



**POLSKIE ZRZESZENIE
INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW
SANITARNYCH**

CZASOPISMO WYDAWANE OD 1921 ROKU

Gaz Woda i Technika Sanitarna

Gas Water & Sanitary Engineering

9

2026

POLSKI KONGRES NAFTOWY I GAZOWNICZY

POWERING THE FUTURE



📅 21-22 października 2026 r.

📍 Muzeum Historii Polski w Warszawie

Wielobiegunowy świat, zakłócenia w łańcuchach dostaw, trwająca reindustrializacja i nasilające się wyzwania geopolityczne redefiniują podejście do źródeł energii i surowców wykorzystywanych w przemyśle. Potrzeba stabilności i bezpieczeństwa staje się impulsem do działania na rzecz efektywności i odporności – a branża naftowo-gazownicza znajduje się w samym centrum tych zmian.

Polski Kongres Naftowy i Gazowniczy skupi się na kluczowych trendach kształtujących współczesną gospodarkę, roli branży Oil and Gas w budowaniu bezpiecznych warunków dla rozwoju naszego kraju i regionu.

- **Presja geopolityczna** – zakłócenia w łańcuchach wartości i na rynkach energii
- **Transformacja i stabilność** – zmieniająca się rola i przyszłość branży naftowo-gazowniczej
- **Strategiczne zarządzanie zasobami** – znaczenie przystępnych cenowo i dostępnych węglowodorów dla nowoczesnego przemysłu i produkcji energii
- **Nowe technologie** – AI, uczenie maszynowe, zaawansowane rozwiązania wspierające biznes
- **Branża paliwowa jako motor napędowy** wzrostu dla biznesu zorientowanego na klienta
- **Konkurencyjność i dywersyfikacja:** jak wzmacniać bezpieczeństwo energetyczne

Dwudniowe wydarzenie zgromadzi liderów biznesu, decydentów, środowisko akademickie i analityków z sektora naftowego i gazowego. Uzupełnieniem będzie Young Professionals Forum – platforma dla innowacji i kierunków rozwoju branży naftowo-gazowniczej.

**Dołącz do Polskiego Kongresu
Naftowego i Gazowniczego!**



www.polishoilandgas.com

KOLEGIUM REDAKCYJNE / Editorial Board

REDAKTOR NACZELNY / Editor in Chief

prof. dr hab. inż. Andrzej J. Osiańczak

ZASTĘPCA REDAKTORA NACZELNEGO / Deputy Editor in Chief

dr inż. Piotr Jadwiszczak

REDAKTORZY / Editors

dr hab. inż. Zbysław Dymaczewski – Politechnika Poznańska

dr hab. inż. Wojciech Kostowski – Politechnika Śląska

prof. dr hab. inż. Beata Kowalska – Politechnika Lubelska

dr hab. inż. Małgorzata Kwestarz – Politechnika Warszawska

dr inż. Piotr Manczarski – Politechnika Warszawska

dr hab. inż. Jerzy Mikosz – Politechnika Krakowska

dr Grzegorz Rosłonek – ORLEN S.A.

dr inż. Katarzyna Umiejewska – Politechnika Warszawska

RADA PROGRAMOWO-NAUKOWA / Scientific and Program Council

prof. dr hab. inż. Stanisław Nagy – Przewodniczący Rady – Akademia Górniczo-Hutnicza

prof. Antonio Albuquerque – University of Beira Interior, Portugalia

prof. dr hab. inż. Andrzej Białowiec – Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

prof. dr hab. inż. Waldemar Kamrat – Politechnika Gdańska

dr hab. inż. Dariusz Kowalski – Politechnika Lubelska

dr Ricardo Bolado Lavin – European Commission, Joint Research Centre, Petten

Myroslav Malovanyy, Ph.D., D.Sc., professor – Lviv National Polytechnic University

dr Kiran Tota-Maharaj – Aston University

mgr inż. Marcin Nocoń – Bio-Energo-Gaz

prof. dr hab. inż. Marcin Zieliński – Uniwersytet Warmińsko-Mazurski

ADRES REDAKCJI / Editorial address

ul. Czackiego 3/5 pokój 217, 00-043 Warszawa

e-mail: redakcja@gwits.pl

WYDAWNICTWO / Publisher

POLSKIEGO ZRZESZENIA INŻYNIERÓW

I TECHNIKÓW SANITARNYCH

ul. Czackiego 3/5 pokój 217, 00-043 Warszawa, tel: 22 826 28 94

e-mail: wydawnictwo@pzits.pl, www.pzits.pl

Szczegóły prenumeraty: www.pzits.pl/prenumerata

DRUK / Printing

Zakład Poligrafii i Kolportażu Wydawnictwo SIGMA-NOT Sp. z o.o.

ul. Ks. J. Popiełuszki 19/21, 01-595 Warszawa

Miejsce i data wydania: Warszawa 09/2026

Nakład: 230 egzemplarzy

INFORMACJE / Journal info

Wersja pierwotna: elektroniczna

Czasopismo GWITS znajduje się w wykazie czasopism naukowych Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Czasopismo GWITS znajduje się w bazach czasopism technicznych: BazTech, Index Copernicus ICV 2024 = 82.36.

Artykuły publikowane w GWITS otrzymują numer DOI (Digital Object Identifier). Są rejestrowane w bazie danych CrossRef. Są publikowane online w otwartym dostępie (Open Access).

Artykuły w otwartym dostępie na licencji Creative Commons CC BY 4.0. Licencjobiorcą jest PZITS.

PRZESYŁANIE ARTYKUŁÓW / Submission

Przesyłanie artykułów i wytyczne dla autorów / Article submission and author guidelines www.gwits.pl

SPIS TREŚCI / Contents

Jakub Gawriuczenko, Andrzej Osiańczak

Analiza techniczno-ekonomiczna wytwarzania niebieskiego wodoru w procesie reformingu parowego

Techno-economic analysis of blue hydrogen production via steam methane reforming. 2

Ewa Wiśniowska, Małgorzata Kryłów

Kofeina i sukraloza jako markery skażenia wód powierzchniowych ściekami komunalnymi

Caffeine and sucralose as indicators of municipal wastewater contamination in surface waters. 11

Daniel Jakubowski, Jarosław Chudzik

Transport podciśnieniowy ścieków w budynkach – potencjał do wykorzystania w nowoczesnych instalacjach wewnętrznych

Vacuum sewage transport in buildings – potential use in modern internal installations. 18

Agnieszka Kuskowska, Aleksandra Goczyńska, Kacper Bareja, Jakub Kitta, Waldemar Kamrat

The role of pumped-storage hydropower plants as large-scale electrical energy storage in the power system

Rola elektrowni szczytowo-pompowych jako wielkoskalowych magazynów energii elektrycznej w systemie elektroenergetycznym. 25

Łukasz Michalik, Jarosław Bajer

Analiza strat wody w sieci wodociągowej gminy Proszowice według wytycznych AWWA

Water loss analysis in the water supply network of the Proszowice Municipality according to AWWA guidelines. 30

Witold Paleczek

Rekonstrukcja fraktalna SFS-C w metodach LiDAR i SLAM przy nowoczesnym obrazowaniu infrastruktury wodociągowo-kanalizacyjnej z zastosowaniem AFI ASCII (DSL)

Fractal SFS-C reconstruction in LiDAR and SLAM methods for advanced imaging of water and sewage infrastructure using AFI ASCII (DSL). 38

PZITS W DZIAŁANIU

Wydarzenia 47

Certyfikacja serwisantów MOŚ – nowy standard jakości i ochrony środowiska 49

Wszystkie opublikowane artykuły dostępne są w otwartym dostępie (Open Access) na stronie:

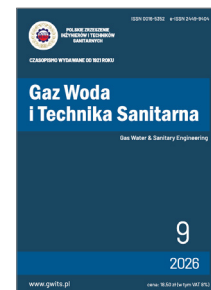
All published manuscripts are available online in Open Access:

www.gwits.pl

 facebook.com/GazWoda

 linkedin.com/company/gazwoda/





Analiza techniczno-ekonomiczna wytwarzania niebieskiego wodoru w procesie reformingu parowego

Techno-economic analysis of blue hydrogen production via steam methane reforming

Jakub Gawriuczenko^{1*}, Andrzej J. Osiadacz² 

¹ DCX POLSKA Sp. z o.o.

² Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Warszawska

*Kontakt / Correspondence: jgawriuczenkow@gmail.com

Streszczenie:

Artykuł przedstawia analizę techniczno-ekonomiczną wytwarzania wodoru niebieskiego metodami reformingu parowego metanu (SMR) i reformingu autotermicznego (ATR), zintegrowanymi wychwytywaniem dwutlenku węgla (CCS). Integracja CCS z ATR okazała się ekonomicznie korzystniejsza. Analiza wrażliwości metodą Morrisa oraz symulacje Monte Carlo wskazują koszt magazynowania wodoru jako dominujący czynnik ryzyka, odpowiadający za ponad 55% wariacji LCOH. Wodór niebieski jawi się więc jako technologicznie dojrzała i ekonomicznie uzasadniona ścieżka dekarbonizacji przemysłu w perspektywie 2035–2050, do czasu osiągnięcia parytetu kosztowego przez wodór zielony.

Słowa kluczowe: wodór niebieski, wodór zielony, H₂, SMR, ATR, CCS, LCOH, DCFA

Abstract:

This article presents a techno-economic analysis of blue hydrogen production using steam methane reforming (SMR) and autothermal reforming (ATR), both integrated with carbon capture and storage (CCS). Integrating CCS with ATR proved to be more economically advantageous. Sensitivity analysis using the Morris method and Monte Carlo simulations identify hydrogen storage cost as the dominant risk factor, accounting for over 55% of LCOH variance. Blue hydrogen thus emerges as a technologically mature and economically justified pathway for industrial decarbonization over the 2035–2050 horizon, until green hydrogen achieves cost parity.

Keywords: blue hydrogen, green hydrogen, H₂, SMR, ATR, CCS, LCOH, DCFA

1. Wstęp

Transformacja energetyczna wymusza odejście od paliw kopalnych na rzecz nośników energii o niższym śladzie węglowym. Wodór jest jednym z nielicznych kandydatów zdolnych zastąpić gaz ziemny i węgiel zarówno w przemyśle ciężkim, jak i w sektorach trudnych do elektryfikacji [1]. Rosnące zapotrzebowanie na energię, napędzane urbanizacją i wzrostem populacji, zbiega się z presją regulacyjną na redukcję emisji CO₂. W efekcie to nie sam fakt stosowania wodoru, lecz wybór konkretnej ścieżki jego produkcji staje się kluczowym problemem decyzyjnym dla sektora energetycznego [1].

W praktyce przemysłowej funkcjonuje kilka ścieżek wytwarzania wodoru, umownie rozróżnianych kolorystycznie według źródła surowca i emisyjności procesu. Wodór szary, produkowany w reformingu parowym metanu (SMR – steam methane reforming) bez wychwytu CO₂, pozostaje dominującą technologią ze

względem na niski koszt jednostkowy, jego ślad węglowy wyklucza go jednak z długoterminowych scenariuszy dekarbonizacji [2]. Wodór zielony, wytwarzany w elektrolizie zasilanej energią odnawialną, oferuje zerową emisyjność procesową, lecz jego koszt produkcji pozostaje istotnie wyższy niż konwencjonalnych metod opartych na gazie ziemnym. Ogranicza to jego konkurencyjność w obecnych warunkach rynkowych [10]. Pomiedzy tymi dwoma skrajnościami sytuuje się wodór niebieski, produkowany metodami reformingu (SMR lub ATR – autothermal reforming) zintegrowanymi z technologią CCS (*carbon capture and storage* – wychwytywanie i składowanie dwutlenku węgla), która pozwala ograniczyć emisje procesowe przy zachowaniu względnie niskiego kosztu jednostkowego [3].

Wodór niebieski jest często wskazywany jako technologia postępująca: rozwiązanie umożliwiające skalowanie infrastruktury wodorowej i redukcję emisji w perspektywie średnioterminowej, zanim koszty wodoru zielonego osiągną parytet z technologiami

opartymi na gazie ziemnym [12]. Ocena tej tezy wymaga rzetelnej analizy techniczno-ekonomicznej, uwzględniającej nie tylko koszty kapitałowe i operacyjne poszczególnych wariantów, lecz także wpływ czynników regulacyjnych, w szczególności ceny uprawnień do emisji w systemie EU ETS, która bezpośrednio przekłada się na opłacalność inwestycji w CCS [6].

W literaturze przedmiotu dostępne są analizy LCOH (*levelized cost of hydrogen* – uśredniony koszt produkcji wodoru) dla pojedynczych technologii lub porównania ograniczone do dwóch-trzech wariantów [3–5]. Brakuje natomiast spójnego zestawienia obejmującego jednocześnie różne poziomy skuteczności wychwytu CO₂ w ramach SMR i ATR oraz odniesienia do elektrolizy alkalicznej, przeprowadzonego w jednolitych warunkach ekonomicznych właściwych dla rynku europejskiego. Niniejszy artykuł wypełnia tę lukę: przedstawia analizę sześciu wariantów technologicznych (SMR, ATR, SMR z CCS o skuteczności wychwytu 52% i 85%, ATR z CCS o skuteczności 91% oraz elektrolizę alkaliczną jako punkt odniesienia dla wodoru zielonego) dla instalacji modelowej o wydajności 607 t H₂/dobę, przy przyjęciu 2026 roku jako roku bazowego.

Celem artykułu jest wyznaczenie uśrednionego kosztu produkcji wodoru (LCOH) dla poszczególnych wariantów metodą DCFA (discounted cash flow analysis – analiza zdyskontowanych przepływów pieniężnych), identyfikacja progu opłacalności ekonomicznej technologii CCS względem ceny uprawnień emisyjnych oraz określenie głównych czynników ryzyka kosztowego za pomocą analizy wrażliwości metodą Morrisa i symulacji Monte Carlo. Wyniki mają dostarczyć podstaw do oceny, czy i w jakim horyzoncie czasowym wódór niebieski stanowi ekonomicznie uzasadnioną ścieżkę dekarbonizacji przemysłu w warunkach europejskich.

1.1. Opis instalacji modelowej

Do przeprowadzenia analizy przyjęto instalację modelową o wydajności 607 t H₂/dobę, pracującą przy 90% wykorzystaniu zdolności produkcyjnych. Odpowiada to skali przemysłowej reprezentatywnej dla dużych odbiorców: rafinerii, zakładów chemicznych, przemysłu stalowego [3, 4]. Instalację zamodelowano w sześciu wariantach technologicznych, różniących się metodą reformingu (SMR lub ATR), obecnością i skutecznością wychwytu CO₂ (CCS) lub, w przypadku wariantu referencyjnego, technologią elektrolizy alkalicznej.

Instalacje oparte na reformingu wykorzystują gaz ziemny jako surowiec i paliwo procesowe, przy stosunku pary do węgla (S/C) wynoszącym odpowiednio 5,0 dla SMR i 1,7 dla ATR. Niższa wartość dla ATR wynika z wewnętrznego dostarczania ciepła przez egzotermiczną reakcję częściowego utleniania, co eliminuje konieczność zewnętrznego ogrzewania pieca [3]. Reakcje reformingu zachodzą w temperaturze 700–1000°C dla SMR i 950–1100°C dla ATR, przy ciśnieniu procesowym 15–80 bar w zależności od wariantu. Instalacja ATR wymaga dodatkowo jednostki wydzielania powietrza (ASU) do produkcji tlenu procesowego, element nieobecny w SMR [3].

Wariant referencyjny (ALK) opiera się na elektrolizie wody zasilanej energią elektryczną, prowadzonej w znacznie łagodniejszych warunkach procesowych (temperatura 60–80°C, ciśnienie 1–30 bar), co upraszcza wymagania materiałowe. Wiąże się to jednak z wielokrotnie wyższym zapotrzebowaniem na energię elektryczną: 50–55 kWh/kg H₂, w porównaniu do technologii gazowych [5, 11].

Parametry techniczne wszystkich analizowanych wariantów zestawiono w Tabeli 1.

Tabela 1. Zbiórce parametry techniczne instalacji modelowej (607 t H₂/dobę), opracowanie własne na podstawie [3, 5, 11]

Table 1. Summary of technical parameters for the model plant (607 tonnes of H₂ per day), own study based on [3, 5, 11]

Parametr	SMR-CCS 52%	SMR-CCS 85%	ATR-CCS 91%	ALK
Surowiec	Gaz ziemny	Gaz ziemny	Gaz ziemny + O ₂	Woda demin.
Temperatura procesu, °C	700–1000	700–1000	950–1100	60–80
Ciśnienie procesu, bar	15–40	15–40	25–80	1–30
Sprawność LHV, %	74–85	74–85	73–80	62–82
TRL	8–9	8–9	8–9	9
Stopień wychwytu CO ₂ , %	52	85	91	–
Emisje GHG, kg CO ₂ eq/kg H ₂	8,20	6,66	3,91	0,52–1,56*
Zużycie energii elektrycznej, kWh/kg H ₂	0,56	4,42	5,32	50–55
Wymagana jednostka ASU	Nie	Nie	Tak	Nie
Czystość produktu H ₂ , %	99,9+	99,9+	99,9+	99,9–99,999

* w zależności od struktury źródła zasilania energią elektryczną [5, 11]

Warianty bazowe bez CCS (SMR, ATR) mają analogiczne parametry procesowe: temperaturę, ciśnienie, sprawność. Różnią się przede wszystkim brakiem instalacji wychwytu CO₂ oraz niższym zapotrzebowaniem na energię elektryczną (0,6–1,0 kWh/kg H₂ dla SMR) [3]. W analizie służą jako punkt odniesienia do oceny wpływu integracji CCS na profil techniczny i ekonomiczny instalacji.

1.2. Warianty technologiczne objęte analizą

Analizą objęto sześć wariantów technologicznych, reprezentujących pełne spektrum dostępnych obecnie ścieżek produkcji wodoru niskoemisyjnego: od technologii referencyjnych bez wychwytu CO₂, przez trzy stopnie integracji CCS o rosnącej skuteczności, po elektrolizę alkaliczną jako wariant zeroemisyjny [3, 5]. Taki dobór pozwala ocenić nie tylko bezwzględną konkurencyjność kosztową poszczególnych technologii, lecz także krańcowy koszt redukcji emisji przy przechodzeniu między kolejnymi poziomami wychwytu CO₂.

Tabela 2. Warianty technologiczne objęte analizą, opracowanie własne
Table 2. Technological options covered by the analysis, own study

Wariant	Technologia bazowa	Wychwyt CO ₂	Rola w analizie
SMR	Reforming parowy metanu	Brak	Punkt odniesienia – wodór szary
ATR	Reforming autotermiczny	Brak	Punkt odniesienia – wodór szary
SMR-C- CS 52%	Reforming parowy metanu	52%	Niski stopień integracji CCS
SMR-C- CS 85%	Reforming parowy metanu	85%	Wysoki stopień integracji CCS
ATR-C- CS 91%	Reforming autotermiczny	91%	Najwyższy stopień integracji CCS
ALK	Elektroliza alkaliczna	Nie dotyczy (zeroemisyjny)	Wariant referencyjny – wodór zielony

Warianty SMR i ATR bez CCS pełnią funkcję punktów odniesienia przy ocenie wpływu wychwytu CO₂ na koszty inwestycyjne i operacyjne. Pozwalają wyodrębnić tzw. koszt unikniętej emisji, kluczowy parametr oceny opłacalności CCS w kontekście EU ETS [6]. Wariant ALK, zasilany energią z odnawialnych źródeł, reprezentuje alternatywną ścieżkę dekarbonizacji, niezależną od infrastruktury gazowej i pozbawioną emisji procesowych. Stanowi punkt odniesienia dla oceny konkurencyjności wodoru niebieskiego względem zielonego w horyzoncie średnioterminowym [5, 10].

1.3. Metoda DCFA i wzór LCOH

Ocenę ekonomiczną poszczególnych wariantów przeprowadzono metodą zdyskontowanych przepływów pieniężnych DCFA (*discounted cash flow analysis*), standardowym podejściem w analizach techniczno-ekonomicznych instalacji wodorowych [3, 7, 8, 9]. Metoda pozwala wyznaczyć uśredniony koszt produkcji wodoru LCOH (*levelized cost of hydrogen*): stały koszt jednostkowy, przy którym zdyskontowane wpływy ze sprzedaży wodoru równoważą zdyskontowane nakłady inwestycyjne i koszty operacyjne w całym okresie eksploatacji instalacji.

$$LCOH = \frac{C_{cap} \cdot CRF + C_{op}}{m_{H_2}}$$

(1)

gdzie:
C_{cap} – całkowite nakłady inwestycyjne (CAPEX)
C_{op} – roczne koszty operacyjne (OPEX)
m_{H₂} – roczna produkcja wodoru
CRF – współczynnik odzysku kapitału (*capital recovery factor*):

$$CRF = \frac{IRR \cdot (1 + IRR)^n}{(1 + IRR)^n - 1}$$

(2)

Model generuje wyniki pre-podatkowe. Nie uwzględnia podatku dochodowego, tarczy podatkowej z odpisów amortyzacyjnych ani struktury finansowania kapitałem dłużnym – jest to standardowe uproszczenie na etapie porównań technologicznych [3, 7]. CAPEX wyznaczono metodą kaskadową czynników instalacyjnych, przyjmując jako punkt wyjścia koszt zakupu urządzeń procesowych (TPEC – *total purchased equipment cost*) na podstawie danych Oni i in. [3], skorygowany o wskaźnik inflacji dla lat 2020–2026 i przeliczony z CAD na USD. Kluczowe założenia ekonomiczne przyjęte do modelu zestawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Założenia ekonomiczne modelu DCFA, opracowanie własne na podstawie [3, 7, 15]

Table 3. Economic assumptions of the DCFA model, own study based on [3, 7, 15]

Parametr	Wartość	Jedn.
Rok bazowy i waluta	2026	USD
Wydajność instalacji	221 555 000	kg H ₂ /rok
Stopień wykorzystania zdolności produkcyjnych	90	%
Okres funkcjonowania inwestycji (n)	25	lat
Okres spłaty inwestycji	3	lata
IRR – technologie gazowe (SMR, ATR, CCS)	10	%
IRR – elektroliza alkaliczna (ALK)	15	%
CRF (IRR = 10%, n = 25 lat)	0,1102	–
CRF (IRR = 15%, n = 25 lat)	0,1547	–
Kurs walutowy	0,75	CAD/USD
Wskaźnik inflacji (2020–2026)	1,2248	–
Cena gazu ziemnego	9,70	USD/GJ
Cena energii elektrycznej	0,07	USD/kWh
Cena wody demineralizowanej	1,10	USD/ jednostkę

Wyższy IRR przyjęty dla ALK (15% wobec 10% dla technologii gazowych) odzwierciedla wyższe postrzegane ryzyko inwestycyjne projektów opartych na odnawialnych źródłach energii względem dojrzałych technologii reformingu [3].

1.4. Analiza wrażliwości: metoda Morrisa i symulacje Monte Carlo

Punktowe oszacowania LCOH opierają się na deterministycznych wartościach parametrów wejściowych, które w rzeczywistości podlegają wahaniom rynkowym. Do identyfikacji parametrów o dominującym wpływie na wynik oraz oceny stabilności wniosków ekonomicznych zastosowano dwuetapową procedurę analizy niepewności: metodę przesiewową Morrisa oraz symulację Monte Carlo [3, 13].

Metoda Morrisa (*Morris screening method*) służy do identyfikacji parametrów wejściowych o największym wpływie na zmienność wyniku modelu, bez konieczności pełnego, kosztownego obliczeniowo próbkowania przestrzeni parametrów. Polega na wielokrotnym obliczaniu tzw. efektów elementarnych, czyli zmian wyniku modelu wywołanych pojedynczą, niewielką zmianą jednego parametru wejściowego, powtarzanych w wielu losowo wybranych punktach przestrzeni próbkowania. Dla każdego parametru wyznacza się dwie miary: średnią wartość bezwzględną efektów elementarnych (μ^*), wskazującą siłę wpływu parametru na wynik, oraz odchylenie standardowe tych efektów (σ), wskazujące na nieliniowość lub interakcje z innymi parametrami [3]. Zestawienie obu miar na wykresie Morrisa pozwala rozróżnić parametry o wpływie pomijalnym, liniowym i istotnym lub interakcyjnym.

Analizą objęto dziesięć parametrów wejściowych: IRR (*internal rate of return* – wewnętrzna stopa zwrotu), okres magazynowania wodoru, koszty jednostek kapitałochłonnych,

koszty wychwytu i sekwestracji CO₂, ceny nośników energii oraz stopień wykorzystania instalacji. Dla każdego przyjęto zakres zmienności ±30% względem wartości bazowej lub zakres rynkowy właściwy dla danego parametru [3].

Symulację Monte Carlo wykorzystano w ilościowym oszacowaniu wkładu poszczególnych parametrów w całkowitą wariancję wynikową LCOH, z zastosowaniem indeksów Sobola. W przeciwieństwie do metody Morrisa, która jedynie rankinguje parametry pod względem istotności, symulacja Monte Carlo pozwala oszacować procentowy udział każdego parametru w wariancji wyniku końcowego. Odbywa się to przez wielokrotne losowe próbkowanie wartości wszystkich parametrów z zadanych rozkładów i obliczenie rozkładu wynikowego LCOH [3, 13]. Do porównania technologii między sobą zastosowano dodatkowo modelowanie różnic przy wspólnych rozkładach parametrów zależnych. Każda para wariantów korzysta z tych samych próbkowanych wartości, co eliminuje sztuczną wariancję wynikającą z niezależnego próbkowania [3, 13].

Model traktuje parametry wejściowe jako niezależne zmienne losowe, pomijając rzeczywiste korelacje między nimi, np. współwystępowanie wzrostu cen gazu ziemnego, energii elektrycznej i uprawnień CO₂. Ograniczenie to dyskutowane jest szerzej w rozdziale 4 [13].

2. Wyniki

2.1. CAPEX i OPEX poszczególnych wariantów

Zestawienie kosztów inwestycyjnych i operacyjnych dla sześciu analizowanych wariantów, przy wydajności instalacji 607 t H₂/dobę, przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Struktura kosztów CAPEX i OPEX dla analizowanych wariantów technologicznych, opracowanie własne na podstawie [3, 7, 15]
Table 4. CAPEX and OPEX cost structure for the technological options analysed, own study based on [3, 7, 15]

Parametr	SMR	ATR	SMR- -CCS 52%	SMR- -CCS 85%	ATR- -CCS 91%	ALK
Koszty kapitałowe – CAPEX, mln USD	943,10	1338,71	1331,36	1653,48	1884,97	1500,00
Coroczne koszty kapitałowe, mln USD	103,90	147,48	146,67	182,16	207,66	165,25
Koszty operacyjne – OPEX, mln USD/rok	589,62	612,29	639,87	697,77	508,06	951,07
LCOH, USD/kg H ₂	3,48	3,81	3,94	4,41	3,59	5,93

Najniższy koszt kapitałowy ma instalacja SMR bez wychwytu CO₂ (943,10 mln USD). Integracja modułu CCS podnosi CAPEX istotnie: dla SMR-CCS 52% wzrost wynosi ok. 41%, dla SMR-CCS 85% ok. 75% względem wariantu bazowego. Najwyższy koszt kapitałowy spośród wszystkich wariantów odnotowano dla ATR-CCS 91% (1884,97 mln USD). Wynika to z konieczności bu-

dowy jednostki separacji powietrza (ASU) oraz zaawansowanej infrastruktury wychwytu o wysokiej skuteczności [3, 4].

Struktura kosztów operacyjnych wykazuje odmienny rozkład niż CAPEX. Mimo najwyższych nakładów inwestycyjnych wariant ATR-CCS 91% osiąga najniższy OPEX spośród technologii gazowych (508,06 mln USD/rok). Wyższe wydatki kapitałowe znajdują więc uzasadnienie w niższych kosztach bieżącej eksploatacji, przede wszystkim dzięki ograniczonym opłatom emisyjnym przy wysokim stopniu wychwytu CO₂ [4, 6]. Odwrotną zależność obserwuje się dla SMR-CCS 85%: wysoki OPEX (697,77 mln USD/rok) to skutek największego wśród technologii gazowych zużycia energii elektrycznej, potrzebnej do zasilania dwóch modułów wychwytu wymaganych przy 85% skuteczności [3].

Elektroliza alkaliczna wyróżnia się zdecydowanie najwyższym OPEX (951,07 mln USD/rok) co jest spowodowane wysokim zużyciem energii elektrycznej (50–55 kWh/kg H₂). Odpowiada za ponad 95% całkowitego budżetu operacyjnego tej technologii [11]. CAPEX pozostaje przy tym umiarkowany (1500,00 mln USD, niższy niż dla ATR-CCS 91%), ale dominujący udział kosztów energii elektrycznej w OPEX przekłada się na najwyższy LCOH spośród wszystkich analizowanych wariantów.

ATR-CCS 91% wypada więc jako wariant optymalny spośród technologii niskoemisyjnych: 3,59 USD/kg H₂, drożej tylko od wariantu bazowego SMR bez CCS (3,48 USD/kg H₂), przy jednoczesnym zapewnieniu 91% redukcji emisji procesowych. Wpływ opłat emisyjnych EU ETS na tę relację omawia podrozdział 3.3.

2.2. LCOH: porównanie wariantów i pozycja ATR-CCS 91%

Zestawienie wartości LCOH dla sześciu analizowanych wariantów, uporządkowane rosnąco, przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Ranking wariantów technologicznych według LCOH, opracowanie własne
Table 5. Ranking of technological options by LCOH, own study

Poz.	Wariant	LCOH, USD/kg H ₂	Redukcja emisji CO ₂ względem wariantu bazowego
1	SMR	3,48	– (wariant bazowy, brak CCS)
2	ATR-CCS 91%	3,59	91%
3	ATR	3,81	– (wariant bazowy, brak CCS)
4	SMR-CCS 52%	3,94	52%
5	SMR-CCS 85%	4,41	85%
6	ALK	5,93	100% (przy zasilaniu OZE)

Z rankingu wynika obserwacja kluczowa dla oceny opłacalności wodoru niebieskiego: wariant ATR-CCS 91% osiąga LCOH niższy niż nieobjęty wychwytem wariant ATR bazowy (3,59 wobec 3,81 USD/kg H₂), mimo znacząco wyższych nakładów inwestycyjnych opisanych w podrozdziale 3.1. Integracja CCS z ATR obniża koszt produkcji wodoru o ok. 0,22 USD/kg H₂, bo oszczędności z eliminacji opłat emisyjnych w EU ETS przewyższają dodatkowy koszt kapitałowy i operacyjny instalacji wychwytu [4, 6]. Ta zależność nie występuje dla SMR: integracja CCS-52% podnosi LCOH o ok. 0,46 USD/kg H₂ (wzrost o 13% względem

wariantu bazowego), a CCS-85% o ok. 0,93 USD/kg H₂. Opłacalność CCS jest więc silnie zależna od technologii bazowej, nie tylko od stopnia wychwytu [3].

Porównanie SMR-CCS 52% i SMR-CCS 85% pokazuje, że podniesienie skuteczności wychwytu z 52% do 85% wiąże się ze wzrostem LCOH o ok. 12%. Główną przyczyną jest znacznie wyższe zapotrzebowanie na energię elektryczną i parę technologiczną, niezbędną do regeneracji rozpuszczalnika aminowego w dwóch modułach CCS wymaganych do osiągnięcia wyższej skuteczności [3]. Krańcowy koszt dodatkowej redukcji emisji rośnie zatem wraz ze skutecznością: każdy kolejny punkt procentowy wychwytu w SMR jest droższy niż poprzedni.

Zestawienie SMR-CCS 85% z ATR-CCS 91% ujawnia różnicę LCOH rzędu 22,8% na korzyść ATR, mimo wyższego stopnia wychwytu CO₂ w tym drugim wariantcie. Wybór technologii bazowej reformingu ma więc większe znaczenie dla ostatecznego kosztu wodoru niebieskiego niż sam stopień integracji CCS. Dzięki wewnętrznemu odzyskowi ciepła z reakcji częściowego utleniania i niższemu zapotrzebowaniu na parę technologiczną ATR generuje korzystniejszy profil kosztowy nawet przy wyższych nakładach inwestycyjnych [3, 4].

Elektroliza alkaliczna pozostaje najdroższym z analizowanych wariantów, z LCOH wyższym o ok. 65% względem optymalnego ATR-CCS 91%. Warunki, w jakich ta relacja mogłaby się odwrócić, omówiono w podrozdziale 3.5.

2.3. Wpływ ceny uprawnień EU ETS na opłacalność CCS

Kluczowym czynnikiem determinującym ekonomiczną zasadność integracji CCS jest poziom opłat emisyjnych w europejskim systemie handlu uprawnieniami do emisji (EU ETS). Próg opłacalności, rozumiany jako cena CO₂, przy której wariant z CCS staje się tańszy niż odpowiadający mu wariant bez wychwytu, wykazuje istotne różnice między technologiami reformingu – przedstawia je tabela 6.

Tabela 6. Próg opłacalności CCS względem ceny uprawnień EU ETS, opracowanie własne na podstawie [3, 6]

Table 6. CCS break-even point relative to the price of EU ETS allowances, own study based on [3, 6]

Wariant	Próg opłacalności CCS, USD/t CO ₂	Relacja do cen EU ETS w 2026 r.
ATR-CCS 91%	60	Poziom już osiągnięty i przekroczony
SMR-CCS 52%	125	Powyżej obecnego poziomu rynkowego
SMR-CCS 85%	130	Powyżej obecnego poziomu rynkowego

Wariant ATR-CCS 91% osiąga przewagę kosztową nad wariantem bazowym już przy cenie uprawnień na poziomie 60 USD/tCO₂, zbliżonym do notowań rynkowych EU ETS w 2026 roku [6]. Przy obecnych warunkach regulacyjnych integracja CCS z ATR jest więc ekonomicznie uzasadniona bez dodatkowego wsparcia publicznego. Eliminacja opłat emisyjnych dzięki wychwyceniu 91% CO₂ daje oszczędność rzędu 146 mln USD/rok, która z nadwyżką kompensuje wzrost rocznych kosztów kapitałowych wynikający z wyższego CAPEX [3, 4].

Inaczej wygląda sytuacja dla SMR. Próg opłacalności wynosi 125 USD/t CO₂ dla wariantu CCS-52% i 130 USD/t CO₂ dla CCS-85%, a więc istotnie powyżej cen obserwowanych na rynku EU ETS w roku bazowym. Integracja CCS z SMR pozostaje w 2026 roku ekonomicznie nieuzasadniona bez dodatkowego wsparcia regulacyjnego lub finansowego, np. mechanizmów typu hydrogen contracts for difference [4]. Różnica progów opłacalności między ATR a SMR wynika bezpośrednio z niższego OPEX technologii ATR, opisanego w podrozdziale 3.1: im niższy koszt operacyjny bazowy, tym mniejsza cena CO₂ potrzebna, by oszczędności z eliminacji opłat emisyjnych zrównoważyły dodatkowy koszt kapitałowy CCS.

Wynik ten ma implikacje dla polityki wspierania dekarbonizacji przemysłu wodorowego. Technologia bazowa reformingu determinuje wrażliwość projektu na politykę klimatyczną w większym stopniu niż sam stopień wychwytu CO₂. Projekty oparte na ATR mogą osiągać opłacalność CCS przy znacznie niższych cenach uprawnień niż projekty oparte na SMR.

Analiza przyjmuje stałą cenę uprawnień EU ETS właściwą dla roku bazowego 2026, nie uwzględniając prognozowanej trajektorii wzrostu cen do poziomu 100–150 EUR/t do 2030 roku [14]. Przy takim wzroście próg opłacalności dla SMR-52% (125 USD/t) zostałby najprawdopodobniej przekroczony w ciągu kilku lat, co poprawiłoby pozycję konkurencyjną wszystkich wariantów CCS względem technologii bazowych [3, 14].

2.4. Wyniki analizy wrażliwości: dominacja kosztu magazynowania wodoru

Analiza metodą Morrisa, przeprowadzona dla trzech wariantów niebieskiego wodoru (SMR-CCS 52%, SMR-CCS 85%, ATR-CCS 91%), wykazała spójny wzorec: we wszystkich trzech technologiach magazynowanie wodoru oraz wewnętrzna stopa zwrotu (IRR) plasują się w strefie najwyższej wrażliwości modelu, wyraźnie odróżniając się od pozostałych parametrów. Ilościowe wyniki analizy niepewności metodą Monte Carlo, kwantyfikujące udział poszczególnych parametrów w całkowitej wariancji LCOH, przedstawiono w tabeli 7.

Tabela 7. Udział parametrów wejściowych w wariancji wynikowej LCOH, opracowanie własne na podstawie [3, 13]

Table 7. Contribution of input parameters to the variance in the LCOH output, own study based on [3, 13]

Parametr	SMR-CCS 52%	SMR-CCS 85%	ATR-CCS 91%
Magazynowanie wodoru	>55%	34,9%	>55%
IRR (CRF)	~37%	30,1%	~39%
Cena gazu ziemnego	semi-wrażliwy	26,3%	semi-wrażliwy
Pozostałe parametry	7,6%	8,7%	5,5%
Suma parametrów dominujących	~92,4%	~91,0%	~94,5%

Dla SMR-CCS 52% i ATR-CCS 91% magazynowanie wodoru oraz IRR wyjaśniają łącznie odpowiednio 92,4% i 94,5% całkowitej wariancji wynikowej modelu. Pozostałe osiem analizowanych parametrów (ceny mediów, koszty jednostek kapitałochłonnych, odległość transportu CO₂, koszty sekwestracji,

stopień wykorzystania instalacji), odpowiada łącznie za mniej niż 8% wariancji [3].

Wariant SMR-CCS 85% ma odmienny, bardziej rozłożony profil wrażliwości. Udział magazynowania wodoru spada do 34,9%, przy jednoczesnym wzroście znaczenia ceny gazu ziemnego do 26,3%. Powodem jest najwyższe w tej technologii zużycie gazu jako paliwa, niezbędnego do zasilania dwóch modułów CCS wy-maganych do osiągnięcia 85% skuteczności wychwytu [3].

Dominująca pozycja kosztu magazynowania wodoru ma źród-ło w strukturze CAPEX opisanej w podrozdziale 3.1: magazyn wodoru stanowi 24–48% całkowitych nakładów inwestycyjnych we wszystkich wariantach, niezależnie od technologii bazowej czy stopnia integracji CCS [3]. Decyduje o tym przede wszystkim wybór rozwiązania magazynowego. Naziemne zbiorniki ciśnieniowe kosztują 135–345 USD/kg pojemności, podczas gdy kawerny solne, wymagające jednak odpowiedniej geologii loka-lizacji, jedynie 2–13 USD/kg [3]. Dostępność tańszego rozwiąza-nia geologicznego mogłaby obniżyć LCOH o 0,3–0,6 USD/kg H₂ – to największa pojedyncza dźwignia redukcji kosztów spośród wszystkich zidentyfikowanych w analizie.

Wysoki udział IRR w strukturze wariancji (30–39% w zależno-ści od wariantu) ma też znaczenie praktyczne: rzeczywisty koszt kapitału zależy od profilu ryzyka postrzeganego przez inwesto-rów i instytucje finansujące, nie tylko od parametrów technicz-nych instalacji [3].

Model traktuje wszystkie parametry wejściowe jako niezależne zmienne losowe, pomijając rzeczywiste korelacje rynkowe, np. współwystępowanie wzrostu cen gazu ziemnego i energii elek-trycznej. Ograniczenie to omówiono szerzej w dyskusji, w roz-dziale 4 [13].

2.5. Porównanie z ALK: warunki konkurencyjności elektrolizy alkalicznej

Elektroliza alkaliczna, przyjęta jako punkt odniesienia dla wo-doru zielonego, osiąga LCOH na poziomie 5,93 USD/kg H₂, war-tość wyższą o ok. 65% względem optymalnego ATR-CCS 91% (3,59 USD/kg H₂) i o ok. 51% względem SMR-CCS 52%. To naj-wyższy koszt produkcji spośród wszystkich sześciu analizowa-nych wariantów (por. tabela 5, podrozdział 3.2).

Źródłem tej różnicy jest struktura kosztów operacyjnych ALK, w której energia elektryczna odpowiada za ponad 95% budżetu OPEX, przy zużyciu 50-55 kWh/kg H₂ [11]. Przy przyjętej w ana-lizie cenie energii elektrycznej 0,07 USD/kWh, OPEX instalacji ALK (951 mln USD/rok) jest o 87% wyższy niż dla ATR-CCS 91% (508 mln USD/rok), mimo że CAPEX obu technologii pozostaje zbliżony (1500 wobec 1885 mln USD). Potwierdza to analiza wrażliwości: cena energii elektrycznej odpowiada za ok. 60% wariancji LCOH w wariancie ALK i jest zdecydowanie dominują-cym czynnikiem ryzyka kosztowego tej technologii [5].

Punkt przecięcia (crossover) kosztowego z ATR-CCS 91%

Przyjmując LCOH wariantu ATR-CCS 91% jako punkt odniesie-nia i zakładając niezmiennosc pozostałych parametrów modelu, wyznaczono cenę energii elektrycznej, przy której obie technolo-gie osiągają równowagę kosztową:

$$LCOH_{ALK}(c_e) = LCOH_{ATR-CCS} = 3,59 \text{ USD/kg H}_2$$

Rozwiązanie tej zależności wskazuje próg konkurencyjności ALK na poziomie 37 USD/MWh (0,037 USD/kWh) – wartość ponad 45% niższą od ceny przyjętej w scenariuszu bazowym (70 USD/MWh). Wynik jest spójny z szacunkami IRENA [10], według których obniżenie kosztu energii elektrycznej poniżej 30–40 USD/MWh stanowi warunek konieczny konkurencyj-ności zielonego wodoru względem ścieżek opartych na pali-wach kopalnych.

Tabela 8. Warunki konkurencyjności ALK względem ATR-CCS 91%, opracowanie własne na podstawie [3, 10, 11]

Table 8. ALK's competitive position relative to ATR-CCS 91 per cent, own study based on [3, 10, 11]

Czynnik	Stan obecny (2026)	Warunek konkurencyjności ALK
Cena energii elektrycznej	70 USD/MWh	< 37 USD/MWh
Emisyjność energii elektrycznej	~0,70 kg CO ₂ /kWh (miks PL)	< 0,05 kg CO ₂ /kWh (OZE)
CAPEX elektrolizera	~1500 mln USD	< 900 mln USD (redukcja ~40%)
Cena gazu ziemnego	9,70 USD/GJ	> 18–20 USD/GJ

Cena energii elektrycznej poniżej progu 37 USD/MWh jest dziś osiągalna jedynie w regionach o wyjątkowo korzystnych warun-kach wiatrowych lub nasłonecznienia (pozostaje poza zasięgiem standardowych warunków sieciowych w Polsce i Europie Środ-kowej w perspektywie do 2030 roku) [10]. Prognozy wskazują jednak, że ceny energii z OZE mogą spaść do 15–25 USD/MWh do 2030–2035 roku, co zbliżałoby ALK do progu konkurencyjności niezależnie od dalszego rozwoju technologii elektrolizerów [10].

Konkurencyjność cenowa ALK nie jest przy tym równoznacz-na z przewagą emisyjną. Elektroliza zasilana z polskiego miksu energetycznego (emisyjność ok. 0,70 kg CO₂/kWh) generuje emisje rzędu 36,4 kg CO₂eq/kg H₂, niemal dziesięciokrotnie więcej niż ATR-CCS 91% (3,91 kg CO₂eq/kg H₂). Osiągnięcie za-równo konkurencyjności kosztowej, jak i emisyjnej wymaga więc jednoczesnego spełnienia dwóch warunków: obniżenia ceny energii elektrycznej poniżej 37 USD/MWh oraz zapewnienia jej pochodzenia z niskoemisyjnych źródeł wytwórczych.

3. Dyskusja

3.1. Zestawienie wyników z danymi literaturowymi

Ocena spójności uzyskanych wyników z dotychczasowym do-robkiem literaturowym jest niezbędnym elementem weryfikacji wiarygodności zastosowanego modelu DCFA. Bezpośrednie po-równanie wartości LCOH z literaturą wymaga jednak uwzględ-nienia różnic metodologicznych: roku bazowego, waluty, przyję-tej stopy IRR oraz zakresu kosztów ujętych w modelu, w szcze-gółności obecności lub braku kosztów magazynowania wodoru i pełnej infrastruktury CCS, które w wielu wcześniejszych opra-cowaniach były pomijane lub niedoszacowane [3].

Tabela 9. Porównanie LCOH niniejszej analizy z wynikami literaturowymi, opracowanie własne na podstawie [3]
Table 9. Comparison of the LCOH from this analysis with results reported in the literature, own study based on [3]

Technologia	Niniejsza analiza, USD/kg H ₂ , 2026	Oni i in. [3], (CAD/kg H ₂ , 2020)
SMR (bez CCS)	3,48	1,22
ATR (bez CCS)	3,81	1,23
SMR-CCS 52%	3,94	1,69
SMR-CCS 85%	4,41	2,36
ATR-CCS 91%	3,59	1,66
ALK	5,93	–

Praca Oni i in. [3] jest bezpośrednim punktem odniesienia metodologicznego dla niniejszej analizy: na jej podejściu opiera się zarówno struktura kaskadowego wyznaczania CAPEX, jak i uwzględnienie kosztów magazynowania wodoru w bilansie LCOH. Bezwzględne wartości LCOH uzyskane w niniejszej pracy są około 3-krotnie wyższe niż w cytowanym źródle. Złożyły się na to trzy czynniki: aktualizacja do cen roku 2026 (skumulowana inflacja rzędu 22% względem roku bazowego 2020 przyjętego przez Oni i in.), wyższa cena gazu ziemnego w niniejszym modelu (9,70 USD/GJ wobec 5 USD/GJ charakterystycznej dla rynku kanadyjskiego) oraz wyższa cena energii elektrycznej, odzwierciedlająca realia rynku europejskiego. Mimo tych różnic w wartościach bezwzględnych relacje między wariantami pozostają spójne: w obu analizach ATR-CCS osiąga najniższy LCOH spośród technologii z wychwytem CO₂, a SMR-CCS 85% pozostaje wariantem najdroższym. Potwierdza to trafność struktury modelu, niezależnie od zastosowanych cen bazowych [3].

Zgodność wyników potwierdza się także w wymiarze technicznym. Parametry procesowe reformingu przyjęte w analizie: zakresy temperatur (700–1000°C dla SMR, 950–1100°C dla ATR) oraz endotermiczny charakter reakcji konwersji metanu – pozostają zgodne z fundamentalną charakterystyką kinetyczną i termodynamiczną procesu SMR opisaną przez Rostrup-Nielsen i in. [17]. To niezależne potwierdzenie poprawności założeń technicznych leżących u podstaw modelu ekonomicznego.

W odniesieniu do wodoru zielonego, uzyskany próg konkurencyjności cenowej ALK (37 USD/MWh) jest zbliżony z szacunkami IRENA [10], według których obniżenie kosztu energii elektrycznej poniżej 30–40 USD/MWh jest warunkiem koniecznym osiągnięcia konkurencyjności zielonego wodoru względem ścieżek opartych na paliwach kopalnych. Zbieżność ta, uzyskana została niezależnie na podstawie odmiennych metodologii. Analiza IRENA ma charakter przekrojowy i obejmuje wiele projektów globalnych, podczas gdy niniejsza opiera się na modelu DCFA dla pojedynczej instalacji referencyjnej.

Malejąca krańcowa opłacalność CCS w technologii SMR znajduje potwierdzenie w pracy Collodio i in. [9], którzy wykazali wzrost LCOH o ok. 46% przy podniesieniu skuteczności wychwytu z ok. 55% do ok. 90%. W niniejszej analizie analogiczny wzrost (SMR-CCS 52% → SMR-CCS 85%) wynosi tylko ok. 12%. Różnica wynika z efektu skali, instalacja 607 t H₂/dobę jest ok. trzykrotnie większa od analizowanej przez Collodio i in., przy

współczynnika skali SF = 0,67–0,68 oraz z proporcjonalnie stałego udziału kosztu magazynowania wodoru w CAPEX (24–48%), który zmniejsza względny wpływ różnic w infrastrukturze CCS na końcowy LCOH [3, 7, 9].

Wyniki niniejszej analizy pozostają zatem jakościowo spójne z literaturą przedmiotu. Różnice w wartościach bezwzględnych LCOH wynikają z odmiennych założeń cenowych i walutowych właściwych dla różnych rynków i lat bazowych, natomiast kluczowe relacje ekonomiczne między technologiami, są potwierdzone niezależnie przez wcześniejsze opracowania [3, 7, 9, 10, 17].

3.2. Implikacje praktyczne: CCS jako technologia pomostowa w kontekście polityki UE i Polski

Wyniki analizy wpisują się bezpośrednio w obowiązujące ramy regulacyjne Unii Europejskiej, które przypisują niebieskiemu wodorowi rolę technologii przejściowej w dekarbonizacji przemysłu. Europejska Strategia Wodorowa z 2020 roku, pakiet REPowerEU z 2022 roku oraz rozporządzenie o gazie ziemnym i wodorze z 2024 roku dopuszczają finansowanie publiczne niebieskiego wodoru na zasadach analogicznych do zielonego, pod warunkiem spełnienia określonych progów emisyjności [5]. Ekonomiczna zasadność CCS dla ATR już przy cenie uprawnień EU ETS na poziomie 60 USD/t (poziomie już osiągniętym rynkowo) potwierdza, że obecne otoczenie regulacyjne rzeczywiście sprzyja wdrażaniu tej technologii bez dodatkowego wsparcia finansowego ze środków publicznych [6].

Skala globalnego zapotrzebowania na wodór niskoemisyjny wzmacnia praktyczne znaczenie tego wyniku. Przemysł ciężki (produkcja amoniaku, rafinerie, redukcja bezpośrednia stali) zużywa obecnie ponad 97 Mt H₂/rok, przy czym cały ten wolumen pochodzi z produkcji opartej na paliwach kopalnych bez wychwytu CO₂ [3]. Niebieski wodór pozwala dekarbonizować te procesy bez zmiany technologii odbiorczej. To istotna przewaga praktyczna nad wodorem zielonym, który w wielu zastosowaniach przemysłowych wymaga dodatkowych inwestycji dostosowawczych po stronie odbiorcy. Prognozy IEA wskazują, że niebieski wodór powinien stanowić ok. 33% globalnego miks wodorowego w 2030 roku, a według Hydrogen Council nawet 36% [5, 18]. Obie organizacje traktują tę technologię jako niezbędny element transformacji energetycznej nadchodzącej dekady.

Kontekst polski

Polska jako kraj o wysokiej emisyjności sektora energetycznego i rozbudowanej infrastrukturze gazowej, wpisuje się w grupę państw dopuszczających niebieski wodór jako element przejściowy przy jednoczesnym docelowym priorytecie dla wodoru zielonego. O realnym tempie wdrożenia niebieskiego wodoru w warunkach krajowych zdecydują trzy czynniki.

Dostępność geologiczna dla sekwestracji CO₂. Polska dysponuje ograniczonym, lecz zidentyfikowanym potencjałem geologicznym: formacje solankowe Niżu Polskiego oraz zubożone złoża węglowodorów w Karpatach mogą stanowić lokalne centra sekwestracji, choć wymagają dalszych badań potwierdzających ich pojemność i szczelność [16].

Tempo dekarbonizacji krajowego miks energetycznego.

Wynik analizy środowiskowej dla ALK zasilanego z polskiej sieci pokazuje, że w obecnych warunkach polskich niebieski wodór ma wyraźną przewagę środowiskową nad elektrolizą zasilaną z sieci krajowej, mimo że elektroliza jest technologią z założenia zeroemisyjną. Zgodnie z Krajowym Planem na rzecz Energii i Klimatu udział OZE w polskim miksie ma wzrosnąć do 40–50% do 2030 roku i powyżej 60% do 2040 roku. Poprawi to stopniowo profil środowiskowy elektrolizy sieciowej, jednak w perspektywie najbliższej dekady przewaga niebieskiego wodoru w warunkach krajowych pozostaje istotna.

Lokalizacja potencjalnych instalacji. Ośrodki przemysłu chemicznego dysponujące już infrastrukturą gazową i doświadczeniem w produkcji wodoru (Płock, Police, Puławy) są naturalnymi kandydatami do wdrożenia instalacji ATR-CCS na skalę zbliżoną do modelowej (607 t H₂/dobę). Dotyczy to zwłaszcza połączenia z planowaną siecią European Hydrogen Backbone, która mogłaby obsłużyć eksport nadwyżek lub import wodoru z regionów o korzystniejszych warunkach produkcji [3, 12].

Ograniczenia horyzontu czasowego roli CCS

Rola CCS jako technologii pomostowej ma z definicji charakter przejściowy. Nawet najlepszy wariant niskoemisyjny (ATR-CCS 91%) generuje emisje na poziomie 3,91 kg CO₂eq/kg H₂. Wartość ta jest dalece przekraczającą zero, obejmuje nieuchwytny ślad upstream wydobywania i transportu gazu ziemnego (1,34–2,28 kg CO₂eq/kg H₂), niezależny od skuteczności samej instalacji CCS [3]. Według scenariusza IEA Net Zero 2050 udział wodoru szarego w globalnym miksie powinien spaść z ok. 90% w 2020 roku do ok. 2% w 2050 roku, przy czym niebieski wodór pełni w tym scenariuszu funkcję wyłącznie przejściową [18]. Instalacja budowana dziś, przy założonym 25-letnim okresie eksploatacji, może więc funkcjonować przez znaczną część swojego cyklu życia w otoczeniu regulacyjnym wymagającym emisji bliskich zeru. Stwarza to ryzyko ograniczonej wartości rezydualnej aktywów po 2040–2045 roku i sugeruje potrzebę projektowania instalacji z myślą o możliwości dalszej rozbudowy CCS lub adaptacji do zasilania biometanem bądź e-metanem [2, 6].

W praktyce oznacza to, że decyzje inwestycyjne dotyczące niebieskiego wodoru w Polsce i UE powinny uwzględniać nie tylko bieżącą opłacalność ekonomiczną potwierdzoną w niniejszej analizie, lecz również strategię wyjścia z technologii w horyzoncie 2040–2050, równoległe z rozwojem konkurencyjności kosztowej wodoru zielonego, opisanym w podrozdziale 3.5.

3.3. Ograniczenia analizy

Przedstawiona analiza opiera się na modelu DCFA zakładającym stałe ceny gazu ziemnego, energii elektrycznej i uprawnień EU ETS w całym 25-letnim horyzoncie eksploatacji instalacji. Traktuje też parametry wejściowe analizy wrażliwości jako niezależne zmienne losowe, pomijając rzeczywiste korelacje rynkowe w szczególności współwystępowanie wzrostu cen gazu, energii elektrycznej i uprawnień CO₂, napędzane wspólnymi mechanizmami rynkowymi i regulacyjnymi [3, 13]. Model nie uwzględnia ponadto podatku dochodowego, tarczy podatkowej ani instrumentów wsparcia publicznego, np. mechanizmu hy-

drogen contracts for difference rozważanego w UE i Wielkiej Brytanii. Wyniki mają więc charakter pre-podatkowy i nie są bezpośrednio porównywalne z analizami uwzględniającymi strukturę finansowania inwestycji [3, 4]. Zakres systemu ograniczono do granicy instalacji produkcyjnej (koszt at-gate), pomijając koszty sprężania, transportu i dystrybucji, które w zależności od odległości i formy transportu mogą dodać 0,5–3,0 USD/kg H₂ i istotnie zmienić ranking ekonomiczny technologii z perspektywy odbiorcy końcowego [3, 4].

Trzy kierunki rozwoju wydają się tu najistotniejsze. Po pierwsze, zastosowanie dynamicznego modelu cen mediów i uprawnień CO₂, opartego na scenariuszach prognostycznych IEA lub BloombergNEF, pozwoliłoby ocenić moment osiągnięcia progu opłacalności CCS w warunkach zmieniającej się polityki klimatycznej [3, 13, 14]. Po drugie, rozszerzenie zakresu systemu o koszty dostawy dałoby pełny koszt dostarczonego wodoru (LCDH) [4, 12]. Po trzecie, analiza klastrowa uwzględniająca konkretne lokalizacje przemysłowe wraz z dostępnością formacji geologicznych do sekwestracji CO₂ pozwoliłaby ocenić realny potencjał wdrożeniowy niebieskiego wodoru w warunkach krajowych [3, 12].

4. Wnioski

Przeprowadzona analiza techniczno-ekonomiczna sześciu wariantów technologicznych produkcji wodoru (SMR, ATR, SMR-CCS 52%, SMR-CCS 85%, ATR-CCS 91% oraz ALK) dla instalacji modelowej o wydajności 607 t H₂/dobę, przy warunkach rynku europejskiego w roku bazowym 2026, pozwala sformułować pięć wniosków.

ATR-CCS 91% jest optymalnym wariantem niebieskiego wodoru pod względem bilansu koszt-emisje. Spośród wszystkich analizowanych technologii niskoemisyjnych osiąga najniższy LCOH (3,59 USD/kg H₂) przy jednocześnie najniższym śladzie węglowym wśród wariantów gazowych (3,91 kg CO₂eq/kg H₂). Przewaga ta wynika z wewnętrznego odzysku ciepła w procesie ATR, który eliminuje zużycie gazu jako paliwa i minimalizuje koszty operacyjne, mimo najwyższego CAPEX spośród rozpatrywanych technologii gazowych.

Integracja CCS z ATR jest ekonomicznie uzasadniona już przy obecnych cenach uprawnień EU ETS. ATR-CCS 91% (3,59 USD/kg H₂) jest tańszy niż ATR bez wychwyty CO₂ (3,81 USD/kg H₂). Eliminacja opłat emisyjnych kompensuje z nadwyżką wyższe koszty kapitałowe instalacji CCS. Proóg opłacalności wynosi 60 USD/t CO₂, poziom osiągnięty i przekroczony na rynku EU ETS, podczas gdy dla SMR próg ten pozostaje wyższy (125–130 USD/t CO₂).

Magazynowanie wodoru jest dominującym czynnikiem ryzyka kosztowego niezależnie od wybranej technologii. Stanowi 24–48% CAPEX we wszystkich wariantach i odpowiada za ponad 55% wariancji LCOH w SMR-CCS 52% i ATR-CCS 91%. Zastąpienie zbiorników naziemnych tańszymi kavernami solnymi tam, gdzie pozwalają na to warunki geologiczne, stanowi największą pojedynczą dźwignię redukcji kosztów dostępną bez zmian w rdzeniu procesu produkcyjnego.

Wodór zielony (ALK) pozostaje droższy o ok. 65% od optymalnego wariantu niebieskiego, ale zbliża się do progu

konkurencyjności. Wyznaczony punkt przecięcia kosztowego (37 USD/MWh) jest już dziś osiągalny w regionach o wyjątkowo korzystnych warunkach OZE, choć pozostaje poza zasięgiem standardowych warunków sieciowych w Polsce i Europie Środkowej do 2030 roku. Konkurencyjność kosztowa nie oznacza jednak przewagi środowiskowej. ALK zasilana z sieci o wysokiej emisyjności, jak polska, generuje emisje wielokrotnie wyższe niż wodór niebieski.

Wodór niebieski jest technologicznie dojrzałą i ekonomicznie uzasadnioną technologią pomostową w perspektywie 2035–2050. Wyniki analizy, spójne z niezależnymi ustaleniami literaturowymi [3, 10, 17], potwierdzają, że przy obecnym poziomie cen EU ETS i cen energii ATR-CCS oferuje najkorzystniejszy dostępny bilans kosztowo-emisyjny wśród technologii niskoemisyjnych produkcji wodoru. Jego rola pozostaje jednak z założenia przejściowa. Strukturalna niemożność osiągnięcia zeroemisyjności oraz postępująca redukcja kosztów wodoru zielonego wymagają, by decyzje inwestycyjne uwzględniały strategię wygaszania technologii w horyzoncie 2040–2050, równoległe z rozwojem infrastruktury OZE i elektrolizy.

5. Literatura

Praca macierzysta: J. D. Gawriuczenkow, Analiza techniczno-ekonomiczna wytwarzania wodoru niebieskiego w procesie reformingu parowego, M.S. thesis, Wyd. Inż. Środowiska, Politechnika Warszawska, Warszawa, Polska, 2026.

- [1] Dawood, F., Anda, M., & Shafiullah, G. (2020). Hydrogen production for energy: An overview. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(7), 3847–3869. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.059>
- [2] Saeidi, S. i in. (2023). Evolution paths from gray to turquoise hydrogen via catalytic steam methane reforming. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 183, 113392. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113392>
- [3] Oni, A., Anaya, K., Giwa, T., Di Lullo, G., & Kumar, A. (2022). Comparative assessment of blue hydrogen from steam methane reforming, autothermal reforming, and natural gas decomposition technologies for natural gas-producing regions. *Energy Conversion and Management*, 254, 115245. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115245>
- [4] Walden, J. (2022). *Blue Hydrogen Production Technology Review: Report on behalf of the Bacton Energy Hub Hydrogen Supply Special Interest Group*. Progressive Energy.
- [5] Ivan, B. a. O. (2023). Comparison between Green and Blue Hydrogen Production: Climate Impact, Status Quo and Prospects. *repositUM (TU Wien)*. <https://doi.org/10.34726/hss.2023.110261>
- [6] Congressional Budget Office. (2023). Carbon Capture and Storage in the United States. Congressional Budget Office. <https://www.cbo.gov/publication/59832>
- [7] Mohajerani, S., Kumar, A., & Oni, A. O. (2018). A techno-economic assessment of gas-to-liquid and coal-to-liquid plants through the development of scale factors. *Energy*, 150, 681–693. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.005>
- [8] Swanson, R. M., Platon, A., Satrio, J. A., & Brown, R. C. (2010). Techno-economic analysis of biomass-to-liquids production based on gasification. *Fuel*, 89, S11–S19. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.07.027>
- [9] Collodi, G., Azzaro, G., Ferrari, N., & Santos, S. (2017). Techno-economic Evaluation of Deploying CCS in SMR Based Merchant H₂ Production with NG as Feedstock and Fuel. *Energy Procedia*, 114, 2690–2712. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1533>
- [10] IRENA. (2020). *Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- [11] Parkash, S. (2003). *Refining Processes Handbook*. Gulf Professional Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-7721-9.X5000-2>
- [12] Okonkwo, E. C., Al-Breiki, M., Bicer, Y., & Al-Ansari, T. (2021). Sustainable hydrogen roadmap: A holistic review and decision-making methodology for production, utilisation and exportation using Qatar as a case study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(72), 35525–35549. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.08.111>
- [13] Henriksson, P. J. G., Heijungs, R., Dao, H. M., Phan, L. T., De Snoo, G. R., & Guinée, J. B. (2015). Product carbon footprints and their uncertainties in comparative decision contexts. *PLoS ONE*, 10(3), e0121221. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0121221>
- [14] Glushchenko, A. (2.12.2025). Carbon price in the EU ETS to hit €126/t by 2030. GMK Center. <https://gmk.center/en/infographic/carbon-price-in-the-eu-ets-to-hit-e126-t-by-2030>
- [15] Howarth, R. W., & Jacobson, M. Z. (2021). How green is blue hydrogen? *Energy Science & Engineering*, 9(10), 1676–1687. <https://doi.org/10.1002/ese3.956>
- [16] Boot-Handford, M.E., Abanades, J.C., Anthony, E.J., Blunt, M.J., Brandani, S., Mac Dowell, N., Fernández, J.R., Ferrari, M.-C., Gross, R., Hallett, J.P., Haszeldine, R.S., Heptonstall, P., Lyngfelt, A., Makuch, Z., Mangano, E., Porter, R.T.J., Pourkashanian, M., Rochelle, G.T., Shah, N., Yao, J.G., Fennell, P.S.. (2013). Carbon capture and storage update. *Energy & Environmental Science*, 7(1), 130–189. <https://doi.org/10.1039/c3ee42350f>
- [17] Rostrup-Nielsen, J. R., Sehested, J., & Nørskov, J. K. (2002). Hydrogen and synthesis gas by steam- and CO₂ reforming. In *Advances in catalysis* (pp. 65–139). [https://doi.org/10.1016/s0360-0564\(02\)47006-x](https://doi.org/10.1016/s0360-0564(02)47006-x)
- [18] IEA. (2021). *Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector*. International Energy Agency, Paris. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>

Kofeina i sukraloza jako markery skażenia wód powierzchniowych ściekami komunalnymi

Caffeine and sucralose as indicators of municipal wastewater contamination in surface waters

Ewa Wiśniowska^{1*} , Małgorzata Kryłów² 

¹ Wydział Infrastruktury i Środowiska, Politechnika Częstochowska

² Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Krakowska

* Kontakt / Correspondence: ewa.wisniowska@pcz.pl

Streszczenie:

W pracy omówiono właściwości kofeiny i sukralozy, ich stężenia w ściekach, efektywność usuwania w oczyszczalniach oraz koncentracje i przemiany w wodach powierzchniowych. Ustalono, że kofeina jest dobrym markerem świeżego zanieczyszczenia ściekami komunalnymi. Sukraloza natomiast ze względu na dużą trwałość w środowisku wodnym pozwala identyfikować skażenie długotrwałe lub historyczne. Ze względu na to markery te powinny być oznaczane równolegle. Zaproponowano schemat monitoringu skażenia oraz sposób interpretacji wyników. Proponowaną metodykę można zalecić jako uzupełnienie standardowego monitoringu jakości wód powierzchniowych służące identyfikacji źródeł skażenia.

Słowa kluczowe: kofeina, sukraloza, markery ścieków komunalnych, monitoring wód, oczyszczalnie ścieków, mikrozanieczyszczenia

Abstract:

The present study analyses the properties of caffeine and sucralose, their concentrations in wastewater, removal efficiency in treatment works, and their concentrations and transformations in surface waters. The study established that caffeine serves as an effective indicator of recent contamination by municipal wastewater. Conversely, sucralose, due to its high persistence in the aquatic environment, facilitates the identification of long-term or historical contamination. Consequently, a parallel analysis of these markers is necessary. A proposed scheme for monitoring contamination and a method for interpreting the results are presented. The proposed methodology can be recommended as a supplement to standard surface water quality monitoring for the identification of sources of contamination.

Keywords: caffeine, sucralose, municipal wastewater markers, water monitoring, wastewater treatment plants, micropollutants

1. Wprowadzenie

Podstawowymi wskaźnikami chemicznymi określającymi zawartość zanieczyszczeń organicznych w wodzie i ściekach są: chemiczne zapotrzebowanie tlenu (ChZT), biochemiczne pięciodobowe zapotrzebowanie na tlen (BZT₅) oraz ogólny węgiel organiczny (OWO). Wskaźniki te nie identyfikują poszczególnych związków organicznych, lecz opisują ich sumaryczne stężenie. Wartość ChZT stanowi miarę całkowitej zawartości związków organicznych, obejmując zarówno frakcję łatwo biodegradowalną, jak i substancje odporne na rozkład. Na wartość tego wskaźnika mogą ponadto wywierać wpływ niektóre związki nieorganiczne,

jak np. siarczki i azotyny. Do zalet ChZT zalicza się szybkość analizy i powtarzalność uzyskiwanych wyników [1]. Wartość BZT₅ odzwierciedla zawartość łatwo biodegradowalnych związków organicznych. Podobnie jak ChZT, BZT₅ też nie pozwala na identyfikację rodzaju związków organicznych obecnych w ściekach. Stosunek BZT₅/ChZT jest często wykorzystywany jako orientacyjny wskaźnik biodegradowalności ścieków [1, 2]. OWO jest sumarycznym wskaźnikiem określającym całkowitą ilość węgla związanego w związkach organicznych obecnych w próbce. Podobne wartości OWO mogą wynikać zarówno z obecności ścieków komunalnych, jak i naturalnej materii organicznej (np. substancji humusowych) czy spływów z terenów rolniczych [3].

Ze względu na krótki czas oznaczania oraz wyeliminowanie konieczności stosowania toksycznych odczynników, takich jak dwuchromian potasu i związki rtęci, OWO jest coraz częściej wykorzystywany jako alternatywa dla oznaczania ChZT.

Ograniczeniem wskaźników takich jak OWO, ChZT i BZT₅ jest ich brak specyficzności źródłowej – żaden z nich nie pozwala odróżnić zanieczyszczenia pochodzenia komunalnego od naturalnego czy przemysłowego.

W przypadku monitorowania stanu wód powierzchniowych określenie źródeł zanieczyszczeń jest istotne w celu ich eliminacji. Szczególnie istotne jest ustalenie źródeł skażenia ludzkimi fekaliami. Źróżłami takimi mogą być nie tylko odpływy z oczyszczalni, ale także przelewy burzowe, spływy z pól, wycieki ze zbiorników bezodpływowych, nieszczelności sieci kanalizacyjnych czy składowisk odpadów. Skażenie fekaliami tradycyjnie oceniano oznaczając bakterie wskaźnikowe, przede wszystkim z grupy coli (*Escherichia coli*) oraz enterokoki jelitowe (*Enterococcus spp.*). Obecność tych mikroorganizmów świadczy o zanieczyszczeniu kałem, jednak nie pozwala jednoznacznie rozróżnić, czy źródłem skażenia były ścieki komunalne, czy odchody zwierząt. Dodatkowym ograniczeniem klasycznych wskaźników bakterierynych jest ich stosunkowo szybka inaktywacja w środowisku wodnym pod wpływem czynników fizycznych, chemicznych i biologicznych. W konsekwencji ich brak w próbie nie wyklucza wcześniejszego dopływu ścieków komunalnych. Wadę tę można zmniejszyć oznaczając uzupełniająco bardziej trwałe organizmy wskaźnikowe, takie jak somatyczne kolifagi, F-specyficzne kolifagi RNA oraz *Clostridium perfringens* [4].

W ostatnich latach coraz większe znaczenie zyskują także molekularne metody identyfikacji źródeł skażenia fekalnego, określane jako MST (Microbial Source Tracking). Wykorzystują one markery genetyczne związane z mikrobiotą jelitową określonych gospodarzy, w tym markery charakterystyczne dla zanieczyszczeń pochodzenia ludzkiego [5].

Jako alternatywa lub uzupełnienie analizy wskaźników mikrobiologicznych skażenia kałem ludzkim wykorzystywany jest także koprostanol (5 β -cholestan-3 β -ol). Związek ten powstaje w przewodzie pokarmowym większości ssaków w wyniku mikrobiologicznej redukcji cholesterolu. Znaczna część cholesterolu docierającego do jelita grubego ulega przekształceniu do koprostanolu, który następnie jest wydalany z kałem. Ze względu na wysoką trwałość, zwłaszcza w osadach dennych, koprostanol może utrzymywać się w środowisku przez długi czas, dzięki czemu stanowi cenny wskaźnik zarówno aktualnego, jak i historycznego oddziaływania ścieków komunalnych. Należy jednak podkreślić, że koprostanol może być również produkowany przez inne ssaki, dlatego jego oznaczanie nie pozwala na jednoznaczną identyfikację źródła skażenia. W celu zwiększenia wiarygodności interpretacji często wykorzystuje się również stosunki stężeń koprostanolu do innych steroli i stanoli kałowych [6].

Poza wskaźnikami sumarycznymi i mikrobiologicznymi, do oceny skażenia ściekami komunalnymi wykorzystywane są parametry nieorganiczne, jak azot amonowy lub fosforany. Podwyższone stężenie azotu amonowego w wodach powierzchniowych, zwłaszcza przy jednocześnie niskich stężeniach azotanów, może świadczyć o niedawnym dopływie ścieków surowych lub niedostatecznie oczyszczonych [1]. Fosforany występujące w wodach

powierzchniowych mogą pochodzić zarówno ze źródeł rolniczych, jak i komunalnych. W zlewniach silnie zurbanizowanych podwyższone stężenie związków fosforu jest najczęściej związane z dopływem ścieków komunalnych, zawierających produkty metabolizmu człowieka, resztki żywności oraz związki fosforu pochodzące z detergentów [1, 7].

Do chemicznych wskaźników obecności ścieków bytowych zalicza się również związki powierzchniowo czynne, przede wszystkim anionowe surfaktanty, takie jak liniowe alkilobenzenosulfoniany (LAS) stosowane w detergentach, oraz produkty ich biodegradacji. Jako uzupełniające markery ścieków komunalnych wykorzystywane są również bor i jego związki także pochodzące z detergentów, środków czystości i innych produktów gospodarstwa domowego [1, 8, 9].

Przedstawiony przegląd wskazuje, że klasyczne wskaźniki fizykochemiczne i mikrobiologiczne są przydatne do oceny stopnia zanieczyszczenia wód, jednak ich wykorzystanie do jednoznacznej identyfikacji ścieków komunalnych jako źródła skażenia jest ograniczone. W związku z tym coraz większą uwagę poświęca się mikrozanieczyszczeniom o charakterze antropogenicznym, które powszechnie występują w ściekach bytowych. Znaczenie tej grupy zanieczyszczeń zostało podkreślone w znowelizowanej dyrektywie dotyczącej oczyszczania ścieków komunalnych, która wprowadza obowiązek monitorowania oraz stopniowego ograniczania emisji wybranych mikrozanieczyszczeń pochodzących ze ścieków komunalnych [10]. Do zakresu wskaźników dla ścieków komunalnych nie wprowadzono jednak takich związków jak kofeina czy sukraloza, a stanowiłyby one przydatne markery, gdyż ze względu na wysoką specyficzność źródłową i niską granicę oznaczalności, umożliwiają wykrywanie nawet niewielkich domieszek ścieków komunalnych w wodach powierzchniowych.

Celem niniejszego opracowania jest ocena przydatności kofeiny i sukralozy jako markerów skażenia ściekami komunalnymi oraz wykazanie, że związki te mogą stanowić wartościowe uzupełnienie rutynowo stosowanych wskaźników skażenia wód fekaliami. Mogą być też przydatne w monitoringu pracy oczyszczalni ścieków. W szczególności analizowana jest możliwość ich wykorzystania do identyfikacji dopływu nie w pełni oczyszczonych ścieków komunalnych do wód powierzchniowych.

2. Charakterystyka kofeiny i sukralozy

2.1. Kofeina

Kofeina zalicza się do grupy metyloksantyn, pochodnych puryny zawierających trzy grupy metylowe przy atomach azotu pierścienia ksantynowego. Związek ten charakteryzuje się umiarkowaną hydrofilowością i dobrą rozpuszczalnością w wodzie. W zakresie pH typowym dla wód naturalnych kofeina występuje głównie w postaci obojętnej, co w połączeniu z niską wartością współczynnika podziału oktanol-woda powoduje, że pozostaje przede wszystkim w fazie wodnej. Wykazuje ograniczoną sorpcję na osadach dennych i materii zawieszonej oraz charakteryzuje się stosunkowo dużą mobilnością w środowisku wodnym [11]. W organizmie człowieka kofeina ulega intensywnemu metabolizmowi, w wyniku czego jedynie około 1–3% przyjętej dawki jest wydalane z moczem w postaci niezmienionej. Do ścieków komu-

nalnych kofeina i jej metabolity trafiają przede wszystkim wraz z moczem i kałem, a dodatkowo również wskutek wylewania resztek napojów zawierających kofeinę do kanalizacji. W środowisku wodnym kofeina charakteryzuje się stosunkowo wysoką podatnością na biodegradację. W wodach powierzchniowych czas półtrwania kofeiny wynosi zazwyczaj od kilku do kilkunastu dni, zależnie od warunków środowiskowych. Związek ten jest również skutecznie usuwany w procesach zaawansowanego utleniania, takich jak ozonowanie oraz oddziaływanie promieniowaniem UV [12–14]. Głównym źródłem kofeiny w wodach powierzchniowych są ścieki komunalne. Może ona także być wprowadzana do nich wraz z odciekami ze składowisk odpadów komunalnych oraz ze spływami z terenów zurbanizowanych podczas opadów deszczu [12].

2.2. Sukraloza

Sukraloza jest syntetycznym słodzikiem, trójchlorową pochodną sacharozy, w której trzy grupy hydroksylowe zostały zastąpione atomami chloru. Jest dopuszczona w Unii Europejskiej do obrotu i spożycia jako E955. Sukraloza jest dodawana do napojów oraz żywności o obniżonej kaloryczności; bardzo dobrze rozpuszcza się w wodzie [15]. Równocześnie jest związkiem silnie hydrofilowym, niepodatnym na jonizację i słabo sorbującym się na zawiesinach [16]. Sukraloza charakteryzuje się bardzo wysoką trwałością w środowisku oraz niską podatnością na biodegradację i rozkład fizykochemiczny. Wynika to przede wszystkim z zastąpienia trzech grup hydroksylowych atomami chloru, co uniemożliwia rozpoznawanie cząsteczki przez enzymy hydrolityczne rozkładające naturalne cukry, a jednocześnie zwiększa trwałość wiązań chemicznych. W konsekwencji sukraloza jest odporna na typowe procesy biodegradacji oraz większość procesów utleniania stosowanych w oczyszczaniu ścieków, w tym ozonowanie w standardowych warunkach eksploatacyjnych [15]. Ze względu na wysoką hydrofilowość oraz niewielkie powinowactwo do materii organicznej związek pozostaje niemal wyłącznie w fazie wodnej [17]. Dodatkowo sukraloza praktycznie nie jest metabolizowana w organizmie człowieka i jest wydalana głównie w postaci niezmienionej (85–95%) z moczem i kałem [18]. W wodach naturalnych nie ulega istotnej biodegradacji ani hydrolizie w zakresie typowych wartości pH. Także jej fotodegradacja zachodzi powoli. W efekcie może przemieszczać się na znaczne odległości, przenikać do wód podziemnych oraz utrzymywać się w środowisku przez wiele miesięcy. Dzięki temu jest uznawana za jeden z najbardziej wiarygodnych chemicznych markerów dopływu ścieków komunalnych, także o charakterze długotrwałym lub historycznym [17].

3. Stężenia kofeiny i sukralozy w ściekach oraz wodach powierzchniowych

Analiza dostępnych danych wskazuje, że stężenia kofeiny w ściekach surowych są zazwyczaj do dwóch rzędów wielkości wyższe niż w ściekach oczyszczonych. Jednocześnie obserwuje się znaczne zróżnicowanie zarówno stężeń, jak i efektywności usuwania tego związku, wynikające z różnic w składzie ścieków, zastosowanej technologii oczyszczania oraz warunków eksplo-

atacyjnych oczyszczalni. W badaniach Buerge i wsp. przeprowadzonych w sześciu szwajcarskich oczyszczalniach ścieków stężenia kofeiny w ściekach surowych wynosiły 7–73 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$, natomiast w oczyszczonych 0,03–9,5 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$, przy skuteczności usuwania na poziomie 81–99,9% [12]. Nieco niższą efektywność usuwania (około 67%) uzyskali Gómez i wsp. w komunalnej oczyszczalni ścieków w Hiszpanii, gdzie średnie stężenia kofeiny wynosiły w ściekach surowych 6,17 i 2,02 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ w oczyszczonych [19]. Również Santos i wsp. analizując cztery oczyszczalnie w Sewilli, wykazali stosunkowo duże zróżnicowanie skuteczności usuwania (44–75%), które wiązali przede wszystkim z obciążeniem hydraulicznym, czasem zatrzymania ścieków oraz sezonową zmiennością ich składu [20]. Znacznie wyższą (> 88%) skuteczność usuwania kofeiny uzyskiwano w nowoczesnych układach biologicznych, np. oczyszczalniach wykorzystujących proces A_2O [21]. W pięciu portugalskich oczyszczalniach komunalnych Silva i wsp. oznaczyli 26–46 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ kofeiny w ściekach surowych oraz 0,084–8,4 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ w ściekach oczyszczonych, uzyskując skuteczność usuwania przekraczającą 82% [22]. Podobnie wysoką skuteczność (>95%) odnotowano w dużej oczyszczalni As-Samra w Jordani, obsługującej ponad 3 mln równoważnych mieszkańców [23]. W ściekach oczyszczonych z oczyszczalni ścieków w Bandung w Indonezji stężenie kofeiny wynosiło 12,2 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ [24]. Kofeina była wykrywana we wszystkich próbkach ścieków oczyszczonych z wyżej wymienionych oczyszczalni. Podsumowując można stwierdzić, że w większości klasycznych oczyszczalni ścieków kofeina jest skutecznie usuwana, a efektywność tego procesu zazwyczaj przekracza 80–90%. Jednocześnie związek ten jest obecny w niewielkich stężeniach w większości próbek ścieków oczyszczonych, które mogą wnosić do odbiorników znaczny jej ładunek. Ze względu na powszechną obecność kofeiny w ściekach komunalnych i jej dużą podatność na biodegradację, związek ten należy uznać za dobry marker świeżego skażenia wody ściekami komunalnymi. Ponadto można stwierdzić, że stopień rozkładu kofeiny poniżej 80% może być sam w sobie wskaźnikiem zakłóceń pracy oczyszczalni ścieków.

Kofeina ponadto obecna jest także w ściekach ze zbiorników bezodpływowych oraz tych odprowadzanych do odbiorników z przelewów burzowych. Odpływy ze zbiorników bezodpływowych charakteryzują się stężeniami kofeiny od kilkudziesięciu do kilkuset $\mu\text{g}/\text{dm}^3$, a więc porównywalnymi lub wyższymi niż w ściekach surowych. Przykładowo w Szkocji stwierdzono stężenie kofeiny w bezpośrednim odpływie ze zbiornika bezodpływowego na poziomie 200 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ [25], natomiast w USA na poziomie nieprzekraczającym 80 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ [26]. W odniesieniu do przelewów burzowych Madoux-Hummary i wsp. wykazali, że podczas opadów kofeina obecna w ściekach bytowych jest rozcieńczana przez wody opadowe. Autorzy ci monitorowali przez rok dwa przelewy burzowe w Montrealu. Stwierdzona mediana stężeń kofeiny odprowadzanych podczas deszczów przelewami mieściła się w zakresie 0,3–4,6 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ [27].

Wysoka skuteczność usuwania kofeiny w oczyszczalniach ścieków powoduje, że jej obecność w wodach powierzchniowych jest najczęściej związana z dopływem ścieków surowych, niedostatecznie oczyszczonych lub zrzutami z przelewów burzowych. Z tego względu analiza stężeń kofeiny w wodach powierzchniowych znajduje szerokie zastosowanie w identyfikacji antropoge-

nicznych źródeł zanieczyszczeń oraz ocenie oddziaływania ścieków komunalnych na środowisko wodne.

Stężenia kofeiny w wodach powierzchniowych są dobrze udokumentowane, a ich zakres jest znacząco niższy niż w surowych ściekach komunalnych, od 0,006 do 8,5 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$. Wartości te są zależne od stopnia antropopresji, efektywności pracy oczyszczalni ścieków, obecności przelewów burzowych oraz warunków hydrologicznych [12]. W wodach powierzchniowych z terenów o niewielkiej antropopresji stężenia kofeiny są bardzo niskie ($< 0,002 \mu\text{g}/\text{dm}^3$), czego przykładem są wysokogórskie jeziora w Szwajcarii [12]. W wodach odbierających ścieki nieoczyszczone stężenie kofeiny wyraźnie wzrasta osiągając lokalnie nawet kilka lub więcej $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ [12, 28]. Obserwowane są zwiększone stężenia kofeiny poniżej miejsc zrzutu ścieków komunalnych jak w przypadku rzeki Lis w Portugalii [29]. Buerge i wsp. wykazali, że kofeina dobrze odzwierciedla antropogeniczne obciążenie wód ściekami komunalnymi, lecz jej użyteczność jako markera zależy od warunków lokalnych i czasu, jaki upłynął od dopływu ścieków [12]. Z tego względu kofeina jest przydatna jako marker aktualnego lub niedawnego skażenia ściekami komunalnymi, natomiast gorzej nadaje się do identyfikacji oddziaływania długotrwałego lub historycznego. W badaniach monitoringowych zasadne jest łączenie jej oznaczeń z bardziej trwałymi markerami antropogenicznymi. Szczególnie znaczenie ma tutaj sukraloza, która w przeciwieństwie do kofeiny wykazuje wysoką trwałość środowiskową i może wskazywać na obecność ścieków komunalnych nawet wtedy, gdy kofeina została już rozłożona. Sukraloza tylko w niewielkim stopniu ulega rozkładowi podczas oczyszczania ścieków. Wyniki analiz wskazują, że sukraloza występuje w porównywalnych stężeniach w ściekach surowych i oczyszczonych. Przykładowo badania przeprowadzone w Szwecji przez Brorström-Lundén i wsp. wykazały obecność sukralozy w ściekach surowych w stężeniach od 3,5 do 7,9 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$, natomiast w ściekach oczyszczonych od 1,8 do 10,8 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ [30]. Oznacza to, że klasyczne procesy oczyszczania usuwały jedynie niewielką część tego związku, a w części badanych oczyszczalni stężenia w odpływie były nawet wyższe niż w ściekach surowych. Podobne wyniki uzyskali Scheurer i wsp. w dwóch niemieckich oczyszczalniach [31]. Zjawisko to potwierdzili także Subedi i Kannan, którzy w dwóch komunalnych oczyszczalniach ścieków w stanie Nowy Jork oznaczyli średnie stężenia sukralozy wynoszące 29,4 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ w ściekach surowych oraz 29,6 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ w ściekach oczyszczonych, przy średniej skuteczności usuwania poniżej 2% [32]. Wyniki te są zgodne z najnowszym globalnym przeglądem Li i wsp. obejmującym dane z 24 oczyszczalni, który wykazał, że sukraloza należy do najsłabiej usuwanych sztucznych słodzików w oczyszczalniach ścieków, a jej skuteczność usuwania nie przekracza 10% [33]. Torres i wsp. wykazali, że sukraloza praktycznie nie ulega biodegradacji ani w warunkach tlenowych, ani beztlenowych, nawet po kilkudziesięciu dniach, co wskazuje, że niewielka skuteczność usuwania tego związku wynika przede wszystkim z jego właściwości, a nie z niedoskonałości technologii oczyszczania [34]. Badania prowadzone przez Guo i wsp. w Shenzhen wykazały, że niewielka podatność sukralozy na rozkład biologiczny powoduje jej obecność nie tylko w ściekach oczyszczonych, ale również w wodach estuarialnych

i przybrzeżnych. Autorzy obserwowali stopniowy spadek stężenia tego związku wraz z odległością od miejsca zrzutu ścieków, jednak związek pozostawał łatwo wykrywalny nawet po znacznym rozcieńczeniu, co potwierdza jego wysoką trwałość i przydatność jako markera ścieków komunalnych [35]. W ściekach ze zbiorników bezodpływowych stężenie sukralozy było porównywalne do oznaczanego w ściekach komunalnych, tj. 6–98 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ [36]. Dane na temat stężeń tego związku w ściekach z przelewów burzowych są niedostępne. Biorąc jednak pod uwagę wysoką trwałość sukralozy można oczekiwać, że związek ten będzie obecny również w tego rodzaju ściekach, a jego stężenie będzie zależało przede wszystkim od stopnia ich rozcieńczenia wodami opadowymi.

W wodach powierzchniowych stężenia sukralozy są zróżnicowane od 0,06 do 18,0 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ [17, 30, 33, 37]. Stężenia te są o jeden do dwa rzędy wielkości niższe niż w ściekach komunalnych. Związek ten jednak jest często wykrywany. Najwyższe stężenia zaobserwowano w bezpośrednim sąsiedztwie zrzutów ścieków komunalnych oraz na terenach zurbanizowanych. Ze względu na bardzo wysoką trwałość środowiskową i niewielką podatność na biodegradację sukraloza może utrzymywać się w wodach powierzchniowych przez długi czas, dzięki czemu jest uznawana za jeden z najbardziej wiarygodnych markerów długotrwałego oddziaływania ścieków komunalnych.

4. Kofeina i sukraloza jako markery skażenia wód powierzchniowych ściekami komunalnymi

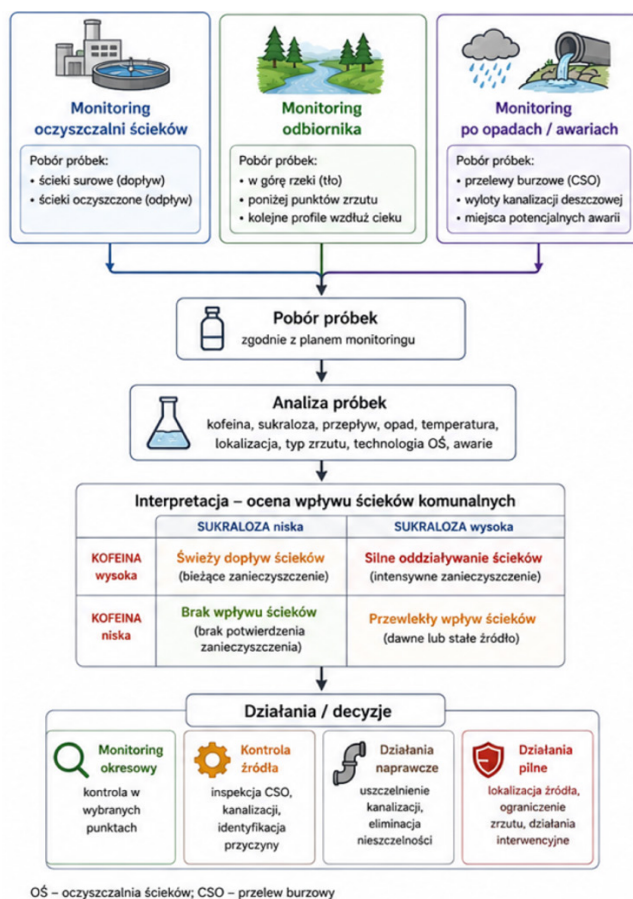
Analizując przydatność kofeiny i sukralozy jako markerów skażenia wód powierzchniowych ściekami komunalnymi, należy określić cechy, jakie powinien spełniać idealny wskaźnik. Powinien on charakteryzować się powszechnym występowaniem w ściekach komunalnych, znikomą obecnością lub jej brakiem w środowisku naturalnym, wysoką swoistością źródłową, łatwością oznaczania oraz odpowiednią trwałością w środowisku. Jednocześnie nie powinien ulegać znacznym przemianom chemicznym ani biologicznym, a jego stężenie powinno pozostawać w możliwie prostym związku z wielkością dopływu ścieków komunalnych [12, 17, 38]. Ani kofeina, ani sukraloza nie spełniają wszystkich wymagań stawianych idealnemu markerowi. Kofeina charakteryzuje się dużą swoistością dla świeżych ścieków komunalnych, jednak stosunkowo szybko ulega biodegradacji zarówno podczas oczyszczania ścieków, jak i w wodach powierzchniowych. Sukraloza wykazuje natomiast bardzo wysoką trwałość w środowisku i praktycznie nie jest usuwana w klasycznych biologicznych oczyszczalniach ścieków. Z tego względu odzwierciedla przede wszystkim długotrwałe lub historyczne oddziaływanie ścieków. Zasadne wydaje się zatem równoczesne oznaczanie obu związków, ponieważ dostarczają one komplementarnych danych o charakterze i czasie dopływu ścieków komunalnych do odbiornika [12, 31, 34].

Interpretacja uzyskanych wyników nie powinna się ponadto opierać wyłącznie na stężeniach kofeiny i sukralozy. Konieczne jest uwzględnienie warunków hydrologicznych, w szczególności przepływu, wielkości i czasu wystąpienia opadu atmosferycznego oraz czasu, jaki od niego upłynął. Istotne znaczenie mają również parametry technologiczne oczyszczalni ścieków.

Ważna jest także charakterystyka miejsca poboru próbek, obejmująca rodzaj odbiornika (rzeka, kanał deszczowy, zbiornik retencyjny), obecność przelewów burzowych, wylotów ścieków, infiltracji z nieszczelnych systemów kanalizacyjnych lub oddziaływania zbiorników bezodpływowych. Dopiero łączna analiza danych chemicznych, hydrologicznych i technologicznych pozwala na wiarygodną identyfikację źródeł skażenia ściekami komunalnymi [17, 27, 39].

Do wdrożenia monitoringu kofeiny i sukralozy rekomendować należałoby schemat przedstawiony na rys. 1 wykorzystujący kofeinę i sukralozę jako komplementarne markery ścieków komunalnych. W początkowym okresie monitoringu, obejmującym co najmniej 6–12 miesięcy, zaleca się równoczesne oznaczanie obu związków w ściekach surowych i oczyszczonych. Jednocześnie zaleca się rejestrowanie natężenia przepływu oraz danych meteorologicznych, w szczególności wielkości opadów atmosferycznych. Takie postępowanie umożliwia określenie zmienności sezonowej oraz ocenę wpływu warunków hydrologicznych na stężenia analizowanych markerów [39].

W przypadku monitoringu odbiorników ścieków rekomendowane jest wyznaczenie co najmniej jednego punktu referencyjnego zlokalizowanego powyżej miejsca zrzutu ścieków oraz dwóch punktów poniżej zrzutu - bezpośrednio za wylotem oraz w odległości około 0,5–1 km, umożliwiających ocenę rozcieńczenia i naturalnych procesów samooczyszczania. Jeżeli podejrzewa się infiltrację ścieków do środowiska gruntowo-wodnego, program monitoringu można uzupełnić o piezometrię zlokalizowaną zgodnie z kierunkiem przepływu wód podziemnych [17, 26]. Szczególną uwagę należy zwrócić na monitoring prowadzony po intensywnych opadach atmosferycznych. W takich sytuacjach wskazane jest wykonywanie serii próbek chwilowych, ponieważ to właśnie podczas epizodów opadów dochodzi do dopływu nieoczyszczonych ścieków komunalnych do odbiorników przez przelewy burzowe. Badania wykazały, że kofeina stanowi w takich sytuacjach czuły wskaźnik świeżego dopływu ścieków komunalnych [12, 27]. Raportowanie wyników oznaczeń powinno obejmować nie tylko wartości stężeń analizowanych związków, lecz również informacje umożliwiające ich prawidłową interpretację. Zaleca się podawanie granicy oznaczalności (LOQ), niepewności pomiaru, rodzaju pobranej próbki (próbka chwilowa lub średnia), natężenia przepływu, sumy opadów z ostatnich 24 lub 48 godzin, temperatury wody oraz przewodności elektrolitycznej właściwej, danych hydrologicznych i technologicznych. Znacząco zwiększa to wiarygodność identyfikacji źródeł skażenia ściekami komunalnymi oraz umożliwia porównywanie wyników uzyskiwanych w różnych programach monitoringowych [39].



Rys. 1. Proponowany schemat monitoringu kofeiny i sukralozy (opracowanie własne)

Fig. 1. Proposed monitoring scheme for caffeine and sucralose (developed by the authors)

Na podstawie spotykanych stężeń i właściwości omawianych markerów można zalecić uproszczony algorytm praktyczny interpretacji wyników (tab. 1). Proponowany algorytm ma charakter pomocniczy i nie wynika z obowiązujących przepisów prawa. Jego celem jest ułatwienie interpretacji wyników monitoringu poprzez równoczesne analizowanie obu markerów. Podstawowym założeniem algorytmu jest odmienne zachowanie obu związków. Kofeina ulega szybkiej biodegradacji zarówno podczas oczyszczania ścieków, jak i po przedostaniu się do odbiornika, dlatego jej obecność wskazuje przede wszystkim na świeży dopływ ścieków komunalnych.

Natomiast sukraloza charakteryzuje się wysoką trwałością w środowisku dzięki czemu stanowi wskaźnik długotrwałego lub historycznego oddziaływania ścieków komunalnych. Łącznie wyniki oznaczeń obu związków pozwalają zwiększyć wiarygodność identyfikacji źródła skażenia. Proponowany algorytm powinien być stosowany łącznie z analizą warunków hydrologicznych i technologicznych, co umożliwia wiarygodną ocenę źródła i charakteru skażenia ściekami komunalnymi.

Tabela 1. Uproszczony algorytm interpretacji wyników analizy kofeiny i sukralozy w wodach powierzchniowych (opracowanie własne na podstawie literatury [12, 17, 27, 31, 34])

Table 1. Simplified algorithm for interpreting the results of caffeine and sucralose analyses in surface waters (developed by the authors based on literature data [12, 17, 27, 31, 34])

Kofeina	Sukraloza	Najbardziej prawdopodobna interpretacja	Zalecenie
< LOQ	< LOQ	Brak potwierdzenia wpływu ścieków komunalnych	Kontynuacja monitoringu okresowego
> LOQ	< LOQ lub śladowa	Świeży dopływ ścieków komunalnych, możliwy przelew burzowy lub lokalne źródło zanieczyszczenia	Sprawdzić opady, przepływ, wyniki badań mikrobiologicznych oraz potencjalne źródła punktowe
< LOQ lub niska	stabilna, wyraźnie > LOQ	Długotrwały wpływ ścieków oczyszczonych, infiltracja z kanalizacji lub zbiorników bezodpływowych, historyczne skażenie	Analiza przestrzenna, monitoring piezometrów, ocena migracji zanieczyszczeń
Wysoka	Wysoka	Intensywny i ciągły wpływ ścieków komunalnych	Kontrola źródła, ponowny pobór próbek, analiza pracy oczyszczalni
Wyraźny wzrost po opadzie	Niewielkie zmiany	Dopływ ścieków z przelewów burzowych lub kanalizacji ogólnospławnej	Monitoring zdarzeniowy podczas kolejnych opadów

5. Wnioski

Przeprowadzony przegląd literatury wskazuje, że zarówno kofeina, jak i sukraloza należą do dobrych chemicznych markerów skażenia wód powierzchniowych ściekami komunalnymi. W przeciwieństwie do klasycznych wskaźników jakości ścieków, takich jak ChZT, BZT₅ czy OWO, umożliwiają one nie tylko potwierdzenie obecności ścieków komunalnych, lecz również dostarczają informacji o charakterze oraz czasie ich dopływu do odbiornika. Dodatkowo w porównaniu z klasycznymi wskaźnikami mikrobiologicznymi oba związki wykazują również większą stabilność analityczną.

Przegląd wyników prowadzonych badań wykazał, że kofeina jest związkiem skutecznie usuwanym w biologicznych oczyszczalniach ścieków, a efektywność jej eliminacji najczęściej przekracza 80–90%. W konsekwencji obecność podwyższonych stężeń kofeiny w wodach powierzchniowych świadczy przede wszystkim o świeżym dopływie ścieków komunalnych, pochodzących z przelewów burzowych, awarii kanalizacji, nieszczelnych systemów kanalizacyjnych lub zrzutów ścieków niedostatecznie oczyszczonych. Z kolei sukraloza charakteryzuje się bardzo wysoką trwałością w środowisku i praktycznie nie ulega biodegradacji podczas klasycznego oczyszczania ścieków. Dzięki temu stanowi wiarygodny marker długotrwałego lub historycznego oddziaływania ścieków komunalnych na środowisko wodne.

6. Literatura

[1] Miksch K, Sikora J., (red.) (2010). *Biotechnologia ścieków*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa

[2] Pluciennik-Koropczuk, E., Jakubaszek, A., Myszograj, S., & Uszakiewicz, S. (2017). COD Fractions in Mechanical-Biological Wastewater Treatment Plant. *Civil and Environmental Engineering Reports*, 24(1), 207–217. <https://doi.org/10.1515/ceer-2017-0015>

[3] Hilke I. (2015) *General principles for the quantification of Total Organic Carbon (TOC) in environmental solid and liquid samples*. Technical Reports 30, Max-Planck-Institut für Biogeochemie, Jena, Germany.

[4] Health Canada. (2023). *Guidelines for Canadian Recreational Water Quality: Indicators of Fecal Contamination*. Ottawa, Canada.

[5] Ahmed, W., Hughes, B., & Harwood, V. (2016). Current status of marker genes of bacteroides and related taxa for identifying sewage pollution in environmental waters. *Water*, 8(6), 231. <https://doi.org/10.3390/w8060231>

[6] Kriaa, A., Bourgin, M., Mkaouar, H., Jablaoui, A., Akermi, N., Soussou, S., Maguin, E., & Rhimi, M. (2019). Microbial reduction of cholesterol to coprostanol: an old concept and new insights. *Catalysts*, 9(2), 167. <https://doi.org/10.3390/catal9020167>

[7] Jasiewicz, C., & Baran, A. (2006). Rolnicze źródła zanieczyszczenia wód–biogeny. *Journal of Elementology*, 11(3).

[8] Ying, G. (2005). Fate, behavior and effects of surfactants and their degradation products in the environment. *Environment International*, 32(3), 417–431. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2005.07.004>

[9] Buszka, P. M., Fitzpatrick, J. A., Watson, L. R., & Kay, R. T. (2007). Evaluation of ground-water and boron sources by use of boron stable-isotope ratios, tritium, and selected water-chemistry constituents near Beverly Shores, north-western Indiana, 2004. In *Scientific Investigations Report*. <https://doi.org/10.3133/sir20075166>

[10] Directive (EU) 2024/3019 of the European Parliament and of the Council of 27 November 2024 concerning urban wastewater treatment (recast) <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/3019/oj> (dostęp 3.07.2026)

[11] NCBI National Library of Medicine NCBI, <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Caffeine> (dostęp 3.07.2026)

[12] Buerge, I. J., Poiger, T., Müller, M. D., & Buser, H. (2003). Caffeine, an anthropogenic marker for wastewater contamination of surface waters. *Environmental Science & Technology*, 37(4), 691–700. <https://doi.org/10.1021/es020125z>

[13] Rosal, R., Rodríguez, A., Perdígón-Melón, J. A., Petre, A., García-Calvo, E., Gómez, M. J., Agüera, A., & Fernández-Alba, A. R. (2009). Occurrence of emerging pollutants in urban wastewater and their removal through biological treatment followed by ozonation. *Water Research*, 44(2), 578–588. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.07.004>

[14] Summers, R. M., Louie, T. M., Yu, C., Gakhar, L., Louie, K. C., & Subramanian, M. (2012). Novel, highly specific N-Demethylases enable bacteria to live on caffeine and related purine alkaloids. *Journal of Bacteriology*, 194(8), 2041–2049. <https://doi.org/10.1128/jb.06637-11>

[15] Tollefsen, K. E., Nizzetto, L., & Huggett, D. B. (2012). Presence, fate and effects of the intense sweetener sucralose in the aquatic environment. *The Science of the Total Environment*, 438, 510–516. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.08.060>

- [16] Jenner, & Smithson, A. (1989). Physicochemical properties of the sweetener sucralose. *Journal of Food Science*, 54(6), 1646–1649. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1989.tb05179.x>
- [17] Oppenheimer, J., Eaton, A., Badruzzaman, M., Haghani, A. W., & Jacangelo, J. G. (2011). Occurrence and suitability of sucralose as an indicator compound of wastewater loading to surface waters in urbanized regions. *Water Research*, 45(13), 4019–4027. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.05.014>
- [18] Roberts, A., Renwick, A., Sims, J., & Snodin, D. (2000). Sucralose metabolism and pharmacokinetics in man. *Food and Chemical Toxicology*, 38, 31–41. [https://doi.org/10.1016/S0278-6915\(00\)00026-0](https://doi.org/10.1016/S0278-6915(00)00026-0)
- [19] Gómez, M., Bueno, M. M., Lacorte, S., Fernández-Alba, A., & Agüera, A. (2006). Pilot survey monitoring pharmaceuticals and related compounds in a sewage treatment plant located on the Mediterranean coast. *Chemosphere*, 66(6), 993–1002. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.07.051>
- [20] Santos, J., Aparicio, I., Callejón, M., & Alonso, E. (2008). Occurrence of pharmaceutically active compounds during 1-year period in wastewaters from four wastewater treatment plants in Seville (Spain). *Journal of Hazardous Materials*, 164(2–3), 1509–1516. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.09.073>
- [21] He, K., Echigo, S., Asada, Y., & Itoh, S. (2018). Determination of caffeine and its metabolites in wastewater treatment plants using Solid-Phase extraction and liquid Chromatography–Tandem mass spectrometry. *Analytical Sciences*, 34(3), 349–353. <https://doi.org/10.2116/analsci.34.349>
- [22] Silva, S., Cardoso, V. V., Duarte, L., Carneiro, R. N., & Almeida, C. M. M. (2021). Characterization of Five Portuguese Wastewater Treatment Plants: Removal Efficiency of Pharmaceutical Active Compounds through Conventional Treatment Processes and Environmental Risk. *Applied Sciences*, 11(16), 7388. <https://doi.org/10.3390/app11167388>
- [23] Al-Mashaqbeh, O., Alsafadi, D., Dalahmeh, S., Bartelt-Hunt, S., & Snow, D. (2019). Removal of selected pharmaceuticals and personal care products in wastewater treatment plant in Jordan. *Water*, 11(10), 2004. <https://doi.org/10.3390/w11102004>
- [24] Astuti, M. P., Notodarmojo, S., Priadi, C. R., & Padhye, L. P. (2022). Contaminants of emerging concerns (CECs) in a municipal wastewater treatment plant in Indonesia. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(8), 21512–21532. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23567-8>
- [25] Ramage, S., Camacho-Muñoz, D., & Petrie, B. (2018). Enantioselective LC-MS/MS for anthropogenic markers of septic tank discharge. *Chemosphere*, 219, 191–201. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.12.007>
- [26] SAGE PublicationsSage CA: Los Angeles, CA. (n.d.). Occurrence of Pharmaceuticals and Consumer Product Chemicals in Raw Wastewater and Septic Tank Effluent from Single-Family Homes - Kathleen E. Conn, Kathryn S. Lowe, Jörg E. Drewes, Christiane Hoppe-Jones, Maria B. Tucholke, 2010. Sage Journals. <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1089/ees.2009.0364>
- [27] Madoux-Humery, A., Dorner, S., Sauvé, S., Aboulfadl, K., Galarneau, M., Servais, P., & Prévost, M. (2013). Temporal variability of combined sewer overflow contaminants: Evaluation of wastewater micropollutants as tracers of fecal contamination. *Water Research*, 47(13), 4370–4382. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.04.030>
- [28] Busse, L., & Nagoda, C. (2015). *Detection of caffeine in the streams and rivers within the San Diego region*. Surface Water Ambient Monitoring Program
- [29] Paíga, P., Ramos, S., Jorge, S., Silva, J. G., & Delerue-Matos, C. (2019). Monitoring survey of caffeine in surface waters (Lis River) and wastewaters located at Leiria Town in Portugal. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(32), 33440–33450. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06168-w>
- [30] Brorström-Lundén E., Svenson A., Viktor T., Woldegiorgis A., Remberger M., Kaj L., Dye C., Bjerke A., Schlabach M. (2008). *Measurements of Sucralose in the Swedish Screening Program 2007*. Part I: Sucralose in Surface Waters and STP Samples. IVL Report B1769, IVL Swedish Environmental Research Institute, Stockholm
- [31] Subedi, B., & Kannan, K. (2014). Fate of artificial sweeteners in wastewater treatment plants in New York State, U.S.A. *Environmental Science & Technology*, 48(23), 13668–13674. <https://doi.org/10.1021/es504769c>
- [32] Guo, W., Li, J., Liu, Q., Shi, J., & Gao, Y. (2021). Tracking the fate of artificial sweeteners within the coastal waters of Shenzhen city, China: From wastewater treatment plants to sea. *Journal of Hazardous Materials*, 414, 125498. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125498>
- [33] Scheurer, M., Brauch, H., & Lange, F. T. (2009). Analysis and occurrence of seven artificial sweeteners in German waste water and surface water and in soil aquifer treatment (SAT). *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 394(6), 1585–1594. <https://doi.org/10.1007/s00216-009-2881-y>
- [34] Torres C.I., Ramakrishna S., Chiu C., Nelson K.G., Wasterhoff K., Krajmalik-Brown R. (2015). Fate of sucralose during wastewater treatment, *Environmental Engineering Science* 28(5). 325–331. <https://doi.org/10.1089/ees.2010.0227>
- [35] Li, J., Li, X., Li, Y., Liu, H., & Wang, Q. (2025). Artificial sweeteners in wastewater treatment plants: A systematic review of global occurrence, distribution, removal, and degradation pathways. *Journal of Hazardous Materials*, 494, 138644. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.138644>
- [36] Robertson, W., Stempvoort, V., Spoelstra, J., Brown, S., & Schiff, S. (2015). Degradation of sucralose in groundwater and implications for age dating contaminated groundwater. *Water Research*, 88, 653–660. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.10.051>
- [37] Fu, K., Wang, L., Wei, C., Li, J., Zhang, J., Zhou, Z., & Liang, Y. (2019). Sucralose and acesulfame as an indicator of domestic wastewater contamination in Wuhan surface water. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 189, 109980. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109980>
- [38] Glassmeyer, S. T., Furlong, E. T., Kolpin, D. W., Cahill, J. D., Zaugg, S. D., Werner, S. L., Meyer, M. T., & Kryak, D. D. (2005). Transport of Chemical and Microbial Compounds from Known Wastewater Discharges: Potential for Use as Indicators of Human Fecal Contamination. *Environmental Science & Technology*, 39(14), 5157–5169. <https://doi.org/10.1021/es048120k>
- [39] Verlicchi, P., & Ghirardini, A. (2019). Occurrence of micropollutants in wastewater and evaluation of their removal efficiency in treatment trains: the influence of the adopted sampling mode. *Water*, 11(6), 1152. <https://doi.org/10.3390/w11061152>

Transport podciśnieniowy ścieków w budynkach – potencjał do wykorzystania w nowoczesnych instalacjach wewnętrznych

Vacuum sewage transport in buildings – potential use in modern internal installations

Daniel Jakubowski¹*, Jarosław Chudzicki¹

¹ Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Warszawska

*Kontakt / Correspondence: jaroslaw.chudzicki@pw.edu.pl

Streszczenie:

W artykule przedstawiono rozwój historyczny systemów kanalizacji sanitarnej podciśnieniowej stosowanych w budynkach. Omówiono zasadę działania instalacji, a także rozwiązania inżynierskie i różnice w stosunku do tradycyjnych rozwiązań odprowadzania ścieków. Zwrócono uwagę na rozbieżności w tekstach norm z całego świata oraz przedstawiono kierunki dalszych badań celem ustandaryzowania technologii.

Słowa kluczowe: kanalizacja podciśnieniowa, zawór opróżniający, pompa próżniowa

Abstract:

This article provides a historical development of vacuum sewerage systems used in buildings. The operating principle of the system is discussed, along with engineering solutions and differences from traditional sewage disposal solutions. Differences in international standards are highlighted, and directions for further research aimed at standardizing the technology are presented.

Keywords: vacuum drainage, discharge valve, vacuum pump

1. Rozwój technologii

Podciśnienie w transporcie płynów znane było już starożytnym Grekom. Heron z Aleksandrii w III wieku przed naszą erą używał zjawiska lewara do transportu wody [13]. Pierwsze koncepcje wykorzystania podciśnienia w transporcie ścieków w sieciach zewnętrznych zostały jednak opracowane dopiero w trakcie rewolucji przemysłowej, natomiast pierwszy działający system został zaprojektowany pod koniec XIX wieku przez holenderskiego inżyniera Charlesa Liernura. W pierwszym praktycznym wykorzystaniu nowego wynalazku, ścieki z poszczególnych domów spływały grawitacyjnie do komór zbiorczych zlokalizowanych pod ulicą. Dopiero stamtąd ścieki były podciśnieniowo transportowane dalej. Na jego patencie powstały sieci podciśnieniowe w wielu holenderskich miastach, a także za granicą: w Pradze i Sankt Petersburgu. Jego najdłużej działający system, w miejscowości Trouville-sur-Mer we Francji, działał aż 95 lat, do 1987 roku [1].

Początków zastosowania podciśnienia w instalacjach wewnętrznych w budynkach należy szukać w 1956 roku, kiedy to szwedzki inżynier Joel Liljendahl opracował pierwszy patent toalet, z których ścieki były odprowadzane za pomocą podciśnienia. Jego pomysł znalazł realizację już 3 lata później, gdy wybudował

on pierwszy na świecie system na jednym z osiedli na północ od Sztokholmu, zużywając na spłukanie 1,5 litra wody oraz 50 litrów powietrza. Wydarzenie to rozpoczęło dynamiczny rozwój tej technologii. W 1968 roku szwedzka firma Electrolux nabyła prawa do tego patentu. Małe instalacje podciśnieniowe złożone z toalety i zbiornika zaczęły znajdować zastosowanie w toaletach zlokalizowanych w środkach transportu – samolotach, statkach, pociągach, co obecnie jest standardowym rozwiązaniem. [3] W tym miejscu warto wspomnieć, że równolegle do wynalazku Liljendahla, rozwijała się również technologia kanalizacji podciśnieniowej do odprowadzania wód opadowych. W postaci np. systemu Pluvia firmy Geberit, jest ona obecnie popularnym rozwiązaniem wybieranym przez projektantów.

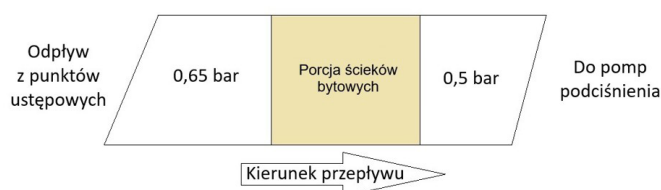
W Polsce jako pierwszy temat zewnętrznej sieci kanalizacji podciśnieniowej podjął w 1992 roku dr inż. Witold Olszewski, gdy opatentował on system kanalizacji próżniowo-lewarowej przystosowany do stosowania w sieciach zewnętrznych. Z powodu wad konstrukcyjnych nie zyskał on popularności [3]. Tematem zewnętrznych sieci podciśnieniowych zajmowała się również dr inż. Katarzyna Miszta-Kruk w swojej rozprawie doktorskiej w roku 2006 [2]. Dokonała tam ona opracowania metodyki ilościowej oceny niezawodności elementów kanalizacji

podciśnieniowej, gdyż do tej pory parametry istniały jedynie w ujęciu jakościowym. Od tamtej pory technika wykorzystania podciśnienia w transporcie ścieków w systemach kanalizacyjnych zlokalizowanych w Polsce ogranicza się w dużej mierze do instalacji kanalizacji deszczowych oraz małych wewnętrznych instalacji kanalizacji sanitarnych w środkach transportu (statki, samoloty, kolej).

W związku z wprowadzeniem przez Komisję Europejską dyrektywy „Fit for 55” [9], coraz częściej stosuje się nowatorskie rozwiązania projektowe w celu spełnienia wizji budynku zero-emisyjnego. Jednym z nich jest coraz popularniejsze, zwłaszcza w krajach skandynawskich, projektowanie wewnętrznych instalacji kanalizacyjnych w systemie podciśnieniowym. W momencie przygotowywania niniejszej publikacji w Polsce działają już dwie pierwsze tego typu duże instalacje wewnętrzne zlokalizowane w budynkach wysokościowych, odprowadzające ścieki z kilkuset toalet [14].

2. Zasada działania

Zasada działania instalacji kanalizacji podciśnieniowej opiera się na wykorzystaniu różnicy ciśnienia do przemieszczania ścieków powstających w toaletach i pisuarach. W warunkach standardowych, cała armatura przy płuczkach ustępowych jest zamknięta, zapewniając szczelność instalacji w części ssawnej. Podciśnienie w tej części jest wytwarzane w jednym punkcie instalacji, przez pompy podciśnienia. Ich zadaniem jest utrzymać w przewodach ciśnienie absolutne w zakresie między 0,5 bar a 0,65 bar. Uzyskana różnica ciśnień w tej wysokości jest wystarczająca do transportu ścieków z prędkością umożliwiającą samooczyszczanie instalacji [6]. W momencie spłukania toalety, zawór odprowadzający dba o dostarczenie do rury odpływowej odpowiednich proporcji wody i powietrza w wysokości 0,7 litra wody oraz 60 litrów powietrza atmosferycznego na jedno użycie. Powstała w ten sposób trójfazowa mieszanina (powietrze, woda, oraz ciała stałe) tworzy porcję ścieków bytowych, która jest transportowana przewodami w wyniku różnicy ciśnienia roboczego (rys. 1).



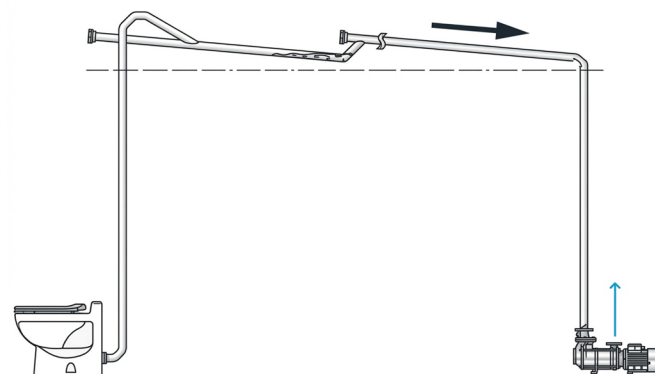
Rys 1. Sposób transportu podciśnieniowego ścieków [14]

Fig 1. Method of vacuum transport of sewage [14]

Wraz ze wzrostem odległości, którą ścieki przebywają w trakcie spłukania, porcja ścieków spłaszcza się pod wpływem siły grawitacji, pojawia się nieszczelność w przekroju przewodu, co w efekcie wyrównuje ciśnienie przed i za nim. Odległość ta wynosi zaledwie kilka metrów, jednakże dzięki ułożeniu spadku przewodów zgodnie z kierunkiem transportu ścieków oraz ponownego podniesienia rzędnej trasy instalacji, wytwarza się samoczynnie zasyfonowanie przewodu, które ponownie tworzy porcję ścieków, umożliwiając jej dalszy transport w kierunku

zestawu pompowego przy następnym użyciu spłuczki (rys. 2).

Na końcu instalacji zlokalizowana jest osiowo wbudowana pompa, która wytwarza podciśnienie na króćcu ssawnym, rozdrabnia fekalia i tłoczy je do sieci miejskiej bez zbiorników pośrednich.



Rys 2. Sposób tworzenia się porcji ścieków bytowych [5]

Fig 2. The method of creating a portion of domestic sewage [5]

3. Różnice w dokumentach normalizacyjnych

W związku z unikalną technologią oraz jej dotychczasowym wykorzystaniem głównie w środkach transportu, istniejące normy i wymagania techniczne znacznie różnią się od siebie, a ich zawartość nie odpowiada aktualnemu poziomowi wiedzy związanej z postępowaniem technologicznym w tej dziedzinie.

Obowiązujące w Polsce Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 z późniejszymi zmianami, w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie [11], nie uwzględnia kanalizacji podciśnieniowej jako sposobu odprowadzania ścieków, skupiając się jedynie na rozwiązaniu grawitacyjnym. Nie oznacza to jednak, że instalacje podciśnieniowe znajdują się w próżni prawnej, nie będąc uregulowane żadnymi przepisami. Mimo iż w treści rozporządzenia nie znajduje się ani jedno nawiązanie kanalizacji podciśnieniowej, w wykazie norm można odnaleźć powołanie na normę PN-EN 12109:2003 „Wewnętrzne systemy kanalizacji podciśnieniowej”, co sprawia, że jest ona obowiązującym na terenie Polski aktem prawnym.

Norma PN-EN 12109 [10] jest więc podstawowym dokumentem normatywnym opisującym zasady projektowania, montażu i eksploatacji systemów kanalizacji podciśnieniowej wewnątrz budynków, który obowiązuje w Polsce. Pomimo upływu czasu (pierwsze wydanie tej normy pochodzi z kwietnia 1999 roku), w dokumencie tym nie tylko uporządkowano rozwiązania inżynierskie stosowane w instalacjach kanalizacji podciśnieniowej, lecz zwrócono także uwagę na niezawodność działania instalacji (na przykład poprzez wprowadzenie wytycznych na temat obliczania wskaźników gotowości do działania systemu oraz szacowania jego niezawodności). Wartym podkreślenia jest fakt, iż już 25 lat temu autorzy normy zwrócili uwagę na konieczność projektowania nowych budynków z zachowaniem zasad ekonomii energetycznej oraz wskazywali kierunki optymalizacji, na przykład minimalizacji stosunku woda-powietrze podczas transportu podciśnieniowego ścieków. Pomimo wprowadzenia solidnych podstaw teoretycznych, norma ta jest obecnie nieprzydatna

w kwestii wymiarowania przewodów. W normie zamieszczono zasady obliczania natężenia przepływu ścieków zgodnie z metodologią obowiązującą dla kanalizacji grawitacyjnej. Sprawia to, że w obliczeniach uwzględniona jest jedynie faza płynna i stała, przy pominięciu obecności znacznych ilości powietrza zasysanych do instalacji w trakcie splukiwania toalet. Powoduje to, że projektanci zgodnie z prawem obliczają natężenie przepływu ścieków bytowych, jednakże dobór średnicy przewodu następuje na podstawie danych empirycznych producenta systemu, co ukazuje w praktyce lukę między wymaganiami zapisanymi w normie a osiągnięciami nauki ostatnich 25 lat.

W Australii i Nowej Zelandii obowiązuje z kolei norma AS/NZS 3500 [7]. Ten obszerny dokument zawiera kompendium wiedzy o projektowaniu wewnętrznych instalacji wodociągowych i kanalizacyjnych w budynkach. W normie tej znajduje się obszerny rozdział poświęcony wyłącznie instalacjom kanalizacji podciśnieniowej.

Treść normy obejmuje zagadnienia projektowe i wykonawcze instalacji kanalizacji podciśnieniowych. Z normy tej często korzystają projektanci europejscy.

W normie [7] zamieszczono następujące definicje, kryteria i wytyczne:

- definicja pojemności jednostki próżniowej „Vacuum loading unit (VLU)”, jako sumy objętości splukiwanych ścieków, wody oraz zasysanego powietrza,
- dopuszczalny zakres absolutnego ciśnienia roboczego w instalacji (od 30 kPa do 65 kPa) i związana z tym maksymalna łączna długość odcinków instalacji o kierunku ruchu przeciwnym do siły grawitacji nie większa niż 6 metrów,
- wprowadzenie elementu usztywnienia dwustronnego (bilateral bracing) jako elementu kluczowego w zachowaniu szczelności instalacji poprzez wzmocnienie łączów kształtek i ochronę przed stale występującymi uderzeniami wywołanymi przez poruszającymi się porcjami ścieków,
- sposób przeprowadzenia próby szczelności.

Drugim z przydatnych dokumentów jest australijska norma SA TS 100:2018 [12] stanowiąca uzupełnienie normy AS/NZS 3500. W normie tej skupiono się na wskazówkach dotyczących bezpieczeństwa i niezawodności pracy pojedynczych elementów instalacji podciśnieniowej (misek ustępowych, pisuarów oraz ich zaworów odcinających):

- definicję zaworu opróżniającego „Zawór kontrolujący przepływ nieczystości oraz powietrza pomiędzy stroną atmosferyczną miski ustępowej i pisuaru, a instalacją próżniową”. Definicja w tej postaci jest o tyle istotna, gdyż wynika z niej możliwość modyfikowania współczynnika woda-powietrze w trakcie pracy zaworu (a więc i większą elastyczność w obsłudze instalacji), czego norma PN-EN 12109 nie przewiduje,
- zakres średnic przewodów przyłączeniowych pisuarów oraz misek ustępowych wynoszący DN 35-65 mm,
- wymagania materiałowe dla misek ustępowych oraz pisuarów,
- sposób montowania zaworów antyskażeniowych.

Kolejnym z dokumentów jest północnoamerykańska norma CSA B45.13-19/IAPMO Z1700-2019 [8]. Możliwa do zauważenia jest inspiracja normą australijską AS/NZS 3500. Amerykanie podają tu podobne wartości ilościowe ścieków bytowych jako

wytyczne do projektowania, poszerzając jednak treść normy o wymagania materiałowe (między innymi uwzględniając możliwość stosowania rur miedzianych), a także szeroko opisując sposób przeprowadzania testów systemu.

Różnice w prawodawstwie na całym świecie spowodowały, że firmy aspirujące do miana światowych liderów w produkcji systemów kanalizacji sanitarnej podciśnieniowej opracowują swoje własne szczegółowe wytyczne, uwzględniając jednak ogólne wytyczne zawarte w przytoczonych dokumentach normalizacyjnych. Przykładem może być firma Jets Vacuum AS i jej poradnik do projektowania [5]. Poradnik poza wytycznymi projektowymi zgodnymi ze wspomnianymi wcześniej normami, zawiera także instrukcje montażowe, a także obszerny rozdział o konserwacji oraz serwisowaniu instalacji w razie awarii, co jest szczególnie istotne w kontekście wysokich wymagań szczelności oraz zapewnienia ciągłości działania instalacji. Autorzy poradnika skupili się także na dydaktycznym charakterze tworzonego dokumentu. Poza odpowiedzią na pytanie jak działa instalacja, czytelnik znajdzie tu również odpowiedź na o wiele ważniejsze pytanie, dlaczego jest stosowane takie a nie inne rozwiązanie. W połączeniu ze spójnością z omawianymi w tym rozdziale aktami prawnymi z całego świata, ten obszerny, blisko 50 stronicowy dokument stanowi dobry punkt wyjścia do nauki technologii instalacji podciśnieniowych nie tylko dla instalatora, lecz także projektanta. Warto w tym miejscu zauważyć, iż wymiarowanie oraz modelowanie kanalizacji sanitarnej podciśnieniowej zaproponowane przez producentów systemu jest w dużej mierze empiryczne. Złożoność przepływu trójfazowego wpływa na jego wysoką niestabilność [13], co sprawia, że nie opracowano do tej pory nieempirycznych metod obliczeniowych.

4. Wymiarowanie instalacji

W celu przedstawienia sposobu wymiarowania instalacji kanalizacji sanitarnej podciśnieniowej posłużono się przykładem budynku 30 kondygnacyjnego o funkcji biurowej, posiadającego na każdym piętrze toaletę jedynie z 5 miskami ustępowymi. Wymiarowanie rurociągów podciśnieniowych opiera się na empirycznym współczynniku Vacuum Loading Unit (VLU). VLU jest miarą łącznej objętości powietrza i ścieków stanowiącej obciążenie systemu, która uwzględnia częstotliwość użytkowania przyboru oraz natężenie przepływu. W budynkach biurowych następujące wartości VLU są przypisane poszczególnym elementom białego montażu (tab. 1):

- miska ustępowa oraz pisuar – 4 VLU
- umywalka – 8 VLU
- prysznic – 12 VLU

Suma VLU w przykładowej toalecie wynosi więc 5 misek ustępowych $\times$ 4 VLU = 20 VLU. Poziomy przewód odprowadzający ścieki z toalety do pionu będzie miał w tym przypadku wymiar DN50. Używanie tej metody jest proste i intuicyjne, co umożliwia szybki dobór rurociągów do planowanej inwestycji. Warto w tym miejscu zauważyć, że dane empiryczne posiadane przez producentów ograniczają się do średnicy maksymalnie DN75. Jest to spowodowane małą ilością inwestycji w opisywanej technologii. Generuje to problem widoczny w przykładowym wieżowcu użytym w tym rozdziale. Chcąc dobrać średnicę pionu na najniższej kondygnacji, zsumowano VLU wszystkich toalet, otrzymując

20 VLU $\times$ 30 kondygnacji = 600 VLU. Wynik ten przekracza maksymalne VLU dla przewodu DN75. Wytyczne producentów sugerują wybieranie w tym przypadku średnicy DN110, dopóki badania na większych średnicach nie zostaną ukończone.

Tabela 1. Maksymalne wartości parametru Vacuum Loading Units dla poszczególnych wymiarów przewodów [5]

Table 1. Maximum values of the Vacuum Loading Units parameter for individual pipe dimensions [5]

DN [mm]	Przewody poziome [VLU]	Przewody pionowe [VLU]
50	24	48
75	200	400

5. Zasada działania poszczególnych elementów instalacji

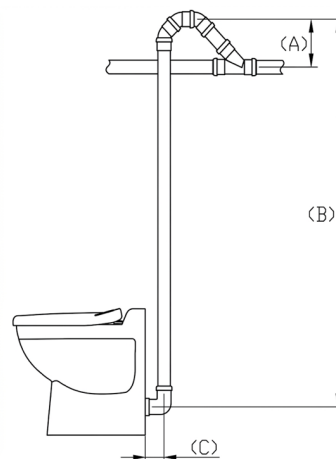
Podciśnieniowe pisuary oraz miski ustępowe do poprawnego działania wymagają współpracy z zaworem opróżniającym (discharge valve – rys. 3). Normalnie zawór pozostaje w pozycji zamkniętej. Po wciśnięciu przycisku spłukującego wysyłany jest sygnał do sterownika zaworu, który zwalnia blokadę zaworu odpływowego. Różnica ciśnienia atmosferycznego oraz ciśnienia roboczego panującego w instalacji wypycha ścieki z ustępu do instalacji. Jednocześnie, sterownik otwiera inny zawór, który steruje dopływem mieszanki wody spłukującej i powietrza. To ten zawór odpowiedzialny jest za główną oszczędność jaką generuje instalacja podciśnieniowa, w postaci redukcji zużycia wody do 0,7 litra na spłukanie. Aby zakończyć spłukiwanie wody, sterownik z powrotem przywraca blokadę zaworu odpływowego, co powoduje odcięcie instalacji od miski ustępowej bądź pisuaru. Z drobnym opóźnieniem sterownik zamyka również dopływ wody, umożliwiając zapewnienie zapasu wody na następne spłukanie. Po całej sekwencji, układ wraca do trybu normalnego, mając zamknięte wszystkie zawory. Co ważne, cały układ działa bez zasilania elektrycznego, gdyż wszystkie sygnały otwarcia i zamknięcia zaworów przekazywane są za pomocą tłoków i sprężyn w sposób pneumatyczno-kinetyczny [4].



Rys 3. Zawór opróżniający [4]
Fig 3. Discharge valve [4]

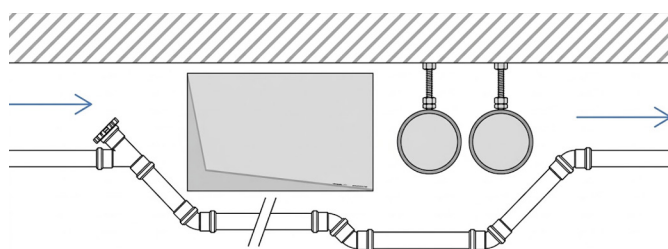
Drugim, najdłuższym elementem instalacji jest ciąg rur transportujących ścieki do zestawu pompowego. Trasa instalacji jest elementem najbardziej wrażliwym na błędy montażowe, gdyż błędne zamocowanie nawet jednej kształtki może zagrozić efektywności pracy znacznej części instalacji. Trasa instalacji wymaga diametralnie innych zasad montażu rurociągów w porównaniu do kanalizacji grawitacyjnej:

- Pozioma trasa instalacji domyślnie prowadzona jest pod stropem. W związku z tym ścieki są transportowane w pierwszej kolejności przewodem pionowym kilka metrów przeciwnie do zwrotu siły grawitacji. Włączenie się do przewodu poziomego należy wykonać poprzez tzw. „Gooseneck” – w wolnym tłumaczeniu: łabędzią szyję, co stanowi zabezpieczenie przed przepływem wstecznym (rys. 4). Zmiana średnicy rur może nastąpić jedynie na odcinku poziomym. Odcinek pionowy instalacji musi być tej samej średnicy (dotyczy to także pionów sekcyjnych), aby uniknąć zmiennej prędkości poruszania się ścieków w trakcie transportu pionowego.
- Przewody poziome są układane ze spadkiem 1% w kierunku zestawu pompowego celem umożliwienia utworzenia się porcji osadów w kieszeni transportowej. Kieszeń wykorzystywana jest także do regulacji wysokości instalacji, co ułatwia rozwiązywanie kolizji z innymi instalacjami i przeszkodami napotykanymi na etapie realizacji (rys. 5). Zalecane jest wykonywanie kieszeni po każdych 15 metrach przewodu poziomego.



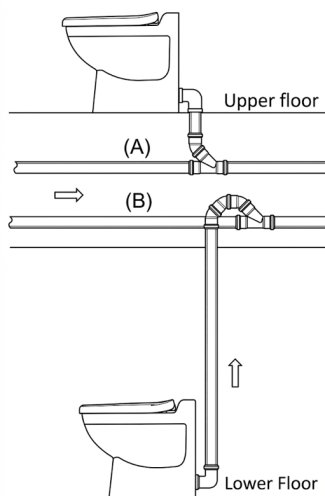
Rys 4. Schemat włączenia się w przewód poziomy rury pionowej [5]
Fig 4. Diagram of connecting a vertical pipe to a horizontal line [5]

- Ciśnienie absolutne w instalacji wynosi do 0,35 bar, co po odjęciu strat ciśnienia wynikających z chropowatości rur przekłada się na efektywną maksymalną wysokość podnoszenia ścieków przeciwnie do grawitacji na poziomie 5 metrów. Suma odcinków transportu ścieków przeciwnie do grawitacji na trasie najbardziej niekorzystnej nie może przekroczyć tej wartości.



Rys 5. Omijanie przeszkód za pomocą kieszeni transportowej [5]
Fig 5. Avoiding obstacles with the transport pocket [5]

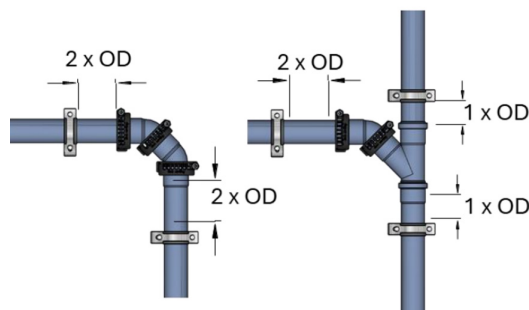
- W przypadku, gdy ograniczenia maksymalnej wysokości podnoszenia nie mogą zostać spełnione, możliwe jest sprowadzenie trasy bezpośrednio na kondygnację niżej. Należy pamiętać w takim przypadku, aby nie łączyć ścieków z piętra wyższego z poziomym przewodem z toalety z piętra niższego (rys. 6). Pozwoli to uniknąć przepływu wstecznego z toalety do toalety między kondygnacjami. Ścieki z różnych kondygnacji muszą być transportowane do pionu osobnymi przewodami.



Rys 6. Sposób prowadzenia ścieków z wyższej kondygnacji [5]

Fig 6. The method of conducting sewage from the upper floor [5]

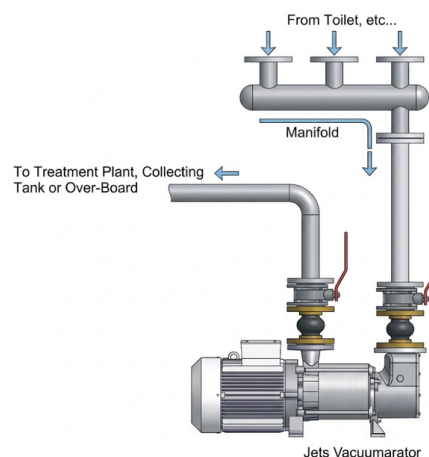
- Ze względu na małą średnicę wykorzystywanych rur, instalacja jest szczególnie narażona na awarie powstałe na skutek umieszczenia w toaletach przedmiotów do tego nieprzeznaczonych. Aby można szybko przywrócić instalację do sprawności, w krytycznych miejscach umieszczane są otwory rewizyjne. Czyszczeniaki należy montować na górnym i dolnym końcu pionów, na każdej kieszeni transportowej, krańcu przewodu poziomego oraz przy zmianach kierunku prowadzenia instalacji o 90 stopni.
- W przeciwieństwie do kanalizacji grawitacyjnej, w instalacji podciśnieniowej warto stosować zawory odcinające poszczególne partie budynku. Ogólna zasada ich lokalizowania jest identyczna jak w instalacji wody użytkowej – zawory muszą umożliwiać odcięcie poszczególnych toalet oraz pionów.
- Zasady stosowania podpór przesuwnych w postaci obejm nie zmieniają się w porównaniu do kanalizacji grawitacyjnej. Same podpory przesuwne są jednak niewystarczające, ze względu na prędkość transportu ścieków mogącą osiągać nawet 10 m/s. Uderzenie z tą prędkością porcji osadów przy zmianie kierunku, w połączeniu ze stosowanym powszechnie w tej instalacji połączeniem kielichowym poszczególnych kształtek i rur, prowadzi do kinetycznego rozłączenia się elementów rurociągu. Aby uniknąć tego problemu, przy każdej zmianie kierunku należy wzmocnić łączenie zaciskiem stawowym (*joint clamp*) (Rys. 7).



Rys 7. Wzmocnienie rurociągu przy zmianie kierunku [5]

Fig 7. Reinforcement of the pipeline when changing direction [5]

- Współcześnie wykorzystywany generator podciśnienia to pompa śrubowa z wbudowanym przy króćcu ssawnym rozdrabniaczem. Pompa, poza rozdrabnianiem, spełnia jeszcze dwie funkcje: transportuje nadciśnieniowo ścieki bytowe do przyłącza kanalizacyjnego oraz generuje podciśnienie robocze, dzięki liniowemu montażowi w instalacji (Rys. 8). Montaż zbiornika próżniowego nie jest potrzebny w tym rozwiązaniu, ze względu na przejęcie jego funkcji przez cały zład instalacji. Warty uwagi jest różnica w stosunku do tradycyjnej pompy próżniowej współpracującej ze zbiornikiem próżniowym. Praca nowoczesnej pompy wykonywana jest na czynniku roboczym jakim jest ciecz. Jako, że ciecz uszczelnia komorę pompy, łopatki nie muszą już szczelnie o nią ocierać oraz nie muszą być smarowane, co ułatwia eksploatację urządzenia [6]. W związku ze zmniejszeniem zajmowanej przestrzeni przez pompę zalecane jest używanie zestawu pompowego złożonego więcej niż z jednego urządzenia, co zwiększa bezawaryjność układu.



Rys 8. Schemat instalacji pompy Vacuumator [6]

Fig 8. Vacuumator pump installation diagram [6]

Dokonano zestawienia najważniejszych różnic między instalacją kanalizacyjną podciśnieniową a grawitacyjną (tab. 2). Warto podkreślić dwie kluczowe różnice. Kanalizacja podciśnieniowa zajmuje znacznie mniej miejsca ze względu na mniejsze średnice przewodów, a także brak konieczności stosowania pionów wentylacyjnych. Drugą różnicą jest znaczna oszczędność wody, co przekłada się na możliwość uzyskania wyższej klasy w trakcie procesu certyfikacji budynku.

Tabela 2. Zestawienie różnic między instalacją kanalizacyjną podciśnieniową oraz grawitacyjną [14]**Table 2.** Summary of the differences between vacuum and gravity sewer systems [14]

Porównywana własność	Kanalizacja podciśnieniowa	Kanalizacja grawitacyjna
Prędkość przepływu	8-10 m/s	0,7-1,5 m/s
Średnica przewodów	DN 40 - 90	DN 40 - 160
Wymagany spadek	1% (z możliwością odcinkowego prowadzenia przeciwnie do grawitacji)	2%
Ciśnienie robocze	0,35 – 0,55 bar	1 bar
Zużycie wody na spłukanie	0,7 l	5 l
Konstrukcja płuczki ustępowej	Zintegrowana z zaworem opróżniającym	Standardowa
Maksymalna odległość płuczki ustępowej od pionu	Ograniczona jedynie mocą pompy	1 m
Sposób łączenia rur	Kielichowe z dodatkowymi obejmami wzmacniającymi	Kielichowe
Sposób wentylacji	Układ zamknięty, bez wentylacji	Dodatkowe piony wentylacyjne

6. Podsumowanie i wnioski

Europejskiemu prawodawstwu brakuje aktualnych oraz wyczerpujących dokumentów na temat instalacji kanalizacji podciśnieniowej. Polskie rozporządzenie o Warunkach Technicznych [11] nie wspomina ani słowem o tej technologii. Obowiązująca w Polsce norma PN-EN 12109 [10] pomimo iż zawiera informacje o tej technologii, to są to informacje uogólnione oraz przestarzałe. W chwili obecnej zastosowanie wymagań wspomnianych norm nie umożliwia zaprojektowania instalacji kanalizacji podciśnieniowej z maksymalną efektywnością, możliwą dzięki postępowi technologicznemu z ostatnich 25 lat.

Brak prawodawstwa na rynku europejskim powoduje niedobór specjalistów w dziedzinie kanalizacji sanitarnej podciśnieniowej. Prowadzi to do sytuacji, w której projektanci zmuszeni są do korzystania z usług specjalistycznych firm zewnętrznych, autorów technologii, o czym świadczą stosowne adnotacje w projektach technicznych budynków [14].

Nowatorskość technologii kanalizacji podciśnieniowej powoduje brak jednolitych wytycznych projektowych, co może prowadzić do utrudnienia jej wykorzystywania. Z przeglądu literatury wynika, jakoby najrozsądniejszym byłoby tymczasowe przyjęcie następujących wytycznych normowych na rynku europejskim:

- Istniejąca europejska EN 12109 – podejście systemowe do problematyki efektywności energetycznej oraz bezpieczeństwa biologicznego.
- Nowozelandzka AS/NZS 3500.2 – wymagania dla projektantów instalacji na temat projektowanej prędkości, spadków, stosowanych ciśnień.

- Australijska SA TS 100 – procedury przeprowadzania testów odbiorczych instalacji.
- Amerykańska CSA B45.13-19 – wytyczne na temat stosowanych materiałów, ich niezawodności oraz sposobu eksploatacji działającej instalacji.

Dotychczasowe stosowanie instalacji kanalizacji podciśnieniowej niemal wyłącznie w środkach transportu powoduje brak badań nad wykorzystaniem tej technologii w skali makro w dużych budynkach. Brak danych z takich budynków zmusza producentów jedynie do ekstrapolacji wyników z małych instalacji do estymacji kosztów eksploatacji dużych instalacji, które niekoniecznie muszą się potwierdzić. Mniejsze zużycie wody na spłukanie jest punktem niezmiennym od skali instalacji i to właśnie ta właściwość skłania pierwszych inwestorów do wyboru kanalizacji podciśnieniowej w celu uzyskania wyższych klas certyfikatów efektywności energetycznej. Warto zauważyć, że zestawy pompowe kanalizacji podciśnieniowej zużywają energię, która nie jest uwzględniana choćby w certyfikacji BREEAM. Dodatkowo, mniejsza ilość wody potrzebnej do spłukania, przekłada się na mniejszą ilość energii zużytej przez zestaw hydroforowy na dostarczenie wody użytkowej do toalet. Patrząc szerzej, zastosowanie instalacji kanalizacji podciśnieniowej wpływa też na sieć miejską, zmniejszając natężenie przepływu do oczyszczalni ścieków, a także ilość wody tłocznej z miejskich stacji uzdatniania wody.

Następnym nieprzewidzianym problemem dla instalacji kanalizacji podciśnieniowej jest twardość wody wodociągowej. Dotychczasowe stosowanie tej technologii na statkach oraz domkach jedno- i wielorodzinnych w Skandynawii wystawiało ją na działanie jedynie wody o niskiej zawartości wapnia i magnezu. Zawory opróżniające dostarczają wodę kanalikami mniejszymi niż DN10, co przy kontakcie z przeważnie twardą wodą pobieraną z ujęć powierzchniowych w Polsce może doprowadzić do szybkiego ich zakamienienia. W efekcie może to skutkować zmniejszoną żywotnością systemu i częstymi pracami serwisowymi. Prowadzi to do przypuszczenia, iż to zawór opróżniający jest najbardziej newralgicznym elementem instalacji podciśnieniowej, co by było odwzorowaniem wniosków z rozprawy doktorskiej [2] (najbardziej awaryjnym elementem sieci zewnętrznych są studzienki przyłączeniowe z zaworem opróżniającym).

Aktualne wyniki badań nad przepływem trójfazowym w instalacjach wewnętrznych trwają w laboratoriach producentów systemów. Niestety, żadna z firm nie opublikowała dokładnych informacji na ten temat. Stworzenie platformy do wymiany wiedzy open source między firmami oraz instytucjami badawczymi przyspieszyłoby stworzenie nieempirycznych wytycznych do projektowania instalacji podciśnieniowych.

Podsumowując, kanalizacja podciśnieniowa w budynkach to technologia nowatorska, mająca liczne przewagi nad jej grawitacyjnym odpowiednikiem. Stawia jednak ona dopiero pierwsze kroki na rynku europejskim. Brak ujednoliconego prawodawstwa oraz przykładów działających, dużych budynków w tej technologii sugeruje traktowanie jej jako prototypu z dużym potencjałem, który należy obserwować w przyszłości.

7. Literatura

- [1] Liljendahl, J. (1966). *Method of hydro-pneumatic conveying system and apparatus*, United States Patent Office.
- [2] Miszta-Kruk, K. (2006). *Analiza niezawodności kanalizacji podciśnieniowej na podstawie badań eksploatacyjnych wybranych systemów*, Rozprawa doktorska. Politechnika Warszawska.
- [3] Piętka, J. (2017). *Kanalizacja podciśnieniowa jako rozwiązanie systemów kanalizacji na terenach zagrożonych powodziami oraz o trudnych warunkach gruntowo-wodnych*. Przegląd budowlany 88(9)
- [4] Jets Vacuum AS. (2022). Instruction Manual No.054100970.
- [5] Jets Vacuum AS. (2018). Piping Guide. Vacuum Piping Guide, Building
- [6] Jets Vacuum AS. (2007). Vacuum theory & background
- [7] AS/NZS 3500.2. (2017). Plumbing and drainage Sanitary plumbing and drainage. Sai global.
- [8] CSA B45.13:19/IAPMO Z1700-2019. (2019) Vacuum waste-collection systems. Standards council of Canada.
- [9] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2024/1275 z dnia 24 kwietnia 2024 r. w sprawie charakterystyki energetycznej budynków
- [10] PN-EN 12109:2003. (1999). Wewnętrzne systemy kanalizacji podciśnieniowej. Europejski Komitet Normalizacyjny.
- [11] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, Dz.U.2024 poz.726
- [12] SA TS 100:2018. (2018). Technical Specification Vacuum WC pans, vacuum urinals and interface valves intended for use with vacuum drainage systems and designs. Sai global.
- [13] Błażejowski, R. & Matz, R. (2026). *Hydraulics of vacuum sewerage system*. CRC Press.
- [14] Jakubowski, D. (2026.) *Analiza porównawcza instalacji kanalizacji sanitarnej podciśnieniowej i grawitacyjnej na przykładzie inwestycji The Bridge w Warszawie*. Praca dyplomowa magisterska. Politechnika Warszawska.

ŚWIATOWY KONGRES ABSOLWENTÓW POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ

16-17 października 2026

$\int_{1945}^{\infty} \text{Alumni PWR}(t) dt$

Alumni PWR
Stowarzyszenie Absolwentów Politechniki Wrocławskiej

pwr.edu.pl

Politechnika Wrocławska

The role of pumped-storage hydropower plants as large-scale electrical energy storage in the power system

Rola elektrowni szczytowo-pompowych jako wielkoskalowych magazynów energii elektrycznej w systemie elektroenergetycznym

Agnieszka Kuskowska¹, Aleksandra Goczyńska², Kacper Bareja², Jakub Kitta¹, Waldemar Kamrat^{1*} 

¹ Faculty of Electrical and Control Engineering, Gdańsk University of Technology

² Faculty of Management and Economics, Gdańsk University of Technology

*Kontakt / Correspondence: waldemar.kamrat@pg.edu.pl

Abstract:

The development of large-scale energy storage solutions is necessitated by the increasing integration of intermittent renewable energy sources into the Polish Power System to maintain system stability and flexibility. In this paper, the strategic role of pumped-storage hydropower plants (PSHPs) as critical electrical energy buffers is analyzed, with a focus placed on the specific case study of the Młoty PSHP project. The grid stability is significantly enhanced by the implementation of the Młoty PSHP. A comparative analysis against alternative storage technologies is also presented, through which the Młoty project's advantages as a large-capacity, long-duration storage asset are justified.

Keywords: electric power system, energy storage, power system stability, pumped-storage hydropower plants, renewable energy integration

Streszczenie:

Rozwój rozwiązań magazynowania energii na dużą skalę jest konieczny ze względu na rosnącą integrację odnawialnych źródeł energii o zmiennej charakterystyce pracy z Krajowym Systemem Elektroenergetycznym (KSE) w celu utrzymania stabilności i elastyczności systemu. W niniejszym artykule analizowana jest strategiczna rola elektrowni szczytowo-pompowych (PSHP) jako krytycznych buforów energii elektrycznej, ze szczególnym uwzględnieniem studium przypadku projektu PSHP Młoty. Wdrożenie PSHP Młoty znacząco poprawia stabilność sieci. Przedstawiono analizę porównawczą z alternatywnymi technologiami magazynowania, w której uzasadniono zalety projektu Młoty jako zasobu magazynowego o dużej pojemności i długim czasie działania.

Słowa kluczowe: system elektroenergetyczny, magazynowanie energii, stabilność systemu

1. Introduction

The dynamic development of renewable energy sources in Poland, which resulted in a record capacity increase of 6.6 GW in 2023, presents new challenges for the operational stability of the National Power System (KSE) [1]. The decarbonization process, assuming the decommissioning of stable coal-fired units with a total capacity of approximately 5–7 GW by 2030 [2], leads to a reduction in the physical inertia of the system and increases its susceptibility to rapid frequency changes [3, 4]. In this context, pumped-storage hydropower plants (PSHPs) play a crucial role as a proven technology for system-scale storage. They can shift energy surpluses in time and provide critical system services, such as frequency and voltage regulation [5–7]. The aim of

this article is to analyze the strategic role of PSHPs in the Polish power system, with a specific focus on the Młoty PSHP project [8]. The basic principles of operation for such installations are presented [9], and a review of existing domestic and global solutions is conducted [10–12]. Through the analysis of technical parameters and balancing capabilities, it is demonstrated that investment in large-scale energy storage is an essential element of a secure energy transition in Poland [4, 8].

2. Background and PSHP principles

A pumped-storage hydropower plant (PSHP) is a facility that combines the functions of electrical energy storage with energy generation, enabling long-term energy storage in the form of

potential energy of water in an upper reservoir [9]. The operation of a PSHP is based on a cycle of pumping and discharging energy, which occurs in two phases: the pumping phase and the generation phase (charging and discharging of the storage, respectively). During the pumping phase (charging process), water is pumped from the lower reservoir to the upper reservoir. This process requires the consumption of electricity from the grid and its conversion into potential energy of water. In the discharging phase (energy generation), water falls from the upper reservoir through water turbines, generating electricity that is supplied to the system when power demand is highest [9].

Table 1. Design parameters of Młoty PSHP [4]
Tabela 1. Parametry projektowe ESP Młoty [4]

Object	Parameter	Value
Upper Reservoir	Dimensions	~1241 m (length) x 417 m (width) x 22 m (depth)
	Total capacity	~6 mln m³
Lower Reservoir	Dimensions	~2.5 km (length) x 400–800 m (width)
	Total capacity	~13 mln m³
	Useful capacity	~6,3 mln m³
	Additional function	Flood protection (reserve: 7)
Lower reservoir dam	Dimensions	20 m (height) x 240 m (length) [4]

Table 2. Key technical parameters of the Młoty PSHP [4]
Tabela 2. Parametry techniczne ESP Młoty [4]

Parameter	Characteristics / Value
Installed capacity	Dependent on specific project scale
Storage capacity	From several hundred MWh to over 100 GWh (dependent on reservoirs and head)
Water head	200–1000 m
Cycle efficiency	Average 75–80%
Discharge time	4–9 hours (extendable with natural inflows)
Number of cycles	Virtually unlimited (> 20,000 cycles)
Reaction time	Approx. 2 minutes to reach full power from standstill
Technical lifespan	Even over 80 years [10]

Table 3. Hydrological characteristics of the Bystrzyca Łomnicka river [13]
Tabela 3. Charakterystyka hydrologiczna rzeki Bystrzyca Łomnicka [13]

Hydrological parameter	Value
Maximum flow	25,8 m³/s
Minimum flow	0,02 m³/s
Average flow	0,66 m³/s
Catchment area	~40 km²

3. Review of existing solutions

Poland possesses three implemented pumped-storage hydropower plants, which form the basis for system-scale electricity storage:

- Żarnowiec Power Plant – located in Puck County, Pomeranian Voivodeship, constructed between 1973–1983 with an installed capacity of 716 MW and a storage capacity of 3.6 GWh (capable of continuous operation at full power for 5.5 hours) [10, 14].
- Porąbka-Żar Power Plant – in Międzybrodzie Bialskie, Silesian Voivodeship, constructed in 1979 with a capacity of 540 MW, utilizing Lake Międzybrodzkie as a lower reservoir and an artificial upper reservoir atop Mount Żar [14].
- Żydowo Power Plant – in the village of Żydowo, Koszalin County. The Żydowo PSHP was the first of its kind in Poland and is the only one located between two natural lakes. Terrain topography and geology enabled the formation of two lakes approximately 1.5 km apart with a level difference of 82 meters [11].

PSHPs play a key role in contemporary power systems by providing both energy storage and comprehensive system services necessary for grid stability maintenance. In an era of dynamic growth in variable renewable energy (wind, PV), PSHPs represent a system-scale storage technology capable of shifting energy from low-demand periods to peak load periods. Furthermore, these plants provide critical system services such as frequency regulation (both primary and secondary), voltage control, and provision of reserve power capacities within minutes or seconds of activation [5, 6, 7, 15]. However, the development of new PSHPs faces numerous technical, geographical, and regulatory limitations. A fundamental constraint is the requirement for very specific topographical and geological conditions – the plant requires the existence or creation of two water reservoirs at significantly different elevations with an appropriate head, which limits potential locations to only a few percent of the land area. Additionally, new PSHP projects encounter significant regulatory and market obstacles – including complex environmental permit procedures and a lack of effective financial mechanisms in market structures to cover high capital expenditures [5, 7, 15].

4. Młoty Pumped-Storage Hydropower Plant – A Case Study

The Młoty PSHP project has over half a century of history – the first concepts were developed in the 1960s. The project's history is linked to many challenges, including changes in energy policy, environmental barriers, and social factors, which led to many years of investment stagnation [8]. Technical parameters place the Młoty PSHP among the leading European pumped-storage plants. The turbining capacity will reach 750 MW, while the pumping capacity will be 720 MW, with an energy capacity of 3.5 GWh and a planned technical head of 590 m [9]. The transition time from standstill to full generation is under 180 seconds, allowing for an immediate response to sudden drops in weather-dependent generation [9]. The round-trip efficiency (RTE), estimated at 77.3%, positions the project at the level

of European leaders [9]. Planned operational functions include: grid frequency regulation, reactive power compensation, and absorption of RES surpluses (especially in afternoon hours when PV generation peaks). Additionally, the plant has black start capability, enabling activation without power from the KSE [9].

Table 4. Comparison of selected PSHPs worldwide
Tabela 4. Porównanie wybranych ESP

Plant name and location	Power, MW	Capacity, MWh	Characteristics
Fengning, China	3 600	40 000	Largest in the world; key for stabilizing the Chinese grid [17, 16]
Ludington, USA	2 172	19 548	Commissioned in 1973; supports grid with nuclear plants [18]
Okutataragi, Japan	1 932	15 546	Important for balancing an island power system [12]
Dinorwig, UK	1 728	9 100	One of the fastest-reacting units in Europe [19]
Entracque, Italy	1 184	17 040	Alpine installation supporting regional grid stability [20]
Goldisthal, Germany	1 060	8 480	Represents German expertise in pumping technology [21]

5. Analysis of PSHP system balancing capability

The transformation of the National Power System (KSE) towards non-synchronous sources creates new, previously unseen challenges for grid stability [4, 22]. According to generating capacity of 750 MW and a pumping capacity of 720 MW, takes on key importance as an element supporting power system stability during the energy transition [4, 9]. Through the utilization of heavy rotating masses in hydro-generators, the facility provides natural mechanical inertia that photovoltaic and wind farms lack [4]. The plant can function as a synchronous compensator, allowing for precise reactive power regulation and voltage stabilization in transmission grid nodes in southern Poland [9, 23].

Selected technical and operational indicators of the Młoty project: Storage capacity: The project assumes an energy capacity of 3.5 GWh, which allows for approx. 4.7 hours of operation at full generating capacity [9]. Regulation dynamics: The transition time from standstill to full generation is under 180 seconds, enabling an immediate response to sudden drops in weather-dependent generation [4, 9]. Curtailment mitigation: Non-market RES generation limitations amounted to over 70 GWh in 2023 [1/S25]. Młoty PSHP enables the absorption of these surpluses during midday hours and their return to the system during the evening peak, which is essential for daily balancing [4, 24]. The Młoty project can provide physical stabilization of grid parameters by supplying mechanical inertia lacking in renewable sources. The technical parameters of the facility allow for rapid reaction to frequency fluctuations and effective management of RES energy surpluses. Consequently, this investment serves as a technical safeguard for the system PSE S.A. data, a record capacity increase in renewable energy sources of 6.6 GW (approx. 30% y/y) occur-

red in 2023, bringing the total installed RES capacity to 28.3 GW [1]. Simultaneously, Poland's decarbonization process assumes the decommissioning of stable 200 MW class coal- fired units, whose capacity in the system is expected to fall by approx. 5–7 GW by 2030, significantly lowering the system's physical inertia and affecting resource adequacy assessments [2, 3].

This phenomenon increases susceptibility to rapid frequency changes, measured by the Rate of Change of Frequency (RoCoF) index [4]:

RoCoF = df / dt (1)

The RoCoF index (1), which determines the rate of grid frequency changes (df) over time (dt), serves as a measure of power system stability; its limitation depends directly on the level of inertia provided by the rotating masses of generating units, preventing sudden parameter fluctuations and protecting the grid against cascading stability loss [4, 8]. In this context, the Młoty PSHP project, with a against the effects of coal-fired unit decommissioning, combining regulatory functions with large-scale energy storage.

Round-Trip Efficiency (RTE): The cycle efficiency index for this investment was calculated at 77.3% [23]. This index is calculated as the ratio of electricity supplied to the system during the turbin- ing phase to the total electricity taken from the grid during the process of pumping water to the upper reservoir, as expressed by the following relationship:

RTE = (Egenerated / Epumped) · 100% (2)

where:
RTE – round-trip efficiency expressed as a percentage, %
Egenerated – the amount of electricity generated by turbo-genera- tor sets and supplied to the grid in the generation phase, MWh
Epumped – the amount of electricity taken from the power sys- tem to fill the upper reservoir, MWh [9, 23].

6. Comparison with alternative technologies

An increase in the share of pumped-storage hydropower plants in the national energy mix is considered one of the key directions for improving the stability and flexibility of the National Power System (KSE) under conditions of a growing share of wind and photovoltaic generation [25]. The planned Młoty Pumped-Stora- ge Hydropower Plant is considered a large-scale energy storage facility with a power capacity of approximately 750 MW and an energy capacity of several GWh, capable of daily balancing of RES energy surpluses and rapid regulation of active power and frequ- ency [4]. Compared to other storage solutions, PSHPs enable sys- tem- scale energy accumulation with multi-decadal operational durability [25, 26].

Pumped-Storage Hydropower Plants (PSHP). Pumped-sto- rage hydropower plants represent a mature technology for lar- ge-scale energy storage, in which energy is accumulated in the form of the potential energy of water. Very high power levels and high cycle efficiency in the range of 75–80% are achieved, whi- le simultaneously maintaining very long operational durability and negligible capacity degradation, which predisposes them

for system operation [4, 26, 27].

Battery Energy Storage (Li-ion). Battery storage is characterized by high cycle efficiency and very good regulatory dynamics, which favors short- term applications. However, their utilization at a system scale is limited by relatively short operational durability and progressive capacity degradation over time, leading to an increase in unit energy storage costs [25, 28].

CAES (Compressed Air Energy Storage). The CAES technology is based on storing energy in the form of compressed air in underground geological structures. Power levels in the range of hundreds of MW are achieved; however, it is characterized by lower cycle efficiency and significant dependence on the availability of suitable geological conditions [28, 29].

Energy storage in the form of hydrogen (H₂). Hydrogen storage is based on the conversion of electrical energy into chemical form and its subsequent recovery. Although long-term energy storage is enabled by this technology, it is characterized by low overall conversion chain efficiency and durability determined by the lifespan of electrolyzers and fuel cells [30].

In the following table, selected energy storage technologies are compared regarding, among others, technical and economic parameters, including power scale, cycle efficiency, operational durability, and LCOES cost indicators, to assess their suitability for system operation with a high share of renewable sources [4, 26–30].

Table 5. Comparison of selected technologies [4]
Tabela 5. Porównanie wybranych technologii [4]

Criterion	PSHP	Battery (Li-ion)	CAES	Hydrogen
Power scale	hundreds of MW – GW	kW – hundreds of MW	hundreds of MW	MW–GW
Energy capacity	GWh	MWh – GWh	GWh	GWh – TWh
Storage time	hours – days	minutes – hours	hours – days	days – weeks
Cycle efficiency	75–80%	85–95%	45–70%	30–40%
Operational durability, year	50–100	8–15	>30	10–40
Capacity degradation	negligible	significant over time	negligible	negligible
CAPEX	high	moderate	high	very high
LCOE, €/MWh	100– 200	150–300	120–250	>300
Cost sensitivity	low	high	medium	very high
System utility	very high	local/regional	conditional	long-term

The advantage of the planned Młoty Pumped-Storage Hydropower Plant as a large-scale storage facility results from the combination of high power and energy capacity with high cycle efficiency and very long operational durability, which corresponds to the requirements of the National Power System under conditions of a growing share of wind and photovoltaic sources [4, 26, 27].

Pumped-storage hydropower plants enable energy storage in a daily horizon and the provision of system services, such as rapid power regulation, reserve maintenance, and frequency stabilization, which significantly increases system operational flexibility [4, 8, 31].

Compared to battery storage, the advantage of PSHP is represented by the lack of significant capacity degradation over time and a multi-decadal operation period, which translates into more favorable cost indicators over the entire life cycle at a large scale of stored energy [6, 25].

Relative to CAES technology, the alternative remains limited by strong dependence on geological conditions and typically lower cycle efficiency, whereas, compared to hydrogen storage, the fundamental advantage of PSHP is a significantly higher "energy-to-energy" conversion efficiency and better suitability for regulatory operation [29, 30].

Case analyses of Młoty PSHP further indicate that this project aligns with national system conditions and can perform the role of a key energy storage facility in the south-western part of the KSE [9].

7. Barriers and development perspectives of PSHP for młoty

The implementation of the investment in Młoty encounters a range of structural barriers that determine the project's schedule and risk.

Environmental and hydrological barriers. The greatest technical and legal challenge is the necessity to move approx. 6 million m³ of earth and deep interference in the Bystrzyca riverbed [4]. Location in an area of high environmental value necessitates obtaining a derogation from Article 4 (7) of the Water Framework Directive (WFD), which is a complicated process requiring proof of overriding public interest while demonstrating a lack of alternative solutions with less impact on water ecosystems [32, 33].

Economic and financial barriers. The estimated capital expenditure (CAPEX) at the level of 1,332.5 million EUR represents a significant barrier to entry [9]. Unlike battery technologies, which are characterized by lower initial costs, PSHP requires long-term financial support mechanisms. The main barrier is the lack of a stable capacity market model or contracts for difference that would account for the facility's 80-year lifecycle and ensure a return on investment under variable energy price conditions [9].

Social barriers. The long history of the project, dating back to the 1970s, led to a state of so-called "investment freeze" for the village of Młoty. The necessity for resident relocation and the change in the region's character from tourist-oriented to industrial generate a risk of social opposition, requiring the implementation of a transparent compensation policy and broad social consultations to avoid administrative blocks [4, 8].

8. Development perspectives and importance for transformation

Perspectives for the Młoty PSHP project stem directly from the assumptions of the "Energy Policy of Poland until 2040" and are crucial for the success of economic decarbonization [3]:

Synergy with nuclear power: Młoty PSHP will serve as an indispensable buffer for the planned first Polish nuclear power plant. The capability for energy absorption in the so-called night valley will allow the reactor to operate at constant, optimal thermal power, minimizing technical stress and increasing the economic efficiency of the entire nuclear system [4].

Offshore integration and grid development: In the face of offshore wind farm development in the north of the country, Młoty PSHP (located in the south) will enable the management of power surpluses transmitted via ultra-high voltage highways. Thanks to the planned 400 kV network expansion on the north-south axis, this facility will allow for wind energy storage during low-demand periods, reducing the necessity for offshore farm curtailment [34].

Sovereignty and system security: The facility in Młoty offers a unique capability for black start on a national scale. In the event of a system-wide blackout, the plant can provide voltage to the grid and initiate the system restoration process, making it a cornerstone of Poland's energy security as stable coal units are decommissioned [4, 22].

9. Conclusion

The conducted analysis confirms the hypothesis that the implementation of the 750 MW Młoty PSHP project constitutes a foundation for Poland's energy security during the transformation [4, 9]. As a facility equipped with heavy rotating masses, this power plant provides necessary mechanical inertia, directly improving system stability and protecting it from cascading parameter loss [4, 23].

Key conclusions drawn from the project analysis include:

Balancing and curtailment mitigation: Młoty PSHP will enable effective management of RES energy surpluses, reducing the phenomenon of curtailment, which exceeded 70 GWh in 2023 [1, 4, 24].

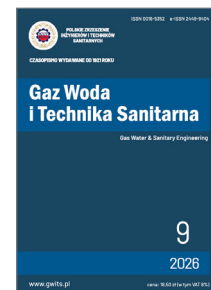
Technological synergy: The facility will serve as a necessary buffer for the planned first Polish nuclear power plant [4] and will enable the integration of energy from offshore wind farms [27].

System security: Thanks to its unique black start capability, the plant constitutes a critical resource in the process of potential system restoration after a blackout [4, 9, 22].

Despite significant barriers, including high capital expenditures (CAPEX) of 1,332.5 million EUR [9], complicated environmental procedures related to the Water Framework Directive [32, 33], and social challenges arising from the long-term "freeze" of Młoty village [4, 8], this investment is a strategically important resource. Results of the study clearly indicate that without large-scale energy storage with the characteristics of Młoty PSHP, a successful and safe energy transition in Poland will be difficult to achieve [8, 35].

10. References

- [1] PSE S.A. (2023). Raport 2023 KSE: Zestawienie danych ilościowych dotyczących funkcjonowania KSE w 2023 roku
- [2] PSE S.A. (2024). Ocena wystarczalności zasobów na poziomie krajowym 2025–2040
- [3] Ministerstwo Klimatu i Środowiska. (2021). *Polityka energetyczna Polski do 2040 r.*
- [4] Zespół Ekspertski do spraw Budowy Elektrowni Szczytowo-Pompowych. (2022). *Rola elektrowni szczytowo-pompowych w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym: Uwarunkowania i kierunki rozwoju.*
- [5] Argonne National Laboratory. (2014). *Pumped storage hydropower*. <https://publications.anl.gov/anlpubs/2014/12/106380.pdf>
- [6] EERA. (2012). *Factsheet: Pumped-hydro energy storage*. https://www.eera-energystorage.eu/component/attachments/?task=download&id=683%3AAEERA_Factsheet_Pumped-Hydro-Energy-Storage
- [7] National Renewable Energy Laboratory. (2013). *Pumped-storage hydropower*. <https://docs.nrel.gov/docs/fy13osti/58655.pdf>
- [8] Lewandowski, M., Lewandowski, S., Steller, J., Trojanowska, K. (2023). Uwarunkowania, potrzeby i kierunki rozwoju elektrowni szczytowo-pompowych w Polsce. *Energetyka*, (7), 413–424.
- [9] Kulpa, J., Olczak, P., Surma, T., Matuszewska, B. (2024). Pumped storage hydropower as a part of energy storage systems in Poland: Młoty case study. *Energies*, 17(8), 1830. <https://doi.org/10.3390/en17081830>
- [10] Tokarz, J., & Hryckiewicz, L. (2003). Elektrownia Wodna Żarnowiec-historia i dzień dzisiejszy. *Energetyka*, 509–515.
- [11] Energa Wytwarzanie. (b.d.). Wodny magazyn energii ESP Żydowo. <https://energa-wytwarzanie.pl/nasze-zrodla/magazyny-enerгии/24498/esp-zydowo>
- [12] Japan Nuclear. (2010). 2003–2004 electricity review in Japan. The Federation of Electric Companies in Japan.
- [13] Kowalski, E., Rotkegel, M., Stałęga, S. (2008). Uwarunkowania geologiczno-inżynierskie wznawienia budowy elektrowni szczytowo-pompowej koło Bystrzycy Kłodzkiej. *Górnictwo i Geoinżynieria*, 32, 213–226.
- [14] PGE Energa Odnawialna. (b.d.). Żar Hydroelectric Power Plant. <https://pgeeo.pl/en/our-generation-assets/hydroelectric-power-plants/zar>
- [15] Majewski, W. (2013). The development of hydro power in Poland. The most important hydro engineering facilities. *Acta Energetica*, 3(16). <https://doi.org/10.12736/issn.2300-3022.2013303>
- [16] National Hydropower Association. (2012). Pumped storage. https://www.hydro.org/wp-content/uploads/2017/08/NHA_PumpedStorage_071212b1.pdf
- [17] Shahan, Z. (4.01.2022). Largest pumped-hydro facility in world turns on in China. *CleanTechnica*. <https://cleantechnica.com/2022/01/04/largest-pumped-hydro-facility-in-world-turns-on-in-china/>
- [18] State Grid Corporation of China. (2013). World's largest pumped storage power station with 3.6 GW installed capacity began construction in Fengning. *Xinhua Press Agency* 2013
- [19] PRNewswire. (2013). Ludington pumped storage plant recognized for 40 years of service to customers and Michigan. *Power Magazine UK* 2013
- [20] Stuart, N. (2012). First Hydro Company. Dinorwig Power Station. <http://www.fhc.co.uk>
- [21] Chudy, Ł. (2011). Elektrownia Szczytowo-Pompowa Goldisthal w Niemczech. *Gospodarka Wodna*, 329–331.
- [22] Wagner, L. (2012). Overview of energy storage methods. *MORA Associates* 2012
- [23] Szczerbowski, R. (2024). Bezpieczeństwo energetyczne a rola wielkoskalowych magazynów energii. *Rynek Energii*, 156(1), 22–30.
- [24] Nowak, J. A. (2022). Układ regulacji mocy biernej w elektrowniach wodnych o zmiennej prędkości obrotowej (Nr 234567). *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*.
- [25] International Renewable Energy Agency. (2023). The changing role of hydropower: Challenges and opportunities. *IRENA*.
- [26] Zakeri, B., Syri, S. (2015). Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 569–596. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.011>
- [27] Blakers, A., Stocks, M., Lu, B., Cheng, C. (2021). Pumped hydro energy storage: A review. *Progress in Energy*, 3(2). <https://doi.org/10.1088/2516-1083/abd9ea>
- [28] Zakeri, B., Syri, S. (2015). Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 569–596. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.011>
- [29] Crotagino, A. A., Mohmeyer, K.-U., Scharf, R. (2001). *Huntorf CAES: More than 20 years of successful operation*. SMRI Spring Meeting.
- [30] Staffell, I., Kendall, K., Kivimäki, J., et al. (2019). The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system. *Energy & Environmental Science*, 12(2), 463–491. <https://doi.org/10.1039/C8EE01157E>
- [31] National Renewable Energy Laboratory. (2023). Pumped storage hydropower: Benefits for grid reliability and integration of variable energy. *NREL*.
- [32] Kamrat, W. (2023). Development of the Polish energy sector through transformation and harmonization with the European energy and climate policy. *Gaz Woda i Technika Sanitarna*, 97(11), 2–11. <https://doi.org/10.15199/17.2023.11.1>
- [33] European Commission. (2020). Guidance document on the requirements for hydropower in relation to EU nature legislation. *European Union*.
- [34] PSE S.A. (2024, 15 marca). Komunikat Operatora Systemu Przesyłowego w sprawie konsultacji projektu Planu rozwoju w zakresie zaspokojenia obecnego i przyszłego zapotrzebowania na energię elektryczną na lata 2025–2034
- [35] PSE S.A. (b.d.). Komunikat Operatora Systemu Przesyłowego w sprawie konsultacji projektu planu rozwoju.



Analiza strat wody w sieci wodociągowej gminy Proszowice według wytycznych AWWA

Water loss analysis in the water supply network of the Proszowice Municipality according to AWWA guidelines

Łukasz Michalik^{1*} , Jarosław Bajer²

¹ Szkoła Doktorska – Inżynieria Środowiska, górnictwo i energetyka, Politechnika Krakowska

² Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Krakowska

* Kontakt / Correspondence: lukasz.michalik@doktorant.pk.edu.pl

Streszczenie:

Zasoby wodne Polski stają się w wyniku zmian klimatycznych coraz bardziej ograniczone. Powyższy fakt potęguje wyzwanie stojące przed przedsiębiorstwami wodociągowymi w Polsce, jakim jest staranie o poprawę nieefektywnego często rozprowadzania wody, wynikającego z istniejących nieszczelności sieci dystrybucyjnych. W zasadniczej części artykułu przedstawiono analizę strat wody w sieci wodociągowej gminy Proszowice w latach 2019–2024, przeprowadzoną przy pomocy programu „FWAS” w oparciu o wytyczne Amerykańskiego Stowarzyszenia Wodociągów AWWA (American Water Works Association). Wyniki wykazały zmienność strat wody oraz kluczowy wpływ ciśnienia w sieci, wpływającą na ich wielkość. Dokonano także oceny stanu technicznego proszowickiej sieci wodociągowej wg skali ocen proponowanej przez AWWA.

Słowa kluczowe: straty wody, sieć wodociągowa, AWWA, ciśnienie w sieci wodociągowej, monitoring sieci wodociągowej

Abstract:

As a result of climate change, Poland's water resources are becoming increasingly limited. This fact exacerbates the challenge faced by water utilities in Poland in their efforts to improve the often inefficient water distribution resulting from leaks in existing distribution networks. The main part of the article presents an analysis of water losses in the water supply network of the Proszowice municipality in the years 2019–2024, conducted using the "FWAS" software based on guidelines from the American Water Works Association (AWWA). The results demonstrated the variability of water losses and the crucial impact of network pressure on their volume. Additionally, an assessment of the technical condition of the Proszowice water supply network was carried out according to the rating scale proposed by the AWWA.

Keywords: water losses, water supply network, AWWA, water network pressure, water supply network monitoring

1. Wstęp

Efektywna pod względem ograniczania strat wody eksploatacja sieci dystrybucyjnych przez przedsiębiorstwa wodociągowe wiąże się z koniecznością ciągłego gromadzenia przez nie danych, których analiza w zależności od ich kompletności i dokładności, umożliwia wyznaczenie odpowiednich wskaźników charakteryzujących pod względem szczelności stan techniczny tych ważnych obiektów składowych systemów zaopatrzenia w wodę. Analiza taka pozwala również na wyciągnięcie stosownych wniosków i opracowanie odpowiednich strategii wykonywania prac remontowych, prowadząc jednocześnie do ograniczenia

ponadnormatywnych strat wody. W polskiej branżowej literaturze naukowo-technicznej można znaleźć szereg prac poruszających tę tematykę, ukazujących skalę problemu, jego skutki i sposoby ograniczania, a także potrzebę gromadzenia odpowiednich danych eksploatacyjnych [1–7]. W niniejszym artykule przedstawiono analizę wskaźników dotyczących głównie strat wody (wśród nich najważniejszego – Infrastrukturalnego Indeksu Wycieków *ILI*) dla sieci wodociągowej gminy Proszowice zarządzanej przez Wodociągi Proszowickie Sp. z o.o. Analizę przeprowadzono w oparciu o dane eksploatacyjne z lat 2019–2024 udostępnione przez Kierownictwo Przedsiębiorstwa i przetworzone przy pomocy programu „FWAS” (Free Water Audit Software)

opracowanego przez Amerykańskie Stowarzyszenie Wodociągów AWWA (American Water Works Association). Artykuł pokazuje również jak można oceniać straty wody w sieciach dystrybucyjnych zgodnie z wytycznymi amerykańskimi, co stanowi wartościowe dopełnienie tej tematyki, gdyż dotychczas w tym zakresie bardziej znane i powszechnie stosowane w Polsce są wytyczne europejskiego Międzynarodowego Stowarzyszenia Wodnego IWA (International Water Association).

2. Charakterystyka obiektu badań

Obiektem badań jest sieć wodociągowa gminy Proszowice (woj. małopolskie). Gmina ta ma charakter miejsko-wiejski, a siedzibą gminy jest miasto o tej samej nazwie – Proszowice (rys. 1). Współczesny system dystrybucji wody w jej obszarze opiera się na rozwiązaniach z drugiej połowy XX wieku. Obecnie za ujmowanie, uzdatnianie oraz dystrybucję wody odpowiada przedsiębiorstwo Wodociągi Proszowickie Sp. z o.o., które powstało w 2016 roku [8]. Spółka przeprowadziła kompleksową modernizację i rozbudowę zakładu uzdatniania wody (ZUW), w którym aktualnie procesy technologiczne obejmują m.in.: koagulację, sedimentację na wielostrumieniowych pakietach lamelowych, filtrację na złożach węgla aktywnego oraz dezynfekcję lampami UV. Przepustowość maksymalna stacji wynosi ok. 2880 m³/d [9]. W analizowanym okresie 2019–2024 liczba mieszkańców gminy Proszowice wykazywała trend spadkowy. Populacja zmniejszała się sukcesywnie od początku badanego okresu – od 16 187 osób w roku 2019 do 15 420 osób w 2024 roku, co pokazuje w sposób bardziej szczegółowy poniższa tabela (Tab. 1). Poza danymi o liczbie mieszkańców zawiera ona również długości sieci oraz liczbę przyłączy wodociągowych i hydrantów w podziale na tereny miejskie i wiejskie [10, 11].



Rys 1. Lokalizacja miasta Proszowice na mapie powiatowej województwa małopolskiego [12]

Fig 1. Location of the town of Proszowice on the county map of the Lesser Poland Voivodeship [12]

Tabela 1. Liczba mieszkańców gminy Proszowice w latach 2019–2024 wraz z podstawowymi danymi technicznymi analizowanej sieci wodociągowej [10, 11]
Table 1. Population of Proszowice Municipality, 2019–2024 along with basic technical data of the analyzed water supply network [10, 11]

Rok	Liczba miesz- kańców	Dł. sieci [km]	Hydranty [szt.]		Czynne przyłącza wodociągowe [szt.]	
			Tereny miejskie	Tereny wiejskie	Tereny miejskie	Tereny wiejskie
2019	16 187	219,4	1843	351	1132	2459
2020	15 863	219,4	1843	351	1141	2490
2021	15 800	219,4	1843	351	1146	2513
2022	15 657	219,4	1843	351	1153	2538
2023	15 528	219,4	1843	351	1155	2561
2024	15 420	219,4	1843	351	1157	2592

Powodem spadku liczby mieszkańców jest między innymi starzejące się społeczeństwo. Zjawisko to jest również efektem tzw. polaryzacji demograficznej, której przyczyną jest bliskość jednej z największych polskich aglomeracji jaką jest Kraków [13]. Zauważyć też można, że zarówno długość sieci wodociągowej jak i liczba hydrantów w analizowanym okresie pozostawała na stałym poziomie, ale jednocześnie następował stały wzrost liczby przyłączy wodociągowych, co skutkowało sukcesywnym dogęszczaniem infrastruktury.

Sieć dystrybucji wody w gminie Proszowice jest zasilana z ujęcia z pobliskiego cieku wodnego – rzeki Ścieklec. Ma ona charakter mieszany, w części miejskiej dominuje układ pierścieniowy, natomiast na terenach wiejskich układ promienisty. Teren gminy charakteryzuje się wielkościami niwelacji sięgającymi od ok. 200 do ok. 260 m n.p.m, przy czym miasto Proszowice położone jest na wysokości od ok. 200 do ok. 230 m n.p.m. Sieć wodociągowa na całej swojej długości jest klasyfikowana jako rozdzielcza.

3. Dane eksploatacyjne

Podstawą do opracowania niniejszego artykułu były dane udostępnione przez Wodociągi Proszowickie Sp. z o.o. Materiał badawczy obejmował, poza danymi zestawionymi już w tabeli 1, następujące wielkości z zakresu bilansu wody dla gminy Proszowice: ilość wody wtłoczonej do sieci wodociągowej, ilość wody dostarczonej do odbiorców, ilość wody pobranej na cele technologiczne oraz ilość wody sprzedanej hurtowo (tabela 2).

Tabela 2. Dane dotyczące bilansu wody w gminie Proszowice dla lat 2019–2024 [11]

Table 2. Water balance data in Proszowice Municipality for the years 2019–2024 [11]

Rok	Woda wtłoczona [tys. m ³]	Woda dost. do odb. [tys. m ³]	Woda na cele techn. [tys. m ³]	Woda eksport. [tys. m ³]
2019	763,6	491,3	25,7	8,5
2020	814,5	502,6	108	8,6
2021	741,0	485,7	90,2	8,9
2022	716,6	500,9	17,1	9,4
2023	767,4	482,4	17,6	9,6
2024	782,8	495,3	22,7	10,9

Dla pełnego obrazu warunków eksploatacyjnych sieci, w tabeli 3 zamieszczono dane dotyczące liczby awarii na proszowickiej sieci dystrybucji wody w każdym z lat badanego okresu, w rozbi-
ciu na tereny miejskie i wiejskie.

Tabela 3. Liczba awarii na sieci wodociągowej gminy Proszowice w latach 2019–2024 [11]
Table 3. Number of failures on the water supply network in Proszowice Municipality for the years 2019–2024 [11]

Rok	Obszary miejskie [szt.]	Obszary wiejskie [szt.]	Awarie łącznie [szt.]
2019	15	60	75
2020	13	61	74
2021	18	51	69
2022	2	27	29
2023	2	32	34
2024	2	41	43

Na ich podstawie można zauważyć wyraźny spadek liczby awarii w 2022 roku – szczególnie na terenach miejskich, gdzie w stosun-
ku do roku 2021 wyniósł on blisko 90%. Powyższe dane (tab. 2 i 3) stanowią materiał wyjściowy do przeprowadzenia oceny strat wo-
dy w sieci wodociągowej gminy Proszowice, w tym zgodnie z wy-
tycznymi AWWA.

4. Wstępna ocena wielkości strat wody w proszowickiej sieci wodociągowej

Zebrane dane umożliwiły przeprowadzenie ogólnego bilansu wody i obliczenie rzeczywistych wielkości strat wody w sieci jej dystrybucji za pomocą wzoru (1):

$$Ws = Wt - (Wd - Wtech - Wsp.) \tag{1}$$

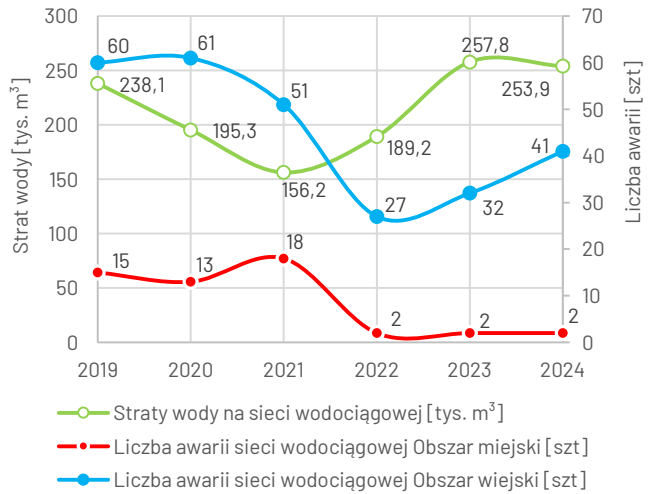
- gdzie:
- Ws – straty wody, tys. m³
 - Wt – woda wtłoczona do sieci wodociągowej, tys. m³
 - Wd – woda dostarczona do odbiorców końcowych, tys. m³
 - $Wtech$ – ilość wody przeznaczona na cele technologiczne przed-
siębiorstwa wodociągowego, tys. m³
 - Wsp – woda sprzedana przez przedsiębiorstwo wodociągo-
we hurtowo, tys. m³

W tabeli 4 przedstawiono wyniki tych obliczeń, a na rysunku 2 ilu-
strowano zestawienie liczby uszkodzeń proszowickiej sieci wodo-
ciągowej z wielkością występujących w niej strat wody w danym
roku badanego okresu.

Tabela 4. Zestawienie wyliczonych strat wody w sieci jej dystrybucji w gminie Proszowice w latach 2019–2024 [11]
Table 4. Summary of calculated water losses in the distribution network of the Proszowice Municipality for the years 2019–2024 [11]

Rok	Woda wtłoczona do sieci (Wt) [tys. m³]	Zużycie autoryzowane (Wd+Wtech+Wp) [tys. m³]	Straty wody (Ws) [tys. m³]
2019	763,6	525,5	238,1
2020	814,5	619,2	195,3
2021	741,0	584,8	156,2
2022	716,6	527,4	189,2
2023	767,4	509,6	257,8
2024	782,8	528,9	253,9

Wielkość strat wody w sieci wodociągowej jest ściśle powiązana z liczbą występujących na niej awarii. Zazwyczaj im ta liczba jest wyż-
sza, tym wielkość strat wody wykazuje tendencję wzrostową [14, 15].



Rys 2. Zestawienie ilości wody utraconej w proszowickiej sieci wodociągowej z liczbą jej awarii w danym roku, z ich podziałem na tereny miejskie i wiejskie (opracowanie własne)
Fig 2. Comparison of water loss volume in the Proszowice water supply network with the number of failures per year broken down into urban and rural areas (own study)

Z wykresu strat wody wyraźnie widoczne są skutki działań pod-
jętych przez Przedsiębiorstwo wodociągowe w Proszowicach w celu ograniczenia strat wody w sieci dystrybucyjnej. Szczególnie zauważalne jest to w latach 2019–2022, pod koniec któ-
rych sumaryczna liczba awarii spadła do poziomu 29. Na osobną uwagę zasługuje rok 2021, w którym straty wody wyniosły 156,2 tys. m³, co jest wartością najniższą w całym analizowanym okresie, podczas gdy w roku tym sumaryczna liczba awarii nale-
ży do jednej z najwyższych. W kolejnych latach, pomimo zmniejszonej liczby awarii na sieci dystrybucji wody, wielkość strat wody uległa wzrostowi. Sytuacja ta mogła wynikać najpewniej z awarii rurociągów o większych średnicach, znajdujących się w strefie podwyższonego ciśnienia dyspozycyjnego, tj. zlokalizowanych np. bliżej stacji pomp, względnie na niższych obszarach.

5. Metodyka badań strat wody wg AWWA

Przedstawione dane stanowią punkt wyjścia do analizy stanu technicznego sieci wodociągowej gminy Proszowice z punktu wi-
dzenia jej szczelności. W celu kompleksowej oceny jej funkcjonowania zastosowano metodykę sporządzania rocznego bilansu wody i obliczania charakterystycznych wskaźników rekomendowanych przez amerykańską instytucję AWWA, w tym oprogramowanie „FWAS” – AWWA Free Water Audit Software v6.0, które pozwala na przedstawienie sumarycznego wyniku i ocenę bilansu wodnego dla każdego roku. Na rys. 3 przedstawiono przykładowe kryteria wraz z pytaniami zadawanymi przez program dotyczącymi sposobu zbierania danych, stanowiące jednocześnie podstawę do oceny stopnia ich dokładności. Na wstępie warto nadmienić, iż w wyżej wymie-
nionym programie, każdej z wprowadzanych danych przypisuje się wskaźnik dokładności (miarę zaufania do ich dokładności) w skali od 1 do 10, przy czym wartości najniższe odpowiadają danym o naj-
mniejszej dokładności, a najwyższe o największej [16].

Interactive Data Grading Responses

Billed Unmetered Authorized Consumption (BUAC) - Data Grading Criteria		go to notes
Criteria Question	Select Best-Fit Answers to All Visible Questions	
buac.0 Was there any billed consumption on unmetered accounts in the audit year?	Yes	
buac.1 What portion of billed accounts are unmetered (% by number of accounts)?	5% or less	
buac.2 Methodology to quantify consumption for unmetered accounts?	Extrapolated from similar customer groups in the utility's metered population, but limited is sample sizes	Limiting
buac.3 How frequently is unmetered customer consumption estimated?	Monthly	
FINAL DATA GRADE FOR THIS AUDIT INPUT:		5

Rys 3. Przykład kryteriów dla „BUAC” wraz z oceną danych na poziomie „5”. Zrzut ekranu z oprogramowania FWAS (opracowanie własne)

Fig 3. Example of criteria for "BUAC" with a data grading score of „5”. Screenshot from the FWAS software (own study)

W związku z brakiem na proshowickiej sieci wodociągowej opomiarowania w systemie ciągłym oraz brakiem szczegółowych informacji dotyczących sposobu gromadzenia części danych, przyjęto wartości tego wskaźnika z przedziału 4–6. Oznacza to, że np. składowe bilansu wody przyjmą w tej metodzie nieco inne wartości niż pochodzące z danych eksploatacyjnych, zatem i wyniki strat wody będą różniły się od tych obliczonych w pkt. 4 (metodą IWA). W oprogramowaniu AWWA FWAS v6.0 wielkości i wskaźniki opisujące straty wody wyznaczane są na podstawie wzorów matematycznych (2–9) przedstawionych w kolejnym podrozdziale [16].

5.1. Wielkości i wskaźniki opisujące straty wody w programie AWWA FWAS v6.0

Objętość strat całkowitych. Aby obliczyć wielkość rocznych strat całkowitych V_c należy zastosować wzór (2).

$$V_c = V_r + V_p \quad (2)$$

gdzie:

- V_c – objętość strat całkowitych wody, tys. m³/rok
- V_r – objętość strat rzeczywistych, tys. m³/rok
- V_p – objętość strat pozornych, tys. m³/rok

Objętość strat pozornych. Jest to wielkość opisująca między innymi objętości strat wody wynikłych z nieautoryzowanej konsumpcji, błędów pomiaru oraz odczytów z wodomierzy jak i błędów wynikłych w wyniku przetwarzania danych. Określa się je z zależności (3).

$$V_p = V_{nk} + V_{bp} + V_{pd} \quad (3)$$

gdzie:

- V_p – objętość strat pozornych, tys. m³/rok
- V_{nk} – objętość nieautoryzowanej konsumpcji, tys. m³/rok
- V_{bp} – objętość wynikająca z błędów pomiarowych, tys. m³/rok
- V_{pd} – objętość wynikająca z błędów generowanych niewłaściwym przetwarzaniem danych, tys. m³/rok

Objętość strat rzeczywistych. Ta wielkość obejmuje straty rzeczywiste, które stanowią największą część całkowitych strat wody. Są one możliwe do określenia wg zależności (4).

$$V_r = V_{str} + V_{zb} + V_{pw} \quad (4)$$

gdzie:

- V_r – objętość strat rzeczywistych, tys. m³/rok
- V_{str} – objętość wody, która została utracona w wyniku strat na sieci przesyłowej i rozdzielczej, tys. m³/rok
- V_{zb} – objętość wody utraconej w wyniku strat na zbiornikach wodociągowych, tys. m³/rok
- V_{pw} – objętość strat wody utraconej na przyłączach wodociągowych, tys. m³/rok

Wskaźnik objętości wody nieprzynoszącej dochodu. Wskaźnik ten opisuje ilość wody jaka nie została sprzedana przez przedsiębiorstwo wodociągowe. Jest on wyrażony formułą (5) w wartości procentowej, dzięki czemu daje możliwość porównania istniejących sieci wodociągowych między sobą.

$$NRWB = \frac{(V_d - V_s) \cdot 100 \%}{V_d} \quad (5)$$

gdzie:

- $NRWB$ – wskaźnik objętości wody nieprzynoszącej dochodu, %
- V_d – objętość wody dostarczonej do sieci wodociągowej, tys. m³/rok
- V_s – objętość wody sprzedanej odbiorcom, tys. m³/rok

Wskaźnik jednostkowych strat całkowitych. Wskaźnik jednostkowych strat całkowitych wody jest wskaźnikiem mówiącym o wielkości strat wody przypadającej na daną liczbę przyłączy wodociągowych (6) lub też na daną długość sieci wodociągowej (7).

$$Wj I = \frac{V_c}{L_p} \quad (6)$$

gdzie:

- $Wj I$ – wskaźnik jednostkowych strat całkowitych typu I, tys. m³ rok · przyłączy
- V_c – objętość całkowita strat wody, tys. m³/rok
- L_p – liczba przyłączy wodociągowych, szt.

$$(7) \quad Wj II = \frac{V_c}{(M + R) \cdot 365}$$

gdzie:

- $Wj II$ – wskaźnik jednostkowych strat całkowitych typu II, tys. m³ rok · przyłączy
- V_c – objętość całkowita strat wody, tys. m³/rok
- M – długość badanej sieci wodociągowej magistralnej, km
- R – długość badanej sieci wodociągowej rozdzielczej, km

Wskaźnik strat nieuniknionych. Jest to wskaźnik, który opisuje wielkość strat wody jakie teoretycznie mogą być najmniejsze w sieci wodociągowej. Można go obliczyć ze wzoru (8).

$$U_{ARL} = (18 \cdot L_m + 0,8 \cdot N_c + 25 \cdot L_c) \cdot 0,365 \cdot p \quad (8)$$

gdzie:

- U_{ARL} – wskaźnik strat nieuniknionych, 3/rok
- L_m – długość badanej sieci wodociągowej wraz z odsadzkami hydrantowymi, km
- N_c – liczba aktywnych jak i nieaktywnych przyłączy wodociągowych, szt.
- L_c – całkowita długość przyłączy wodociągowych, km
- p – średnie ciśnienie wody w sieci wodociągowej, m sł. wody
- 18 – jednostkowy wyciek dla przewodów magistralnych oraz przewodów rozdzielczych, dm³/(km · doba · m sł. wody)

- 0,8 – jednostkowy wyciek przypadający na jedno podłączenie wodociągowe, dm³/(1 podłączenie · doba · m sł. wody)
- 25 – jednostkowy wyciek odniesiony do długości połączeń wodociągowych, dm³/(km · doba · m sł. wody)

Infrastrukturalny indeks wycieków (Infrastructure Leakage Index) ILI. Jest to wartość bezwymiarowa, która „uśrednia wyniki” rocznych strat rzeczywistych wody w stosunku do rocznych nieuniknionych strat wody. Im jest ona bliższa wartości „1” tym sieć wodociągowa jest w lepszym stanie technicznym ze względu na szczelność. Wskaźnik ten oblicza się za pomocą wzoru (9).

$$ILI = \frac{Vr}{UARL}$$

9

gdzie:

ILI – infrastrukturalny indeks wycieków (strat wody), -

Vr – objętość strat rzeczywistych wody dostarczonej do sieci wodociągowej, tys. m³/rok

UARL – wskaźnik rocznych strat nieuniknionych, tys. m³/rok

Zestawienie wartości ILI wraz z odpowiadającymi im stanami technicznym sieci wodociągowej według AWWA zamieszczono w tabeli 5.

Tabela 5. Klasyfikacją stanu technicznego sieci wodociągowych na podstawie wartości wskaźnika ILI według AWWA [1]
Table 5. Classification of the technical condition of water supply networks based on the ILI index range according to AWWA [1]

Stan sieci	Zakres wskaźnika ILI według AWWA
bardzo dobry	ILI ≤ 3,0
dobry	3,0 < ILI ≤ 5,0
słaby	5,0 < ILI ≤ 8,0
niedopuszczalny	ILI > 8

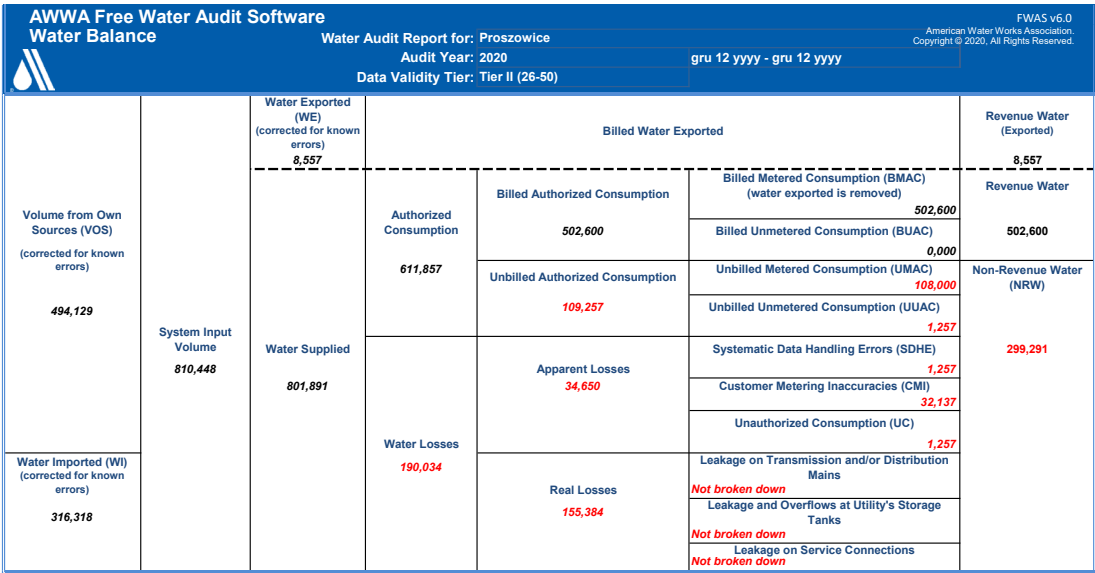
6. Wyniki i ich analiza

Wykorzystując dane eksploatacyjne pozyskane z Przedsiębiorstwa wodociągowego w gminie Proszowice, z nadanymi im poziomami zaufania do ich dokładności oraz stosując opisaną w rozdziale 2 metodykę bilansowania wskaźników wg AWWA i korzystając z oprogramowania AWWA FWAS v6.0, przeprowadzono analizę strat wody występujących w sieci wodociągowej tej gminy. Przykładowy zapis składowych rocznego bilansu wody dla 2020 roku obrazuje skan z programu (rys. 4), natomiast zbiorcze zestawienie składowych bilansu wodnego dla całego okresu 2019–2024 zamieszczono w tabeli 6. W kolejnej tabeli 7 przedstawiono wyniki obliczeń programem AWWA FWAS v6.0 wartości poszczególnych wielkości charakterystycznych bilansu wody dla sieci wodociągowej gminy Proszowice w latach 2019–2024. Obliczenia przeprowadzono w oparciu o wzory (2–5).

Tabela 6. Składowe bilansu wodnego dla gminy Proszowice w latach 2019–2024 z uwzględnieniem przyjętych poziomów zaufania do ich dokładności (opracowanie własne)

Table 6. Water balance components for the Proszowice municipality taking into account the adopted levels regarding their accuracy for the years 2019–2024 (own study)

ROK	Woda wtłoczona do sieci [tys. m ³ /rok]	Woda import. [tys. m ³ /rok]	Woda eksport. [tys. m ³ /rok]	Autoryzowana konsumpcja [tys. m ³ /rok]	Straty wody [tys. m ³ /rok]
2019	759,801	269,950	8,458	518,228	233,115
2020	810,448	316,318	8,557	611,857	190,034
2021	737,313	235,224	8,856	577,114	151,343
2022	713,035	225,771	9,353	519,252	184,429
2023	763,582	294,03	9,552	501,206	252,824
2024	778,905	201,194	10,846	519,238	248,821

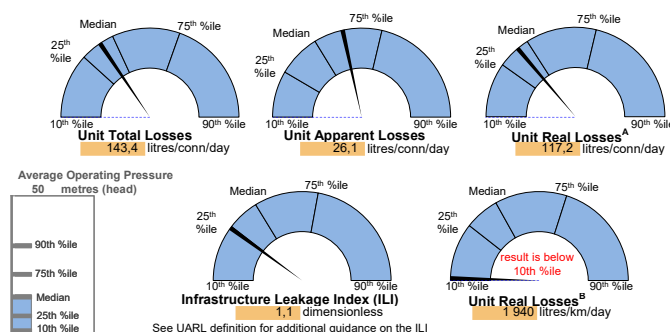


Rys 4. Skan z programu AWWA Free Water Audit Software v6.0 przedstawiający sumaryczny wynik bilansu wodnego dla wodociągu proszowickiego w 2020 roku (opracowanie własne)
Fig 4. Screenshot from AWWA Free Water Audit Software v6.0 showing the summary result of water balance result for the Proszowice water supply system in 2020(own study)

Tabela 7. Podstawowy bilans wodny dla sieci wodociągowej gminy Proszowice w latach 2019–2024 (opracowanie własne)
Table 7. Basic water balance for the water supply network of the Proszowice municipality in the years 2019–2024 (own study)

ROK	Fakturowana autoryz. konsump. [tys. m ³ /rok]	Niefakturowana autoryz. konsump. [tys. m ³ /rok]	Straty pozorne [tys. m ³ /rok]	Straty rzeczywiste [tys. m ³ /rok]	Woda przynosząca dochód [tys. m ³ /rok]	Woda nieprzynosząca dochodu [tys. m ³ /rok]
2019	491,300	26,928	29,667	203,426	491,300	260,043
2020	502,600	109,257	34,650	155,384	502,600	299,291
2021	485,700	91,414	32,739	118,604	485,700	242,758
2022	500,900	18,352	29,768	154,662	500,900	202,782
2023	482,400	18,806	28,728	224,096	482,400	271,630
2024	495,300	23,938	29,740	219,082	495,300	272,760

Powyższe wartości podstawowego bilansu wodnego, przeprowadzonego za pomocą programu AWWA FWAS v6.0, pokazują jak na przestrzeni sześciu lat zmieniał się on dla sieci wodociągowej gminy Proszowice. Można zauważyć, że o ile wolumen zafakturowanej autoryzowanej konsumpcji jest dość stabilny, to rzeczywiste straty wody ulegają sporym wahaniom. Ma to związek najprawdopodobniej z występującymi na sieci wodociągowej wahaniami liczby awarii oraz ich ewentualnej skali (średnice, na których nastąpiła awaria przewodów, wielkość wypływu). Na rys. 5 przedstawiono otrzymane z programu w formie wykresów wartości najważniejszych ze zdefiniowanych w pkt. 2 wskaźników charakteryzujących straty wody w sieci wodociągowej gminy Proszowice dla roku 2020 wraz z końcową oceną jej stanu technicznego dokonaną w oparciu o wartości wskaźnika ILI (rys. 5). W tabeli 8 zestawiono te wyniki uzyskane dla poszczególnych lat badanego okresu 2019–2024.



Rys 5. Wydruk z programu AWWA Free Water Audit Software v6.0 wyników obliczenia wartości najważniejszych wskaźników strat wody dla sieci wodociągowej gminy Proszowice dla 2020 roku (opracowanie własne)

Fig 5. AWWA Free Water Audit Software v6.0 the results of the key water supply network indicators for the Proszowice Municipality for 2020 (own study)

Tabela 8. Szczegółowy bilans strat wody w sieci wodociągowej gminy Proszowice w latach 2019–2024 wg metody AWWA wraz z jej oceną (opracowanie własne)

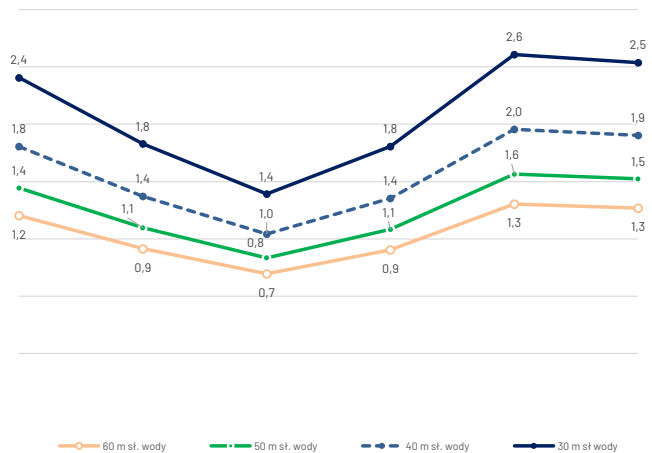
Table 8. Detailed balance of water consumption of the Proszowice municipality and losses using the AWWA method, including an assessment of the method for the 2019–2024 (own study)

ROK	Straty rzeczywiste A [l/przyłącz/rok]	Straty pozorne [l/przyłącz/d]	Wj I Straty całkowite [l/przyłącz/d]	Wj II Straty rzeczywiste B [l/km/d]	UARL Straty nieuniknione [tys. m ³ /rok]	ILI
2019	155,3	22,6	177,9	2541	140,9	1,4 (bdb)
2020	117,2	26,1	143,4	1940	141,7	1,1 (bdb)
2021	88,8	24,5	113,3	1481	142,2	0,8 (bdb)
2022	114,8	22,1	136,9	1931	142,8	1,1 (bdb)
2023	165,2	21,2	186,4	2798	143,3	1,6 (bdb)
2024	160,1	21,7	181,8	2736	143,9	1,5 (bdb)

Mimo że uzyskane wartości wskaźnika ILI pozwalają ocenić stan techniczny proszowickiej sieci jako bardzo dobry, to należy pamiętać o pewnym ograniczeniu metodologicznym przeprowadzonej analizy. Kluczowym parametrem wpływającym na wartość nieuniknionych strat rzeczywistych jest średnie ciśnienie robocze w sieci wodociągowej, co bezpośrednio obrazuje wzór (8). W obliczeniach przyjęto, na podstawie informacji od Pracowników Przedsiębiorstwa wodociągowego w Proszowicach, stałą, uśrednioną dla całej sieci wartość ciśnienia na poziomie 50 m sł. wody (5 barów) we wszystkich latach analizowanego okresu. Przyjęcie niniejszego założenia wynikało z braku szczegółowych, ciągłych danych pomiarowych ciśnienia dyspozycyjnego dla danego rejonu sieci. W rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych ciśnienie w sieci wodociągowej ulega stałym wahaniom np. w cyklu dobowym (związanym np. ze zmiennością godzinowego rozbioru wody przez mieszkańców), co przedstawiono w tabeli 9. Zawiera ona wyniki obliczeń wartości UARL dla sieci wodociągowej gminy Proszowice, przeprowadzonych dla przyjętych kilku innych wartości ciśnienia niż założona 50 m sł. wody w obliczeniach podstawowych (jednej większej 60 i dwóch mniejszych 40 i 30 m sł. wody). Na ich podstawie obliczono wartości infrastrukturalnego wskaźnika wycieków (strat wody) ILI dla każdej z powyższych wartości ciśnienia, przy czym długość każdej z odsadzek hydrantowych, zarówno na terenach wiejskich jak i miejskich, przyjęto równą 5 m. Średnią długość przyłączy wodociągowych przyjęto jako 10 m, natomiast danych dotyczących liczby przyłączy nieaktywnych nie udało się pozyskać. Wyniki ilustruje rys. 6.

Tabela 9. UARL oraz ILI dla sieci wodociągowej gminy Proszowice w zależności od różnych wartości ciśnienia (opracowanie własne)
Table 9. UARL and ILI for the water supply network of the Proszowice municipality for different pressure (own study)

ROK	60 m sł. wody		50 m sł. wody		40 m sł. wody		30 m sł. wody	
	UARL	ILI	UARL	ILI	UARL	ILI	UARL	ILI
2019	169,1	1,2	140,9	1,4	112,7	1,8	84,5	2,4
2020	170,0	0,9	141,7	1,1	113,3	1,4	85,0	1,8
2021	170,6	0,7	142,2	0,8	113,7	1,0	85,3	1,4
2022	171,4	0,9	142,8	1,1	114,2	1,4	85,7	1,8
2023	171,9	1,3	143,3	1,6	114,6	2,0	86,0	2,6
2024	172,7	1,3	143,9	1,5	115,1	1,9	86,3	2,5



Rys 6. Zestawienie wartości ILI dla sieci wodociągowej gminy Proszowice dla różnych wartości panującego w niej ciśnienia dyspozycyjnego (opracowanie własne)
Fig 6. Comparison of ILI values for various available pressure values in the water supply network (own study)

Zważywszy na fakt, że według metody AWWA najwyższa wartość wskaźnika *ILI* dla uzyskania bardzo dobrej oceny technicznej badanej sieci wynosi 3,0, można zauważyć z przebiegu powyższych wykresów (rys. 6), że w całym analizowanym okresie wartość ta nie została przekroczona dla żadnego z wariantów wartości ciśnienia. Maksymalną wartość (2,6) odnotowano w roku 2023 przy najniższym ciśnieniu (30 m sł. wody), co w pełni uzasadnia wystawienie badanej sieci tak wysokiej oceny.

7. Podsumowanie i wnioski

Analiza strat wody w sieci wodociągowej gminy Proszowice, obsługiwanej przez Wodociągi Proszowickie Sp. z o. o. dla lat 2019–2024, przeprowadzona wg wytycznych AWWA, daje podstawę do sformułowania następujących wniosków:

1. Zmienna produkcja wody przy stabilnym jej zużyciu przez odbiorców: Ilość wody dostarczonej do odbiorców w analizowanym okresie wykazywała znaczącą stabilność, utrzymując się na poziomie około 490 tys. m³/rok, zauważalny jest natomiast brak stałości w przypadku ilości wody wtłoczonej do sieci, gdzie różnice pomiędzy

poszczególnymi latami sięgały nawet 100 tys. m³ (pomiędzy rokiem 2023 a 2021). Wahania te wynikały w sposób bezpośredni ze strat wody w sieci dystrybucyjnej, których to w szczytowym momencie odnotowano prawie 260 tys. m³, co spowodowało z kolei konieczność zwiększenia produkcji wody uzdatnionej w celu zapewnienia ciągłości dostaw wody do odbiorców końcowych.

2. Brak liniowej zależności między liczbą awarii a wielkością strat: Analiza wykazała brak logicznej, rosnącej zależności pomiędzy liczbą awarii na sieci a wielkością strat wody (w badanym okresie pojawiała się nawet zależność odwrotna, czego przyczyną mogą być rodzaje awarii, zróżnicowane co do skali rozmiarów i ich skutków).

3. Bardzo dobry stan techniczny sieci wodociągowej Gminy Proszowice: Stan techniczny sieci wodociągowej w gminie Proszowice w latach 2019–2024, oceniany za pomocą wskaźnika *ILI*, zgodnie z jego klasyfikacją podaną przez AWWA, okazał się „bardzo dobry” nawet w sytuacji, gdy do obliczenia jego wartości przyjmowano panujące w niej ciśnienia znacznie odbiegające od podanej przez Eksploatatora wartości 50 m sł. wody (miało to wpływ na poziom wartości strat nieuniknionych – wskaźnika *UARL* a zatem i wskaźnika *ILI*). Świadczy to o dużym marginesie wartości *ILI* zachowujących taką ocenę badanej sieci wodociągowej (mniejszych od 3,0), a zatem zaufania do jej poprawności.

4. Kompleksowość i precyzja metodyki AWWA: Przeprowadzona analiza dowodzi, że wytyczne AWWA stanowią skuteczne i wszechstronne narzędzie do oceny strat wody w sieciach jej dystrybucji. Metodyka ta wyróżnia się uwzględnieniem szerokiego zakresu czynników eksploatacyjnych oraz możliwością przypisania poszczególnym danym wejściowym poziomów ufności, co umożliwia uzyskanie bardziej wiarygodnych wyników obliczeń i przeprowadzenie rzetelnej, ale ostrożniejszej oceny stanu technicznego infrastruktury ze względu na jej szczelność.

Wymienione w artykule argumenty wskazują na aktualność i dużą wagę problematyki strat wody w sieciach wodociągowych, co też tłumaczy opracowywanie podobnych analiz dla innych polskich miast i gmin, głównie przez pracowników uczelni. Dotychczas są one jednak oparte w większości o wytyczne IWA, a autorzy niniejszej pracy pragną zarekomendować metodę sporządzania rocznego bilansu wody oraz obliczania wskaźników strat wody zalecaną przez AWWA. Jak wykazano powyżej, zapewnia ona wysoką precyzję (liczba uwzględnianych danych, ale z ostrożnym podejściem do ich dokładności), a same obliczenia są proste i możliwe do wykonania przy pomocy łatwo dostępnego programu komputerowego **AWWA Free Water Audit Software v6.0**, także przez samych eksploatatorów systemów wodociągowych, w rękach których są wszystkie potrzebne do tego dane. Autorzy zachęcają ich zatem do tego, gdyż wyniki tych obliczeń i ich analizy mogą dostarczać Kierownictwu przedsiębiorstw wodociągowych kluczowych informacji, ułatwiających sprawne i efektywne zarządzanie siecią oraz planowanie remontów, których realizacja pozwoli skutecznie ograniczyć straty wody.

8. Literatura

- [1] Bajer, J., & Iwanejko, R. (2013). Analiza i ocena strat wody w sieci wodociągowej miasta Krakowa. *Instal*, 10(344), 43-48.
- [2] Rak, J., & Tunia, A. (2012). Analiza i ocena strat wody w wodociągu Rzeszowa. *Instal. Teoria i Praktyka w Instalacjach*, (5), 42-45.
- [3] Studziński, A., Pietrucha-Urbanik, K., & Kluz, W. (2014). Analiza strat wody w sieci wodociągowej w Stalowej Woli. *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury*, 31(61), 333-342. <https://doi.org/10.7862/rb.2014.23>
- [4] Bajer, J., Lubowiecka, T., & Spaczyńska, M. (2004). Analiza awaryjności sieci wodociągowej miasta i gminy Wadowice. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, 25-34.
- [5] Rak, J., & Misztal, A. (2017). Analiza strat wody w wodociągu miasta Jarosław. *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury*, 34(64), 123-136. <https://doi.org/10.7862/rb.2017.198>
- [6] Ociepa, E., Mrowiec, M., & Deska, I. (2019). Analysis of water losses and assessment of initiatives aimed at their reduction in selected water supply systems. *Water*, 11(5), 1037. <https://doi.org/10.3390/w11051037>
- [7] Merc, K., Kędzia, W., & Ociepa, E. (2017). Analiza strat wody na podstawie wskaźników zalecanych przez International Water Association. *Proceedings of ECOpole*, 11(1), 211-219. [https://doi.org/10.2429/proc.2017.11\(1\)023](https://doi.org/10.2429/proc.2017.11(1)023)
- [8] Urząd Gminy i Miasta Proszowice. (2024, 17 października). Nowa era w jakości wody w Proszowicach. https://proszowice.pl/aktualnosc-9193-nowa_era_w_jakosci_wody_w_proszowicach.html
- [9] Rejestr.io. (b.d.). Wodociągi Proszowickie Sp. z o.o. (KRS 0000601570). <https://rejestr.io/krs/601570/wodociagi-proszowickie>. (dostęp: 30.08.2026)
- [10] Główny Urząd Statystyczny. (b.d.). Bank Danych Lokalnych: jednostka terytorialna 1725. <https://bdl.stat.gov.pl/bdl/dane/teryt/jednostka/1725> (dostęp: 30.08.2026)
- [11] Wodociągi Proszowickie Sp. z o.o. (b.d.). Dane przedsiębiorstwa wodociągowego [materiały niepublikowane].
- [12] WczasyPolskie.pl. (b.d.). Województwo małopolskie, mapa powiatów. <https://wczasypolskie.pl/wojewodztwo-malopolskie-mapa-powiatow>
- [13] Hryniewicz, J., Witkowski, J., & Potrykowska, A. (2019). *Migracje a sytuacja demograficzna Polski*. Rządowa Rada Ludnościowa.
- [14] Kutylowska, M. (2019). *Metody regresyjne i klasyfikacyjne w analizie i ocenie poziomu awaryjności przewodów wodociągowych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
- [15] Piechurski, F. G., & Kuś, K. (2004). Znaczenie wskaźników awaryjności i strat wody w ocenie pracy sieci wodociągowych. W Materiały XVIII Krajowej, VI Międzynarodowej Konferencji „Zaopatrzenie w Wodę, Jakość i Ochrona Wód”
- [16] American Water Works Association. (2016). *Water audits and loss control programs (AWWA Manual M36, 4th ed.)*. <https://www.normsplash.com/FreeDownload/143443926/AWWA-M36-16-en.pdf>



Rok założenia 1919

POLSKIE ZRZESZENIE INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW SANITARNYCH ODDZIAŁ W KRAKOWIE POLISH ASSOCIATION OF SANITARY ENGINEERS AND TECHNICIANS

zaprasza na

XIX OGÓLNOPOLSKĄ KONFERENCJĘ NAUKOWO-TECHNICZNĄ "WENTYLACJA • KLIMATYZACJA • OGRZEWNICTWO • ŚRODOWISKO"



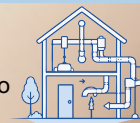
I. CIEPŁOWNICTWO I OGRZEWNICTWO – DROGA DO DEKARBONIZACJI

1. Systemy IV i V generacji
2. Wielkoskalowe pompy ciepła
3. Efektywność energetyczna budynków
4. Hybrydowe węzły ciepłne
5. Magazyny energii
6. Ciepło odpadowe



II. WENTYLACJA I KLIMATYZACJA – KOMFORT, ZDROWIE

1. Wentylacja inteligentna i hybrydowa
2. Filtracja i bezpieczeństwo zdrowotne
3. Chłodzenie pasywne
5. Jakość środowiska wewnętrznego



III. ŚRODOWISKO I GOSPODARKA OBIEGU ZAMKNIĘTEGO

1. Ślad węglowy
2. Oszczędność wody i ochrona wód
3. Retencja i błękitno-zielona infrastruktura
4. Odzysk ciepła i chłodu
5. Infrastruktura liniowa
6. Wentylacja miejska



IV. NOWOCZESNE ZARZĄDZANIE

1. Narzędzia pracy inżyniera
2. IoT w budynkach i miastach
3. Cyfrowe zarządzanie środowiskiem
4. Inteligentne opomiarowanie
5. AI w zarządzaniu energią



TRESNA, 22-23 PAŹDZIERNIKA 2026 r.

Szczegóły wydarzenia pod linkiem: <https://pzits.krakow.pl/konferencja-2026/>

Rekonstrukcja fraktalna SFS-C w metodach LiDAR i SLAM przy nowoczesnym obrazowaniu infrastruktury wodociągowo-kanalizacyjnej z zastosowaniem AFI ASCII (DSL)

Fractal SFS-C reconstruction in LiDAR and SLAM methods for advanced imaging of water and sewage infrastructure using AFI ASCII (DSL)

Witold Paleczek^{1*} 

¹ Wydział Budownictwa, Politechnika Częstochowska

* Kontakt / Correspondence: witold.paleczek@pcz.pl

Streszczenie:

SFS-C jest fraktalną architekturą rekonstrukcji widmowej do scalania danych niekompletnych w systemach LiDAR i SLAM stosowanych w diagnostyce infrastruktury wodociągowo-kanalizacyjnej. W warunkach aerozoli, wilgoci, multipath i niskiego SNR wykorzystuje formanty globalne, maski fraktalne i nadokreśloność sekwencyjną, umożliwiając deterministyczną rekonstrukcję impulsów ToF, trajektorii i widm częściowych. Przedstawiono przykłady języka formalnego AFI ASCII (DSL) opracowanego do testowania SFS-C.

Słowa kluczowe: rekonstrukcja widmowa, formanty globalne, maski fraktalne, nadokreśloność sekwencyjna, widma częściowe

Abstract:

SFS-C is a fractal spectral-reconstruction architecture for merging incomplete data in LiDAR and SLAM systems used in the diagnostics of water and sewage infrastructure. Under aerosol, moisture, multipath and low-SNR conditions, it employs global formants, fractal masks and sequential over-specification, enabling deterministic reconstruction of ToF pulses, trajectories and partial spectra. Examples of the AFI ASCII (DSL) formal language developed for testing SFS-C are presented.

Keywords: spectral reconstruction, global formants, fractal masks, sequential over determination, partial spectra

1. Wprowadzenie

Metody LiDAR i SLAM, choć wywodzące się z geometrii przestrzennej i robotyki, stają się dziś kluczowymi narzędziami diagnostyki infrastruktury wodociągowo-kanalizacyjnej, szczególnie w przestrzeniach zamkniętych o utrudnionych warunkach pomiarowych. Obrazowanie kanałów, kolektorów, studni rewizyjnych i galerii technicznych należy do najtrudniejszych zadań diagnostyki podziemnej ze względu na aerozole, wilgoć, odbicia wielokrotne, nieregularną geometrię oraz ograniczony dostęp. W takich warunkach dane optyczne i inercyjne są niekompletne, a klasyczne metody DSP tracą stabilność. LiDAR dostarcza dyskretną reprezentację przestrzeni, SLAM rekonstruuje geometrię i trajektorię ruchu, lecz oba systemy – działające lokalnie, bez GNSS – generują widma częściowe

podatne na multipath, tłumienie i deformacje impulsów. SFS-C (Self-Similar Fractal Spectral Coding) stanowi odpowiedź na te ograniczenia: wykorzystuje fraktalną organizację widma, stabilne formanty oraz nadokreśloność sekwencyjną do deterministycznego scalania widm częściowych bez modeli kanału, pilotów i klasycznego FEC. W instalacjach sanitarnych SFS-C pełni rolę strukturalnego filtra multipath, poprawiając rekonstrukcję impulsów ToF i jakość zbioru punktów rejestrowanych. W wielokanałowych układach pomiarowych – LiDAR, SLAM oraz wybrane czujniki IoT generujące sygnały widmowe o niskim SNR – każdy sensor dostarcza widmo częściowe, które SFS-C integruje na poziomie widma, zwiększając odporność systemu na zakłócenia środowiskowe. Fraktalna organizacja widma oraz nadokreśloność sekwencyjna umożliwiają deterministyczne odtwarzanie sygnałów zdegradowanych, co

zwiększa stabilność całego procesu rekonstrukcji danych. Integracja sygnałów IoT z danymi LiDAR/SLAM i SFS-C tworzy spójny model odtwarzania informacji pomiarowych w przestrzeniach zamkniętych, szczególnie tam, gdzie warunki pomiarowe są skrajnie utrudnione, a dostęp do obiektu ograniczony. W tabeli 1 przedstawiono logiczną mapę struktury SFS-C, natomiast w tabeli 2 mapę zastosowań w diagnostyce infrastruktury wodociągowo-kanalizacyjnej. Ze względu na trwającą procedurę patentową niniejsze opracowanie ma charakter koncepcyjny i przedstawia zasadę działania SFS-C bez szczegółów implementacyjnych.

Tabela 1. SFS-C – mapa logiczna (przepływ informacji, etapy, zależności); opracowanie własne

Table 1. SFS-C – logical map (information flow, stages, dependencies); own study

Etap / komponent	Opis działania	Zależności / przepływ informacji
Widma kanałowe	Każdy kanał zawiera widmo częściowe z brakami wynikającymi z maski	Dane wejściowe są niekompletne, lecz komplementarne między kanałami
Maski komplementarne	Każdy kanał ma inną maskę widmową; zbiory braków nie pokrywają się	Komplementarność tworzy układ nadokreślony
Transformacja FFT	Przejście do dziedziły widmowej (jeśli wejście jest czasowe)	FFT → widma kanałowe gotowe do skalania
Scalanie widm	Łączenie widm kanałów w jedną strukturę widmową	Informacja sumuje się, a braki uzupełniają się wzajemnie
Aproksymacja nadokreślona	Wykorzystanie nadmiaru informacji do stabilizacji i uzupełnienia braków	Nadokreśloność = stabilność + odporność na szum
Projekcja widmowa	Projekcja na przestrzeń widm zgodnych z maskami i redundancją	Zapewnienie spójności widmowej między kanałami
Pętla FFT–IFFT–FFT	Pętla zapewniająca zgodność czas–widmo	Brak iteracji; brak funkcji celu; brak parametrów
Rekonstrukcja globalna	Odtworzenie pełnego widma sygnału	Wynik jest globalny, nie lokalny
Transformacja IFFT	Przejście do dziedziły czasowej	Otrzymujemy sygnał zrekonstruowany
Wyjście: sygnał zrekonstruowany	Stabilny, kompletny, bez artefaktów iteracyjnych	Efekt deterministyczny, powtarzalny, odporny na szum

Wnioski: SFS-C działa jak deterministyczny system skalania informacji widmowej, w którym komplementarność masek tworzy układ nadokreślony, aproksymacja nadokreślona zapewnia stabilność, pętla FFT–IFFT–FFT zapewnia spójność czas–widmo, brak iteracji eliminuje artefakty i zależność od parametrów, rekonstrukcja jest globalna, a nie lokalna. To jest logiczna mapa algorytmu, która pokazuje, że SFS-C nie jest ani metodą optymalizacji, ani filtracją, ani estymacją – lecz proponowaną klasą rekonstrukcji strukturalnej.

Tabela 2. SFS-C w LiDAR i SLAM – mapa zastosowań w diagnostyce infrastruktury wodociągowo-kanalizacyjnej; opracowanie własne
Table 2. SFS-C in LiDAR and SLAM – application map for water and wastewater infrastructure diagnostics; own study

Obszar LiDAR / SLAM	Problem techniczny	Zastosowanie SFS-C
Skanowanie w przestrzeniach zamkniętych	Odbicia wielokrotne, aerozole, wilgoć, nieregularna geometria	Rekonstrukcja impulsów LiDAR z widm częściowych; stabilizacja ToF
Skanowanie kanałów i kolektorów	Silny multipath, brak linii widzenia, zmienne SNR	Scalanie widm z wielu przejść; rekonstrukcja globalna zbioru punktów rejestrowanych
Obrazowanie studni rewizyjnych	Zaniki sygnału, ostre zmiany geometrii, odbicia od ścian	Stabilizacja widma i rekonstrukcja impulsów zdegradowanych
SLAM w korytarzach technicznych	Utrata cech, niestabilna trajektoria, błędy dopasowania	Rekonstrukcja trajektorii z widm komplementarnych; stabilizacja mapy
Skanowanie w obecności wody	Odbicia od powierzchni wody, tłumienie sygnału	Uzupełnianie braków widma; rekonstrukcja impulsów ToF
Skanowanie w rurach o małym przekroju	Wąska geometria, silne odbicia, częściowe dane	Nadokreślona rekonstrukcja widma; stabilizacja zbioru punktów rejestrowanych
SLAM mobilny na robotach inspekcyjnych	Drgania, zmienna dynamika dopplerowska, niestabilny ruch	Stabilizacja widma przy zmianach dynamiki dopplerowskiej; rekonstrukcja trajektorii
Integracja LiDAR + SLAM + GNSS	Przerwy w GNSS, brak synchronizacji, błędy czasowe	Rekonstrukcja widma GNSS; stabilizacja fuzji LiDAR/SLAM/GNSS
Obrazowanie w warunkach zakłóceń elektromagnetycznych	Zakłócenia sygnałów ToF, interferencje	Rekonstrukcja sygnału z widm obciążonych
Skanowanie w niskiej widoczności	Aerozole, mgła, para wodna	Rekonstrukcja impulsów z widm niekompletnych
Skanowanie w rurach o dużej długości	Utrata cech, powtarzalna geometria	Scalanie widm z wielu przejść; stabilizacja SLAM
Skanowanie w systemach hybrydowych (LiDAR + kamera)	Braki danych w obrazie, niestabilne oświetlenie	Rekonstrukcja widm sygnałów optycznych
Monitoring deformacji infrastruktury	Wysoka wrażliwość na zakłócenia	Stabilizacja widma i redukcja błędów chwilowych
Skanowanie w warunkach zakłóceń akustycznych	Zakłócenia impulsów ToF	Rekonstrukcja sygnału z widm zdegradowanych
Skanowanie w systemach kosmicznych LEO/MEO	Zmienna geometria, zmienne SNR	Scalanie widm z wielu pasm i konstelacji

Wnioski: SFS-C w LiDAR i SLAM działa, ponieważ: dane LiDAR/SLAM są wielokanałowe, widma impulsów ToF są częściowe, zaniki są komplementarne między przejściami, SFS-C potrafi zrekonstruować pełne widmo impulsu i trajektorii z wielu widm niekompletnych. To czyni SFS-C proponowaną klasą metod rekonstrukcji danych LiDAR/SLAM, niezależną od filtrów, estymacji, korelacji, modeli propagacji i metod iteracyjnych.

2. Glosariusz

W glosariuszu zawarto jedynie pojęcia niezbędne do precyzyjnego omówienia zagadnień LiDAR i SLAM w kontekście architektury SFS-C.

Aerozole – cząstki zawieszone w powietrzu (wilgoć, mgła, pył); w kontekście SFS-C – powodują tłumienie i złożone widma, które SFS-C rekonstruuje.

AFI ASCII (Artificial Intelligence Formal Interface ASCII – Formalny Interfejs Sztucznej Inteligencji w notacji ASCII) – deterministyczny język formalny DSL (Domain-Specific Language) zaprojektowany jako interfejs komunikacji z modułami rekonstrukcji, symulacji i walidacji w systemach LiDAR/SLAM; umożliwia definiowanie instrukcji, parametrów środowiskowych, profili sensorów oraz warstw semantycznych w procesach testowania systemu rekonstrukcji SFS-C.

Atenuacja – tłumienie sygnału przez aerozole, wilgoć i materiał ścian, powodujące spadek energii prążków widma; w SFS-C atenuacja prowadzi do powstawania widm częściowych, które są uzupełniane poprzez formanty globalne i nadokreśloność sekwencyjną.

Cylindryczna geometria – układ przestrzenny typowy dla rur i kolektorów. Powoduje lokalne zniekształcenia widma oraz ubytki danych wynikające z odbić i tłumienia. Stanowi środowisko szczególnie wymagające dla LiDAR/SLAM, w którym SFS-C umożliwia stabilizację i scalanie widm częściowych.

DSL (Domain-Specific Language) – język formalny projektowany do obsługi określonej dziedziny problemowej; w SFS-C DSL jako AFI ASCII pełni rolę deterministycznego interfejsu deklaratywnego, który opisuje zadanie rekonstrukcji, odwzorowuje przebieg testów i zapewnia semantyczną walidację poleceń.

DSP (Digital Signal Processing) – dziedzina przetwarzania sygnałów obejmująca m.in. filtrację, rekonstrukcję, kompresję, estymację oraz analizę widmową. W niniejszym artykule SFS-C jest ujmowany jako architektura rekonstrukcji fraktalnej realizowana w ramach przetwarzania cyfrowego sygnałów. W odróżnieniu od klasycznych metod ograniczonych do filtracji, interpolacji lub estymacji, SFS-C integruje operacje widmowe, strukturę masek, równania operacyjne, mechanizmy nadokreśloności oraz procedury rekonstrukcji fraktalnej. Szczegółowa architektura SFS-C obejmuje również algorytmy FFT-IFFT, parametryzację operacji, separację kanałów, procedury generowania i kompozycji samopodobnych rozkładów widmowych oraz ich implementację w wielowymiarowych przestrzeniach metrycznych.

FEC (Forward Error Correction) – klasyczne metody korekcji błędów oparte na dodawaniu bitów nadmiarowych; w SFS-C FEC stanowi jedynie punkt odniesienia: system nie stosuje kodów korekcyjnych, lecz osiąga odporność poprzez rekonstrukcję widmową opartą na stabilnych formantach globalnych, maskach fraktalnych i nadokreślonym zbiorze widm wynikającym z redundancji sekwencyjnej. Zapewnia funkcjonalność analogiczną do FEC, lecz realizowaną strukturalnie i widmowo, bez dodawania bitów korekcyjnych.

Feature sparse – środowisko o małej liczbie cech geometrycznych, typowe dla rur i kolektorów; w SFS-C brak cech przekłada się na częściowe widma, które są uzupełniane poprzez formanty globalne i nadokreśloność sekwencyjną.

FFT (Fast Fourier Transform) – szybka transformacja Fouriera; w SFS-C FFT służy do przejścia do dziedziny częstotliwości, gdzie stosowane są maski fraktalne i scalanie widm.

Filtr multipath widmowy – działanie SFS-C na poziomym widmie, eliminujące prążki powstałe w wyniku odbić. Stabilizuje dane LiDAR/SLAM w kanałach.

Formant – stabilny element energetyczny widma, odporny na lokalne zakłócenia i zmiany amplitudy. Reprezentuje trwały rozkład energii, zachowany nawet przy deformacji lub zaniku prążków lokalnych; w SFS-C formanty globalne i lokalne pełnią rolę kotwic widmowych, umożliwiając rekonstrukcję sygnału przy niskim SNR, silnym multipath i danych częściowych; ich stabilność energetyczna stanowi podstawę deterministycznego odtworzenia widma pierwotnego.

Formanty globalne – stabilne prążki widma odporne na multipath; w SFS-C pełnią rolę kotwic widmowych, od których rozpoczyna się rekonstrukcja.

GNSS (Global Navigation Satellite Systems) – systemy nawigacji satelitarnej; w SFS-C: główny obszar zastosowań transmisyjnych.

GNSS-denied (brak sygnału GNSS) – sytuacja, w której sygnał GNSS nie dociera do przestrzeni podziemnych, takich jak kanały, kolektory czy galerie techniczne. W takich warunkach LiDAR/SLAM generują widma częściowe, które SFS-C scala w procesie rekonstrukcji.

IFFT (Inverse FFT) – odwrotna transformacja Fouriera; w SFS-C IFFT jest częścią pętli FFT → IFFT → FFT, która zapewnia spójność czas-widmo i stabilizację rekonstrukcji.

IMU (Inertial Measurement Unit: inercyjna jednostka pomiarowa) – zespół czujników inercyjnych obejmujący akcelerometrię i żyroskopy, a w niektórych konstrukcjach także magnetometr. Dostarcza informacji o ruchu platformy (przyspieszenia, obroty, przechyty). W systemach LiDAR/SLAM stabilizuje rekonstrukcję geometrii, kompensując ruch urządzenia; w kontekście SFS-C sygnały IMU stanowią kanał pomocniczy: ich widma są częściowe i zaszumione, lecz zawierają stabilne komponenty inercyjne, które mogą być scalane z widmami LiDAR/kamery w rekonstrukcji wielokanałowej.

LEO (Low Earth Orbit) – orbity niskie (200–2000 km). Sygnały z satelitów LEO charakteryzują się dużą dynamiką dopplerowską i zmiennym SNR; w kontekście SFS-C widma z LEO są traktowane jako widma częściowe, które można stabilizować i scalać dzięki nadokreśloności.

LiDAR (Light Detection and Ranging) – impulsowe obrazowanie przestrzeni; w kontekście SFS-C widma impulsów ToF są traktowane jako widma częściowe, które można rekonstruować globalnie, szczególnie w warunkach multipath, aerozoli i odbić w kanałach.

Maski fraktalne – struktury selekcjonujące prążki zgodne z organizacją widma. Automatycznie eliminują odbicia niezgodne z sygnałem.

MEO (Medium Earth Orbit) – orbity średnie (2000–20 000 km). Klasyczne orbity GNSS. SFS-C umożliwia rekonstrukcję widm kodów i faz z wielu pasm i konstelacji MEO, nawet przy zakłóceniach i brakach danych.

Multipath – wielokrotne odbicia sygnału od ścian kanału. Degradują lokalne prążki widma; SFS-C działa jako filtr multipath widmowy.

Nadokreśloność sekwencyjna – wielokrotne widma z kolejnych impulsów LiDAR lub ramek SLAM. Umożliwiają deterministyczne scalanie widma.

Rekonstrukcja nadokreśloności – metoda rekonstrukcji sygnału z nadmiaru informacji; w SFS-C nadokreśloność wynika z komplementarnych masek widmowych i wielu kanałów, co pozwala na deterministyczne odtworzenie widma bez modeli sygnału i bez iteracji.

SFS-C (Self-Similar Fractal Spectral Coding) – fraktalny system kodowania widmowego. Łączy maskowanie fraktalne, redundancję sekwencyjną i aproksymację nadokreśloności, umożliwiając rekonstrukcję sygnału z widm niekompletnych, bez FEC, pilotów, estymacji kanału i metod iteracyjnych.

SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) – jednoczesna lokalizacja i mapowanie. SFS-C stabilizuje dane wejściowe SLAM poprzez rekonstrukcję widm impulsów i trajektorii, co redukuje błędy dopasowania i utraty cech w przestrzeniach zamkniętych.

SNR (Signal-to-Noise-Ratio) – stosunek sygnału do szumu; w SFS-C niski SNR nie uniemożliwia rekonstrukcji, ponieważ system korzysta z widm komplementarnych i aproksymacji nadokreśloności, która stabilizuje widmo nawet przy silnych zakłóceniach środowiskowych.

ToF (Time of Flight) – czas przelotu impulsu; w SFS-C widma ToF są poddawane maskowaniu fraktalnemu i scalaniu wielokanałowemu, co umożliwia rekonstrukcję impulsów zdegradowanych przez multipath, aerozole, wodę i odbicia.

Widma częściowe – widma niekompletne powstałe wskutek aerozoli, multipath, ruchu platformy lub geometrii kanału – to podstawowy materiał wejściowy SFS-C.

3. Przegląd literatury przedmiotu

Badania nad obrazowaniem infrastruktury podziemnej – w tym sieci wodociągowo-kanalizacyjnych – rozwijają się dynamicznie w kilku równoległych nurtach: LiDAR mobilny, SLAM w środowiskach o ograniczonej widoczności, roboty inspekcyjne, fuzja wielosensorowa oraz modelowanie propagacji sygnałów. W niniejszym przeglądzie zestawiono najważniejsze kierunki badań, które tworzą kontekst dla zastosowania metod rekonstrukcji widmowej systemu SFS-C. Prace Aijazi (2019) [1] oraz Jin, (2020) [10] pokazują, że mobilny LiDAR jest skutecznym narzędziem do detekcji i modelowania obiektów podziemnych, w tym rur i kanałów. Autorzy podkreślają problemy charakterystyczne dla środowisk zamkniętych: odbicia wielokrotne, zmienny współczynnik odbicia, wilgoć oraz nieregularna geometria. Badania Kim (2023) [11] oraz Liu L. (2023) [13] wskazują dodatkowo na degradację sygnału w obecności aerozoli, mgły i wilgoci – zjawiska typowe dla infrastruktury wodno-kanalizacyjnej. W kontekście SFS-C istotne jest to, że dane LiDAR w takich warunkach często mają charakter widm częściowych, co uzasadnia stosowanie rekonstrukcji nadokreśloności i scalania widm. Badania Ma K. (2017) [16], Zhang R. (2021) [35] oraz Tian (2023) [28] koncentrują się na SLAM w rurach i korytarzach technicznych, gdzie klasyczne algorytmy mają trudności z powodu: powtarzalnej, cylindrycznej geometrii, braku wyraźnych cech, silnych odbić, niestabilnej trajektorii robotów. Prace te pokazują, że SLAM wymaga stabilizacji danych wejściowych, szczególnie w środowiskach ubogich w cechy geometryczne. SFS-C może pełnić tu rolę stabilizatora

widma impulsów ToF oraz danych intensywnościowych. Grunatilake (2022) [8], Lu (2022) [8], Zhang (2014) [34] oraz Que (2023) [25] opisują roboty inspekcyjne wyposażone w LiDAR, identyfikację radiową RFID (Radio-Frequency Identification), kamery i IMU. Wskazują na problemy: zaniki sygnału, zakłócenia elektromagnetyczne, trudne warunki propagacji, brak GNSS. W takich środowiskach dane niekompletne i komplementarne są – co jest bezpośrednio zgodne z logiką SFS-C (maski fraktalne, nadokreśloność, scalanie widm). Bao (2024) [3], Ma (2024) [15] oraz Liu (2026) [12] przedstawiają nowoczesne metody fuzji LiDAR/IMU oparte na grafach czynnikowych. Badania te pokazują, że: fuzja wielosensorowa poprawia stabilność SLAM, dane z LiDAR są często zdegradowane, rekonstrukcja wymaga stabilizacji widma i redukcji szumu. SFS-C może stanowić warstwę pre-processingową, stabilizującą widmo impulsów przed ich użyciem w grafach czynnikowych. Bedford (2019) [4] oraz Wei (2022) [31] analizują propagację fal elektromagnetycznych i radarowych w środowiskach podziemnych. Wskazują na: silny multipath, tłumienie sygnału, niejednorodność ośrodka. To są dokładnie te zjawiska, które SFS-C adresuje poprzez rekonstrukcję widm zdegradowanych i stabilizację struktury widma. Prace Behrendt (2000) [5], Ferrare (1995) [7], Melfi (1985) [17], Shipley (1983) [26], Wulfmeyer (1998) [32] oraz Totems (2021) [29] dotyczą lidarów atmosferycznych, ale mają znaczenie dla SFS-C, ponieważ: opisują złożone struktury widmowe, analizują wpływ aerozoli i wilgoci, stosują zaawansowane metody filtracji widmowej. Są to bezpośrednie analogie do problemów występujących w kanałach i kolektorach. Prace autora (2004–2026) [18–24] tworzą bazę teoretyczną: formanty energetyczne (2013) [21], FFT w analizie wilgoci (2005) [19], fraktalne struktury geometryczne (2025) [22], SFS-C jako system transmisyjny (2026) [23]. W kontekście techniki sanitarnej stanowią one podstawę do zastosowania SFS-C w rekonstrukcji danych LiDAR/SLAM przy mapowaniu. Literatura wskazuje jednoznacznie, że: LiDAR i SLAM w środowiskach wodno-kanalizacyjnych generują dane niekompletne, warunki pomiarowe powodują multipath, aerozole, wilgoć, odbicia, klasyczne metody stabilizacji są niewystarczające, fuzja wielosensorowa wymaga stabilnych widm wejściowych, rekonstrukcja globalna jest kluczowa dla jakości mapowania. W tym kontekście SFS-C stanowi nową klasę metod rekonstrukcji widmowej, która może znacząco poprawić jakość danych LiDAR/SLAM w diagnostyce infrastruktury wodociągowo-kanalizacyjnej.

4. Mechanizmy działania SFS-C w rekonstrukcji danych LiDAR i SLAM

System SFS-C działa na poziomie widma sygnału traktując dane LiDAR i SLAM jako zbiór prążków o różnym stopniu kompletności i stabilności. W przeciwieństwie do klasycznych metod filtracji czasowej, SFS-C wykorzystuje strukturę widmową sygnału, w której część prążków pozostaje stabilna nawet w obecności silnych zakłóceń, aerozoli, wilgoci czy odbić od ścian. Te stabilne elementy widma – formanty globalne – stanowią podstawę rekonstrukcji. Multipath i zakłócenia środowiskowe mają charakter lokalny i niekoherentny, dlatego degradują jedynie wybrane prążki widma. SFS-C wykorzystuje maski fraktalne, które selekcjonują prążki zgodne ze strukturą sygnału i odrzucają te, które powstały w wyniku odbić lub deformacji impulsów. Dzięki temu

możliwe jest odtworzenie widma pierwotnego nawet wtedy, gdy dane LiDAR lub SLAM są niekompletne. Kluczowym elementem działania SFS-C jest nadokreśloność sekwencyjna – wielokrotne widma pochodzące z kolejnych impulsów LiDAR lub z kolejnych ramek SLAM. Choć każde z nich może być częściowe, ich wspólna struktura widmowa umożliwia deterministyczne scalanie i rekonstrukcję sygnału bez modeli kanału, pilotów czy klasycznych metod korekcji błędów. SFS-C pełni zatem rolę strukturalnego filtru multipath, działającego nie na danych czasowych, lecz na widmie sygnału. Stabilność formantów globalnych oraz fraktalna organizacja widma umożliwiają odtworzenie danych LiDAR i SLAM w warunkach silnych zakłóceń, aerozoli, wilgoci i nieregularnej geometrii przestrzeni zamkniętych.

5. Metody rekonstrukcji widmowej SFS-C w danych LiDAR i SLAM

W przestrzeniach zamkniętych instalacji sanitarnych – kanałach, kolektorach, studniach rewizyjnych i galeriach technicznych – dane LiDAR i SLAM ulegają degradacji wskutek aerozoli, wilgoci, odbić od ścian oraz nieregularnej geometrii. Sygnały optyczne i impulsowe przyjmują postać widm częściowych, w których część prążków jest stabilna, a część zdegradowana. System SFS-C operuje na tych widmach, traktując je jako struktury samopodobne, które można deterministycznie scaić. Multipath w kanałach ma charakter lokalny i niekoherentny, dlatego degradowuje jedynie wybrane prążki widma. SFS-C wykorzystuje formanty globalne – stabilne elementy widma, które pozostają nienaruszone nawet przy silnych zakłóceniach środowiskowych. Formanty pełnią rolę kotwic widmowych, stabilizujących proces rekonstrukcji. Maski fraktalne selekcionują prążki zgodne ze strukturą sygnału i odrzucają te, które powstały w wyniku odbić, aerozoli lub deformacji impulsów. Dzięki temu możliwe jest odtworzenie widma pierwotnego nawet wtedy, gdy dane LiDAR lub SLAM są niekompletne z natury pomiaru. W systemach LiDAR i SLAM stosowanych w technice sanitarnej istotną rolę odgrywa również nadokreśloność sekwencyjna – wielokrotne widma pochodzące z kolejnych impulsów lub ramek. Choć każde z nich może być częściowe, ich wspólna struktura widmowa umożliwia deterministyczne scalanie sygnału bez modeli kanału, pilotów czy klasycznych metod korekcji błędów. SFS-C działa zatem jako strukturalny filtr multipath, operujący na poziomie widma, a nie na danych czasowych. Stabilność formantów globalnych oraz fraktalna organizacja widma pozwalają odtworzyć dane LiDAR i SLAM w warunkach aerozoli, wilgoci, odbić i nieregularnej geometrii typowych dla infrastruktury wodociągowo-kanalizacyjnej.

6. Zastosowanie języka formalnego AFI ASCII (DSL) do testów SFS-C w LiDAR i SLAM

W testach metody SFS-C wykorzystano potencjał AI Copilot do rekonstrukcji, symulacji i walidacji w środowisku LiDAR/SLAM. W artykule przedstawiono zastosowanie opracowanego języka formalnego AFI ASCII jako deterministycznego DSL, który porządkuje i kontroluje cały proces testowania SFS-C. Dobór repozytoriów danych pozostaje dowolny i zależy od użytkownika, ponieważ DSL nie jest związany z żadnym konkretnym źródłem

danych. W przedstawionej koncepcji AFI ASCII pełni rolę deklaratywnego interfejsu, umożliwiającego jednoznaczne opisanie parametrów zadania, odwzorowanie jego przebiegu w warunkach hydrotechnicznych oraz zapewnienie pełnej walidacji semantycznej poleceń przed ich przekazaniem do modułu wykonawczego. Warstwa rekonstrukcyjna definiuje zakres zadania oraz opis środowiska wodociągowo-kanalizacyjnego. Moduły HEADER, TASK, CONTEXT i OUTPUT_SPEC określają elementy infrastruktury oraz formę prezentacji wyników. Warstwa symulacyjna odwzorowuje zachowanie systemu LiDAR/SLAM. Moduły SENSOR_PROFILE, POINT_CLOUD_CONTEXT, ENVIRONMENT_MODEL i NOISE_PROFILE opisują profil sensora, zbiór punktów rejestrowanych oraz warunki środowiskowe. Warstwa walidacyjna zapewnia semantyczną poprawność poleceń. Moduły VALIDATION_RULES, CONFLICT_DETECTION, SEMANTIC_INTEGRITY i PARSER_RESPONSE kontrolują spójność tokenów (znak podkreślenia jest stosowany jako separator tokenów, zapewniający jednoznaczne rozdzielanie poleceń w DSL), zgodność modułów oraz integralność logiczną instrukcji. Współdziałanie tych trzech warstw sprawia, że AFI ASCII działa jako kompletny język formalny, który opisuje zadanie, odwzorowuje jego przebieg i zapewnia przekazanie polecenia do systemu wykonawczego. Przykłady podprogramów AFI ASCII przedstawiono w tabelach 3, 4 i 5.

Tabela 3. Przykładowy podprogram AFI ASCII dla rekonstrukcji SFS-C w LiDAR/SLAM, opracowanie własne
Table 3. Example AFI ASCII subroutine for SFS-C reconstruction in LiDAR/SLAM, own study

Moduł	Pole	Wartość
HEADER	ID	SFS_C_LIDAR_SLAM_RECONSTRUCTION
	MODEL_PROFILE	COPILOT_ANALYTICAL
SENSOR	TYPE	LIDAR_3D; IMU; CAMERA_RGBD
	FRAME_RATE	20_HZ
TASK	GOAL	RECONSTRUCT_SFS_C
	SUBGOAL	ALIGN_POINT_CLOUD; REMOVE_NOISE; GENERATE_FRACTAL_MAP
CONTEXT	ENVIRONMENT	WATER_PIPE_NETWORK; SEWAGE_INFRASTRUCTURE
	INPUT_DATA	POINT_CLOUD; ODOMETRY; HYDRO_NOISE_PROFILE
CONSTRAINTS	LIMITS	LOW_VISIBILITY; HIGH_REFLECTION; WATER_TURBULENCE
	PRIORITY	STRUCTURAL_ACCURACY > AESTHETIC_OUTPUT
OUTPUT_SPEC	FORMAT	POINT_CLOUD_MAP; FRACTAL_VISUALIZATION
	RESOLUTION	HIGH_DENSITY

Tabela 4. Przykładowy podprogram AFI ASCII dla symulacji LiDAR/SLAM z rekonstrukcją SFS-C, opracowanie własne
Table 4. Example AFI ASCII subroutine for LiDAR/SLAM simulation with SFS-C reconstruction, own study

Moduł	Pole	Wartość
HEADER	ID	SFS_C_LIDAR_SLAM_SIMULATION
	MODEL_PRO-FILE	COPILOT_ANALYTICAL
	SENSOR_PROFILE	LIDAR_3D; IMU; CAMERA_RGBD
	FRAME_RATE	20_HZ
	RANGE	0_50_METERS
	POINT_CLOUD_CONTEXT	RAW_POINT_CLOUD; ODOMETRY; DEPTH_MAP
ENVIRON- MENT_MODEL	DENSITY	HIGH_DENSITY
	INFRASTRUC- TURE	WATER_PIPE_NETWORK; SEWA- GE_TUNNELS
	CONDITIONS	LOW_VISIBILITY; HIGH_REFLECTION; WATER_TURBULENCE
TASK	GOAL	RECONSTRUCT_SFS_C
	SUBGOAL	ALIGN_POINT_CLOUD; REMOVE_NO- ISE; GENERATE_FRACTAL_MAP
NOISE_PRO- FILE	TYPE	HYDRO_NOISE; SENSOR_DRIFT; REFLECTION_ARTIFACTS
CONSTRAINTS	PRIORITY	STRUCTURAL_ACCURACY > AESTHETIC_OUTPUT
OUTPUT_SPEC	FORMAT	POINT_CLOUD_MAP; FRACTAL_VI- SUALIZATION
	RESOLUTION	HIGH

Tabela 5. Hydrotechniczna warstwa walidacji semantycznej AFI ASCII; opracowanie własne
Table 5. Hydrotechnical semantic validation layer of AFI ASCII; own study

Moduł	Pole	Wartość
HEADER	ID	AFI_ASCII_VALIDATION_HYDRO_LAY- ER
	MODEL_PRO-FILE	COPILOT_SEMANTIC_CHECK
VALIDATION_ RULES	TOKEN_ CHECK	ENSURE_SINGLE_SEMANTIC_UNIT
	MODULE_ CHECK	VERIFY_HYDRO_MODULE_COMPA- TIBILITY
	FIELD_CHECK	REQUIRE_PIPE_GEOMETRY_FIELDS
CONFLICT_ DETECTION	FLOW_CON- FLICT	CHECK_FLOW_RATE_COMPATIBILITY
	MATERIAL_ CONFLICT	PIPE_MATERIAL_MATCHING (PVC / STEEL / CONCRETE)
	ENVIRON- MENT_CON- FLICT	HYDRO_NOISE_PROFILE_ALIGN- MENT
SEMANTIC_IN- TEGRITY	SENSOR_ CONFLICT	LIDAR_REFLECTION_RISK_IN_WET_ ENVIRONMENT
	GEOMETRY_ CONSISTENCY	VALIDATE_PIPE_DIAMETER_AND_ CURVATURE
	PRESSURE_ ALIGNMENT	CHECK_PRESSURE_ZONE_COMPA- TIBILITY
PARSER_RE- SPONSE	RESOLUTION	VALIDATE_OUTPUT_SPEC_MATCHING
	STATUS	VALID / INVALID / WARNING
	REPORT	GENERATE_HYDRO_SEMANTIC_SU- MMARY

7. Ilustracje widmowe, rekonstrukcyjne, geometryczne, nawigacyjne i skuteczności rekonstrukcji (ujęcie modelowe)

W celu zobrazowania problemów metrologicznych występujących podczas skanowania kanałów i kolektorów za pomocą LiDAR oraz sposobu ich kompensacji przez rekonstrukcję widmową SFS-C, poniżej przedstawiono zestaw zależności matematycznych o charakterze modelowym. Ilustracje te nie opisują implementacji algorytmu, lecz pokazują metrologiczne skutki działania rekonstrukcji widmowej.

7.1. Ilustracja widmowa – zanik energii sygnału LiDAR w aerozolu wodnym

Sygnał odbiciowy LiDAR w przestrzeniach zamkniętych ulega lokalnym zanikom energii w wybranych pasmach częstotliwościowych. Zjawisko to można opisać widmem mocy:

$$X(f) = F\{x(t)\} \quad (1)$$

$$E_B = \int_B |X(f)|^2 df \quad (2)$$

gdzie:

$X(f)$ – widmo sygnału odbiciowego

E_B – energia w paśmie B

Aerozol wodny oraz odbicia wielokrotne powodują ubytki energii w wybranych pasmach. Jako komentarz metrologiczny, można stwierdzić, że ubytki energii w widmie prowadzą do lokalnych zaników zbioru punktów rejestrowanych, co skutkuje nieciągłością geometrii kanału i błędami w trajektorii SLAM. Jest to podstawowy problem metrologiczny w diagnostyce infrastruktury wodociągowej.

7.2. Ilustracja rekonstrukcyjna – stabilizacja formantów po SFS-C

Rekonstrukcja widmowa SFS-C przywraca stabilność formantów lokalnych i globalnych, co można opisać zależnością:

$$\hat{X}(f) = R_{SFS-C}(X(f)) \quad (3)$$

$$\hat{E}_B = \int_B |\hat{X}(f)|^2 df \quad (4)$$

gdzie:

$\hat{X}(f)$ – widmo po rekonstrukcji

R_{SFS-C} – operator rekonstrukcji o strukturze uogólnionej

$\hat{E}_B$ – energia w paśmie po rekonstrukcji

Jako komentarz metrologiczny, można stwierdzić, że wzrost $\hat{E}_B$ energii w paśmie roboczym oznacza, iż sygnał LiDAR odzyskuje ciągłość widmową, co przekłada się na poprawne jakości rekonstrukcji geometrii kanału. Jest to kluczowe dla detekcji deformacji, zapadnięć i lokalnych uszkodzeń.

7.3. Ilustracja geometryczna – ciągłość zbioru punktów rejestrowanych

Ciągłość zbioru punktów rejestrowanych można opisać wskaźnikiem:

$$C = \frac{1}{L} \int_0^L \rho(s) ds \quad (5)$$

gdzie:

- C – wskaźnik ciągłości geometrii
- $\rho(s)$ – lokalna gęstość punktów LiDAR
- L – długość analizowanego odcinka

Jako komentarz metrologiczny, można stwierdzić, że w obecności aerozolu wodnego gęstość $\rho(s)$ spada, co prowadzi do nieciągłości geometrii. Po rekonstrukcji SFS-C wskaźnik C wzrasta, co oznacza przywrócenie ciągłości krawędzi kanału – kluczowe dla oceny deformacji konstrukcyjnych.

Ilustracja nawigacyjna – stabilizacja trajektorii SLAM

Wpływ rekonstrukcji widmowej na stabilność trajektorii SLAM można opisać błędem średniokwadratowym:

$$e_{raw} = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L \|\gamma_{raw}(s) - \gamma_{ref}(s)\|^2 ds} \quad (6)$$

$$e_{rec} = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L \|\gamma_{rec}(s) - \gamma_{ref}(s)\|^2 ds} \quad (7)$$

gdzie:

- γ_{raw} – trajektoria bez rekonstrukcji
- γ_{rec} – trajektoria po rekonstrukcji
- γ_{ref} – trajektoria referencyjna

Jako komentarz metrologiczny, można stwierdzić, że warunki pomiarowe w kanałach (niska widoczność, odbicia, aerozol) powodują lokalne odchylenia trajektorii SLAM. Po rekonstrukcji widmowej SFS-C błąd e_{rec} ulega zmniejszeniu, co oznacza stabilniejszą nawigację i bardziej wiarygodną rekonstrukcję 3D.

Wnioski: Przedstawione zależności matematyczne stanowią modelowe ilustracje działania systemu LiDAR-SLAM-SFS-C w warunkach pomiarowych typowych dla infrastruktury wodociągowo-kanalizacyjnej. Pokazują one: zanik energii widma w aerozolu, stabilizację formantów po rekonstrukcji, poprawę ciągłości zbioru punktów rejestrowanych, redukcję błęd trajektorii SLAM.

8. Skuteczność rekonstrukcji w funkcji degradacji sygnału

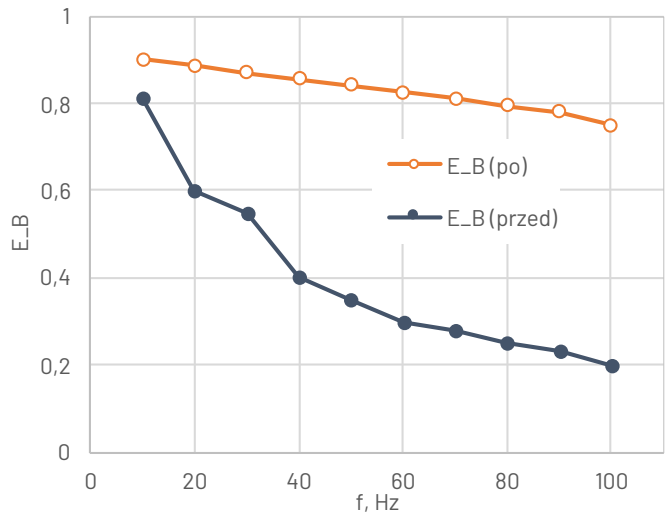
Możliwe są modelowe zależności skuteczności rekonstrukcji:

$$R = \frac{C_{po} - C_{przed}}{C_{ref}} \quad (8)$$

lub

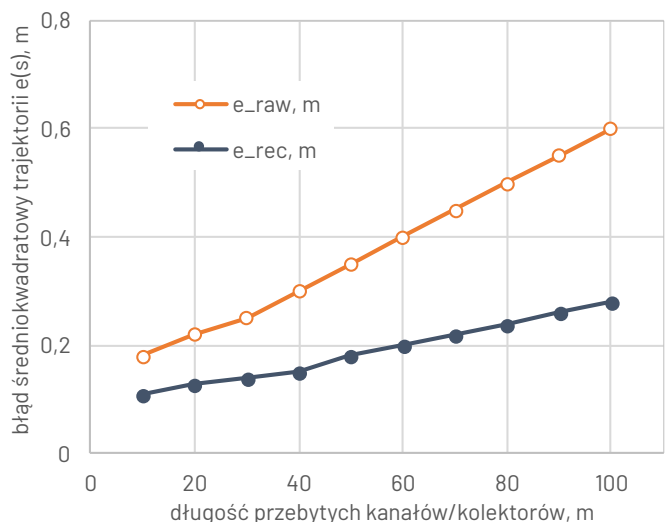
$$R = \frac{e_{raw} - e_{rec}}{e_{raw}} \quad (9)$$

Zależności (8) i (9) pokazują, że im większa degradacja sygnału (niska widoczność, aerozol, odbicia), tym większa korzyść z rekonstrukcji widmowej SFS-C. Przedstawione zależności modelowe tworzą spójny zestaw ilustracji metrologicznych takich jak: stabilizacja widma, poprawa ciągłości zbioru punktów rejestrowanych, redukcja błęd trajektorii SLAM, wzrost skuteczności rekonstrukcji w trudnych warunkach. Ilustracje te mają charakter koncepcyjny i nie ujawniają szczegółów implementacyjnych SFS-C pozostającej w procedurze patentowej.



Rys 1. Widmo „przed/po” rekonstrukcji (dane modelowe)
Fig 1. Pre-/post-reconstruction spectrum (model data)

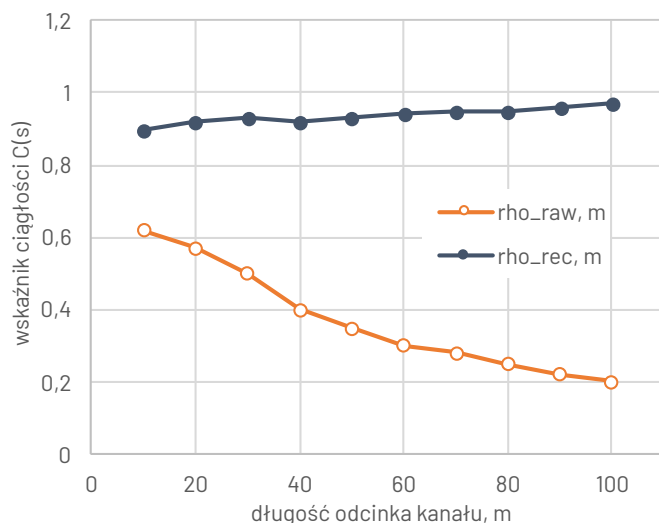
Wykres (rys. 1) przedstawia modelową zależność energii widma sygnału LiDAR w wybranym paśmie częstotliwościowym przed i po rekonstrukcji widmowej SFS-C. Wartości E_B reprezentują energię sygnału zdegradowanego przez aerozol wodny oraz odbicia wielokrotne, natomiast wartości $\tilde{E}_B$ przedstawiają energię po rekonstrukcji widmowej. Wzrost energii w paśmie roboczym po rekonstrukcji oznacza stabilizację formantów lokalnych i globalnych, co przekłada się na poprawę ciągłości zbioru punktów rejestrowanych oraz redukcję błęd trajektorii SLAM. Ilustracja ma charakter modelowy i służy wyłącznie zobrazowaniu metrologicznym korzyści wynikających z rekonstrukcji widmowej SFS-C.



Rys 2. Błąd trajektorii SLAM (dane modelowe)
Fig 2. SLAM trajectory error (model data)

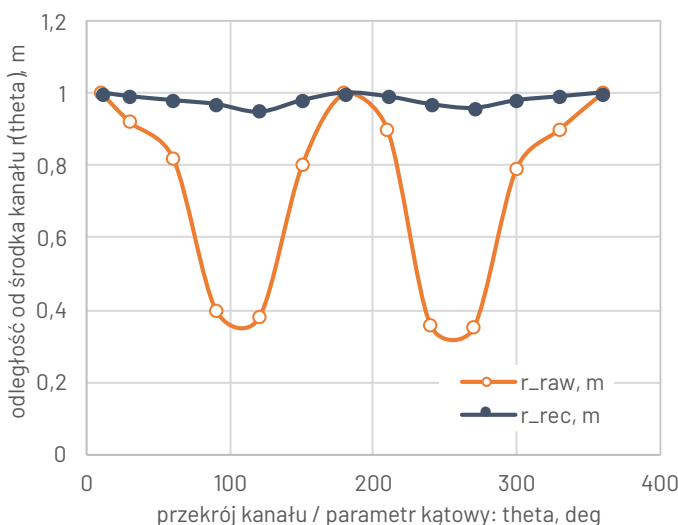
Wykres (rys. 2) przedstawia modelową zależność błęd trajektorii SLAM w funkcji długości przebytego odcinka kanału przed i po rekonstrukcji widmowej SFS-C. Krzywa e_{raw} reprezentuje błąd w warunkach degradacji widma (niska widoczność, aerozol, odbicia), natomiast krzywa e_{rec} przedstawia błąd po stabilizacji widma. Systematyczne obniżenie błęd po rekonstrukcji widmo-

wej potwierdza, że SFS-C poprawia stabilność nawigacji i wiarygodność rekonstrukcji geometrii kanału.



Rys 3. Ciągłość zbioru punktów rejestrowanych (dane modelowe)
Fig 3. Continuity of the recorded point set (model data)

Wykres (rys.3) przedstawia modelową zależność lokalnej gęstości punktów LiDAR wzdłuż krawędzi kanału przed i po rekonstrukcji widmowej SFS-C. W warunkach niskiej widoczności oraz obecności aerozolu wodnego gęstość $\rho(s)$ ulega znacznym spadkom, co prowadzi do nieciągłości zbioru punktów rejestrowanych i utraty informacji geometrycznej. Po rekonstrukcji widmowej SFS-C gęstość punktów wzrasta, a wskaźnik ciągłości C zbliża się do wartości referencyjnych, co oznacza przywrócenie spójności geometrycznej i poprawę jakości rekonstrukcji 3D.

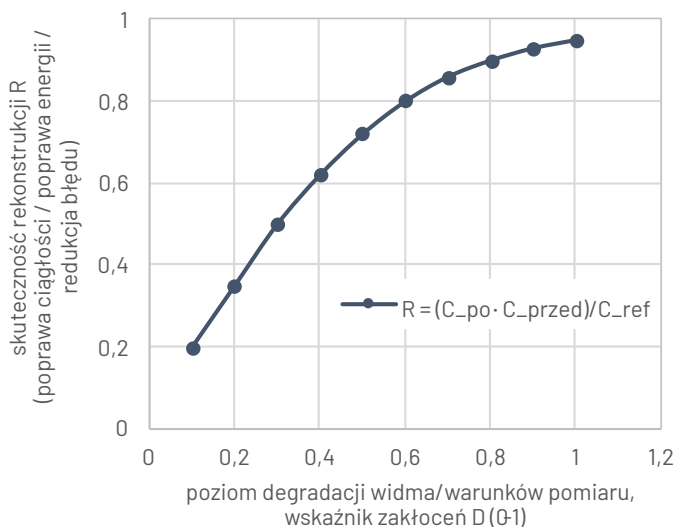


Rys 4. Rekonstrukcyjny profil radialny/promieniowy przekroju kanału jako zależność $r(\theta)$ w funkcji kąta θ

Fig 4. Reconstructed radial profile of the channel cross-section expressed as $r(\theta)$ versus angle θ

Wykres (rys.4) przedstawia modelowany przekrój kanału rejestrowany za pomocą LiDAR. Profil surowy $r_{raw}(\theta)$ zawiera liczne przerwy wynikające z lokalnych zaników sygnału spowodowanych aerozolem wodnym, odbiciami wielokrotnymi oraz niską

widocznością. Po rekonstrukcji widmowej SFS-C profil $r_{raw}(\theta)$ odzyskuje ciągłość geometryczną, a wartości promienia stabilizują się w całym zakresie kątowym. Ilustracja ma charakter modelowy i służy wyłącznie zobrazowaniu metrologicznych korzyści wynikających z rekonstrukcji widmowej SFS-C z pominięciem elementów implementacyjnych.



Rys 5. Skuteczność rekonstrukcji w odniesieniu do poziomu degradacji sygnału

Fig 5. Reconstruction effectiveness versus signal degradation level

Ilustracja (rys.5) modelowa zależności skuteczności rekonstrukcji widmowej SFS-C w funkcji poziomu degradacji sygnału. Wykres pokazuje, że wraz ze wzrostem zakłóceń (niska widoczność, aerozol, odbicia) rośnie względna korzyść rekonstrukcji – im trudniejsze warunki pomiaru, tym większy efekt stabilizacji widma i poprawy ciągłości danych. Zależność ma charakter modelowy i służy wyłącznie zobrazowaniu, że SFS-C jest szczególnie użyteczne w warunkach skrajnie niekorzystnych metrologicznie.

Interpretacja:

D – „jak bardzo sygnał jest zdegradowany” (niska widoczność, aerozol, odbicia),

R – „względna poprawa po rekonstrukcji” (np. znormalizowany wskaźnik poprawy).

9. Wnioski końcowe

Rekonstrukcja widmowa SFS-C stanowi strukturalne podejście do odtwarzania sygnałów zdegradowanych przez multipath, wykorzystując stabilne formanty jako kotwice widmowe. Maski fraktalne selekcionują prążki zgodne ze strukturą sygnału, a nadokreślona redundancja widmowa umożliwia deterministyczną rekonstrukcję bez modeli kanału, pilotów i klasycznego FEC. SFS-C działa jako filtr multipath na poziomie widma, scalając widma częściowe w systemach LiDAR/SLAM podatnych na aerozole, odbicia i deformacje impulsów. Stabilność formantów oraz fraktalna organizacja widma pozwalają odtworzyć strukturę sygnału przy znaczących ubytkach danych. Jako architektura DSP SFS-C obejmuje operacje widmowe, maski fraktalne, definicję formantów i mechanizmy nadokreśloności, stanowiąc deterministyczną metodę rekonstrukcji sygnałów niekompletnych

w przestrzeniach zamkniętych. SFS-C należy do deterministycznych metod rekonstrukcji widmowej, przeznaczonych do pracy z sygnałami niekompletnymi w środowiskach o podwyższonym poziomie zakłóceń.

10. Literatura

- [1] Aijazi, A. K., Malaterre, L., Trassoudaine, L., Chateau, T., & Checchin, P. (2019). Automatic detection and modeling of underground pipes using a portable 3D LiDAR system. *Sensors*, 19(24), 5345. <https://doi.org/10.3390/s19245345>
- [2] Artan, U., Marshall, J. A., & Lavigne, N. J. (2011). Robotic mapping of underground mine passageways. *Mining Technology*, 120(1). <https://doi.org/10.1179/1743286311Y.0000000001>
- [3] Bao, W., Wang, J., Han, H., Zhao, Y., Liu, M., & Wu, H. (2024). Optimized factor graph for Tightly-Coupled LiDAR/IMU localization in underground parking garages. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, X-4–2024, 469–476. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-x-4-2024-469-2024>
- [4] Bedford, M. D., Hrovat, A., Kennedy, G., Javornik, T., & Foster, P. (2020). Modeling microwave propagation in natural caves using LiDAR and ray tracing. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 68(5), 3878–3888. <https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2957969>
- [5] Behrendt, A., & Reichardt, J. (2000). Atmospheric temperature profiling in the presence of clouds with a pure rotational Raman lidar by use of an interference-filter-based polychromator. *Applied Optics*, 39(9), 1372. <https://doi.org/10.1364/ao.39.001372>
- [6] Cui, Y., Liu, S., & Liu, Q. (2021). Navigation and positioning technology in underground coal mines and tunnels: A review. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 121(6), 295–303. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/1065/2021>
- [7] Ferrare, R. A., Melfi, S. H., Whiteman, D. N., Evans, K. D., Schmidlin, F. J., & Starr, D. O. (1995). A comparison of water vapor measurements made by Raman Lidar and Radiosondes. *AMETSOC*. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1995\)012](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1995)012)
- [8] Gunatilake, A., Kodagoda, S., & Thiagarajan, K. (2022). Battery-free UHF-RFID sensors-based SLAM for in-pipe robot perception. *IEEE Sensors Journal*, 22(20), 20019–20026. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3204682>
- [9] Hao, M., Ren, J., Ji, X., Bi, Y., Zhao, S., & Wu, M. (2025). Research on multimodal data enhanced SLAM algorithm for global mapping of underground coal mines. *Scientific Reports*, 15(1), 37124. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-21053-y>
- [10] Jin, J., De Sloover, L., Verbeurgt, J., Stal, C., Deruyter, G., Montreuil, A., De Maeyer, P., & De Wulf, A. (2020). Measuring Surface Moisture on a Sandy Beach based on Corrected Intensity Data of a Mobile Terrestrial LiDAR. *Remote Sensing*, 12(2), 209. <https://doi.org/10.3390/rs12020209>
- [11] Kim, J., Park, B., & Kim, J. (2023). Empirical analysis of autonomous vehicle's LIDAR detection performance degradation for actual road driving in rain and fog. *Sensors*, 23(6), 2972. <https://doi.org/10.3390/s23062972>
- [12] Liu, B., Han, K., Deng, Z., & Guo, G. (2026). A semantic-associated factor graph model for LiDAR-assisted indoor multipath localization. *Sensors*, 26(1), 346. <https://doi.org/10.3390/s26010346>
- [13] Liu, L., Shao, H., Sun, L., Chen, J., Xu, H., Hu, Y., & Xiao, X. (2023). Detection of mildew and moisture content in timber by hyperspectral LiDAR. *Laser Technology*, 47(5), 620–626. <https://doi.org/10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2023.05.007>
- [14] Lu, D., Zhang, Y., Gong, Z., & Wu, T. (2022). A SLAM method based on Multi-Robot cooperation for pipeline environments underground. *Sustainability*, 14(20), 12995. <https://doi.org/10.3390/su142012995>
- [15] Ma A., Yao W. (2024). Multi sensor adaptive fusion SLAM method for underground mobile robots in coal mines. *Journal of Mine Automation*, 50(5), 107–117. <https://doi.org/10.13272/j.issn.1671-251x.2024050031>
- [16] Ma K., Schirru M., Zahraee A., Dwyer-Joyce R., Boxall J., Dodd T. (2017). Pipe SLAM: Simultaneous localisation and mapping in feature sparse water pipes using the Rao-Blackwellised particle filter. In *2017 IEEE international conference on advanced intelligent mechatronics (AIM)* (pp. 1459–1464). IEEE. <https://doi.org/10.1109/AIM.2017.8014224>
- [17] Melfi S., Whiteman D. (1985). Observation of lower-atmospheric moisture structure and its evolution using a Raman lidar. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 66(10), 1288–1292. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1985\)066<1288:OOLAMS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1985)066<1288:OOLAMS>2.0.CO;2)
- [18] Paleczek W. (2004). *Metody analizy danych (na przykładach)*. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej.
- [19] Paleczek W. (2005). A Method of Investigation of Moisture Materials Using FFT. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 43/2005, 81–91.
- [20] Paleczek W. (2005). *MathCad w algorytmach*. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa.
- [21] Paleczek W. (2013). Filtracja sejsmogramu w pasmach częstotliwości formantu głównego. *Drogownictwo*, R. 68, nr 2, s. 62–65.
- [22] Paleczek W. (2025). Tryliony wzorów pola powierzchni trójkąta jako fraktalne struktury w obliczeniach wspomaganych sztuczną inteligencją. *Przegląd Włókienniczy*, 10/2025, 25–37. <https://doi.org/10.15199/60.2025.5.1>
- [23] Paleczek W. (2026). Fraktalny system kodowania widmowego SFS-C dla bezstratnej transmisji danych w nawigacji satelitarnej GNSS. *Przegląd Geodezyjny* 7/2026, 35–37. <https://doi.org/10.15199/50.2026.7.5>
- [24] Paleczek W. (2026). System SFS-C: zgłoszenie patentowe. Materiały niepublikowane.
- [25] Que, J., Zheng, E., & Zou, Z. (2023). Multi-Sensor Fusion SLAM method for underground power pipe Gallery. *Journal of Physics Conference Series*, 2477(1), 012070. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2477/1/012070>
- [26] Shipley, S. T., Tracy, D. H., Eloranta, E. W., Trauger, J. T., Sroga, J. T., Roesler, F. L., & Weinman, J. A. (1983). High spectral resolution lidar to measure optical scattering properties of atmospheric aerosols 1: Theory and instrumentation. *Applied Optics*, 22(23), 3716. <https://doi.org/10.1364/ao.22.003716>
- [27] Späth, F., Behrendt, A., Muppa, S. K., Metzendorf, S., Riede, A., & Wulfmeyer, V. (2016). 3-D water vapor field in the atmospheric boundary layer observed with scanning differential absorption lidar. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9(4), 1701–1720. <https://doi.org/10.5194/amt-9-1701-2016>
- [28] Tian T., Wang L., Yan X., Ruan F., Aadityaa G., Choset H., Li L. (2023). Visual-inertial-laser-lidar (vill) slam: Real-time dense rgb-d mapping for pipe environments. In *2023 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (pp. 1525–1531). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IROS55552.2023.10341761>
- [29] Totems, J., Chazette, P., & Baron, A. (2021). Mitigation of bias sources for atmospheric temperature and humidity in the mobile Raman Weather and Aerosol Lidar (WALI). *Atmospheric Measurement Techniques*, 14(12), 7525–7544. <https://doi.org/10.5194/amt-14-7525-2021>
- [30] Wang, K., Zou, S., Jiang, C., Dai, Y., Chen, S., & Shen, S. (2026). Water-Splat-SLAM: Photorealistic monocular SLAM in underwater environment. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 11(5), 5614–5621. <https://doi.org/10.1109/LRA.2026.3668465>
- [31] Wei, Y., Li, Y., Wang, Y., Lin, Y., & Shen, W. (2023). Research on underground road vehicle location and mapping using MMW radar. In *EITCE '22: Proceedings of the 2022 6th International Conference on Electronic Information Technology and Computer Engineering* (pp. 890–894). <https://doi.org/10.1145/3573428.3573588>
- [32] Wulfmeyer, V., & Bösenberg, J. (1998). Ground-based differential absorption lidar for water-vapor profiling: assessment of accuracy, resolution, and meteorological applications. *Applied Optics*, 37(18), 3825. <https://doi.org/10.1364/ao.37.003825>
- [33] Xie X., Xu L., Li X. (2017). Leaf moisture content measurement using polarized active imaging LiDAR. In *2017 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques (IST)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IST.2017.8261557>
- [34] Zhang F., Clarke D., Knoll A. (2014). Vehicle detection based on LiDAR and camera fusion. In *17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)* (pp. 1620–1625). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2014.6957925>
- [35] Zhang R., Evans, M. H., Worley, R., Anderson, S. R., & Mihaylova, L. (2021). Improving SLAM in pipe networks by leveraging cylindrical regularity. *Lecture Notes in Computer Science*, 56–65. https://doi.org/10.1007/978-3-030-89177-0_6
- [36] Zhang X., Zhang H., Qian, C., Li, B., & Cao, Y. (2023). A LiDAR-intensity SLAM and loop closure detection method using an intensity cylindrical-projection shape context descriptor. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 122, 103419. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103419>

Nadchodzące Wydarzenia

Ochrona drewnianych budynków zabytkowych instalacją mgły wodnej niskociśnieniowej

Szkolenie poświęcone będzie zagadnieniom związanym z ochroną przeciwpożarową drewnianych budynków zabytkowych z wykorzystaniem instalacji mgły wodnej niskociśnieniowej. Omówiony zostanie wpływ lokalizacji obiektu i sposobu zaopatrzenia w wodę na wybór rozwiązania oraz wymagania konserwatora zabytków i konieczność współpracy wielu branż.

W trakcie spotkania przedstawione zostaną również przykładowe projekty oraz możliwe kierunki rozwiązań pozwalających na optymalne zabezpieczenie obiektów zabytkowych.

Wykładowca: mgr inż. Małgorzata Sawczuk

Termin: 15 października 2026 r., godz. 11:00–14:00

Miejsce: on-line

Szczegóły: pzits.com.pl/index.php/szkolenia-seminaryjne

Oprogramowanie wspierające projektowanie rurociągów preizolowanych – produkty, zastosowania, możliwości i ograniczenia

Szkolenie poświęcone będzie narzędziom wspierającym projektowanie rurociągów preizolowanych oraz ich praktycznemu zastosowaniu. Omówione zostaną rodzaje i zastosowania rur preizolowanych – stalowych i elastycznych – a także narzędzia wykorzystywane do obliczeń statycznych rurociągów stalowych.

Uczestnicy poznają również przykładowe zastosowania rur typu Isoplus oraz możliwości wykorzystania omawianych rozwiązań w praktyce projektowej.

Wykładowcy: Marcin Dyśko (ISOPLUS)

Termin: 27 października 2026 r., godz. 11:00–14:00

Miejsce: szkolenie online

Szczegóły: pzits.com.pl/index.php/szkolenia-seminaryjne

Webinar: Bezwykopowa renowacja sieci kanalizacyjnych i wodociągowych

Główna Sekcja Wodociągów i Kanalizacji PZITS zaprasza na dwuczęściowe szkolenie online poświęcone planowaniu, projektowaniu i realizacji bezwykopowych renowacji sieci kanalizacyjnych i wodociągowych.

Podczas spotkań omówione zostaną zagadnienia związane z oceną stanu technicznego przewodów, identyfikacją problemów eksploatacyjnych, doбором odpowiedniej technologii renowacji oraz przygotowaniem dokumentacji projektowej. Program obejmuje również wymagania odbiorowe i kontrolę jakości, problemy wykonawcze oraz doświadczenia praktyczne i studia przypadków.

Pierwsza część szkolenia dotyczyć będzie renowacji sieci kanalizacyjnych, natomiast druga – sieci wodociągowych. Szkolenie skierowane jest m.in. do projektantów, inwestorów, eksploataatorów oraz osób uczestniczących w planowaniu i realizacji prac renowacyjnych.

Termin: Część I – renowacja sieci kanalizacyjnych: 13 października 2026 r., godz. 9:00–13:00

Część II – renowacja sieci wodociągowych: 1 grudnia 2026 r., godz. 9:00–13:00

Miejsce: on-line

Szczegóły: <https://pzits.pl/webinar-bezwykopowa-renowacja-sieci-kanalizacyjnych-i-wodociagowych-planowanie-projektowanie-wykonawstwo>

XIX Konferencja Naukowo-Techniczna „Wentylacja, Klimatyzacja, Ogrzewnictwo, Środowisko” 2026

PZITS Oddział w Krakowie wraz ze współorganizatorami zaprasza na XIX Konferencję Naukowo-Techniczną „Wentylacja, Klimatyzacja, Ogrzewnictwo, Środowisko”. Wydarzenie będzie okazją do wymiany wiedzy i doświadczeń przedstawicieli nauki, branży instalacyjnej, przedsiębiorstw komunalnych oraz specjalistów z zakresu inżynierii środowiska i energetyki.

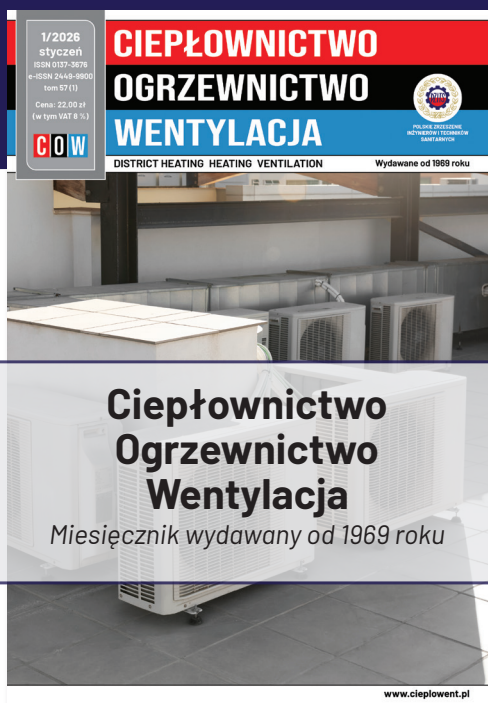
Program obejmuje cztery główne obszary: ciepłownictwo i ogrzewnictwo w kontekście dekarbonizacji, wentylację i klimatyzację, środowisko i gospodarkę obiegu zamkniętego oraz nowoczesne zarządzanie. Poruszone zostaną m.in. zagadnienia pomp ciepła, magazynowania energii, jakości powietrza, odzysku ciepła, gospodarki wodnej, sztucznej inteligencji i cyfryzacji.

Termin: 22–23 października 2026 r.

Miejsce: Lake View Żywiec Resort & Spa, Tresna

Szczegóły: <https://pzits.krakow.pl/konferencja-2026>

Czasopisma Polskiego Zrzeszenia
Inżynierów i Techników Sanitarnych
w nowej odsłonie

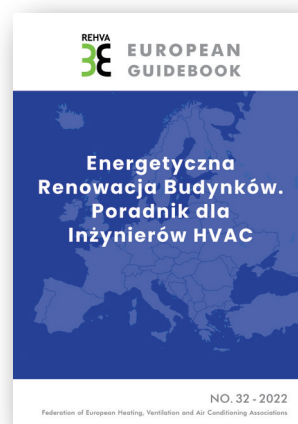


Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja

Miesięcznik wydawany od 1969 roku



Zapisz się na **bezpłatną** prenumeratę
czasopism, a otrzymasz e-poradnik:
„REHVA GB.32: Energetyczna renowacja
budynków. Poradnik dla inżynierów HVAC”



Dołącz już dziś do grona
specjalistów i otrzymuj od bezpłatną
prenumeratę czasopism PZITS.



Więcej szczegółów na stronie:
www.pzits.pl/prenumerata



Certyfikacja serwisantów MOŚ – nowy standard jakości i ochrony środowiska

Zrównoważony rozwój i dbałość o środowisko naturalne wymuszają na branży sanitarnej ciągłe podnoszenie standardów. Jednym z kluczowych obszarów, który w ostatnich latach wymagał pilnej interwencji i uporządkowania, jest rynek małych oczyszczalni ścieków. W odpowiedzi na rosnące zapotrzebowanie oraz zgłaszane przez użytkowników problemy, Wielkopolski Oddział Polskiego Zrzeszenia Inżynierów i Techników Sanitarnych zainicjował i z sukcesem prowadzi pionierski w skali kraju projekt certyfikacji serwisantów tych obiektów.

Małe oczyszczalnie ścieków cieszą się w Polsce coraz większą popularnością, stanowiąc ważny element gospodarki wodno-ściekowej. Należy jednak pamiętać, że samo zainstalowanie urządzenia to dopiero początek drogi do osiągnięcia zamierzonego efektu ekologicznego, ale jak się okazuje, i ekonomicznego. Do prawidłowego serwisowania tych instalacji brakuje niestety wykwalifikowanych specjalistów.



Jak pokazują obserwacje rynku oraz sygnały od samych użytkowników na forach internetowych i w prasie, jakość usług serwisowych często budzi poważne zastrzeżenia. Nierzadko spotykać się można z praktyką tzw. „fikcyjnych przeglądów”, które ograniczają się jedynie do wizualnych oględzin, wypisania dokumentów lub powierzchownego umycia elementów instalacji. Prowadzi to do szybkiej utraty rentowności urządzeń i braku deklarowanych przez producenta efektów oczyszczania. Problem ten dawno przestał dotyczyć wyłącznie hermetycznego środowiska branżowego, gdyż to zaniechanie uderza w tysiące właścicieli przydomowych oczyszczalni oraz narusza ogólnospołeczny interes.

Aby poprawić jakość serwisowania i zapobiec postępującej degradacji urządzeń, PZITS podjęło się opracowania planu szkolenia oraz możliwości zdobycia kwalifikacji wolnorynkowej dla serwisantów. W ramach Zintegrowanego Systemu Kwalifikacji (ZSK), PZITS zostało instytucją certyfikującą (obecnie jedyną w Polsce uprawnioną do tego zadania), która prowadzi walidację – sprawdza, czy kandydat faktycznie posiada wymaganą wiedzę oraz umiejętności praktyczne. Kwalifikacja ta została włączona do Zintegrowanego Systemu Kwalifikacji na poziomie PRK 4.



Jak tłumaczy dr hab. inż. Dobrochna Ginter-Kramarczyk, Przewodnicząca Komisji Walidacyjnej: „Certyfikacja to bynajmniej nie „uzyskanie papierka”. To nie kolejny, wewnętrzny dokument, który warto oprawić w ramkę, a faktyczne potwierdzenie kompetencji serwisanta w ramach kwalifikacji wolnorynkowej wpisanej do Zintegrowanego Systemu Kwalifikacji. Tym samym to gwarancja, iż serwisant, który pozytywnym wynikiem ukończył walidację, jest fachowcem biegłym w swoim fachu.”

Historyczna, pierwsza w Polsce walidacja serwisantów MOŚ, zrealizowana przez Wielkopolski Oddział PZITS, odbyła się 21 czerwca 2024 r. Jej część praktyczna miała miejsce na obiektach w podpoznańskim Zakrzewie i Skórzewie. Zainicjowanie tego procesu w Wielkopolsce podkreśla rolę tego obszaru jako prekursora zmian.





„Ranga tego wydarzenia wykracza daleko poza granice samego regionu. Wprowadzenie certyfikacji serwisantów MOŚ przez PZITS to milowy krok w kierunku profesjonalizacji branży i poprawy standardów ochrony środowiska w Polsce” – zaznacza dr inż. Teresa Kubiak, prezes Wielkopolskiego Oddziału PZITS.

Inicjatywa spotkała się z odzewem rynku. Do chwili obecnej Oddział Wielkopolski PZITS przeprowadził już pięć edycji certyfikacji, w wyniku których na rynek trafiło 27 rzetelnie zweryfikowanych specjalistów. Każdy z nich, aby zdobyć uprawnienia, musiał pomyślnie przejść proces walidacyjny, czyli zdać egzamin teoretyczny i praktyczny przed specjalnie powołanym do tego zadania składem asesorów Komisji Walidacyjnej.

„Choć liczba przeprowadzonych dotąd egzaminów może z pozoru wydawać się niezbyt spektakularna, należy wziąć pod uwagę czas, jaki musimy poświęcić każdemu uczestnikowi. Wynika to bezpośrednio ze złożonej procedury określonej w ramie kwalifikacyjnej oraz naszych bezwzględnych zobowiązań do należytego przeprowadzenia egzaminu. Warto mocno podkreślić, że walidacja jest obiektywnym procesem podlegającym ściśle określonym wytycznym. Z tego względu jedna edycja pozwala nam na ten moment na rzetelne przeegzaminowanie maksymalnie 5-6 osób. Wierzymy jednak, że w miarę rozwoju naszej inicjatywy, to grono będzie sukcesywnie rosnąć, a liczbę przeprowadzonych dotąd procedur uznać należy za wynik bardzo dobrze rokujący” – mówi Jakub Skrzypczak, koordynator walidacji z ramienia Wielkopolskiego Oddziału PZITS.

Wielkopolski Oddział PZITS stale udoskonala wprowadzane rozwiązania, wychodząc naprzeciw oczekiwaniom uczestników, którzy zjeżdżają na egzaminy z różnych kątów Polski. Organizacja oddzielnego kursu przygotowawczego w innym terminie zmuszałaby kandydatów do dwukrotnego przyjazdu. Dlatego od kilku edycji praktyczna część kursu przygotowawczego realizowana jest bezpośrednio w dniu walidacji. Takie podejście nie tylko pozwala na znaczną optymalizację kosztów dojazdu i zakwaterowania po stronie uczestników, ale również umożliwia im wcześniejsze zapoznanie się z obiektami i instalacjami, na których później zdają egzamin praktyczny.

Pojawiają się również bardzo budujące informacje zwrotne od osób, które pomyślnie przeszły proces walidacji. Z relacji samych serwisantów wynika, że certyfikacja realnie pomogła im rozwinąć się zawodowo, a ich potwierdzone kompetencje zostały szybko dostrzeżone przez potencjalnych pracodawców. Jeden z uczestników, posługując się uzyskanym certyfikatem, rozpoczął nawet współpracę z Generalną Dyrekcją Dróg Krajowych i Autostrad (GDDKiA), co stanowi najlepszy dowód na rynkową wartość tego dokumentu.

Nadrzędnym celem działań związanych z certyfikacją serwisantów MOŚ jest dalsza, systemowa profesjonalizacja tej gałęzi rynku. O ile na ten moment posiadanie certyfikatu jest pożądaną i dobrą praktyką, o tyle docelowym założeniem jest wprowadzenie standardu, w którym taki dokument będzie formalnym obowiązkiem przy serwisowaniu MOŚ na wzór rozwiązań funkcjonujących m.in. w Niemczech.



O uzyskanie certyfikatu mogą ubiegać się m.in.: pracownicy firm serwisujących oraz dokonujących montażu MOŚ, technicy i inżynierowie z branży ochrony środowiska, pracownicy gminnych zakładów komunalnych, zarządcy nieruchomości i obiektów użyteczności publicznej, a także osoby prowadzące szkolenia dla użytkowników.

Korzyści z wdrożenia systemu są wielorakie. Dla użytkowników MOŚ to pewność, że powierzają swój sprzęt fachowcowi, co gwarantuje długowieczność instalacji. Dlatego wbrew pozorom to właśnie oni są największymi beneficjentami prowadzonych walidacji. Dla samego serwisanta certyfikat to ważny atut i dowód na jego profesjonalizm, co znacząco zwiększa jego potencjał na rynku pracy. Niemniej ważny pozostaje realny efekt ekologiczny dla środowiska.

Aby ułatwić znalezienie rzetelnego fachowca, PZITS prowadzi ogólnodostępną listę osób certyfikowanych, która znajduje się na stronach Stowarzyszenia. Ponadto Oddział Wielkopolski PZITS już teraz planuje organizację specjalnego panelu dyskusyjnego. Uczestniczyć w nim będą certyfikowani serwisanci, którzy podzielą się swoimi realnymi doświadczeniami z szerszym audytorium podczas konferencji „Ochrona środowiska w praktyce”, organizowanej w ramach Międzynarodowych Targów Ochrony Środowiska POLECO.

**Szczegółowe informacje
dotyczące certyfikacji
serwisantów MOŚ dostępne
są na stronie:**

www.pzits.pl/mos

