu ich lepszej oceny. Wskazują one również na konieczność prowadzenia dalszych badań i opracowania nowych metod oceny systemów wodociągowych. Badania z tego obszaru wnoszą wkład w rozwój dyscyplin naukowych, takich jak inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka oraz nauki o zarządzaniu i jakości.

Typ artykułu: oryginalny artykuł naukowy.

Słowa kluczowe: systemy zaopatrzenia w wodę, dyrektywa w sprawie jakości wody, straty wody, wycieki.

Klasyfikacja JEL: Q25.

ABSTRACT

Objective: Directive 2020/2184 on the quality of drinking water and the European Green Deal introduce new requirements for assessing the quality of water services and the need to reduce water leakage. The main purpose of the article is to compare the methods of determining water losses used in Poland with international standards and to determine the readiness of Polish water supply systems to implement mandatory leakage estimation standards.

Research Design & Methods: The article presents a review of the literature on water loss assessment methods in Poland and abroad. Data on water losses in 11 water supply systems were presented, based on the information from the Central Statistical Office and the literature. Based on the data, a comparative analysis of selected entities was carried out.

Findings: With a ranking of water utilities created, the impact of input data and the adopted calculation methodology on the position of a given entity in the ranking were analysed. The assumptions made for the calculation of the indicators and the choice of the evaluation method are shown to be important in the assessment of the entities.

Implications/Recommendations: Comparing the scope of data collected at the national level and the requirements for international standards, it can be concluded that in Poland these data are not sufficient to calculate the value of the ILI (Infrastructure Leakage Index). The ILI is known in Poland, but its application is limited to the local level. The introduction of new requirements for the calculation of ILI at the national level will require the implementation of methods for collecting large amounts of data from many water utilities.

Contribution: Due to the important role water utilities play, the level of infrastructure maintenance in supply systems must be constantly controlled. One of the basic indicators for assessing the condition of the water supply network is water loss. The conclusion from the article can be used by water operators to better evaluate their systems. The results of the analysis indicate the need for further research and the development of new methods of assessing water supply systems. The research contributes to the development of several scientific disciplines: environmental engineering, mining and energy management and quality studies.

Article type: original article.

Keywords: water supply systems, the Drinking Water Directive, water loss, water leakage.

1. Wprowadzenie

Życie w miastach i dobrostan ich mieszkańców w istotnym stopniu zależą od poprawnie prowadzonej gospodarki wodnej, której częścią są usługi wodociągowo-kanalizacyjne. Wymagania dotyczące ich jakości rosną. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2020/2184 z dnia 16 grudnia 2020 r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi oraz Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2020/852 z dnia 18 czerwca 2020 r. w sprawie ustanowienia ram ułatwiających zrównoważone inwestycje, zmieniające rozporządzenie (UE) 2019/2088, tzw. taksonomia, nakładają nowe obowiązki na przedsiębiorstwa wodociągowo-kanalizacyjne w Unii Europejskiej. Do istotnych wyzwań należy redukcja wycieków z systemu dystrybucji. Wdrożenie dyrektywy 2020/2184 będzie wymagało opracowania skutecznych metod oceny i redukcji tych wycieków.

Głównym celem nowych wymagań formułowanych przez Unię Europejską jest poprawa stanu technicznego infrastruktury wodociągowej, oszczędność cennego zasobu naturalnego, jakim jest woda, oraz zabezpieczenie wody pitnej przed zanieczyszczeniem wynikającym z nieszczelności sieci. Określenie rzetelnych metod oceny strat wody będzie wymagało budowy krajowego systemu zbierania danych oraz ich weryfikacji. Dane na temat infrastruktury wodociągowej oraz wskaźniki jej oceny zbierane są w Polsce przez różne instytucje, np. Główny Urząd Statystyczny (GUS) czy Izbę Gospodarczą „Wodociągi Polskie” (IGWP). Analiza porównawcza danych z wielu przedsiębiorstw umożliwi poszukiwanie dobrych praktyk oraz wdrażanie ich do nowych organizacji. Wskaźników oceny jakości usług wodociągowych jest wiele, jednak autorzy niniejszego artykułu koncentrują się jedynie na analizie wskaźników strat wody.

2. Uwarunkowania prawne dotyczące jakości wody przeznaczonej do picia na terenie Unii Europejskiej

Kwestia ograniczania strat wody jest dyskutowana od wielu lat. W 2015 r. opublikowany został dokument mający na celu określenie problemu i pomoc w redukcji wycieków (*EU Reference...* 2015). W 2020 r. opublikowano z kolei nową dyrektywę w sprawie jakości wody do spożycia (dyrektywa 2020/2184). Zgodnie z jej zapisami kraje członkowskie są zobowiązane do oszacowania wielkości wycieków, a Komisja Europejska opracuje progi wycieków, które będą musiały zostać osiągnięte w najbliższych latach. Do 12 stycznia 2026 r. konieczne będzie zapewnienie, że państwa członkowskie przy ocenie wielkości wycieków wody na ich terytorium oraz możliwości poprawy w zakresie redukcji wycieków będą stosowały infrastrukturalny indeks wycieków (ILI, *infrastructure leakage index*) lub inną odpowiednią metodę. Ocena strat wody będzie wymagana od dostawców obsługujących co najmniej 50 tys. osób lub w przypadku, gdy ilość dostarczanej przez nich wody jest większa niż 10 tys. m³ dziennie. Do 12 stycznia 2028 r. konieczne będzie przyjęcie przez Komisję Europejską aktu delegowanego. Zgodnie z art. 21 dyrektywy 2020/2184 w celu określenia progów, na podstawie ILI lub innej odpowiedniej metody, który będzie podstawą do opracowania planów działania w skali UE. Jakość tego aktu delegowanego będzie zależeć od analiz i danych dostarczonych przez państwa członkowskie.

Europejski Zielony Ład to strategia Unii Europejskiej narzucająca cele w zakresie klimatu i energii do 2030 r. Komisja Europejska uzasadnia, że fundamentalne znaczenie ma odpowiednie ukierunkowanie inwestycji, tak aby były „zrównoważone”. Konieczny jest więc wspólny język i jasne określenie tego, co jest zrównoważone, dlatego rozpoczęto proces tworzenia reguł zwanych taksonomią, które mają dostarczyć firmom, inwestorom i decydentom odpowiednich definicji, według których działalność gospodarczą można uznać za zrównoważoną środowiskowo. Komisja przygotowuje obecnie narzędzie informatyczne, które ułatwi korzystanie z taksonomii.

Rozporządzenie w sprawie taksonomii weszło w życie 12 lipca 2020 r. Ustanowiono w nim sześć celów środowiskowych:

- łagodzenie zmian klimatu,
- adaptacja do zmian klimatu,
- zrównoważone użytkowanie i ochrona zasobów wodnych i morskich,
- przejście na gospodarkę o obiegu zamkniętym,
- zapobieganie i kontrola zanieczyszczeń,
- ochrona i przywracanie różnorodności biologicznej i ekosystemów.

Pierwszy akt delegowany dotyczący zrównoważonych działań na rzecz celów przystosowania się do zmian klimatu i łagodzenia ich skutków został opublikowany 21 kwietnia 2021 r. Kolejne mają się pojawić w 2022 r. Art. 19 rozporządzenia

2020/852 określa techniczne kryteria kwalifikacji, które powinny być ilościowe i w miarę możliwości określać konkretne wartości progowe. W kontekście działalności wodociągowo-kanalizacyjnej powinny one także uwzględniać charakter i skalę działalności gospodarczej oraz być łatwe w użyciu i sformułowane w sposób ułatwiający weryfikację ich przestrzegania.

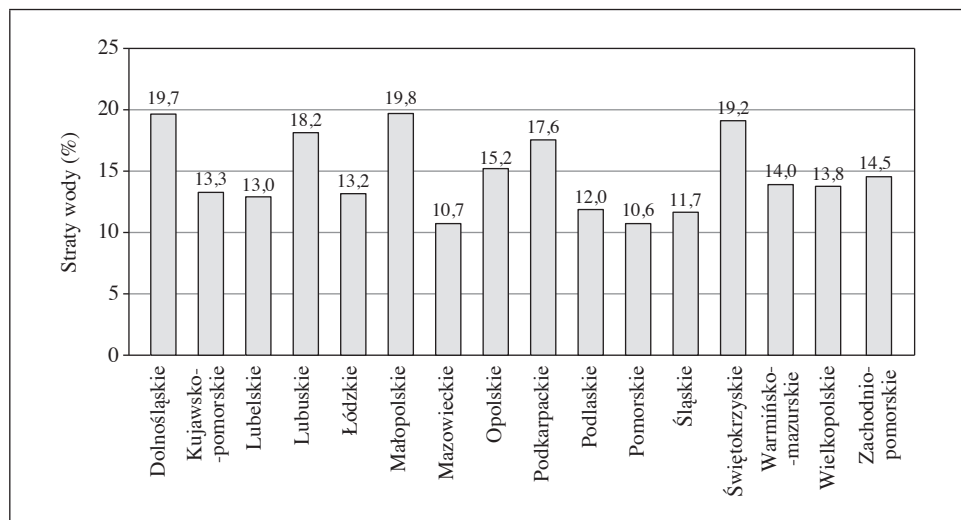
W akcie delegowanym Komisji Europejskiej ustalono techniczne kryteria, na podstawie których można uznać, że działalność gospodarczą kwalifikuje się jako mającą znaczny wkład w łagodzenie lub przystosowanie się do zmian klimatu, a także czy nie powoduje ona znaczącej szkody dla środowiska. Załącznik I określa szczegółowe kryteria dotyczące systemów wodociągowo-kanalizacyjnych. Dostosowanie branży do zmian klimatu zdefiniowane jest w nim przez zużycie energii i poziom wycieków. Jeśli chodzi o ocenę obszarów objętych budową, rozbudową lub eksploatacją systemów zaopatrzenia w wodę, Komisja Europejska podaje następujące wymaganie dotyczące strat wody: poziom wycieku oblicza się przy użyciu infrastrukturalnego wskaźnika wycieków (ILI), który nie może przekroczyć 1,5. Jak wskazano w dyrektywie 2020/2184 w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi, zastosowana może zostać także inna, odpowiednia metoda. Wskaźnik ma być obliczony dla obszaru, w którym prowadzone są prace, np. dla wydzielonej strefy opomiarowanej DMA (*district metered area*) lub obszaru zarządzania ciśnieniem PMA (*pressure management area*).

Dla przedsięwzięć związanych z odnową systemów zaopatrzenia w wodę konieczna jest z kolei poprawa efektywności przez zamknięcie luki między uśrednionym z trzech lat poziomem wycieków ILI a wartością 1,5 o co najmniej 20%. Zgodnie z dyrektywą 2020/2184 możliwe jest także zastosowanie innego wskaźnika. Wyznaczanie wartości obejmuje obszar, na którym prowadzone są prace, z uwzględnieniem DMA lub PMA.

3. Analiza danych dotyczących strat wody w Polsce

Dane dotyczące strat wody na poziomie krajowym zbierane są przez Główny Urząd Statystyczny w ramach rocznego sprawozdania M-06 Sprawozdanie o wodociągach, kanalizacji i wywozie nieczystości ciekłych gromadzonych w zbiornikach bezodpływowych (M-06 2021). Obowiązek sprawozdawczy jest nałożony na jednostki, które zarządzają siecią wodociągową lub kanalizacyjną. W sprawozdaniu wpisuje się wartość strat wody dla każdego przedsiębiorstwa. W objaśnieniu do formularza znajduje się informacja, że straty należy rozumieć jako ilość wody, która „została utracona w sferze procesów dystrybucyjnych (nieszczelności sieci wodociągowej, awarie, błędy w pomiarach itp.). W podanej wielkości nie uwzględnia się wody zużytej w procesie technologicznym, np. filtracja wody, czyszczenie filtrów, płukanie sieci”. Zgodnie z opracowaniem urzędu statystycznego opublikowanym na stronie internetowej „straty wody ustala się szacunkowo, odejmując od wody włoś-

czoney do sieci sprzedaż hurtową wody czystej, zużycie wody na potrzeby własne po włączeniu do sieci oraz wodę dostarczoną odbiorcom” (*Słownik pojęć GUS 2021*). GUS udostępnia dane o stratach wody w formie tabel zagregowanych na poziomie województw. Dane pozyskane z GUS przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Straty wody w Polsce – dane ze sprawozdań M-06 na 2016 r.

Źródło: dane GUS.

Ważnym źródłem danych o stratach wody jest projekt benchmarkingu realizowany przez Izbę Gospodarczą „Wodociągi Polskie” od 2011 r. Dane zbierane są w corocznej ankiecie oraz publikowane w raportach benchmarkingowych dostępnych dla uczestników programu. W 2020 r. opublikowany został raport 5-letni z zestawieniem zmian wartości mediany wskaźników benchmarkingowych (*Benchmarking IGWP 2021*), a także ich wartości minimalnych i maksymalnych oraz częstości występowania. W raporcie benchmarkingowym zbiera się informacje na temat wskaźników dotyczących strat wody, takich jak:

- procentowa wartość straty wody,
- straty wody w tys. m³ na km sieci,
- sprawność sieci (określana jako procentowy stosunek ilości wody sprzedanej do ilości wody włączonej do sieci).

Benchmarking Izby Gospodarczej „Wodociągi Polskie” jest projektem dobrowolnym, w którym uczestniczą przedsiębiorstwa chcące porównywać wartości swoich wskaźników w celu znalezienia jak najlepszych wzorców. W 2019 r. w projekcie uczestniczyło 150 przedsiębiorstw (ok. 7% wszystkich przedsiębiorstw), które dostarczają ponad 61% wody do gospodarstw domowych i obsługują ok. 18%

długości sieci wodociągowej w Polsce. Izba Gospodarcza w ramach projektu benchmarkingu opracowała zestaw definicji wskaźników oraz wartości zmiennych podawanych przez przedsiębiorstwa. Dane sprawdzane są pod kątem wiarygodności oraz komentowane corocznie przez zespół ekspertów podczas prac związanych z przygotowaniem raportu. Z tego względu benchmarking Izby Gospodarczej „Wodociągi Polskie” uznawany jest za najbardziej wiarygodne, prowadzone na tak dużą skalę, źródło informacji o wskaźnikach poziomu utrzymania sieci.

Jeśli chodzi o skalę lokalną, przedsiębiorstwa wodociągowe opracowują oraz wykorzystują własne wskaźniki dotyczące strat wody. Obszerne ich zestawienie przedstawił m.in. F. Piechurski (2014, s. 68–79), który wskazał następujące wskaźniki wykorzystywane w eksploatacji systemów wodociągowych:

- objętość wody wtłoczonej do sieci,
- objętość wody sprzedanej,
- objętość wody sprzedanej odbiorcom domowym,
- objętość wody dostarczonej i zużytej przez przedsiębiorstwo wodociągowe,
- objętość strat wody; wskaźnik odniesiony do liczby mieszkańców przypadającej na 1 km sieci,
- gęstość przyłączy,
- jednostkowa objętość wody dostarczonej,
- wskaźnik intensywności uszkodzeń,
- jednostkowa sprzedaż wody ogółem,
- jednostkowa sprzedaż wody w gospodarstwach domowych,
- objętość wody niesprzedanej,
- jednostkowy wskaźnik strat wody w sieci wodociągowej,
- jednostkowy wskaźnik strat wody na jednego mieszkańca, jedno przyłącze.

Wartości wskaźników mogą być obliczane dla całego systemu zaopatrzenia w wodę lub z podziałem na podsystemy (strefy). Wskaźniki można określać na dobę, na jednego mieszkańca lub jednostkę długości sieci. Podstawą do analiz strat wody jest bilans wody. W eksploatacji wykorzystuje się również pomiary przepływu wykonywane w godzinach nocnych (1:00–4:00) dla wydzielonych stref sieci wodociągowej (DMA).

4. Wskaźniki proponowane w dyrektywie w sprawie jakości wody

Dyrektywa 2020/2184 narzuca obowiązek określania wycieków (ILI lub inna odpowiednia metoda) na podmioty obsługujące co najmniej 50 tys. osób. Według analiz federacji EurEau jej członkowie pochodzą z ponad 2 tys. przedsiębiorstw wodociągowych, które obsługują więcej niż 50 tys. osób, oraz z ponad 30 tys. przedsiębiorstw obsługujących populację mniejszą niż 50 tys. osób. Oznacza to, że większość przedsiębiorstw nie będzie uczestniczyć w ocenie wycieków w skali kraju.

Określenie ILI wymaga zebrania danych dotyczących:

1. UARL (*unavoidable annual losses*), tj. wartości strat nieuniknionych, które obliczane są zazwyczaj dla całego systemu dystrybucji. Zakłada się przy tym, że roczne wycieki nieuniknione dla sieci magistralnej i rozdzielczej wynoszą $6,57 \text{ m}^3/\text{km}/\text{m}$ ciśnienia, na przyłączach do granicy nieruchomości – $0,256 \text{ m}^3/\text{km}/\text{m}$ ciśnienia, a na granicy na terenie nieruchomości – $9,132 \text{ m}^3/\text{km}/\text{m}$ ciśnienia (<https://leakssuite.library.com>, data dostępu: 13.07.2021). W polskiej literaturze przedmiotu (Rak i Misztal 2017) zakłada się, że dzienny wskaźnik wycieków nieuniknionych jest równy $0,8 \text{ dm}^3/\text{km}/\text{mH}_2\text{O}$ (rocznie $0,292 \text{ m}^3$), jednak A. Lambert i in. (2014) przyjmują, że jego wartość wynosi $0,7 \text{ dm}^3/\text{km}/\text{mH}_2\text{O}$ (rocznie $0,256 \text{ m}^3$). Wskaźnik można wyliczyć ze wzoru:

$$\text{UARL (m}^3/\text{rok)} = (6,57 \cdot L_m + 0,256 \cdot N_c + 9,13 \cdot L_p) \cdot P,$$

gdzie:

L_m – długość sieci wodociągowej (magistralnej i rozdzielczej) w km,

L_p – długość przyłączy w km,

N_c – liczba przyłączy,

P – średnie ciśnienie wody w sieci w mH_2O .

Równanie można wykorzystać do przewidywania najniższych technicznie osiągalnych rocznych strat rzeczywistych dla dowolnej kombinacji długości sieci, liczby przyłączy, lokalizacji wodomierzy głównych i średniego ciśnienia roboczego przy założeniu, że infrastruktura systemu dystrybucyjnego jest w dobrym stanie.

Od 1999 r. wartość UARL jest obliczana dla tysięcy sieci na całym świecie, jednak branża wodociągowa sceptycznie podchodzi do tego wskaźnika, wskazując, że jest on zbyt wrażliwy na rozmiar systemu, gęstość przyłączy i średnie ciśnienie. W 2014 r. badania dobrej jakości danych z małych systemów w Austrii i Danii wykazały, że małe samodzielne systemy z mniej niż 3000 przyłączy mogą osiągnąć wycieki mniejsze niż obliczone za pomocą równania UARL, szczególnie przy ciśnieniach poniżej $40 \text{ mH}_2\text{O}$, z rurami o wysokiej elastyczności (<https://leakssuite.library.com>, data dostępu: 13.07.2021).

2. CARL (*current annual real losses*) – wartości rzeczywistych rocznych strat wody, czyli wody faktycznie straconej w sieci. Oznacza objętość wody wtłoczonej do sieci pomniejszoną o wodę sprzedaną i wodę zużytą do celów własnych.

3. ILI – ilorazu omówionych wyżej bieżących rocznych rzeczywistych strat i nieuniknionych rocznych rzeczywistych strat: $\text{ILI} = \text{CARL}/\text{UARL}$. Idealna sytuacja występuje wówczas, gdy ILI jest równy jedności.

Warunkiem poprawnego określenia ilości wody przynoszącej dochód jest wykorzystanie wiarygodnego systemu pomiarowego. Chociaż bilans wody jest ważnym narzędziem ułatwiającym zrozumienie wpływów, zużycia i strat, ogólny brak danych prowadzi do problemów. Luki w nich utrudniają ilościowe określenie

strat handlowych oraz określenie charakteru i lokalizacji strat fizycznych. Pomocne mogą być narzędzia modelowania, także dzielenia sieci na strefy DMA. Bardzo istotna jest również kontrola ciśnienia oraz niedopuszczanie do pozostawiania wycieków tam, gdzie zostały już wykryte.

Istotną kwestią, jeśli chodzi o redukcję ILI, jest zbilansowanie wszystkich komponentów parametru wody niesprzedanej (*non-revenue water*). Poza danymi zebranymi z odczytów konieczne jest określenie dokładności pomiarów (dopasowanie wodomierzy) oraz skuteczne zarządzanie wodą niesprzedaną w celu jej minimalizacji: określanie stref DMA, popularyzacja telemetrii, kontrola ciśnienia w sieci itd.

Według danych EurEau (*Drinking Water... 2021*) przedsiębiorstwa wodociągowe wciąż rzadko stosują współczynnik ILI, UARL czy CARL. Najpopularniejsze są metody obliczania strat według następujących wzorów:

$$KPI1 = Q1 - Q2 - Q3 \text{ (m}^3\text{)},$$

$$KPI2 = Q2 - Q3 \text{ (m}^3\text{)},$$

$$KPI3 = 100 \cdot (KPI1/Q1), \text{ \%},$$

$$KPI4 = KPI1/L1 \text{ (m}^3\text{/km)},$$

gdzie:

$Q1$ – woda ujęta,

$Q2$ – woda wtłoczona do sieci,

$Q3$ – autoryzowana konsumpcja,

$L1$ – długość sieci magistralnej i dystrybucyjnej (czasem również przyłączy).

Kwestia kontroli strat wody dotychczas nie była w przedsiębiorstwach wodociągowych zagadnieniem kluczowym, co zapewne się zmieni ze względu na dyrektywę 2020/2184.

EurEau przeprowadziła wśród swoich członków ankietę na temat dojrzałości zarządzania stratami wody w Europie. Ankietę wypełniło 18 krajów członkowskich (organizacje branżowe, w tym Izba Gospodarcza „Wodociągi Polskie”), obejmujących 30 685 podmiotów, w tym 1995 dużych (obsługujących ponad 50 tys. osób) oraz 28 690 mniejszych. 11 krajów w zdecydowanej większości pobiera wody podziemne, dwa kraje wykorzystują powszechnie technologię odsalania wody (ponad 35% wody wyprodukowanej). W 14 krajach istnieje już obowiązek określania strat wody. Ponadto zdecydowana większość użytkowników domowych i przemysłowych w Unii Europejskiej jest opomiarowana, a w 13 krajach funkcjonują regulacje związane z dokładnością pomiaru, przez co można stwierdzić, że dane już istnieją. Występuje jednak wiele problemów technicznych i organizacyjnych. Bardzo istotne w bilansowaniu wody są zdalne odczyty wodomierzy, gdyż pozwalają przeprowadzić odczyt dla całego systemu w jednym momencie. Stanowią

one jednak średnio 5% wszystkich odczytów, choć jest kilka krajów, w których wskaźnik ten osiąga wartość nawet 35%. Można zatem zauważyć potencjał rozwoju. Działania na rzecz ograniczania wycieków będą więc związane z pomiarami (*smart metering*), modelowaniem i audytem. Drugim zespołem koniecznych środków jest systematyczna odnowa sieci. Standardem w krajach członkowskich jest dążenie do wymiany lub odnowy 2% rocznie, tak aby wiek przewodów nie przekroczył 50 lat. Wartość ta podawana jest jako uśredniona w skali kraju i w praktyce zależy od materiału sieci i jej wykonania.

Członkowie EurEau wskazują następujące metody, skuteczne w znajdowaniu wycieków:

- natychmiastowe reagowanie na zgłoszenia i reklamacje odbiorców,
- określanie i systematyczne pomiary DMA,
- programy detekcji wycieków i napraw,
- zarządzanie ciśnieniem,
- reakcja na wycieki występujące u odbiorcy – darmowa detekcja i naprawy,
- systematyczna renowacja infrastruktury.

Podejście do zagadnienia wycieków zależy oczywiście od wielu czynników, takich jak strefa klimatyczna, stan zasobów wodnych, wielkość przedsiębiorstwa, lokalne uwarunkowania prawne, jakość konserwacji systemu, całkowita długość sieci, liczba połączeń, lokalna topografia, a tym samym charakterystyka hydrauliczna, warunki geologiczne i klimatyczne, ceny wody, a także to, czy woda jest ceniona przez społeczeństwo.

Różne podejścia sprawiają, że dane są często trudne do porównania. Ponadto ograniczenie wycieków nie jest jedynym, absolutnym i idealnym rozwiązaniem problemu braku równowagi między zapotrzebowaniem a zaopatrzeniem w wodę. Należy w pełni uwzględnić lokalne czynniki ekonomiczne, społeczne i środowiskowe, włączając w to także zarządzanie wyciekami. Zakłady wodociągowe przyznają bowiem, że rzeczywisty poziom wycieków jest również wskaźnikiem ogólnej jakości i integralności systemu zaopatrzenia w wodę. Należy także podkreślić, że wodociągi pobierają ze środowiska ilość wody stanowiącą ok. 20% całkowitego zapotrzebowania Europy na wodę, a pozostała część w większości przypada na rolnictwo. Polityka szacowania wycieków i ich redukcji powinna zatem zostać rozszerzona na wszystkie sektory w celu zachowania cennych zasobów oraz zminimalizowania zużycia energii i śladu węglowego.

Wartość docelowa 1,5 jest uznawana przez specjalistów za poziom bardzo dobry w wielu krajach świata (Seago, Mckenzie i Liemberger 2005). Należy mieć jednak na uwadze wartości bezwzględne ilości traconej wody, które przedstawiono w tabeli 1.

Na niejednoznaczność ILI ze względu na trudności związane z dokładnym określeniem długości przyłączy czy wrażliwość indeksu na wartość ciśnienia w dużych

wodociągach wskazują także C. Lenzi i in. (2014). Istnieją również inne wskaźniki wydajności, które mogą być wykorzystane do określania wycieków zgodnie z nową dyrektywą (Klosok-Bazan i in. 2021), takie jak procent całkowitych strat, bezwzględna ilość traconej wody czy woda nieprzynosząca dochodu (NRW) określona przez organizację IWA.

Tabela 1. Podział na kategorie według ILI i ilości wycieków

Kategoria stanu technicznego	ILI	Wycieki (litr/przyłącze/dzień) dla systemów ciśnieniowych o średniej wartości ciśnienia wody				
		10 m	20 m	30 m	40 m	50 m
Kraje rozwinięte						
Doskonała	1–2	–	< 50	< 75	< 100	< 125
Dobra	2–4	–	50–100	75–150	100–200	125–250
Słaba	4–8	–	100–200	150–300	200–400	250–500
Bardzo słaba	> 8	–	> 200	> 300	> 400	> 500
Kraje rozwijające się						
Doskonała	1–4	< 50	< 100	< 150	< 200	< 250
Dobra	4–8	50–100	100–200	150–300	200–400	250–500
Słaba	8–16	100–200	200–400	300–600	400–800	500–1000
Bardzo słaba	> 16	> 200	> 400	> 600	> 800	> 1000

Źródło: (Seago, Mckenzie i Liemberger 2005, s. 5).

Powstają więc narzędzia mające ułatwić szacowanie strat wody. Zastosowanie znajdują metody statyczne, np. oparte na bilansowaniu DMA czy scenariuszach wycieków (Ferrandez-Gamot i in. 2015), ale także dynamiczne, jak np. *leakage diagnosis benchmark* (Vrachimis i in. 2018) czy zarządzanie ciśnieniem (Gupta, Bokde i Kulat 2018, Gupta i in. 2017, Hajibandeh i Nazif 2018). Istotne jest zbieranie danych i właściwe modelowanie (Vrachimis, Eliades i Polycarpou 2018, Vrachimis i in. 2018, Yu i in. 2021). Nie zawsze jednak zebrane dane da się porównać, stąd konieczność odpowiedniego zdefiniowania wskaźników, które mogą służyć za benchmarki.

Porównywanie wskaźników musi być zracjonalizowane. Podczas ich porównywania należy wziąć pod uwagę warunki lokalne. Nie można także pomijać ekonomicznego wskaźnika wycieków (ELL, *economic level of leakage*), określającego poziom, na którym dalsze inwestycje w ograniczanie wycieków są ekonomicznie nieuzasadnione (Moslehi, Jalili-Ghazizadeh i Yousefi-Khoshqalb 2021). Szacowanie ELL przyczynia się do lepszego zrozumienia i zarządzania stratami wody, jednak wymaga ono doskonałej znajomości sieci (Munoz-Trochez, Smout i Kayaga 2011). Istotne jest więc określanie zarówno ILI, jak i ELL (Banovec i Domadenik 2018).

5. Wskaźnik ILI w Polsce

W Polsce nie ma spójnej bazy danych, która umożliwiłaby porównywanie wartości wskaźnika ILI dla przedsiębiorstw wodociągowych z całego kraju. Dla celów badawczych przeanalizowano dane dotyczące ILI dla przykładowych jednostek osadniczych, które pozyskano z literatury (tabele 2 i 3).

Tabela 2. Dane dotyczące ilości wody tłoczzonej do sieci (w m³/rok)

Jednostka osadnicza	Woda dostarczona do sieci	Woda sprzedana odbiorcom	Potrzeby własne	Straty pozorne	Straty rzeczywiste
A	1 179 600	799 600	93 400	–	286 600
B	3 166 798	1 528 228	316 680	–	1 321 890
C	5 886 826	3 598 195	264 621	–	2 024 010
D	13 041 107	9 413 191	1 651 988	–	1 975 928
E	4 678 222	4 046 662	–	–	631 560
F	1 367 300	988 800	159 500	–	219 000
G	98 880	73 344	1450	4944	19 142
H	210 680	146 901	1950	10 534	51 295
I	99 500	74 975	3500	4975	16 050
J	291 980	225 535	9510	14 599	42 336
K	4 689 836	4 222 656	60 591	–	406 589

Źródło: opracowanie własne na podstawie (Garbowski 2017, Kwietniewski 2013, Musz-Pomorska i in. 2016, Ociepa i Kędzia 2015, Studziński, Pietrucha-Urbanik i Mędrala 2014).

Na podstawie danych dotyczących wybranych jednostek osadniczych obliczono wskaźniki ILI. Wartość ta była podstawą do określenia miejsca w rankingu dla każdego z analizowanych układów oraz oceny ich stanu technicznego. Przeanalizowano, w jaki sposób zmiana ciśnienia wpłynie na miejsce w rankingu oraz ocenę stanu technicznego sieci. Określono trzy wartości:

– ILI – wskaźnik ILI dla analizowanego układu obliczony na podstawie danych z literatury,

– ILI_MIN – wskaźnik ILI dla analizowanego układu obliczony na podstawie danych z literatury, ale przy założeniu, że ciśnienie w każdym układzie wynosi 60 m słupa wody,

– ILI_MAX – wskaźnik ILI dla analizowanego układu obliczony na podstawie danych z literatury, ale przy założeniu, że ciśnienie w każdym układzie wynosi 25 m słupa wody.

Wyniki obliczeń, rankingi ze względu na procentową wartość strat wody oraz wskaźnik ILI przedstawiono w tabeli 4. Oceniono również stan techniczny sieci zgodnie z wytycznymi przedstawionymi w tabeli 1.

Tabela 3. Dane dotyczące sieci wodociągowych i przyłączy w analizowanych jednostkach osadniczych

Jednostka osadnicza	Długość sieci magistralnej (km)	Długość sieci rozdzielczej (km)	Liczba przyłączy	Długość przyłączy (km)	Średnie ciśnienie (mH ₂ O)
A	32,5	92,2	3991	124,9	45
B	11,2	120,2	5880	84,4	40
C	51,3	172,2	9902	166,9	60
D	49,8	490,5	16 970	323,8	47
E	14,8	324,2	10 526	218	25
F	–	121,7	5718	48,6	50,5
G	–	16,47	600	16	35
H	–	102,6	1555	90,58	38
I	–	48,02	737	43,39	37
J	–	87,24	2209	86	35
K	46,7	179,1	5352	76,3	35

Źródło: opracowanie własne na podstawie (Garbowski 2017, Kwietniewski 2013, Musz-Pomorska i in. 2016, Ociepa i Kędzia 2015, Studziński, Pietrucha-Urbanik i Mędrala 2014).

Analiza uzyskanych wartości wskaźników strat wody wykazała, że metoda ewaluacji może wpłynąć na wyniki oceny (dla 8 z 11 przedsiębiorstw zauważono zmianę pozycji w rankingu w przypadku zastosowania wskaźnika ILI zamiast procentowego wskaźnika strat wody). Dostrzeżono również, że zmiana wartości ciśnienia może wpłynąć na miejsce przedsiębiorstwa w rankingu (zmianę stwierdzono w przypadku 3 spośród 11 przedsiębiorstw). Zmiana wartości ciśnienia w znacznym stopniu wpływa na ocenę stanu technicznego układu zaopatrzenia w wodę (dla 7 z 11 przedsiębiorstw zauważono wpływ ciśnienia na ocenę stanu technicznego).

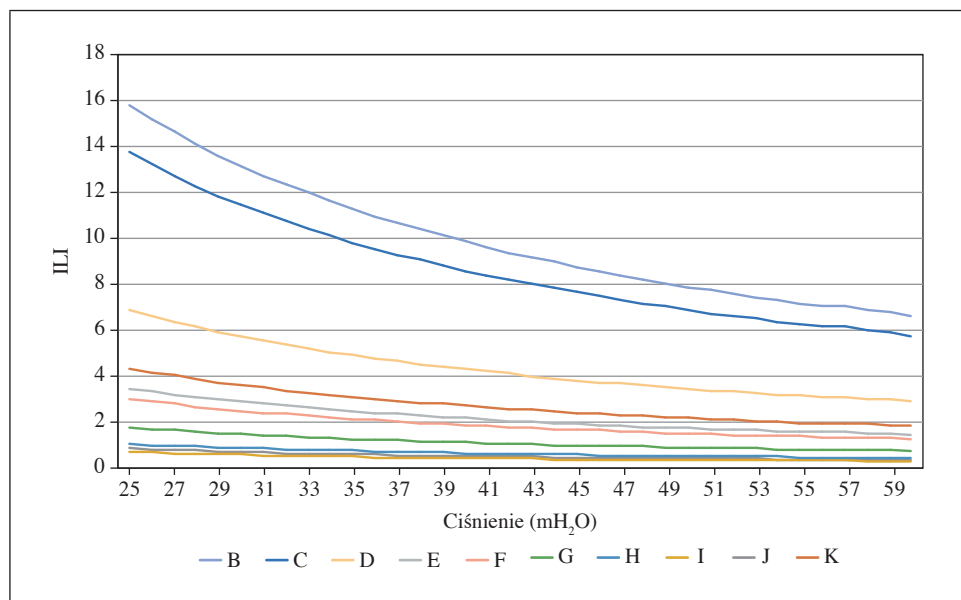
Na rys. 2 dla każdego z układów przedstawiono wartości ILI w zależności od ciśnienia. Zauważono, że w niektórych przypadkach zmiana ciśnienia może powodować nawet kilkukrotną zmianę wartości wskaźnika ILI.

Tabela 4. Analiza wartości wskaźników oceny strat wody

Jednostka osadnicza	Straty (%)	Miejsce w rankingu	ILI	Miejsce w rankingu	Stan techniczny	ILI_MAX	Miejsce w rankingu	Stan techniczny	ILI_MIN	Miejsce w rankingu	Stan techniczny
A	24	8	2,03	6	db	3,66	7	db	1,52	7	dosk.
B	41	11	9,86	11	b. sł.	15,78	11	b. sł.	6,57	11	sł.
C	34	10	5,73	10	sł.	13,76	10	b. sł.	5,73	10	sł.
D	15	4	3,66	9	sł.	6,89	9	sł.	2,87	9	db
E	13	2	3,46	8	sł.	3,46	6	sł.	1,44	6	dosk.
F	16	5	1,48	5	dosk.	3,00	5	db	1,25	5	dosk.
G	19	7	1,27	4	dosk.	1,78	4	dosk.	0,74	4	dosk.
H	24	9	0,69	3	dosk.	1,04	3	dosk.	0,43	3	dosk.
I	16	6	0,46	1	dosk.	0,69	1	dosk.	0,28	1	dosk.
J	14	3	0,60	2	dosk.	0,84	2	dosk.	0,35	2	dosk.
K	8	1	3,10	7	db	4,34	8	sł.	1,81	8	dosk.

Objaśnienia: b. sł. – bardzo słaby, sł. – słaby, db – dobry, dosk. – doskonały.

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 2. Zależność między ciśnieniem a wartością wskaźnika ILI z podziałem ze względu na jednostki osadnicze

Źródło: opracowanie własne.

6. Podsumowanie i wnioski

Utrzymanie infrastruktury wodociągowej oraz redukcja wycieków są kluczowymi zadaniami, jeśli chodzi o utrzymanie i rozwój systemów zaopatrzenia. Obecnie przedsiębiorstwa wodociągowe mogą korzystać z wielu opracowanych już metod służących do wykonywania oceny poziomu strat wewnątrz przedsiębiorstwa. Metody te wymagają zbierania wielu danych oraz uwzględnienia specyfiki danego przedsiębiorstwa. Na poziomie krajowym dane zbierane są przez GUS jedynie w ograniczonym zakresie. Izba Gospodarcza „Wodociągi Polskie” prowadzi bardziej szczegółowe badania ankietowe, które są sprawdzane pod kątem ich wiarygodności. Dane takie mogą służyć do benchmarkingu zewnętrznego przedsiębiorstw.

Porównując zakres danych zbieranych na poziomie krajowym oraz wymagania dotyczące standardów międzynarodowych, można stwierdzić, że w Polsce dane te nie są wystarczające do obliczania wartości wskaźnika ILI określonego jako standardu międzynarodowego. Choć wskaźnik ten jest w Polsce znany, jego zastosowanie ogranicza się do poziomu lokalnego. Wprowadzenie nowych wymagań dotyczących obliczania ILI na poziomie krajowym będzie wiązało się z koniecznością wdrożenia metod zbierania dużej liczby danych z wielu przedsiębiorstw wodociągowych. Dane te, szczególnie wartości ciśnienia w sieci wodociągowej, będą trudne

do weryfikacji. Ciśnienie zmienia się bowiem w ciągu doby i zależy od odległości od pompowni wody czystej oraz ukształtowania terenu. W artykule wykazano, że przyjęta wartość ciśnienia istotnie wpływa zarówno na wyniki porównywania przedsiębiorstw w ramach benchmarkingu (ranking przedsiębiorstw), jak i na ocenę stanu technicznego sieci. Jednym z większych wyzwań dotyczących wprowadzenia obligatoryjnej oceny poziomu strat wody z wykorzystaniem ILI będzie opracowanie metody weryfikacji określonych przez przedsiębiorstwa wartości średniego ciśnienia w sieci. W analizie wykazano, że wartość ta ma kluczowy wpływ na wartość ILI (zob. rys. 2). Z tych względów weryfikacja wartości ILI na poziomie krajowym może okazać się trudnym zadaniem. Lepszym rozwiązaniem mogłoby więc być określenie progów wycieków w zależności od warunków lokalnych (rzeźba terenu, dostępność zasobów, źródło energii wykorzystywanej do pompowania, powierzchnia zaopatrywanego obszaru itd.).

Analiza wartości wskaźnika ILI dla systemów wodociągowych powinna być skorelowana z analizą ekonomiczną. Koszty strat wody są związane z kosztami produkcji oraz przesyłu wody (przede wszystkim zakup energii elektrycznej) oraz kosztami zakupu wody surowej (opłaty środowiskowe). Koszt opłat środowiskowych może istotnie warunkować opłacalność inwestycji związanych z odnową sieci. W celu realizacji wymagań unijnych można rozważyć wykorzystanie innych narzędzi poza wyznaczaniem odgórnej wartości wskaźnika ILI. Ewaluacja powinna uwzględniać nie tylko ocenę ilościową, lecz również jakościową. Ocena jakościowa może dotyczyć sprawdzania wdrożenia dobrych praktyk w zakresie redukcji strat wody, takich jak np. prowadzenie regularnych audytów, wdrażanie modeli hydraulicznych, strefowanie sieci, zarządzanie ciśnieniem czy analiza danych z monitoringu.

Kluczową kwestią oceny infrastruktury technicznej jest jej precyzja i określenie wskaźników do ewaluacji. Na ocenę mogą wpływać lokalne uwarunkowania związane m.in. z długością sieci i liczbą przyłączy, wiekiem oraz strukturą materiałową sieci, wymaganym ciśnieniem, ukształtowaniem terenu, liczbą i rozmiarem awarii. W celu wiarygodnej oceny niezbędne jest wdrożenie metod, które umożliwiają wykorzystanie miarodajnych wskaźników oraz ujednoczenie definicji i sposobu raportowania danych. Aktami prawnymi znacząco wpływającymi na działania sektora wodociągów i kanalizacji są zapisy tzw. taksonomii oraz nowej dyrektywy w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi. Wdrożenie tych aktów przez instytucje zarządzające wodami będzie wymagało opracowania sposobu określania zasad oceny układów technicznych. Wstępnie proponowane przyjęcie wskaźnika ILI jako podstawy oceny systemu może okazać się trudne ze względu na konieczność zbierania dużej liczby danych, niejednoznaczność tego wskaźnika oraz trudność weryfikacji wartości ILI.

Finansowanie badań

Badania zostały sfinansowane ze środków projektu 0713/SBAD/0947 Młoda Kadra.

Literatura

Banovec P., Domadenik P. (2018), *Defining Economic Level of Losses in Shadow: Identification of Parameters and Optimization Framework*, „Proceedings”, vol. 2(11), <https://doi.org/10.3390/proceedings2110599>.

Benchmarking IGWP (2021), <https://igwp.org.pl/index.php/nasza-aktywnosc/analizy-ekonometryczne/1761-raport-benchmarking-wybrane-wyniki-przedsiębiorstw-wodociągowo-kanalizacyjnych-w-polsce-za-lata-2014-2018-juz-dostepny> (data dostępu: 13.07.2021).

Drinking Water Supply and Leakage Management (2021), EurEau, Briefing Note, <https://www.eureau.org/resources/briefing-notes/5735-eureau-briefing-note-on-drinking-water-supply-and-leakage-management/file> (data dostępu: 13.07.2021).

Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2020/2184 z dnia 16 grudnia 2020 r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi (Dz. Urz. UE z 23.12.2020 r., L 435/1).

EU Reference Document Good Practices on Leakage Management WFD CIS WG PoM (2015), Main Report, European Commission, <https://doi.org/10.2779/102151>.

Ferrandez-Gamot L., Busson P., Blesa J., Tornil-Sin S., Puig V., Duviella E, Soldevila A. (2015), *Leak Localization in Water Distribution Networks Using Pressure Residuals and Classifiers*, „IFAC-PapersOnLine”, vol. 48, nr 21, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.09.531>.

Garbowski A. (2017), *Analiza bilansu wody w przedsiębiorstwie „Wodociągi Słupsk” Sp. z o.o. – ważne jest, gdzie mierzymy, czym mierzymy i jak interpretujemy wyniki*, http://www.wodociagi.slupsk.pl/wp-content/uploads/2017/11/Analiza_bilansu_wody.pdf (data dostępu: 13.07.2021).

Gupta A., Bokde N., Kulat K.D. (2018), *Hybrid Leakage Management for Water Network Using PSF Algorithm and Soft Computing Techniques*, „Water Resources Management”, vol. 32, nr 3, <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1859-3>.

Gupta A.D., Bokde N., Marathe D., Kulat K. (2017), *Optimization Techniques for Leakage Management in Urban Water Distribution Networks*, „Water Supply”, vol. 17(6), <https://doi.org/10.2166/ws.2017.064>.

Hajibandeh E., Nazif S. (2018), *Pressure Zoning Approach for Leak Detection in Water Distribution Systems Based on a Multi Objective Ant Colony Optimization*, „Water Resources Management”, vol. 32, <https://doi.org/10.1007/s11269-018-1929-1>.

Klosok-Bazan I., Boguniewicz-Zablocka J., Suda A., Łukasiewicz E., Anders D. (2021), *Assessment of Leakage Management in Small Water Supplies Using Performance Indicators*, „Environmental Science and Pollution Research”, vol. 28, nr 30, <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13575-5>.

Kwietniewski M. (2013), *Zastosowanie wskaźników strat wody do oceny efektywności jej dystrybucji w systemach wodociągowych*, „Ochrona Środowiska”, vol. 35, nr 4.

Lambert A., Charalambous B., Fantozzi M., Kovac J., Rizzo A., Galea St John S. (2014), *14 Years' Experience of Using IWA Best Practice Water Balance and Water Loss Performance Indicators in Europe*, IWA Publishing, London.

Lenzi C., Bragalli C., Bolognesi A., Fortini M. (2014), *Infrastructure Leakage Index Assessment in Large Water Systems*, „Procedia Engineering”, vol. 70, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.113>.

M-06 (2021), Sprawozdanie o wodociągach, kanalizacji i wywozie nieczystości ciekłych gromadzonych w zbiornikach bezodpływowych, <http://form.stat.gov.pl/formularze/2018/passive/M-06.pdf> (data dostępu: 13.07.2021).

Moslehi I., Jalili-Ghazizadeh M., Yousefi-Khoshqalb E. (2021), *Developing a Framework for Leakage Target Setting in Water Distribution Networks from an Economic Perspective*, „Structure and Infrastructure Engineering”, vol. 17(6), <https://doi.org/10.1080/15732479.2020.1777568>.

Munoz-Trochez C., Smout I.K., Kayaga S. (2011), *Economic Level of Leakage (ELL) Calculation with Limited Data: An Application in Zaragoza* (w:) *The Future of Water, Sanitation and Hygiene in Low-income Countries – Innovation, Adaptation and Engagement in a Changing World: Proceedings of the 35th WEDC International Conference, Loughborough, UK, 6–8 July 2011*, red. R.J. Shaw, WEDC, Loughborough University, <https://hdl.handle.net/2134/30105> (data dostępu: 13.07.2021).

Musz-Pomorska A., Iwanek M., Suchorab P., Brodaczevska A. (2016), *Analiza strat wody na przykładzie wybranego wodociągu grupowego*, „Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury”, t. 33, z. 63, nr 2, <https://doi.org/10.7862/rb.2016.120>.

Ociepa E., Kędzia W. (2015), *Analiza strat wody w wybranych wodociągach województwa śląskiego*, „Inżynieria i Ochrona Środowiska”, t. 18, nr 3.

Piechurski F. (2014), *Działania zmierzające do ograniczania strat wody w systemach jej dystrybucji*, „Napędy i Sterowanie”, r. 16, nr 1.

Rak J., Misztal A. (2017), *Analiza strat wody w wodociągu miasta Jarosław*, „Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury”, t. 34, z. 64, nr 4, <https://doi.org/10.7862/rb.2017.198>.

Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2020/852 z dnia 18 czerwca 2020 r. w sprawie ustanowienia ram ułatwiających zrównoważone inwestycje, zmieniające rozporządzenie (UE) 2019/2088 (Dz. Urz. UE z 22.06.2020 r., L 198/13).

Seago C.J., Mckenzie R.S., Liemberger R. (2005), *International Benchmarking of Leakage from Water Reticulation Systems*, https://www.miya-water.com/fotos/artigos/06_international_benchmarking_of_leakage_from_water_reticulation_systems_1017893235a-325e2b03b5c.pdf (data dostępu: 13.07.2021).

Słownik pojęć GUS (2021), <https://stat.gov.pl/metainformacje/slownik-pojec/pojecia-stosowane-w-statystyce-publicznej/496.pojecie.html> (data dostępu: 13.07.2021).

Studziński A., Pietrucha-Urbaniak K., Mędrala A. (2014), *Analiza strat wody oraz awaryjności w wybranych systemach zaopatrzenia w wodę*, „Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury”, t. 31, z. 61, nr 4, <http://doi.prz.edu.pl/pl/pdf/biis/163>.

Vrachimis S.G., Eliades D.G., Polycarpou M.M. (2018), *Leak Detection in Water Distribution Systems Using Hydraulic Interval State Estimation*, IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA), <https://doi.org/10.1109/CCTA.2018.8511516>.

Vrachimis S.G., Kyriakou M.S., Eliades D.G., Polycarpou M.M. (2018), *A Benchmark Dataset for Leakage Diagnosis in Water Distribution Networks*, „International WDSA/CCWI 2018 Joint Conference”, vol. 1.

Yu J., Zhang L., Chen J., Xiao Y., Hou D., Huang P., Zhang G., Zhang H. (2021), *An Integrated Bottom-Up Approach for Leak Detection in Water Distribution Networks Based on Assessing Parameters of Water Balance Model*, „Water”, vol. 13(6), <https://doi.org/10.3390/w13060867>.