

Porównanie sposobów transportu ścieków z zastosowaniem metod racjonalizacji rozwiązań

Comparison of wastewater transport methods using solution rationalization methods

Weronika Patelska¹, Tomasz Schiller^{1*} 

¹ Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Poznańska

* Kontakt / Correspondence: tomasz.schiller@put.poznan.pl

Streszczenie:

Celem pracy jest prezentacja metody wskazania racjonalnego sposobu transportu ścieków oraz jej sprawdzenie na wybranym przykładzie. W pracy przeprowadzono analizę czterech wariantów transportu ścieków. Dokonano analiz SWOT oraz kosztów. Stwierdzono, że o racjonalności systemu transportu ścieków decydują przede wszystkim długość sieci, liczba urządzeń tłocznych, ukształtowanie terenu oraz możliwość wykorzystania istniejącej infrastruktury. Uzyskane wyniki potwierdziły przydatność zastosowanych metod racjonalizacji rozwiązań jako narzędzi wspomagających podejmowanie decyzji projektowych w zakresie planowania systemów kanalizacyjnych.

Słowa kluczowe: transport ścieków, system kanalizacyjny, analiza SWOT, analiza kosztów, racjonalizacja rozwiązań projektowych

Abstract:

The aim of this study was to present a method for determining the efficient way to transport wastewater and to test it using a selected example. This study analyzed four wastewater transport options. SWOT and cost analyses were performed. It was found that the rationality of a wastewater transport system is determined primarily by the length of the network, the number of pumping stations, the topography of the area, and the possibility of utilizing existing infrastructure. The results obtained confirmed the usefulness of the methods used to optimize solutions as tools to support design decisions in the planning of sewer systems.

Keywords: wastewater transport, sewerage system, SWOT analysis, cost analysis, rationalization of design solutions

1. Wstęp

Rozwój obszarów zurbanizowanych oraz rosnące wymagania w zakresie ochrony środowiska sprawiają, że systemy kanalizacyjne potrzebują doskonalenia, aby zapewnić efektywność transportu ścieków z miejsca ich powstawania do obiektów oczyszczania. W praktyce inżynierskiej często pojawia się konieczność transportu ścieków na większe odległości. W takich przypadkach niezbędne jest rozważenie różnych wariantów odprowadzania ścieków (transport grawitacyjny, ciśnieniowy oraz podciśnieniowy).

2. Przegląd metod wspomagających podejmowanie decyzji

Podejmowanie decyzji stanowi jeden z podstawowych elementów procesu planowania, projektowania oraz zarządzania sys-

temami infrastrukturalnymi. W przypadku infrastruktury technicznej decyzje dotyczą najczęściej wyboru racjonalnego rozwiązania spośród kilku możliwych wariantów projektowych, które różnią się parametrami technicznymi, kosztami realizacji, niezawodnością eksploatacyjną oraz oddziaływaniem na środowisko [17]. Współczesne inwestycje infrastrukturalne cechują się znaczną złożonością i wymagają uwzględnienia wielu różnych aspektów funkcjonowania, co powoduje, że w proces podejmowania decyzji warto włączyć metody analityczne wspomagające wybór optymalnego wariantu [16].

Decyzje podejmowane w inżynierii środowiska mają zwykle charakter długoterminowy i wiążą się z istotnymi nakładami finansowymi, a ich konsekwencje mogą wpływać na funkcjonowanie systemu przez wiele lat. Dlatego znaczenie ma stosowanie metod umożliwiających systematyczną analizę dostępnych wariantów i racjonalne uzasadnienie wyboru danego rozwiązania [42]. Piśmiennictwo dotyczące podejmowania decyzji pokazuje

wiele metod wspomagających proces decyzyjny:
Analiza kosztów cyklu życia (LCC – Life Cycle Cost) to jedna z podstawowych metod racjonalizacji rozwiązań technicznych [15]. Pozwala na dokonanie racjonalnego wyboru wariantu inwestycyjnego, szczególnie w przypadku systemów wodno-kanalizacyjnych, które charakteryzują się długim okresem eksploatacji [27]. Uwzględnia koszty operacyjne, konserwacyjne, napraw oraz związane z wymianą i likwidacją obiektu po zakończeniu okresu eksploatacji [32, 18]. Przykładowe kategorie kosztów w systemach transportu ścieków przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Przykłady kosztów w systemach transportu ścieków (opracowanie własne na podstawie [15])
Table 1. Examples of costs in wastewater transportation systems (author's own analysis based on [15])

Rodzaj kosztu	Przykłady w systemach transportu ścieków
Koszty inwestycyjne (CAPEX)	Wykonanie wykopów i robót ziemnych. Zakup i montaż rurociągów. Budowa przepompowni ścieków.
Koszty eksploatacyjne (OPEX)	Koszty obsługi technicznej. Monitoring i sterowanie systemem. Bieżące utrzymanie sieci.
Koszty remontów i utrzymania	Czyszczenie kanałów i usuwanie zatorów. Naprawa uszkodzonych przewodów lub wymiana zużytych elementów. Modernizacja przepompowni ścieków.
Koszty energii	Zasilanie pomp w systemach tłocznych. Praca urządzeń sterujących i automatyki. Transport ścieków na duże odległości.
Koszty środowiskowe	Emisja gazów cieplarnianych związana ze zużyciem energii. Ryzyko zanieczyszczenia gleby i wód w przypadku awarii. Oddziaływanie inwestycji na ekosystemy.

Analiza kosztów i korzyści (CBA – Cost-Benefit Analysis) porównuje koszty i korzyści realizacji przedsięwzięcia w celu określenia opłacalności ekonomicznej. Wykorzystywana w projektach infrastrukturalnych, w których konieczne jest jednoczesne uwzględnienie nakładów finansowych oraz szeroko rozumianych efektów społecznych i środowiskowych [10, 40]. Metoda ta, poprzez dyskontowanie umożliwia porównanie kosztów i korzyści w różnych momentach czasu. W projektach infrastrukturalnych koszty inwestycyjne ponoszone są na początku, a korzyści pojawiają się w długim okresie eksploatacji [37].
Analiza wielokryterialna (MCDA – Multi-Criteria Decision Analysis) to grupa metod stosowanych w inżynierii środowiska i projektowaniu infrastruktury technicznej. Umożliwia jednoczesne uwzględnienie wielu kryteriów, często o wzajemnie sprzecznych wymaganiach, takich jak aspekty ekonomiczne, techniczne, środowiskowe oraz społeczne [1, 2, 17].
Analiza SWOT jest często stosowaną metodą jakościową umożliwiającą ocenę analizowanego problemu przez uporządkowanie i identyfikację czynników wewnętrznych i zewnętrznych wpływających na rozpatrywane rozwiązania [12, 34, 41]. W analizach technicznych SWOT może stanowić narzędzie wspomagające wybór racjonalnego wariantu, szczególnie na wstępnym etapie procesu decyzyjnego [23].
Analiza ryzyka to proces systematycznego identyfikowania, oceniania i zarządzania potencjalnymi zagrożeniami, które mogą

wpływać na funkcjonowanie systemów technicznych, organizacyjnych lub środowiskowych [19, 30]. W kontekście systemów wodociągowych i kanalizacyjnych analiza ryzyka obejmuje nie tylko awarie techniczne, ale także ryzyka środowiskowe i społeczne.
Benchmarking to metoda analizy porównawczej poprzez odniesienie do obiektów lub wartości referencyjnych. Identyfikuje różnice w efektywności technicznej, ekonomicznej i operacyjnej systemów [7, 33]. Podstawą są wskaźniki efektywności (KPI – Key Performance Indicators), które umożliwiają ilościową ocenę funkcjonowania systemów pod kątem kosztów operacyjnych, zużycia energii, niezawodności infrastruktury [11] w ujęciu technicznym, ekonomicznym i środowiskowym [25].

3. Metoda porównania rozwiązań

W niniejszej pracy zaproponowano stosunkowo prostą metodę, która może wspomóc proces decyzyjny. Pokazano również zastosowanie tej metody dla przykładowego systemu kanalizacyjnego, gdzie wybór technologii lub sposobu transportu ścieków wpływa zarówno na wysokość kosztów inwestycyjnych, jak i późniejsze koszty eksploatacyjne oraz oddziaływanie na środowisko naturalne [17].
Proponowana metoda zakłada dwa etapy analizy i jest ukierunkowana na porównanie wariantów systemu kanalizacyjnego służącego przesyłowi ścieków na większe odległości. Można ją zastosować w przypadku innych inwestycji infrastrukturalnych pod warunkiem dostosowania jej elementów do koncepcji, której ma służyć. Pokazano to opisując etapy metody.
Etap pierwszy: jakościowa analiza SWOT. W ramach analizy proponuje się ocenić następujące obszary funkcjonowania systemu:

- uwarunkowania techniczne realizacji inwestycji, w tym długość tras przesyłowych oraz liczba obiektów technologicznych (przepompowni),
- stopień trudności wykonawczej inwestycji wynikający z warunków terenowych oraz gruntowych,
- potencjalną awaryjność poszczególnych elementów infrastruktury,
- wpływ inwestycji na środowisko naturalne, w tym potencjalne ryzyko oddziaływania na wody gruntowe,
- możliwość rozbudowy i etapowania systemu w przyszłości,
- możliwość wykorzystania istniejącej infrastruktury.

Etap drugi: ilościowa analiza kosztów. W proponowanej metodzie, analiza obejmuje porównanie:
• kosztów inwestycyjnych budowy sieci, do których zaliczane są roboty ziemne, przewody, studzienki oraz przepompownie,
• kosztów eksploatacyjnych systemu, w szczególności kosztów związanych z energochłonnością.
W ramach analizy należy przyjąć jednakowe założenia projektowe dla wszystkich wariantów, aby zachować porównywalności wyników i racjonalność oceny poszczególnych rozwiązań. W analizowanym przypadku obejmuje to m.in. jednostkową ilość ścieków bytowych, współczynniki nierównomierności, minimalne spadki dna kanałów, dopuszczalne prędkości przepływu, parametry pracy przepompowni, okres analizy ekonomicznej oraz ceny energii elektrycznej.

3.1. Uproszczona analiza kosztów robót ziemnych, kosztów i własności materiałów

W ramach uproszczonej analizy kosztów robót ziemnych należy przyjąć jednostkowy koszt wykonania wykopu. W badanym przypadku przyjęto 32,50 zł/mb, co stanowi wartość uśrednioną na podstawie danych rynkowych oraz typowych stawek stosowanych w realizacji sieci kanalizacyjnych [46]. Wartość tę należy następnie skorygować o główne czynniki kosztotwórcze wpływające na rzeczywisty koszt wykonania robót [47]. W badanym przypadku uwzględniono wpływ warunków gruntowych, przyjmując dla wszystkich wariantów występowanie gruntu w postaci gliny zwałowej, co skutkowało zwiększeniem kosztu o 50%. Dodatkowo przyjęto, że głębokość wykopów na większości odcinków tras przekracza 1,5 m, co generowało wzrost kosztów o 40%. Średnica przewodów powyżej 160 mm powodowała zwiększenie kosztów o 30%. W przypadku lokalizacji robót uwzględniono prowadzenie sieci w pasie drogowym lub w nawierzchni asfaltowej, co skutkowało wzrostem kosztów o 100%. Należy zaznaczyć, że całkowity koszt robót ziemnych w rzeczywistości obejmuje nie tylko wykonanie wykopów, lecz również szereg dodatkowych czynności, takich jak transport i utylizacja urobku, wykonanie obsypki i zagęszczenia, rekultywacja terenu, odwodnienie wykopów czy odtworzenie nawierzchni asfaltowych. Elementy te wskazano jako składowe pełnego kosztu realizacji robót ziemnych i można je uwzględnić w miarę dostępności danych. Przedstawione tutaj wielkości należy traktować jako wartości wskaźnikowe, służące ocenie względnej kosztowności analizowanych rozwiązań, a nie jako pełne koszty inwestycyjne realizacji robót w terenie.

W analizie rozwiązań projektowych dotyczących transportu ścieków istotnym elementem wpływającym na koszty inwestycyjne i eksploatacyjne systemu kanalizacyjnego jest materiał, z którego wykonuje się przewody. Rozpatrzono trzy podstawowe warianty materiałowe stosowane w systemach kanalizacji grawitacyjnej i tłocznej: polietylen, polichlorek winylu oraz rury betonowe.

Aby umożliwić porównanie analizowanych wariantów materiałowych zestawiono ich podstawowe właściwości w aspekcie technicznym i ekonomicznym (tabela 2). Koszty określono na podstawie danych katalogowych producentów oraz analiz rynkowych.

Tabela 2. Porównanie właściwości materiałów przewodów kanalizacyjnych (opracowanie własne na podstawie [22, 21, 45])

Table 2. Comparison of the properties of sewer pipe materials (author's own analysis based on [22, 21, 45])

Cecha	PE	PVC	Beton
Odporność chemiczna	bardzo wysoka	wysoka	średnia
Wytrzymałość mechaniczna	wysoka	średnia	bardzo wysoka
Elastyczność	bardzo wysoka	niska	bardzo niska
Chropowatość hydrauliczna	bardzo niska	niska	wysoka
Łatwość montażu	średnia	wysoka	niska
Koszt materiału	ok. 200–400 zł/mb	ok. 50–200 zł/mb	ok. 150–350 zł/mb
Trwałość eksploatacyjna	bardzo wysoka	wysoka	bardzo wysoka
Zastosowanie	systemy tłoczne i grawitacyjne	głównie systemy grawitacyjne	duże średnice kanałów, kolektory

3.2. Uproszczona analiza zapotrzebowania na energię elektryczną

Elementem analizy kosztów eksploatacyjnych jest określenie zapotrzebowania na energię elektryczną obiektów infrastruktury. W analizowanym przypadku są to przepompownie ścieków, które stanowią kluczowe obiekty technologiczne w systemach transportu ścieków na większe odległości. Dla każdego wariantu obliczenia wykonano według jednakowego schematu, przyjmując następujące założenia:

- prędkość przepływu ścieków w rurociągu tłocznym wynosi 1,0 m/s,
- długość rurociągu tłoczego odpowiada odległości od ściany zewnętrznej zbiornika pompowni do ściany zewnętrznej studni rozprężnej i jest ograniczona do wartości wymaganej dla podniesienia ścieków do studni rozprężnej kolejnego systemu grawitacyjnego,
- teren wznosi się jednostajnie w kierunku studni rozprężnej; wysokość geometryczna odpowiada różnicy rzędnych pomiędzy zwierciadłem ścieków w pompowni a wlotem przewodu tłoczego do studni rozprężnej,
- zwierciadło ścieków w pompowni nie uwzględnia minimalnego poziomu roboczego, wynikającego z wysokości czynnej,
- rurociąg tłoczny prowadzony jest równoległe do powierzchni terenu,
- przepompownie ścieków i studnie rozprężne mają charakter obiektów modelowych, więc informacje o przyjętych wymiarach zbiornika i zmianach poziomu zwierciadła ścieków nie stanowią przedmiotu niniejszego etapu projektowego.

Procedura obliczenia zapotrzebowania na energię składa się z następujących etapów:

1. Przyjęcie przepływu obliczeniowego równego co do wartości dopływowi ścieków do pompowni.
2. Dobranie średnicy rurociągu tłoczego przy założonej prędkości przepływu ścieków.
3. Wyznaczenie jednostkowych strat energii w przewodzie tłocznym na podstawie danych katalogowych producenta rur (nomogramy hydrauliczne dla rur polietylenowych).
4. Obliczenie liniowych strat energii w rurociągu tłocznym zgodnie ze wzorem (1):

$$\Delta h = i \cdot L \quad (1)$$

gdzie:

Δh – liniowa strata energii w rurociągu tłocznym, m

i – jednostkowa strata energii z nomogramu producenta rur, m/m

L – przyjęta długość rurociągu tłoczego, m

5. Określenie geometrycznej różnicy wysokości dla danego układu pompownia – studnia rozprężna.

6. Wyznaczenie całkowitej wysokości podnoszenia ze wzoru (2):

$$H = H_g + \Delta h \quad (2)$$

gdzie:

H – całkowita wysokości podnoszenia, m

H_g – geometryczna różnica wysokości, m

Δh – liniowa strata energii w rurociągu tłocznym, m

7. Obliczenie mocy użytecznej zgodnie ze wzorem (3):

$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \quad (3)$$

gdzie:

P – mocy użyteczna pomp tłocznych, W

ρ – gęstość ścieków, kg/m³

g – przyspieszenie ziemskie, m/s²

Q – przepływ obliczeniowy, m³/s

H – całkowita wysokość podnoszenia, m

8. Określenie kosztów energii.

W celu określenia kosztów należy przyjąć tryb pracy systemu w skali roku. Umożliwi to przeliczenie zapotrzebowania mocy na roczne zużycie energii elektrycznej. W niniejszym przypadku założono czas pracy wynoszący 8760 godzin, równy całodobowej pracy systemu przez 365 dni w roku. Na tej podstawie wyznaczono roczne zużycie energii ze wzoru (4):

$$E_{rok} = P \cdot 8760 \tag{4}$$

gdzie:

E_{rok} – roczne zużycie energii elektrycznej, kWh

P – moc użyteczna pompowni, kW

W kolejnym kroku należy przyjąć jednostkową cenę energii elektrycznej (w analizowanym przypadku 0,95 zł/kWh). Przyjęta wartość odpowiada uśrednionym kosztom energii czynnej wraz z opłatami dystrybucyjnymi dla odbiorców instytucjonalnych i infrastruktury komunalnej. Wartość ta została określona na podstawie danych publikowanych przez Urząd Regulacji Energetyki, w szczególności średniej rocznej ceny sprzedaży energii elektrycznej na rynku konkurencyjnym, która w 2025 roku wyniosła 458,24 zł/MWh. Odzwierciedla ona wyłącznie koszt energii czynnej wynikający z obrotu hurtowego na rynku energii i nie uwzględnia kosztów dystrybucji, podatków oraz pozostałych opłat taryfowych ponoszonych przez odbiorców końcowych. W analizach dotyczących infrastruktury komunalnej stosuje się wartości skorygowane, obejmujące pełny koszt dostarczenia energii elektrycznej, który w zależności od grupy taryfowej oraz warunków umowy może wynosić około 0,85–1,05 zł/kWh. Na tej podstawie wyznaczono roczny koszt energii ze wzoru (5):

$$K_{rok} = E_{rok} \cdot 0,95 \tag{5}$$

gdzie:

K_{rok} – roczne koszty energii elektrycznej, zł/rok

E_{rok} – roczne zużycie energii elektrycznej, kWh

Końcowym krokiem obliczeń jest odniesienie kosztu rocznego do standardowego czasu użytkowania infrastruktury. W niniej-

szym przypadku okres analizy ekonomicznej przyjęto na poziomie 30 lat, co odpowiada standardowemu przewidywanemu okresowi użytkowania infrastruktury kanalizacyjnej. Całkowity koszt energii w przyjętym horyzoncie czasowym wyznaczono ze wzoru (6):

$$K_{30} = K_{rok} \cdot 30 \tag{6}$$

gdzie:

K_{30} – 30-letni koszt całkowity energii elektrycznej, zł

K_{rok} – roczny koszt energii elektrycznej, zł/rok

4. Charakterystyka przedmiotu badań

Cieśle Małe to jednostka osadnicza o rozproszonej zabudowie i istniejących funkcjach rolniczych. Teren gminy zasadniczo pokrywa glina zwałowa zalegające pod stosunkowo cienką warstwą piasków sandrowych o zróżnicowanej granulacji. Występowanie gruntów spoistych oraz lokalnie podwyższonych poziomów wód gruntowych wpływa na sposób posadowienia przewodów kanalizacyjnych oraz warunki wykonawcze związane z realizacją robót ziemnych.

Projektowany system kanalizacyjny stanowi rozwinięcie koncepcji opracowanej w ramach pracy [29] i został przyjęty jako punkt wyjściowy do dalszych analiz porównawczych dotyczących sposobów transportu ścieków na większe odległości. Założenia projektowe oparto na charakterystyce jednostki osadniczej, analizie lokalnych uwarunkowań terenowych oraz możliwościach technicznych odprowadzania ścieków do istniejących sieci kanalizacyjnych i oczyszczalni ścieków znajdujących się poza obszarem miejscowości.

Przewidziano wykorzystanie systemu kanalizacji grawitacyjnej rozdzielczej, uzupełnionej o systemy ciśnieniowe. Przyjęto cztery warianty odprowadzania ścieków:

Wariant I: do oczyszczalni ścieków w Kołaczkwie,

Wariant II: do oczyszczalni ścieków w Tarnowej,

Wariant III: do istniejącego systemu kanalizacji sanitarnej w Pyzdrach,

Wariant IV: do istniejącego systemu kanalizacji sanitarnej w Tarnowej.

W tabeli 3 zestawiono parametry techniczne analizowanych wariantów transportu ścieków z miejscowości Cieśle Małe do potencjalnych punktów odbioru. Zestawienie umożliwia bezpośrednie porównanie poszczególnych rozwiązań pod względem długości tras, warunków wysokościowych, liczby urządzeń wspomagających oraz podstawowych cech technicznych projektowanej sieci kanalizacyjnej.

Tabela 3. Zestawienie parametrów projektowanych wariantów transportu ścieków. Źródło: opracowanie własne
Table 3. Summary of parameters for the proposed sewage transportation options. Source: authors' own study

Parametr	Wariant I	Wariant II	Wariant III	Wariant IV
Odbiornik ścieków	Oczyszczalnia ścieków w Kołaczkwie	Oczyszczalnia ścieków w Tarnowej	System kanalizacji w Pyzdrach	System kanalizacji w Tarnowej
Długość sieci	4,20 km	4,30 km	1,05 km	5,65 km
Średnica kanałów grawitacyjnych	200 mm	200 mm	200 mm	200 mm
Liczba przepompowni ścieków	9	8	2	9
Maksymalne zagłębienie kanałów	4,35 m	4,42 m	4,11 m	4,81 m
Minimalne zagłębienie kanałów	1,40 m	1,40 m	1,40 m	1,40 m
Liczba studzienek rewizyjnych	85	87	22	114
Spadek kanałów grawitacyjnych	5‰	5–15‰	5‰	5‰
Charakter terenu	równinny	równinny	równinny	równinny
Główne utrudnienia	duża liczba obiektów punktowych i eksploatacyjnych	konieczność zmiany spadków w strefach lokalnych obniżen	ograniczona redundancja układu oraz wrażliwość na awarie punktowe	znaczna długość trasy, zwiększone straty hydrauliczne i energetyczne

Tabela 4. Macierz SWOT wariantów transportu ścieków. Źródło: opracowanie własne
Table 4. SWOT matrix of sewage transportation options. Source: authors' own study

	Mocne strony (S)	Słabe strony (W)	Szanse (O)	Zagrożenia (T)
Wariant I transport ścieków do oczyszczalni ścieków w Kołaczkanie	Możliwość podłączenia do zmodernizowanej oczyszczalni. Centralizacja gospodarki ściekowej na terenie gminy. Możliwość dalszej rozbudowy systemu i podłączenia kolejnych miejscowości. Przebieg trasy wzdłuż istniejących dróg lokalnych. Stosunkowo korzystne warunki terenowe. Ograniczenie kolizji z istniejącą infrastrukturą.	Długość sieci przesyłowej, liczba przepompowni. Podwyższone koszty OPEX związane ze zużyciem energii. Większa awaryjność wynikająca z liczby obiektów technologicznych. Wyższe koszty robót ziemnych.	Możliwość pozyskania środków zewnętrznych na rozwój infrastruktury. Możliwość etapowej rozbudowy systemu centralizującego. Poprawa gospodarki ściekowej na obszarach wiejskich. Możliwość dalszej rozbudowy systemu i podłączenia kolejnych jednostek osadniczych (Wszembórz) do centralnego systemu oczyszczania ścieków.	Ryzyko wzrostu kosztów CAPEX spowodowane długością sieci. Możliwość występowania utrudnionych warunków gruntowo-wodnych. Wysokie koszty utrzymania infrastruktury w długim okresie eksploatacji. Ryzyko awarii przepompowni. Długość przewodów, generująca wyższe koszty budowy.
Wariant II transport ścieków do oczyszczalni ścieków w Tarnowej	Możliwość wykorzystania rozbudowywanej oczyszczalni. Prowadzenie przewodów głównie w drogach zwirowych ograniczających koszty odtworzenia nawierzchni. Ograniczenie kolizji z istniejącą infrastrukturą. Możliwość dalszej rozbudowy systemu.	Długość sieci przesyłowej, liczba przepompowni. Podwyższone koszty OPEX związane ze zużyciem energii. Większa awaryjność wynikająca z liczby obiektów technologicznych. Konieczność prowadzenia robót na terenach użytkowanych rolniczo. Lokalne obniżenia terenu wymagające większych spadków kanałów. Wyższe koszty robót ziemnych.	Możliwość pozyskania środków zewnętrznych na rozwój infrastruktury. Możliwość wykorzystania zwiększonej przepustowości oczyszczalni po modernizacji. Poprawa gospodarki ściekowej na obszarach wiejskich. Możliwość dalszego rozwoju infrastruktury.	Ryzyko wzrostu kosztów CAPEX spowodowane długością sieci. Możliwość występowania utrudnionych warunków wodnych. Ryzyko uszkodzeń infrastruktury podczas prac rolniczych. Konieczność przekroczenia dróg dojazdowych oraz skrzyżowania z infrastrukturą drogową. Długość przewodów, generująca wyższe koszty budowy.
Wariant III transport ścieków do istniejącego systemu kanalizacji sanitarnej w Pyzdrach	Możliwość wykorzystania istniejącej infrastruktury, najkrótsza długość projektowanej sieci. Najniższe koszty CAPEX spośród analizowanych wariantów, niewielka liczba przepompowni ścieków. Najmniejsze koszty OPEX, Przebieg trasy wzdłuż istniejącej drogi lokalnej. Ograniczony zakres robót ziemnych i mniejsze oddziaływanie przedsięwzięcia na środowisko.	Uzależnienie funkcjonowania systemu od istniejącej infrastruktury w Pyzdrach. Ryzyko ograniczonej przepustowości istniejącej sieci kanalizacyjnej.	Możliwość pozyskania środków zewnętrznych na rozwój infrastruktury. Możliwość szybkiej realizacji inwestycji. Możliwość modernizacji istniejącej infrastruktury w przyszłości.	Ryzyko przeciążenia istniejącego systemu kanalizacyjnego. Konieczność uzyskania zgody zarządcy istniejącej sieci. Możliwość wystąpienia dodatkowych kosztów modernizacji infrastruktury odbiorczej.
Wariant IV transport ścieków do istniejącego systemu kanalizacji sanitarnej w Tarnowej	Możliwość wykorzystania istniejącej infrastruktury. Możliwość dalszej rozbudowy systemu i podłączenia kolejnych miejscowości. Przebieg trasy wzdłuż istniejących dróg lokalnych.	Najdłuższa trasa przesyłowa spośród analizowanych wariantów. Duża liczba przepompowni ścieków. Najwyższe koszty OPEX. Zwiększona energochłonność systemu. Wysokie koszty CAPEX, dłuższy czas realizacji inwestycji ze względu na jej skomplikowanie.	Możliwość pozyskania środków zewnętrznych na rozwój infrastruktury. Możliwość dalszej rozbudowy systemu i podłączenia kolejnych jednostek osadniczych (Splawie) do centralnego systemu oczyszczania ścieków. Poprawa uporządkowania gospodarki ściekowej na większym obszarze.	Wysokie ryzyko awaryjności wynikające z długości systemu i liczby przepompowni. Ryzyko wzrostu kosztów CAPEX spowodowane długością sieci. Ryzyko wzrostu kosztów energii i utrzymania infrastruktury. Możliwość wystąpienia trudnych warunków gruntowo-wodnych. Możliwość wystąpienia dodatkowych kosztów modernizacji infrastruktury odbiorczej.

5. Wyniki analizy
5.1. Ocena jakościowa (SWOT)

W celu przeprowadzenia jakościowej oceny projektowanych wariantów transportu ścieków zastosowano analizę SWOT. W tabeli 4 przedstawiono zestawienie wyników SWOT dla wszystkich wariantów transportu ścieków.

5.2. Ocena ilościowa (wyniki analizy kosztów materiałowych i robót ziemnych)

Wyniki uproszczonej analizy kosztów materiałowych i robót ziemnych zestawiono w tabeli 5. Współczynnik korekcyjny uwzględnia wpływ rodzaju gruntu, głębokości wykopu, średnicy rur oraz warunków lokalizacyjnych prowadzenia robót.

W ramach analizy kosztów materiałowych przewodów kanalizacyjnych przeprowadzono porównanie dwóch wariantów: PVC oraz rur betonowych o średnicy nominalnej DN 200. Analiza została wykonana w oparciu o jednakowe założenia geometryczne dla wszystkich wariantów sieci. Na podstawie długości sieci obliczono całkowite koszty przewodów kanalizacyjnych w zależności od zastosowanego materiału (tabela 6).

Tabela 5. Wyniki analizy kosztów wykonania wykopów.
Źródło: opracowanie własne
Table 5. Results of the analysis of excavation costs.
Source: authors' own study

Wariant	Długość [m]	Współczynnik korekcyjny	Koszt wykopu [zł]
I	4 200	2,2	300 300
II	4 300	1,2	167 700
III	1 050	2,2	75 075
IV	5 650	2,2	403 975

Tabela 6. Zestawienie kosztów przewodów w zależności od zastosowanego materiału. Źródło: opracowanie własne
Table 6. Summary of pipes costs by material used.
Source: authors' own study

Wariant	Długość [m]	Koszt przewodów PVC [zł]	Koszt przewodów betonowych [zł]
I	4 200	40 5426	1 050 000
II	4 300	41 5079	1 075 000
III	1 050	10 1356	262 500
IV	5 650	54 5394	1 412 500

5.3. Ocena ilościowa (wyniki analizy zapotrzebowania na energię elektryczną)

Wyniki analizy zapotrzebowania na energię pokazano zestawiając liczbę i moc użyteczną poszczególnych pompowni ścieków (P1, P2 itd.) w analizowanych wariantach (tabela 7). Z kolei w tabeli 8 wykonano porównanie zapotrzebowania na energię elektryczną oraz wynikających z niego kosztów eksploatacyjnych dla wszystkich analizowanych wariantów transportu ścieków. Najbardziej korzystny okazał się wariant III, natomiast najmniej korzystny wariant I.

Tabela 7. Liczba i moc użyteczna pompowni (wyrażona w watach) w zależności od wariantu transportu ścieków. Źródło: opracowanie własne
Table 7. Number and useful power of pumping stations (expressed in watts) depending on the wastewater transport option Source: authors' own study

Pompownia	Wariant I	Wariant II	Wariant III	Wariant IV
P1	28,4	28,9	14,2	23,0
P2	33,3	20,8	23,1	30,5
P3	30,4	30,5		28,6
P4	30,8	32,0		33,6
P5	27,9	31,8		18,4
P6	30,1	28,8		32,5
P7	27,1	25,2		19,8
P8	25,9	29,7		32,8
P9	25,1			28,0

Tabela 8. Zestawienie wartości energochłonności i kosztów eksploatacyjnych. Źródło: opracowanie własne
Table 8. Comparison of energy consumption and operating costs. Source: authors' own study

Wariant	P [W]	E _{rok} [kWh]	K _{rok} [zł]	K ₃₀ [zł]
I	259	2 269	2 155	64 659
II	228	1 994	1 895	56 842
III	38	327	310	9 307
IV	247	2 166	2 057	61 723

6. Dyskusja wyników

Przeprowadzone analizy umożliwiły ocenę czterech wariantów transportu ścieków z miejscowości Cieśle Małe. Zastosowana metoda obejmowała analizę SWOT oraz uproszczoną analizę energochłonności i kosztów. Takie podejście pozwoliło na ilościową i jakościową ocenę rozwiązań.

Uzyskane rezultaty wskazują, że o racjonalności rozwiązania systemu transportu ścieków w największym stopniu decydują długość tras przesyłowych, liczba przepompowni ścieków oraz możliwość wykorzystania istniejącej infrastruktury technicznej. Czynniki te wpływają jednocześnie na poziom nakładów inwestycyjnych, koszty eksploatacji, niezawodność funkcjonowania systemu oraz jego podatność na zakłócenia. Podobne zależności wskazywane są w literaturze dotyczącej planowania i optymalizacji systemów kanalizacyjnych, gdzie podkreśla się, że rozbudowa układów przesyłowych prowadzi do wzrostu kosztów budowy i utrzymania infrastruktury oraz zwiększa ryzyko występowania awarii [8, 13, 35]. Szczególne znaczenie przypisuje się przepompowniom ścieków, które stanowią elementy generujące dodatkowe koszty inwestycyjne i eksploatacyjne, a jednocześnie należą do najbardziej wrażliwych obiektów całego systemu [24, 36].

Najkorzystniejsze wyniki uzyskano dla wariantu III, zakładającego odprowadzenie ścieków do istniejącego systemu kanalizacji sanitarnej w Pyzdrach. Rozwiązanie to wyróżniało się najkrótszą trasą przesyłową, najmniejszą liczbą przepompowni oraz najniższymi kosztami robót ziemnych. Konsekwencją było również najniższe zużycie energii elektrycznej i najniższe koszty eksploatacyjne w całym analizowanym okresie. Otrzymane wyniki potwierdzają obserwacje przedstawiane w literaturze, zgodnie z którymi wykorzystanie istniejącej infrastruktury może prowadzić do istotnego ograniczenia nakładów inwestycyjnych przy zachowaniu wymaganej funkcjonalności systemu [28, 44].

Należy podkreślić, że przewaga wariantu III wynika przede wszystkim ze specyfiki analizowanego przypadku. Cieśle Małe charakteryzuje się stosunkowo niewielką liczbą mieszkańców oraz korzystnym położeniem względem istniejącego systemu kanalizacyjnego w Pyzdrach. W innych warunkach lokalizacyjnych, przy większych odległościach lub ograniczonej przepustowości infrastruktury odbiorczej, uzyskane rezultaty mogłyby być odmiennie. Skuteczność tego rozwiązania pozostaje bowiem uzależniona od możliwości przyjęcia dodatkowego strumienia ścieków przez istniejący system oraz od dostępnych rezerw hydraulicznych i technologicznych infrastruktury odbiorczej. Konieczność każdorazowej weryfikacji tych parametrów podkreślana jest również w opracowaniach dotyczących centralizacji gospodarki ściekowej [28].

Warianty I i II uzyskały zbliżone wyniki zarówno pod względem jakościowym, jak i ilościowym. W obu przypadkach konieczne było zaprojektowanie rozbudowanych układów przesyłowych wyposażonych w liczne przepompownie ścieków, co bezpośrednio wpłynęło na wzrost kosztów realizacji inwestycji oraz kosztów późniejszej eksploatacji. Uzyskane rezultaty potwierdzają zależność opisywaną w literaturze, zgodnie z którą wzrost długości systemu transportowego powoduje zwiększenie kosztów budowy, utrzymania oraz zużycia energii elektrycznej [5, 20, 39]. Jednocześnie oba rozwiązania posiadają istotną zaletę w postaci możliwości wykorzystania istniejących lub modernizowanych oczyszczalni ścieków. W dłuższej perspektywie może to sprzyjać rozwojowi infrastruktury kanalizacyjnej na terenach wiejskich oraz poprawie poziomu skanalizowania gminy [3, 14]. Dodatkowym atutem wariantu I jest jego potencjał rozwojowy, wynikający z możliwości przyszłego włączenia do systemu kanalizacyjnego miejscowości Wszembórz, zlokalizowanej w rejonie projektowanej trasy przesyłowej.

Najmniej korzystnie oceniono wariant IV. Decydujący wpływ na jego ocenę miała największa długość projektowanej sieci oraz konieczność zastosowania dziewięciu przepompowni ścieków. Skutkowało to najwyższymi kosztami robót ziemnych, wysokimi kosztami eksploatacyjnymi oraz zwiększoną złożonością całego układu. Uzyskane wyniki pozostają zgodne z wnioskami przedstawianymi w literaturze, zgodnie z którymi wielostopniowe systemy transportu ścieków cechują się większym poziomem ryzyka eksploatacyjnego i wyższymi wymaganiami w zakresie utrzymania infrastruktury [24, 30, 38]. Pomimo niekorzystnych wyników ekonomicznych i eksploatacyjnych wariant IV charakteryzuje się również pewnym potencjałem rozwojowym, umożliwiającym w przyszłości podłączenie do systemu kanalizacyjnego miejscowości Cieśle Wielkie oraz Spławie. Należy jednak podkreślić, że w warunkach analizowanego przypadku korzyści

związane z możliwością dalszej rozbudowy systemu nie rekompensują wysokich nakładów inwestycyjnych i eksploatacyjnych.

Szczególnie wyraźne różnice pomiędzy analizowanymi wariantami ujawniły się w zakresie zapotrzebowania na energię elektryczną. Najniższe zużycie energii oraz najniższe koszty eksploatacyjne odnotowano dla wariantu III, natomiast najwyższe dla wariantu I. Potwierdza to, że do najważniejszych czynników determinujących energochłonność systemów kanalizacyjnych należą liczba przepompowni ścieków, całkowita wysokość podnoszenia oraz ukształtowanie terenu wpływające na przebieg niwelety kanałów [9, 31].

Korzystne parametry energetyczne wariantu III wynikają nie tylko z niewielkiej długości trasy przesyłowej, lecz również z małych różnic wysokościowych występujących na analizowanym obszarze. Pozwoliło to ograniczyć liczbę urządzeń tłocznych do dwóch obiektów, a tym samym zmniejszyć całkowitą wysokość podnoszenia ścieków. Odmienna sytuacja występowała w wariantach I i II, gdzie profil terenu wykazywał stopniowe wznoszenie się w kierunku odbiornika ścieków. Konieczność pokonywania dodatkowych różnic wysokości powodowała wzrost zapotrzebowania energetycznego oraz wymagała zastosowania większej liczby przepompowni. Interesującym przypadkiem jest wariant IV, dla którego teren obniżał się w kierunku odbiornika. Taki układ wysokościowy teoretycznie sprzyjał grawitacyjnemu transportowi ścieków, jednak potencjalne korzyści hydrauliczne zostały w znacznym stopniu zniwelowane przez największą długość sieci oraz dużą liczbę przepompowni. Wyniki te wskazują, że efektywność energetyczna systemu jest rezultatem wzajemnego oddziaływania wielu czynników, a nie wyłącznie długości przewodów lub różnic wysokościowych rozpatrywanych oddzielnie.

W kontekście obserwowanego wzrostu cen energii elektrycznej oraz rosnących wymagań dotyczących efektywności energetycznej infrastruktury komunalnej znaczenie tego kryterium będzie prawdopodobnie wzrastać w przyszłości. Oznacza to, że energochłonność systemu powinna być traktowana jako jeden z kluczowych parametrów oceny rozwiązań przeznaczonych do wieloletniej eksploatacji [9, 39].

Analiza kosztów materiałowych wykazała, że najniższe nakłady inwestycyjne we wszystkich wariantach uzyskano przy zastosowaniu przewodów PVC. Wynik ten pozostaje zgodny z danymi producentów oraz informacjami prezentowanymi w literaturze branżowej [22, 45]. W warunkach analizowanego przypadku rozwiązanie to można uznać za najbardziej uzasadnione ekonomicznie, szczególnie ze względu na niewielką skalę projektowanego systemu oraz relatywnie mały przepływ ścieków. Należy jednak zaznaczyć, że dobór materiału przewodów nie powinien opierać się wyłącznie na kryterium kosztowym. Istotne znaczenie mają również trwałość eksploatacyjna, odporność na uszkodzenia mechaniczne, warunki gruntowo-wodne oraz przewidywany okres użytkowania infrastruktury.

Prezentowana metoda analiz posiada ograniczenia. Analiza kosztów robót ziemnych została wykonana bez sporządzania szczegółowych kosztorysów inwestorskich, natomiast w analizie energetycznej przyjęto stałe parametry pracy pompowni i nie uwzględniono możliwych zmian cen energii elektrycznej w przyszłości. Nie sprawdzono również innych wariantów, w których ograniczono by liczbę przepompowni przez wydłużenie odcinków tłocznych. Ograniczeniem pozostaje także jakościowy charakter analizy SWOT, której wyniki częściowo zależą od przyję-

tych założeń eksperckich. Podobne ograniczenia metod uproszczonych i wielokryterialnych wskazywane są w literaturze dotyczącej procesów decyzyjnych [17, 23, 26].

Pomimo wskazanych ograniczeń uzyskane wyniki umożliwiają stosunkowo szybkie porównanie analizowanych wariantów oraz identyfikację rozwiązania racjonalnego w warunkach badanego przypadku. Jest to szczególnie ważne na etapie rozważania koncepcji, gdy nie ma jeszcze pełnych danych projektowych. Przeprowadzone analizy potwierdziły przydatność zastosowanych metod oceny jako narzędzi wspomagających podejmowanie decyzji w procesie projektowania i planowania systemów kanalizacyjnych [4, 17, 43].

7. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych analiz i uzyskanych wyników sformułowano następujące wnioski:

Największy wpływ na wybór systemu transportu ścieków mają długość sieci kanalizacyjnej, liczba przepompowni oraz uwarunkowania terenowe wpływające na warunki hydrauliczne transportu (czynniki te oddziałują zarówno na poziom nakładów inwestycyjnych, jak i na przyszłe koszty eksploatacyjne systemu).

Analiza SWOT potwierdziła, że wykorzystanie istniejącej infrastruktury kanalizacyjnej może istotnie zwiększać racjonalność projektowanych rozwiązań, pod warunkiem zapewnienia odpowiedniej przepustowości systemu odbiorczego.

Zastosowanie analizy SWOT oraz analiz kosztowych umożliwiło skuteczne porównanie wariantów transportu ścieków i potwierdziło przydatność tych metod w procesie racjonalizacji decyzji projektowych dotyczących infrastruktury kanalizacyjnej.

Prezentowana w pracy metodyka – połączenie analizy SWOT oraz energochłonności i kosztów – może być zastosowana do wyboru racjonalnego rozwiązania projektowego przy przesyłach ścieków na większe odległości.

8. Literatura

- [1] Attri, S. D., Singh, S., Dhar, A., & Powar, S. (2022). Multi-attribute sustainability assessment of wastewater treatment technologies using combined fuzzy multi-criteria decision-making techniques. *Journal of Cleaner Production*, 357, 131849. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131849>
- [2] Azhar, N. A., Radzi, N. a. M., & Ahmad, W. S. H. M. W. (2021). Multi-criteria decision making: a systematic review. *Recent Advances in Electrical & Electronic Engineering (Formerly Recent Patents on Electrical & Electronic Engineering)*, 14(8), 779–801. <https://doi.org/10.2174/2352096514666211029112443>
- [3] Błazejewski, R. (2003). *Kanalizacja wsi*. Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych, Oddział Wielkopolski.
- [4] Bolis, I., Morioka, S. N., & Sznclwar, L. I. (2017). Are we making decisions in a sustainable way? A comprehensive literature review about rationalities for sustainable development. *Journal of Cleaner Production*, 145, 310–322. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.025>
- [5] Butler, D., & Davies, J. W. (2010). *Urban drainage* (3rd ed.). Taylor & Francis
- [6] Chermack, T. J., & Kasshanna, B. K. (2007). The use and misuse of SWOT analysis and implications for HRD professionals. *Human Resource Development International*, 10(4), 383–399. <https://doi.org/10.1080/13678860701718760>
- [7] Collivignarelli, M. C., Todeschini, S., Abbà, A., Ricciardi, P., Miino, M. C., Torretta, V., Rada, E. C., Conti, F., Cillari, G., Calatroni, S., Lumia, G., & Bertanza, G. (2021). The performance evaluation of wastewater service: a protocol based on performance indicators applied to sewer systems and wastewater treatment plants.

- Environmental Technology*, 43(22), 3426–3443. <https://doi.org/10.1080/09593330.2021.1922509>
- [8] Duque, N., Duque, D., Aguilar, A., & Saldarriaga, J. (2020). Sewer network layout selection and hydraulic design using a mathematical optimization framework. *Water*, 12(12), 3337. <https://doi.org/10.3390/w12123337>
 - [9] Filipe, J., Bessa, R. J., Reis, M., Alves, R., & Póvoa, P. (2019). Data-driven predictive energy optimization in a wastewater pumping station. *Applied Energy*, 252, 113423. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113423>
 - [10] Florio, M., Forte, S., Pancotti, C., Sirtori, E., & Vignetti, S. (2016). *Exploring cost-benefit analysis of research, development and innovation infrastructures: An evaluation framework*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1603.03654>
 - [11] Ganjidoost, A., Knight, M. A., Unger, A. J. A., & Haas, C. T. (2018). Benchmark Performance Indicators for utility water and wastewater pipelines infrastructure. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 144(3). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0000890](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000890)
 - [12] Gürel, E., & Tat, M. (2017). SWOT analysis: A theoretical review. *The Journal of International Social Research*, 10(51), 994–1006. <https://doi.org/10.17719/jisr.2017.1832>
 - [13] Habermehl, R., Bakhshpour, A. E., Dilly, T. C., Haghighi, A., & Dittmer, U. (2024). Automated pump placement algorithms for optimal sewer network design in areas with complex terrain. *Engineering Proceedings*, 69(1), 143. <https://doi.org/10.3390/engproc2024069143>
 - [14] Heidrich, Z. (1999). *Wodociąg i kanalizacja. Cz. 2: Kanalizacja*. Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne.
 - [15] Ilyas, M., Kassa, F. M., & Darun, M. R. (2021). Life cycle cost analysis of wastewater treatment: A systematic review of literature. *Journal of Cleaner Production*, 310, 127549. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127549>
 - [16] Jato-Espino, D., Castillo-Lopez, E., Rodriguez-Hernandez, J., & Canteras-Jordana, J. C. (2014). A review of application of multi-criteria decision making methods in construction. *Automation in Construction*, 45, 151–162. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.05.013>
 - [17] Kabir, G., Sadiq, R., & Tesfamariam, S. (2013). A review of multi-criteria decision-making methods for infrastructure management. *Structure and Infrastructure Engineering*, 10(9), 1176–1210. <https://doi.org/10.1080/15732479.2013.795978>
 - [18] Kambanou, M. L. (2020). Life Cycle Costing: Understanding How it is Practised and Its Relationship to Life Cycle Management—A Case Study. *Sustainability*, 12(8), 3252. <https://doi.org/10.3390/su12083252>
 - [19] Mpindou, G. O. M. K., Bueno, I. E., & Ramón, E. C. (2022). Risk analysis methods of water supply systems: comprehensive review from source to tap. *Applied Water Science*, 12(4). <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01586-7>
 - [20] Kotowski, A. (2015). *Podstawy bezpiecznego wymiarowania odwodnień terenów: Tom I. Sieci kanalizacyjne* (2. wyd.). Wydawnictwo Seidel-Przywecki
 - [21] Malesinska, A., & Chudzicki, J. (2014). Change in Hydraulic Resistance of Water Supply Pipes Being Renovated with Polyethylene Pipes. *Ochrona Środowiska*, 36(3), 29–35.
 - [22] Makris, K. F., Langeveld, J., & Clemens, F. H. L. R. (2019). A review on the durability of PVC sewer pipes: research vs. practice. *Structure and Infrastructure Engineering*, 16(6), 880–897. <https://doi.org/10.1080/15732479.2019.1673442>
 - [23] Marttunen, M., Lienert, J., & Belton, V. (2017). Structuring problems for Multi-Criteria Decision Analysis in practice: A literature review of method combinations. *European Journal of Operational Research*, 263(1), 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.04.041>
 - [24] Misztal-Kruk, K. (2015). Reliability and failure rate analysis of pressure, vacuum and gravity sewer systems based on operating data. *Engineering Failure Analysis*, 61, 37–45. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.07.034>
 - [25] Nam, S., Nguyen, T. T., & Oh, J. (2019). Performance Indicators Framework for assessment of a Sanitary Sewer system using the Analytic Hierarchy Process (AHP). *Sustainability*, 11(10), 2746. <https://doi.org/10.3390/su11102746>
 - [26] Navarro, I. J., Penadés-Plà, V., Martínez-Muñoz, D., Rempling, R., & Yepes, V. (2020). Life cycle sustainability assessment for multi-criteria decision making in bridge design: a review. *Journal of Civil Engineering and Management*, 26(7), 690–704. <https://doi.org/10.3846/jcem.2020.13599>
 - [27] Oh, W., Cho, C., & Lee, M. (2023). Life cycle cost method for safe and effective infrastructure asset management. *Buildings*, 13(8), 1983. <https://doi.org/10.3390/buildings13081983>
 - [28] Pasciuccio, F., Pecorini, I., & Iannelli, R. (2022). Planning the centralization level in wastewater collection and treatment: A review of assessment methods. *Journal of Cleaner Production*, 375, 134092. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134092>
 - [29] Patelska, W. (2025). *Koncepcja sieci kanalizacyjnej dla wybranej jednostki osadniczej* [Praca inżynierska]. Politechnika Poznańska.
 - [30] Pietrucha-Urbaniak, K., & Rak, J. (2025). Reliability, safety and risk modelling in water supply systems for Climate-Resilient Infrastructure. *Water*, 17(24), 3554. <https://doi.org/10.3390/w17243554>
 - [31] Piri, J., Masoudi, B., Haghighi, M. S., & Kisi, O. (2025). Deep learning approach to energy consumption modeling in wastewater pumping systems. *Scientific Reports*, 15(1), 39610. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-23158-w>
 - [32] Possan, E., Molin, D. C. C. D., & Andrade, J. J. O. (2018). A conceptual framework for service life prediction of reinforced concrete structures. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 3(1). <https://doi.org/10.1007/s41024-018-0031-7>
 - [33] Rodrigues, C., Martins, T. a. E., & Amaral, L. (2025). From Efficiency to circularity in the Wastewater sector: A review of Performance Indicators in Regulated countries. *Water*, 17(15), 2226. <https://doi.org/10.3390/w17152226>
 - [34] Prokopowicz, Z., & Jadwiszczak, P. (2026). Analiza techniczna SWOT systemu podwójnej fasady budynku. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, 100(5), 38. <https://doi.org/10.65545/GWITS.2026.05.06>
 - [35] Saldarriaga, J., Herrán, J., González, M. A., Coy, Y., & Iglesias-Rey, P. L. (2024). Optimal Sewer Network Design Including Pumping Stations. *Engineering Proceedings*, 69(1), 16. <https://doi.org/10.3390/engproc2024069016>
 - [36] Sionkowski T., Halecki W., Chmielowski K. 2023. „An Evaluation of Pumping Stations for Pressure Sewers System Made from Concrete Coils, Polymer Concrete, and High-Density Polyethylene (HDPE)”. *Materials* 16 (2): 524.
 - [37] Sokolov, M. V. (2024). NPV, IRR, PI, PP, and DPP: A unified view. *Journal of Mathematical Economics*, 114, 102992. <https://doi.org/10.1016/j.jmateco.2024.102992>
 - [38] Tchórzewska-Cieślak, B., Pietrucha-Urbaniak, K., & Piegoń, I. (2023). The failure risk analysis of the water supply network. *Water*, 15(21), 3815. <https://doi.org/10.3390/w15213815>
 - [39] Turan, M. E., & Cetin, T. (2024). Analyzing the effect of sewer network size on optimization algorithms' performance in sewer system optimization. *Water*, 16(6), 859. <https://doi.org/10.3390/w16060859>
 - [40] Uddin, M. N., & Rabbi, M. S. (2025). A meta-analysis of cost-benefit analysis outcomes in infrastructure projects: Evidence from transport and utility sectors in developing economies. *Review of Applied Science and Technology*, 4(2), 59–86. <https://doi.org/10.63125/hsy92b75>
 - [41] Wang, X. P., Zhang, J., & Yang, T. (2014). Hybrid SWOT approach for strategic planning and formulation in China worldwide express mail service. *Journal of Applied Research and Technology*, 12(2), 230–238. [https://doi.org/10.1016/S1665-6423\(14\)72339-9](https://doi.org/10.1016/S1665-6423(14)72339-9)
 - [42] Wasiluk, J., & Hołota, E. (2024). Ocena efektywności ekonomicznej rozbudowy sieci kanalizacyjnej w miejscowości wiejskiej zlokalizowanej na terenie górzystym. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, 98(11), 11–15. <https://doi.org/10.15199/17.2024.11.2>
 - [43] Zavadskas, E., Antucheviciene, J., Vilutiene, T., & Adeli, H. (2017). Sustainable Decision-Making in civil engineering, construction and building technology. *Sustainability*, 10(1), 14. <https://doi.org/10.3390/su10010014>
 - [44] Zeferino, J. A., Cunha, M. C., & Antunes, A. P. (2014). Planning regional wastewater systems across borders. *Water Resources and Economics*, 8, 4–15. <https://doi.org/10.1016/j.wre.2014.10.007>
 - [45] Zhuge, Y., Fan, W., Duan, W., & Liu, Y. (2021). The durability and rehabilitation technologies of concrete sewerage pipes: A state-of-the-art review. *Journal of Asian Concrete Federation*, 7(2). <https://doi.org/10.18702/acf.2021.12.7.2.1>
 - [46] Chogi. (2023). *Roboty ziemne – definicja, rodzaje, cennik i zakres pracy*. <https://chogi.pl/roboty-ziemne-definicja-rodzaje-cennik-i-zakres-pracy> (dostęp: 25.05.2026)
 - [47] Ekipa redakcyjna jakie instalacje. (2026). Ułożenie rur w wykopie: Cennik 2026. <https://jakie-instalacje.pl/ulozenie-rur-w-wykopie-cennik/> (dostęp: 25.05.2026)