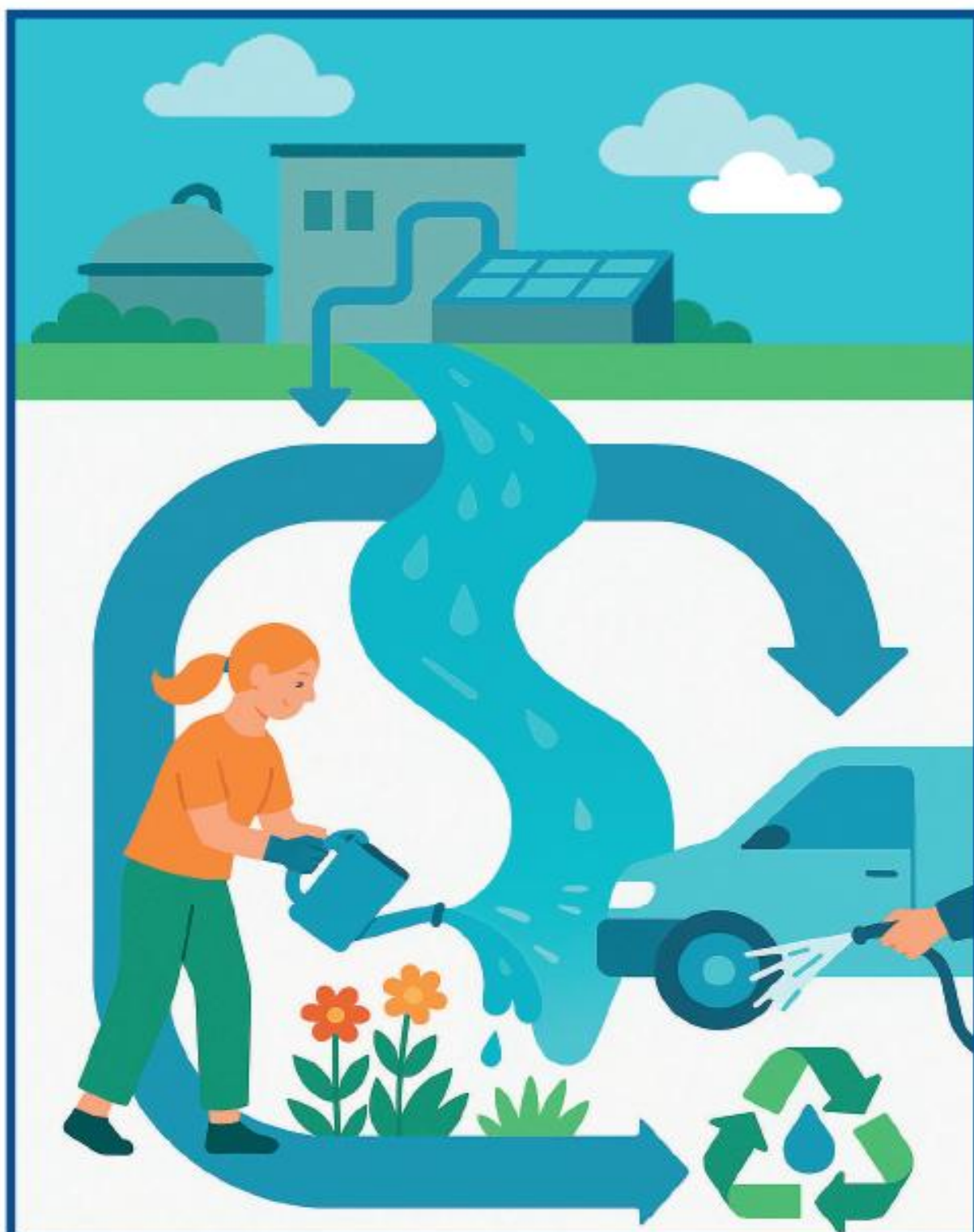




ReNutriWater

Podręcznik

o odzyskiwaniu wody

Interreg
Baltic Sea Region



Co-funded by
the European Union

SUSTAINABLE WATERS

ReNutriWater





Niniejszy podręcznik stanowi podsumowanie projektu ReNutriWater. Powstał on w wyniku wspólnych wysiłków, bazując na wiedzy uzyskanej w projekcie z pomocą naszych partnerów. Kierownictwo i redakcja: Klara Ramm.

Projekt finansowany przez program Interreg Baltic Sea Region. Wyrażone poglądy i opinie są wyłącznie przekonaniami autorów i nie muszą one odzwierciedlać poglądów programu Interreg Baltic Sea Region, który nie ponosi za nie odpowiedzialności.

Wersja: 1.2 wrzesień 2025

Interreg
Baltic Sea Region



Co-funded by
the European Union

SUSTAINABLE WATERS

ReNutriWater



Partnerzy ReNutriWater zaangażowani w tworzenie podręcznika

Główny partner Izba Gospodarcza Wodociągi Polskie	Klara Ramm Maciej Dadok
Fundacja Centrum Balticum	Sonja Lavonen Paula Biveson
Uniwersytet Łotwy	Maris Klavins Oskars Purmalis
Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk	Marzena Smol Mateusz Skalny Paulina Marcinek Magdalena Andrunik Dominika Szoldrowska
Uniwersytet Nauk Stosowanych w Savonii	Monika Wojciechowska Rosa Sartjärvi
Politechnika Warszawska	Monika Żubrowska-Sudoł Justyna Czajkowska Alicja Knap-Bałdyga
Gmina Samsø	Jeppe Ustrup Hermann Lene Skafte Bestmann Kathrin Grundmann
Schwander Polska	Agnieszka Pacholarz Alina Węglarska
Miejskie Przedsiębiorstwo Wodociągów i Kanalizacji w m.st. Warszawie	Agnieszka Bisak
Samsø Wastewater Utility	Mads Skole Due Mikkelsen
Jurmala Water Utility	Kristine Bendza
Siauliai Chamber of Commerce, Industry and Crafts	Daiva Jonuskiene Jolanta Norvaisiene Monika Viliušytė
VNK serviss, Ltd.	Jānis Zviedris
National Regions Development Agency Lithuania	Akvilė Jagučanskytė

Spis treści

1	Wprowadzenie	6
1.1	EN	6
1.2	PL.....	7
1.3	FI.....	9
1.4	LV	10
1.5	LT.....	11
1.6	DK.....	13
2	Ponowne wykorzystanie wody w regionie Morza Bałtyckiego.....	15
3	Aspekty prawne	20
4	Pilotaże ReNutriWater	25
4.1	Wprowadzenie do pilotaży.....	25
4.2	Projekty pilotażowe	28
4.2.1	Kuopio	28
4.2.2	Warszawa.....	30
4.2.3	Wołkowyja	31
4.2.4	Jūrmala	37
4.2.5	Ugāle	38
4.2.6	Samsø	39
5	Wyniki badań	41
5.1	Cechy wody odzyskanej.....	41
5.2	Skuteczność dezynfekcji wody odzyskanej.....	42
5.2.1	Metody wstępnej obróbki przed dezynfekcją.....	42
5.2.2	Porównanie skuteczności różnych metod dezynfekcji	45
5.2.3	Dezynfekcja jako element systemu odzyskiwania wody	53
5.3	Woda odzyskana jako źródło składników odżywczych.....	70
5.3.1	Zachowanie równowagi	70
5.3.2	Doświadczenie z pilotaży	73
5.4	Doświadczenie zdobyte w szklarniach.....	75

6	Słowo do grup docelowych	78
6.1	Uniwersytet Nauk Stosowanych w Savonii, Kuopio	78
6.2	VNK Serviss, Ugāle.....	79
6.3	Jurmalas Udens, Jūrmala	80
6.4	Samsø.....	81
7	Narzędzie wspierające procesy decyzyjne	83
7.1	WaterSafe	83
7.2	Jak używać WaterSafe?	83
8	Wytyczne dotyczące oceny ryzyka.....	85
9	Modele biznesowe.....	90
9.1	Wprowadzenie do modeli biznesowych.....	90
9.2	Zrównoważone modele biznesowe dla sektora wodnego	91
9.3	Modele biznesowe projektu ReNutriWater	92
9.4	Rezultaty procesu tworzenia modeli biznesowych	92
10	Edukacja, budowanie świadomości – dobre praktyki	93
10.1	Terminy używane w komunikacji.....	93
10.2	Scenariusz spotkania z interesariuszami	93
11	Podsumowanie i dalsze plany	98
12	Bibliografia	99
13	Lista partnerów projektu	100
14	Źródła rysunków	100

1 Wprowadzenie

1.1 EN

ReNutriWater – Closing local water circuits by recirculation of nutrients and water and using them in nature

Goals and activities

The project helps public authorities and wastewater treatment plant operators develop action plans to recover water from wastewater and reuse it for cleaning, watering recreational areas, and plants. It is a Water-smart Societies – priority project funded by the EU's Interreg Baltic Sea Region Programme.

Due to climate change and increasing pollution of the environment, freshwater has become an increasingly valuable resource. Hot summers and drought make saving water resources in summertime crucial, also in the Baltic Sea Region. Drinking water should be recognized as a labor-intensive product, which, despite extensive initial treatment, is still often discharged after a single use in many countries. This practice wastes money, energy, and human labour, which could be reduced with water recovery from wastewater.

However, reclaiming water has its challenges, which are related to specific requirements for its quality. The goal of research into reclaimed water is to reduce the risk of its potentially harmful impact on the environment and human health. The key is to develop solutions for the recovery of safe water, free of pathogens and micropollutants, with the right amount of nutrients. Overcoming potential societal hesitation is also crucial. ReNutriWater researchers are well aware of people's perceptions of what constitutes clean and dirty water, which is why the project aims to start by researching primarily non-potable uses of reclaimed water.

In ReNutriWater we strive to preserve nutrients in the reclaimed water, to combat the eutrophication of the Baltic Sea and reduce the need for artificial fertilizers. In the process of reclaiming water, nutrients can be preserved. The amount of them can be adjusted, and the water can then be used for irrigation. This decreases the need for artificial fertilizers and creates beneficial usage of nutrients instead of having them aggregate in the residue of the water treatment process. This mitigates the eutrophication of the Baltic Sea, which is caused by an excess of nutrients. In the pilot cases in ReNutriWater, we tested how nutrient-rich reclaimed water could be produced and used, thus creating circular economy business models in the water sector.

Among the beneficiaries of reclaimed water use, we count both local authorities and private entities. Reclaimed water can be used by local authorities and private entities for various purposes, such as street cleaning, car washes, fountains, and pond recharge, irrigation of recreational areas, and plant breeding.

ReNutriWater centres around three pilots:

Pilot 1: Disinfection efficiency of reclaimed water

As part of the pilot, effective methods for disinfecting reclaimed water were developed.

Pilot 2: Composition adjustment of reclaimed water

Research was carried out into methods for selecting the composition of reclaimed water to adapt it to specific needs, e.g., plant irrigation.

Pilot 3: Breaking barriers for reclaimed water use

Tests were conducted to ensure the safe use of reclaimed water through cultivation in greenhouses.

ReNutriWater partners share the results of the pilot tests with their target groups. The developed solutions and tools help assess the feasibility of implementing selected water reuse technologies.

This project is intended to address diverse challenges to accelerate policymaking, facilitating the implementation of water reuse in the cities of Europe. The good practice of reclaiming water promotes a circular economy and addresses several UN Sustainable Development Goals.

Project Partnership

The Lead partner of the project is the Chamber of Economy “Polish Waterworks”. The initiative has 14 project partners from five countries: Poland, Finland, Latvia, Lithuania, and Denmark. The full list of participants can be found at the end of the handbook.

Project Lifespan

January 2023 – December 2025

Project budget and financing source

The total budget of ReNutriWater is 3.85 million euros. The 80% financing source is the Interreg Baltic Sea Region Programme. More about the Interreg Programme and the project can be found on the project website: ReNutriWater - Interreg Baltic Sea Region (interreg-baltic.eu/project/renutriwater).

Handbook

This handbook is specifically designed to serve as a comprehensive resource, offering valuable insights gained through extensive consultations with a diverse range of stakeholders. It seeks to raise awareness about the critical importance and vast potential of water reuse in addressing global water challenges, highlighting its role in sustainable resource management and environmental protection. By presenting expertise and best practices derived from carefully conducted pilot projects, the handbook aims to empower target groups with practical knowledge and actionable strategies that can be applied in various contexts. Furthermore, it provides a platform for fostering collaboration and encouraging innovation in water reuse practices, ensuring that the lessons learned and solutions developed are accessible and adaptable to a wide audience.

1.2 PL

ReNutriWater – Zamykanie lokalnych obiegów wodnych poprzez recyrkulację składników odżywczych i wody

Cele i działania

Projekt pomaga władzom publicznym i operatorom oczyszczalni ścieków opracować plany działań w celu odzyskiwania wody ze ścieków i ponownego jej wykorzystania do czyszczenia, podlewania terenów rekreacyjnych i roślin. Jest to projekt priorytetowy Water-smart Societies finansowany przez Program UE Interreg dla Regionu Morza Bałtyckiego.

Ze względu na zmiany klimatu i rosnące zanieczyszczenie środowiska, słodka woda staje się coraz cenniejszym zasobem. Gorące lata i susze sprawiają, że oszczędzanie zasobów wodnych latem jest kluczowe, również w regionie Morza Bałtyckiego. Słodką wodę należy uznać za produkt pracochłonny, który pomimo zaawansowanego uzdatniania, w wielu krajach jest nadal często odprowadzany po jednorazowym użyciu. Ta praktyka prowadzi do marnotrawstwa pieniędzy, energii i pracy ludzkiej, co można by ograniczyć dzięki odzyskiwaniu wody ze ścieków.

Jednak odzyskiwanie wody wiąże się z wyzwaniami, które są związane ze szczególnymi wymaganiami dotyczącymi jej jakości. Celem badań nad odzyskaną wodą jest zmniejszenie ryzyka jej potencjalnie szkodliwego wpływu na środowisko i zdrowie ludzi. Kluczem jest opracowanie rozwiązań umożliwiających odzyskiwanie bezpiecznej wody, wolnej od patogenów i mikrozanieczyszczeń, z odpowiednią ilością składników odżywczych. Kluczowe jest również przezwyciężenie potencjalnych wahań społecznych. Badacze ReNutriWater doskonale zdają sobie sprawę z postrzegania przez ludzi tego, co stanowi czystą i brudną wodę, dlatego projekt ma na celu rozpoczęcie od badania przede wszystkim niespożywczych zastosowań odzyskanej wody.

W ReNutriWater dążymy do zachowania składników odżywczych w odzyskanej wodzie, aby zwalczać eutrofizację Morza Bałtyckiego i zmniejszać zapotrzebowanie na sztuczne nawozy. W procesie odzyskiwania wody składniki odżywcze mogą zostać zachowane. Ich ilość może zostać dostosowana, a następnie woda może zostać wykorzystana do nawadniania. Zmniejsza to zapotrzebowanie na sztuczne nawozy i tworzy korzystne wykorzystanie składników odżywczych zamiast ich agregacji w pozostałościach procesu uzdatniania wody. Łagodzi to eutrofizację Morza Bałtyckiego, która jest spowodowana nadmiarem składników odżywczych. W przypadkach pilotażowych w ReNutriWater testowaliśmy, w jaki sposób można produkować i wykorzystywać bogatą w składniki odżywcze odzyskaną wodę, tworząc w ten sposób modele biznesowe gospodarki o obiegu zamkniętym w sektorze wodnym.

Do beneficjentów wykorzystania odzyskanej wody zaliczamy zarówno władze lokalne, jak i podmioty prywatne. Odzyskana woda może być wykorzystywana przez władze lokalne i podmioty prywatne do różnych celów, takich jak czyszczenie ulic, myjnie samochodowe, fontanny i zasilanie stawów, nawadnianie terenów rekreacyjnych i hodowla roślin.

ReNutriWater koncentruje się wokół trzech pilotaży:

Pilot 1: Skuteczność dezynfekcji odzyskanej wody

W ramach pilotażu opracowano skuteczne metody dezynfekcji odzyskanej wody.

Pilot 2: Dostosowanie składu odzyskanej wody.

Przeprowadzono badania nad metodami doboru składu odzyskanej wody w celu dostosowania jej do konkretnych potrzeb, np. nawadniania roślin.

Pilot 3: Przełamywanie barier w zakresie wykorzystania odzyskanej wody.

Przeprowadzono testy w celu zapewnienia bezpiecznego wykorzystania odzyskanej wody w uprawach w szklarniach.

Partnerzy

ReNutriWater dzieli się wynikami testów pilotażowych ze swoimi grupami docelowymi. Opracowane rozwiązania i narzędzia pomagają ocenić wykonalność wdrożenia wybranych technologii ponownego wykorzystania wody.

Projekt ten ma na celu rozwiązanie różnych wyzwań w celu przyspieszenia tworzenia polityki, ułatwiając wdrażanie ponownego wykorzystania wody w miastach Europy. Dobra praktyka odzyskiwania wody promuje gospodarkę o obiegu zamkniętym i odnosi się do kilku Celów Zrównoważonego Rozwoju ONZ.

Partnerstwo w projekcie

Liderem projektu jest Izba Gospodarcza „Wodociągi Polskie”. Inicjatywa ma 14 partnerów z pięciu krajów: Polski, Finlandii, Łotwy, Litwy i Danii. Pełną listę uczestników można znaleźć na końcu podręcznika.

Czas realizacji

Styczeń 2023 – Grudzień 2025

Budżet i źródło dofinansowania

Całkowity budżet ReNutriWater wynosi 3,85 mln euro. Źródłem finansowania jego 80% jest program Interreg Baltic Sea Region. Więcej informacji o programie Interreg i projekcie można znaleźć na stronie internetowej projektu: ReNutriWater - Interreg Baltic Sea Region (interreg-baltic.eu/project/renutriwater).

Podręcznik

Niniejszy podręcznik został specjalnie zaprojektowany, aby służyć jako kompleksowe źródło, oferujące cenne spostrzeżenia uzyskane dzięki szeroko zakrojonym konsultacjom z różnymi interesariuszami. Ma on na celu podniesienie świadomości na temat krytycznego znaczenia i ogromnego potencjału ponownego wykorzystania wody w rozwiązywaniu globalnych wyzwań związanych z wodą, podkreślając jego rolę w zrównoważonym zarządzaniu zasobami i ochronie środowiska. Poprzez prezentowanie wiedzy specjalistycznej i najlepszych praktyk pochodzących ze starannie przeprowadzonych projektów pilotażowych, podręcznik ma na celu wzmocnienie grup docelowych praktyczną wiedzą i wykonalnymi strategiami, które można zastosować w różnych kontekstach. Ponadto stanowi platformę do wspierania współpracy i zachęcania do innowacji w praktykach ponownego wykorzystania wody, zapewniając, że wyciągnięte wnioski i opracowane rozwiązania są dostępne i dostosowane do szerokiego grona odbiorców.

1.3 FI

ReNutriWater – Paikallisten vesikiertojen sulkeminen kierrättämällä ravinteita ja vettä ja hyödyntämällä niitä luonnossa

Tavoitteet ja toiminta

ReNutriWater auttaa kunnallisen jätevedenkäsittelyn kanssa työskenteleviä kuntien, viranomaisten ja operaattoreiden edustajia laatimaan toimintasuunnitelmia kierrätysveden käytöstä, jotta niin vesi kuin sen sisältämät ravinteet saadaan hyödynnettyä virkistysalueiden ja kasvien kasteluun, katujen ja liikennevälineiden puhdistukseen jne. ReNutriWater on EU:n Interreg Baltic Sea Region -ohjelman rahoittama Water-smart Societies -prioriteettiin keskittyvä hanke.

Ilmastomuutoksen ja lisääntyvän ympäristön saastumisen vuoksi makeasta vedestä on tullut yhä arvokkaampi luonnonvara. Kuumat kesät ja kuivuus tekevät vesivarojen säästämisestä kesäisin ratkaisevan tärkeää myös Itämeren alueella. Puhtaan veden tuotantoon kuluu paljon energiaa, mutta siitä huolimatta sitä käytetään edelleenkin monissa maissa vain kerran, jonka jälkeen se käsitellään jätevetenä, joka on poistettava systeemistä. Tämä käytäntö tuhlaa rahaa, energiaa ja ihmistyövoimaa, joita voitaisiin säästää kierrättämällä puhdistettu vesi uusiovetenä.

Veden talteenotossa on kuitenkin haasteita, jotka liittyvät sen laatua koskeviin erityisvaatimuksiin. Uusioveden tutkimuksen tavoitteena on vähentää sen mahdollisten haitallisten vaikutusten riskiä ympäristölle ja ihmisten terveydelle. Tärkeintä on kehittää ratkaisuja turvallisen, taudinaiheuttajista ja mikrosäasteistä vapaan veden talteenottoon. Uusioveteen voidaan myös jättää käyttötarkoitukseen sopiva määrä ravinteita. Yhteiskunnallisen epäroinnin voittaminen on myös ratkaisevan tärkeää. Koska ihmisillä voi olla hyvin vahva tunne siitä, mikä on puhdasta ja mikä likaista vettä, hankkeessa on aloitettu tutkimalla ensisijaisesti kierrätetyn veden käyttötarkoituksia muihin kuin juomavesitarkoituksiin.

ReNutriWaterissa pyrimme säilyttämään uusioveden ravinteita, torjumaan Itämeren rehevöitymistä ja vähentämään keinolannoitteiden tarvetta. Veden talteenotto-prosessissa ravinteet on mahdollista säilyttää. Niiden määrää voidaan säätää, minkä jälkeen vettä voidaan käyttää kasteluun. Tämä vähentää keinolannoitteiden tarvetta ja hyödyntää ravinteita sen sijaan, että ne kasautuisivat vedenkäsittelyprosessin lietteisiin. Tämä lieventää Itämeren ja muiden vesistöjen rehevöitymistä, joka johtuu ravinnevalumien aiheuttamasta ravinteiden liiallisesta määrästä vesistöissä. ReNutriWaterin pilottihankkeissa testasimme, kuinka ravinnerikasta kierrätysvettä voitaisiin tuottaa ja käyttää luoden näin kiertotalouden liiketoimintamalleja vesisektorille.

Uusioveden käytön edunsaajiin lasketaan sekä kunnat että yksityiset tahot. Kierrätettyä vettä voidaan käyttää eri tarkoituksiin kuten katujen ja liikennekaluston puhdistukseen, suihkulähteiden ja lampien täyttöön sekä golfkenttien, virkistysalueiden sekä kasvihuoneiden kasteluun.

ReNutriWater keskittyy kolmeen pilottiin:

Pilotti 1: Uusioveden desinfiointi

Osana pilottia kehitettiin tehokkaita menetelmiä uusioveden desinfiointiin.

Pilotti 2: Uusioveden koostumuksen säätö

Pilotissa tutkittiin menetelmiä, joilla kierrätetyn veden koostumus ja ravinnesisältö voidaan valita sen mukauttamiseksi erityistarpeisiin, esimerkiksi kasvien kasteluun.

Pilotti 3: Uusioveden käytön esteiden murtaminen

Pilottitesteillä testattiin turvallisen uusioveden käyttö kasvihuoneissa.

ReNutriWaterin hankekumppanit jakavat pilottitestien tulokset kohderyhmilleen. Kehitetty ratkaisut ja työkalut auttavat arvioimaan valittujen veden uudelleenkäyttöteknologioiden toteutettavuutta.

Tämän hankkeen tarkoituksena on vastata erilaisiin haasteisiin päätöksenteon nopeuttamiseksi ja veden uudelleenkäytön toteuttamisen helpottamiseksi Euroopan kaupungeissa. Veden talteenoton hyvä käytäntö edistää kiertotaloutta ja vastaa useisiin YK:n kestävän kehityksen tavoitteisiin.

Hankekumppanuus

Hankkeen pääkumppani on Puolan vesilaitoksen talouskamari (The Chamber of Economy "Polish Waterworks"). Hankkeessa on yhteensä 14 hankekumppania viidestä maasta: Puolasta, Suomesta, Latviasta, Liettuasta ja Tanskasta. Osallistujaluettelo löytyy käsikirjan lopusta.

Projektin elinkaari

Tammikuu 2023 – joulukuu 2025

Hankkeen budjetti ja rahoituslähde

ReNutriWaterin kokonaisbudjetti on 3,85 miljoonaa euroa, josta 80 prosenttia on EU:n Interreg Baltic Sea Region -ohjelman rahoittamaa. Lisätietoja Interreg-ohjelmasta ja hankkeesta löytyy hankkeen verkkosivuilta: ReNutriWater - Interreg Baltic Sea Region (interreg-baltic.eu/project/renutriwater).

Käsikirja

Tämä käsikirja on suunniteltu erityisesti toimimaan kattavana ohjeistuksena, joka tarjoaa arvokasta tietoa, mikä pohjautuu laajaan kanssakäymiseen eri sidosryhmien kanssa. Käsikirjalla pyritään lisäämään tietoisuutta veden uudelleenkäytön kriittisestä merkityksestä ja valtavasta potentiaalista maailmanlaajuisiin vesihaasteisiin vastaamisessa ja korostamaan sen roolia kestävässä luonnonvarojen hallinnassa ja ympäristönsuojelussa. Esittelemällä huolellisesti toteutetuista pilottihankkeista saatua asiantuntemusta ja parhaita käytäntöjä käsikirjan tavoitteena on antaa kohderyhmille käytännön tietoa ja toteuttamiskelpoisia strategioita, joita voidaan soveltaa eri yhteyksissä. Lisäksi se tarjoaa alustan yhteistyön edistämiseksi ja innovoinnin kannustamiseksi veden uudelleenkäyttökäytännöissä varmistuen, että saadut kokemukset ja kehitetyt ratkaisut ovat laajan yleisön saatavilla ja mukautettavissa.

1.4 LV

ReNutriWater – Slēgtu ūdens aprites ciklu veidošana, veicot atkārtotu barības vielu un ūdens izmantošanu un to pielietošanu dabā

Mērķi un aktivitātes

Projekts un tā rezultāti palīdz valsts iestādēm un notekūdeņu attīrīšanas iekārtu operatoriem izstrādāt rīcības plānus ūdens atgūšanai no attīrītiem notekūdeņiem un tā atkārtotai izmantošanai, piemēram, ielu tīrīšanā, rekreācijas zonu laistīšanā un augu laistīšanai. Šis ir ES Interreg Baltijas jūras reģiona programmas finansēts projekts prioritātē "Ūdens viedas sabiedrības (Water-smart Societies)".

Sakarā ar klimata pārmaiņām un pieaugošo vides piesārņojumu, saldūdens kļūst par arvien vērtīgāku resursu. Karstas vasaras un sausuma periodi padara ūdens resursu saglabāšanu, saudzīgu izmantošanu īpaši svarīgu arī Baltijas jūras reģionā. Saldūdens būtu jāuztver kā darbietilpīgs produkts, kas, neskatoties uz plašu sākotnējo apstrādi un sagatavošanu, daudzās valstīs joprojām tiek izlietots tikai vienu reizi. Šāda prakse rada līdzekļu, enerģijas un cilvēkresursu izšķērdēšanu, ko iespējams mazināt, atgūstot ūdeni no notekūdeņiem.

Tomēr ūdens atgūšana rada izaicinājumus, kas saistīti ar noteiktām kvalitātes prasībām. Mūsu pētījumu mērķis ir samazināt iespējamās riskus videi un cilvēku veselībai atkārtota ūdens ieguvē un izmantošanā. Būtiski ir izstrādāt droša ūdens atgūšanas risinājumus – bez patogēniem un mikropiesārņotājiem, bet ar atbilstošu barības vielu daudzumu, ja tiek izmantots apzaļumošanā un augu audzēšanā. Nozīmīgi ir arī pārvarēt sabiedrības atturību, kas var būt visai noturīga. Arī projekta pētnieki ir apzinājušies sabiedrības uztveri pret šāda ūdens izmantošanu, kas var variēt plašā spektrā. Sabiedrības attieksme un raksturojums kas ir tīrs, kas netīrs ūdens, radija nepieciešamību sākotnējo uzsvaru likt uz atgūtā ūdens netiešo (nedzeramo) pielietojumu.

ReNutriWater projekta ietvaros tiek strādāts pie barības vielu saglabāšanas atgūtajā ūdenī, lai samazinātu Baltijas jūras eutrofikāciju un nepieciešamību pēc mākslīgā mēslojuma. Atgūšanas procesā var saglabāt barības vielas, pielāgot to daudzumu un izmantot laistīšanai. Tas samazina nepieciešamību pēc mākslīgā mēslojuma un veicina barības vielu lietderīgu izmantošanu, nevis to uzkrāšanos notekūdeņu attīrīšanas atlikumos. Tas mazina ūdeņu eutrofikāciju, ko izraisa pārmērīgs barības vielu daudzums. Pilotprojektos tika testēts, kā sagatavot un izmantot ar barības vielām bagātu attīrīto ūdeni, veidojot aprites ekonomikas biznesa modeļus ūdenssaimniecībā.

Starp atgūtā ūdens lietotājiem var būt gan pašvaldības, gan privātais sektors, un šāda ūdens izmantošanas iespējas ir plašas, ietverot ielu tīrīšanu, automazgātavas, strūklakas, dīķu papildināšanu, parku un rekreācijas zonu laistīšanu, augu audzēšanu.

ReNutriWater ietvaros tiek īstenoti trīs pilotprojekti:

Pilotprojekts 1: Atgūtā ūdens dezinfekcijas efektivitāte

Tika izstrādātas efektīvas metodes atgūtā ūdens dezinfekcijai.

Pilotprojekts 2: Atgūtā ūdens sastāva pielāgošana

Tika pētītas metodes, kā pielāgot ūdens sastāvu konkrētam mērķim, piemēram, augu laistīšanai.

Pilotprojekts 3: Barjeru pārvarēšana atgūtā ūdens izmantošanai

Tika veikti testi, lai nodrošinātu drošu atgūtā ūdens izmantošanu, veicot audzēšanu siltumnīcās.

ReNutriWater partneri dalās ar iegūtajiem pilotprojektu rezultātiem ar dažādām mērķa grupām. Izstrādātie risinājumi un rīki palīdz novērtēt iespējas ieviest konkrētas ūdens atkārtotas izmantošanas tehnoloģijas.

Šis projekts risina dažādas problēmas, lai paātrinātu politikas izstrādi, atvieglojot ūdens atkārtotas izmantošanas ieviešanu Eiropas pilsētās. Atgūtā ūdens labās prakses piemēri veicina aprites ekonomiku un atbalsta vairākus ANO ilgtspējīgas attīstības mērķus.

Projekta partnerība

Projekta vadošais partneris: “Polijas Ūdensapgādes uzņēmumu kamera” (Chamber of Economy “Polish Waterworks”)

Iniciatīvā piedalās 14 partneri no 5 valstīm: Polijas, Somijas, Latvijas, Lietuvas un Dānijas. Pilns dalībnieku saraksts pieejams rokasgrāmatas beigās.

Projekta ilgums

2023. gada janvāris – 2025. gada decembris

Projekta budžets un finansējums

Kopējais projekta ReNutriWater budžets: 3,85 miljoni eiro.

Finansējuma avots: 80 % no Interreg Baltijas jūras reģiona programmas.

Vairāk informācijas par projektu atrodama mājaslapā: ReNutriWater - Interreg Baltic Sea Region (interreg-baltic.eu/project/renutriwater).

Rokasgrāmata

Šī rokasgrāmata kalpo kā visaptverošs informācijas resurss, kas balstīts uz plašām konsultācijām ar dažādām ieinteresētajām pusēm. Tā palīdz palielināt informētību par ūdens atkārtotas izmantošanas nozīmi, uzsvērt tās lomu ilgtspējīgā resursu pārvaldībā un vides aizsardzībā. Rokasgrāmata apvieno ekspertīzi un labās prakses piemērus no pilotprojektiem, lai nodrošinātu praktiskas zināšanas un stratēģijas, kas pielāgojamas dažādos kontekstos. Tā kalpo arī kā platforma sadarbībai un inovācijām ūdens atkārtotas izmantošanas jomā, nodrošinot plašai auditorijai pieejamus risinājumus.

1.5 LT

ReNutriWater – Uždaros vietinēs vandens sistemos, recirkulējot maistingas medžiagas ir vandenī bei panaudojot juos gamtoje

Projekto tikslai ir veiklos

Projekta padeda valdžios institucijoms ir nuotekų valymo įrenginių operatoriams vystyti veiksmų planus, kaip iš nuotekų išgauti vandenį ir pakartotinai jį naudoti valymui, poilsio zonų ir augalų laistymui. Tai Europos Sąjungos Interreg Baltijos jūros regiono programos finansuojamas prioritėtinis projektas „Vandeniui pažangi visuomenė”.

Dėl klimato kaitos ir didėjančios aplinkos taršos gėlas vanduo tampa vis vertingesniu ištekliumi. Karštos vasaros ir sausros lemia, kad vasarą vandens išteklių taupymas yra labai svarbus ir Baltijos jūros regione. Pripažinkim, kad gėlas vanduo yra daug darbo sąnaudų reikalaujantis produktas, kuris, nepaisant intensyvaus pirminio valymo, daugelyje šalių vis dar dažnai išleidžiamas po vienkartinio panaudojimo. Dėl tokios praktikos eikvojami pinigai, energija ir žmonių darbas, kurių kiekį būtų galima sumažinti iš nuotekų išgaunant vandenį.

Vis dėlto vandens regeneravimas susiduria su iššūkiais, susijusiais su specifiniais jo kokybės reikalavimais. Regeneruotame vandens tyrimų tikslas – sumažinti jo galimo žalingo poveikio aplinkai ir žmonių sveikatai riziką. Svarbiausia yra sukurti sprendimus, kaip išgauti saugų vandenį, kuriame nėra patogenų ir mikrodalelių, kuriame yra tinkamas maistinių medžiagų kiekis. Taip pat labai svarbu įveikti galimas visuomenės abejones. „ReNutriWater“ tyrėjai žino kokia yra visuomenės samprata ir įsitikinimai dėl švaraus ir nešvaraus vandens, todėl projekte siekiama visų pirma ištyti negeriamojo regeneruoto vandens panaudojimą.

Projekto „ReNutriWater“ veiklomis siekiame išsaugoti maistingąsias medžiagas regeneruotame vandenyje, kovoti su Baltijos jūros eutrofikacija ir sumažinti dirbtinių trąšų poreikį. Regeneruotame vandenyje galima išsaugoti maistines medžiagas, sureguliuoti jų kiekį ir vandenį panaudoti laistymui. Taip sumažinamas dirbtinių trąšų poreikis ir naudingai panaudojamos maistingosios medžiagos, užuot jas kaupus vandens valymo proceso liekanose; mažinama Baltijos jūros eutrofikacija, kurią sukelia būtent maistinių medžiagų perteklius. „ReNutriWater“ bandomaisiais projektais išbandėme, kaip būtų galima gaminti ir naudoti maistinių medžiagų turtingą regeneruotą vandenį, sukuriant žiedinės ekonomikos verslo modelius vandens sektoriuje.

Tarp naudos iš regeneruoto vandens naudojimo gavėjų yra ir vietos valdžios institucijos, ir privatūs subjektai. Vietos valdžios institucijos ir privatūs subjektai regeneruotą vandenį gali naudoti įvairiems tikslams, pavyzdžiui, gatvėms valyti ir plauti, automobilių plovykloms, fontanams ir tvenkiniams papildyti, poilsio zonoms drėkinti ir augalams veisti.

ReNutriWater remiasi trimis bandomaisiais projektais:

1 bandomasis projektas: regeneruoto vandens dezinfekavimo efektyvumas

Vykdam bandomąjį projektą buvo sukurti efektyvūs regeneruoto vandens dezinfekavimo metodai.

2 bandomasis projektas: regeneruoto vandens sudėties koregavimas

Vykdam bandomąjį projektą atlikti regeneruoto vandens sudėties parinkimo metodų tyrimai, siekiant jį pritaikyti konkrečioms poreikiams, pvz., augalų drėkinimui.

3 bandomasis projektas: kliūčių, trukdančių naudoti regeneruotą vandenį, pašalinimas

Vykdam bandomąjį projektą atlikti bandymai, siekiant užtikrinti saugų regeneruoto vandens naudojimą auginant augalus šiltnamiuose.

ReNutriWater partneriai dalijasi bandomųjų bandymų rezultatais su tikslinėmis grupėmis. Sukurti sprendimai ir priemonės padeda įvertinti pasirinktų pakartotinio vandens naudojimo technologijų įgyvendinimo galimybes.

Šiuo projektu siekiama spręsti įvairius iššūkius, kad būtų paspartintas politikos formavimas, palengvinant pakartotinio vandens naudojimo diegimą Europos miestuose. Geroji vandens pakartotinio naudojimo praktika skatina žiedinę ekonomiką ir padeda siekti kelių JT darnaus vystymosi tikslų.

Partnerystė

Pagrindinis projekto partneris – Lenkijos vandens ūkio rūmai. Inicatyvoje dalyvauja 14 projekto partnerių iš penkių šalių: Lenkijos, Suomijos, Latvijos, Lietuvos ir Danijos. Visą dalyvių sąrašą rasite vadovo pabaigoje.

Projekto trukmė

2023 sausis – 2025 gruodis

Biudžetas ir finansavimo šaltinis

Bendras „ReNutriWater“ biudžetas – 3,85 mln. eurų. 80 proc. finansavimo šaltinis – Interreg Baltijos jūros regiono programa. Daugiau informacijos apie Interreg programą ir projektą galima rasti projekto interneto svetainėje: ReNutriWater - Interreg Baltic Sea Region (interreg-baltic.eu/project/renutriwater).

Vadovas

Šis vadovas yra konkrečiai sukurtas kaip išsamus šaltinis, kuriame pateikiamos vertingos įžvalgos, gautos išsamiai konsultuojantis su įvairiomis suinteresuotosiomis šalimis. Juo siekiama didinti informuotumą apie ypatingą pakartotinio vandens naudojimo svarbą ir didžiulį potencialą sprendžiant pasaulines vandens problemas, pabrėžiant jo vaidmenį tvariai valdant išteklius ir saugant aplinką. Pateikiant patirtį ir geriausią praktiką, įgytą kruopščiai vykdant bandomuosius projektus, vadove siekiama suteikti tikslinėms grupėms praktinių žinių ir veiksmingų strategijų, kurias galima taikyti įvairiomis aplinkybėmis. Tai lyg platforma, padedanti plėtoti bendradarbiavimą ir skatinti inovacijas vandens pakartotinio naudojimo praktikoje, užtikrinant, kad įgyta patirtis ir parengti sprendimai būtų prieinami ir pritaikomi plačiajai auditorijai.

1.6 DK

ReNutriWater – Recirkulere lokale vandkredsløb gennem genanvendelse af næringsstoffer og vand

Mål og aktiviteter

Projektet hjælper offentlige myndigheder og operatører af rensningsanlæg med at udvikle handlingsplaner til at genvinde vand fra spildevand og genbruge det til rengøring, vanding af rekreative områder og planter. Det er et Water-smart Societies – prioritetsprojekt finansieret af EU's Interreg Baltic Sea Region Programme.

På grund af klimaforandringerne og stigende miljøforurening er ferskvand blevet en stadig mere værdifuld ressource. Varme somre og tørke gør det endnu vigtigere at spare på vandressourcerne om sommeren, også i Østersøregionen. Ferskvand bør anerkendes som et ressourcekrævende produkt, som trods en omfattende indledende behandlingsproces stadig ofte udledes efter engangsbrug i mange lande. Denne praksis spilder penge, energi og menneskelig arbejdskraft, som kunne reduceres med vandgenvinding fra spildevand.

Dog har genanvendelse af vand sine udfordringer relateret til specifikke krav til dets kvalitet. Målet med forskning i genanvendt vand er at reducere risikoen for dets potentielt skadelige indvirkning på miljøet og menneskers sundhed. Nøglen er at udvikle løsninger til genvinding af sikkert vand, fri for patogener og mikropollutanter, men med den rette mængde næringsstoffer. At overvinde potentiel samfundsmæssig tøven er også afgørende. ReNutriWater-forskere er godt klar over folks opfattelser af, hvad der udgør rent og beskidt vand, hvorfor projektet prioriterer at undersøge genanvendelse af rensset spildevand til formål, hvor vandet ikke skal bruges som drikkevand.

I ReNutriWater stræber vi efter at bevare næringsstoffer i det genvundne vand for at bekæmpe eutrofiering af Østersøen samt reducere behovet for kunstgødning på land. I processen med at genvinde vand kan næringsstoffer bevares i vandet. Mængden af næringsstoffer kan justeres, hvorefter vandet kan bruges til vanding. Dette mindsker behovet for kunstgødning og muliggør gavnlig brug af næringsstoffer i stedet for at de ophobes på rensningsanlæggene. Dette mindsker udledning af næringsstoffer og dermed eutrofiering af Østersøen. I pilotprojekterne i ReNutriWater testede vi, hvordan næringsrigt genvundet vand kunne produceres og bruges, og dermed skabe cirkulære økonomiske forretningsmodeller i vand- og spildevandssektoren.

Blandt modtagerne af genanvendt vand finder vi både lokale myndigheder og private virksomheder, der kan bruge vandet til forskellige formål såsom gaderengøring, bilvask, springvand og bassiner, vanding af rekreative områder og til dyrkning af planter.

ReNutriWater omfatter tre pilotprojekter:

Pilot 1: Effektiv desinfektion af genvundet vand

Som en del af pilot 1 blev der udviklet effektive metoder til desinfektion af genanvendt vand.

Pilot 2: Justering af sammensætningen af genanvendt vand

Forskning i metoder til at justere sammensætningen af stoffer i det genvundet vand for at tilpasse det til specifikke behov som f.eks. plantevanding.

Pilot 3: Nedbrydning af barrierer for brug af genvundet vand

Det blev testet hvor sikker genanvendelsen af rensset spildevand er ved vanding af planter i drivhuse.

ReNutriWater-partnere deler resultaterne af pilotprojekterne med deres målgrupper. De udviklede løsninger og værktøjer hjælper med at vurdere gennemførligheden af udvalgte teknologier til vandgenanvendelse. Dette projekt har til formål at adressere forskellige udfordringer for at fremskynde politiske beslutninger og lette implementeringen af vandgenbrug i Europas byer. Den gode praksis med at genanvende vand fremmer en cirkulær økonomi og adresserer flere af FN's Verdensmål.

Projektpartnerskab

Hovedpartneren i projektet er Chamber of Economy "Polish Waterworks". Initiativet har 14 projektpartnere fra fem lande: Polen, Finland, Letland, Litauen og Danmark. Den fulde liste over deltagere kan findes i slutningen af håndbogen.

Projektets levetid

Januar 2023 – december 2025

Projektbudget og finansieringskilde

Det samlede budget for ReNutriWater er 3,85 millioner euro. 80% af finansieringen kommer fra Interreg Baltic Sea Region Programme. Mere om Interreg-programmet og projektet kan findes på projektets hjemmeside: ReNutriWater - Interreg Baltic Sea Region (interreg-baltic.eu/project/renutriwater).

Håndbog

Denne håndbog er specifikt designet til at tjene som en brugbar samling af værdifulde indsigter opnået gennem omfattende samarbejde med en bred vifte af interessenter. Den søger at øge bevidstheden om det store og vigtige potentiale for vand-genanvendelse i håndteringen af globale vandudfordringer, og fremhæver dets rolle i bæredygtig ressourceforvaltning og miljøbeskyttelse. Ved at præsentere ekspertise og bedste praksis afledt af de gennemførte pilotprojekter, sigter håndbogen mod at bidrage med praktisk viden og handlingsrettede strategier, der kan anvendes i forskellige sammenhænge. Desuden udgør håndbogen en platform til fremme af samarbejde og opmuntring til innovation i vandgenbrugspraksis, og sikrer, at de lærte erfaringer og udviklede løsninger er tilgængelige for et bredt publikum.

2 Ponowne wykorzystanie wody w regionie Morza Bałtyckiego



Po co odzyskiwać wodę?

Region bałtycki jest bogaty w zasoby wodne: morze, gęsta sieć rzek, wiele jezior i terenów podmokłych. Wprowadzenie w życie ponownego wykorzystania wody jest czymś koniecznym w regionach o gorącym i suchym klimacie, ale w regionie Morza Bałtyckiego również szybko zyskuje na znaczeniu.

Uzdatnianie wody do ponownego użycia to proces istotny, który z kilku powodów w przyszłości stanie się w regionie bałtyckim nieunikniony:

1. Ochrona środowiska: Morze Bałtyckie jest jednym z najbardziej zanieczyszczonych mórz świata. Jakość wód Bałtyku, do których odprowadzane są oczyszczone ścieki, powinna ulec poprawie. Odzyskiwanie wody może ograniczyć zrzut zanieczyszczeń do morza, przyczyniając się tym samym do ochrony ekosystemów morskich i śródlądowych. Odzysk składników odżywczych jest kluczowy dla poprawy jakości wody.
2. Niedobór wody: Niektóre obszary regionu Morza Bałtyckiego borykają się z problemem niedoboru wody, zwłaszcza w porze suchej. Postępująca urbanizacja również stanowi czynnik wpływający niekorzystnie na dostępność tego zasobu. Odzyskiwanie zużytej wody może stanowić jej dodatkowe źródło, pomagając zaspokoić zapotrzebowania rolnictwa, przemysłu, gmin i sektora rekreacyjnego.
3. Zrównoważony rozwój: Kraje regionu bałtyckiego dążą do osiągnięcia zrównoważonego rozwoju, a odzyskiwanie wody wpisuje się w działania mające na celu promowanie efektywnego wykorzystania zasobów i zmniejszenie naszego wpływu na środowisko. Ponowne wykorzystanie wody można uznać za wdrożenie koncepcji gospodarki o obiegu zamkniętym w sektorze wodnym.
4. Adaptacja do zmian klimatu: W obliczu zmian wzorców pogodowych, takich jak wzrost zróżnicowania opadów oraz regularne okresy suszy w porze wiosennej i letniej, odzyskiwanie wody może stanowić zabezpieczenie przed wahaniami dostępności tego surowca.
5. Czynniki ekonomiczne: Wdrożenie procesów odzyskiwania wody oraz składników odżywczych może przyczynić się do zmniejszenia wydatków i zwiększenia bezpieczeństwa dostaw wody w regionie, co ma duże znaczenie dla rozwoju gospodarczego.
6. Rozwój technologiczny: Dzięki innowacjom technologicznym w obszarze uzdatniania, odzyskiwanie wody stało się bardziej opłacalne i bezpieczniejsze, co zachęca do stosowania go w różnych sektorach.
7. Polityka Unii Europejskiej: Rozporządzenia unijne dotyczące oszczędzania i odzyskiwania wody regulują oraz umożliwiają wprowadzenie ponownego wykorzystania wody w życie.
8. Wzrost świadomości: Konieczne jest popularyzowanie w społeczeństwie i wśród interesariuszy wiedzy na temat potrzeby oszczędzania zasobów i wdrażania zasad gospodarki o obiegu zamkniętym w sektorze wodnym.

» **Czynniki te sprawiają, że ponowne wykorzystanie wody jest kluczowym tematem do dyskusji i podjęcia działań w regionie Morza Bałtyckiego.**



Jak radzić sobie z niedoborem wody?

Z jednej strony region Morza Bałtyckiego jest bogaty w zasoby wodne, rzeki, jeziora i tereny podmokłe, ale z drugiej strony dostępność zasobów i ich wykorzystanie różnią się w zależności od obszaru: zużycie wody jest znacznie wyższe na obszarach zurbanizowanych i intensywnie uprawianych rolniczo niż w mniej zaludnionych, naturalnych regionach. Niedobór wody jest widoczny w regionie Morza Bałtyckiego – musimy go ograniczyć.

Odzyskana woda ściekowa może odegrać znaczącą rolę w rozwiązywaniu problemów związanych z niedoborem wody w regionie Morza Bałtyckiego, zaspokajając potrzeby przemysłu i rolnictwa. Oto kilka korzyści, jakie odzyskana woda może przynieść w celu rozwiązania problemu niedoboru:

1. Alternatywne źródło wody: Odzyskana woda stanowi niezawodne alternatywne źródło tego surowca, zwłaszcza w okresach suszy lub niskich opadów. Może to pomóc w zaspokojeniu potrzeb rolnictwa, przemysłu i miejskich dostaw wody.
2. Zrównoważone rolnictwo: W regionach rolniczych odzyskana woda może być wykorzystywana do

nawadniania, co jest szczególnie cenne na obszarach dotkniętych niedoborem słodkiej wody. Dzięki wykorzystaniu uzdatnionej wody rolnicy mogą utrzymać produkcję roślinną bez wyczerpywania naturalnych zasobów.

3. Zmniejszone zużycie słodkiej wody: Dzięki wykorzystaniu odzyskanej wody możemy zmniejszyć zapotrzebowanie na kolejne źródła słodkiej wody, pomagając w utrzymaniu równowagi ekologicznej w rzekach i jeziorach, które w przeciwnym razie mogłyby być nadmiernie eksploatowane w celu zaopatrzenia w wodę.
4. Opłacalność: Chociaż początkowo mogą być konieczne inwestycje w infrastrukturę, odzyskana woda ściekowa może ostatecznie stanowić korzystne rozwiązanie w zakresie zaopatrzenia w wodę, zmniejszając zapotrzebowanie na kosztowną infrastrukturę i oczyszczanie wody słodkiej.
5. Recykling składników odżywczych: Odzyskana woda ściekowa często zawiera składniki odżywcze, takie jak azot i fosfor, które mogą być korzystne dla gleb rolniczych. Recykling ten jest szczególnie przydatny w zwiększaniu żyzności gleby przy jednoczesnym zmniejszeniu zależności od nawozów syntetycznych.
6. Zwiększona odporność: Wdrożenie systemów odzyskiwania ścieków zwiększa odporność na skutki zmian klimatycznych, takie jak zwiększona zmienność opadów i temperatur, które mogą wpływać na dostępność słodkiej wody.
7. Zaangażowanie społeczności i świadomość: Realizacja udanych projektów odzyskiwania ścieków może sprzyjać wzrostowi świadomości i zaangażowania w zrównoważone praktyki wodne, promując kulturę oszczędzania i odpowiedzialnego korzystania z wody.
8. Innowacje i rozwój technologii: Wdrożenie systemów odzyskiwania ścieków może stymulować innowacje w zakresie technologii uzdatniania wody, prowadząc do ulepszenia procesów, które mogą przynieść korzyści zarówno systemom odzyskiwania wody, jak i systemom wody pitnej.

» **Chociaż wykorzystanie odzyskiwanych ścieków wiąże się z wyzwaniami, takimi jak zapewnienie dobrej jakości wody i przezwyciężenie problemów związanych z odbiorem społecznym, odpowiednie planowanie i inwestycje mogą ułatwić włączenie tego zasobu do programu zrównoważonego gospodarowania wodą w regionie Morza Bałtyckiego.**



Co z jakością wody?

Istnieje pilna potrzeba zajęcia się kwestią jakości wód powierzchniowych i gruntowych w regionie Morza Bałtyckiego.

Jakość wód powierzchniowych w regionie Morza Bałtyckiego budzi poważne obawy ze względu na różne czynniki antropogeniczne, w tym rozwój rolnictwa, działalność przemysłową i rozwój miast. Oto kilka kluczowych kwestii dotyczących jakości wody w tym regionie:

1. Eutrofizacja: Jednym z głównych problemów dotyczących Morza Bałtyckiego jest eutrofizacja, spowodowana przede wszystkim wpływem składników odżywczych (azotu i fosforu) z pól uprawnych i ścieków. Prowadzi to do zakwitów glonów, który może spowodować spadek poziomu tlenu i zaszkodzić życiu morskemu.
2. Zanieczyszczenia: Morze Bałtyckie jest narażone na obecność różnych zanieczyszczeń, w tym metali ciężkich (takich jak rtęć i ołów), trwałych zanieczyszczeń organicznych i mikroplastików. Zanieczyszczenia przemysłowe i zanieczyszczenia ze źródeł rozproszonych przyczyniają się do gromadzenia się tych substancji w wodzie.
3. Słoność i stratyfikacja: Wyjątkowy charakter Morza Bałtyckiego, które jest wodami słonawymi o niższej słoności w porównaniu z wodami oceanicznymi, wpływa na rozmieszczenie gatunków i ogólny stan ekosystemu. Stratyfikacja, spowodowana różnicami temperatury i słoności, może prowadzić do obniżenia poziomu tlenu w wodach przydennych.
4. Wpływ na różnorodność biologiczną: Zła jakość wody może znacząco wpływać na populację ryb, w tym gatunki o znaczeniu handlowym, takie jak śledź i szprot. Ponadto podwyższony poziom składników odżywczych i zmiany temperatury mogą zakłócać lokalne ekosystemy, wpływając na różnorodność biologiczną.
5. Środki regulacyjne: Kilka międzynarodowych podmiotów, takich jak Bałtycka Komisja Ochrony Środowiska Morskiego (HELCOM), zajmuje się monitorowaniem i poprawą jakości wody w Morzu Bałtyckim. Działania obejmują ograniczenie wprowadzania składników odżywczych poprzez lepsze

praktyki rolnicze, poprawę oczyszczania ścieków oraz wdrażanie działań na rzecz ochrony środowiska morskiego.

» **Podejmowane są działania mające na celu monitorowanie i poprawę jakości wody, ale wyzwania związane z zanieczyszczeniem, zmianami klimatycznymi i utratą siedlisk nadal stanowią zagrożenie dla tak delikatnego środowiska.**



A jakość wody odzyskanej?

Czasami jakość wody w rzece jest gorsza niż jakość wody odzyskanej.

Istnieją sytuacje, w których jakość wody odzyskanej może być lepsza niż jakość wody występującej w naturalnych zbiornikach, takich jak rzeki. Zjawisko to może wynikać z kilku powodów:

1. Zanieczyszczenie: Rzeki mogą być narażone na różne formy zanieczyszczenia pochodzące ze spływów rolniczych, zrzutów przemysłowych i ścieków miejskich. Może to skutkować niską jakością wody, podniesionym poziomem składników odżywczych, metali ciężkich, patogenów i zanieczyszczeń organicznych.
 2. Procesy oczyszczania: Woda odzyskana zazwyczaj poddawana jest rygorystycznym procesom oczyszczania mającym na celu eliminację zanieczyszczeń i patogenów. Procesy te mogą prowadzić do uzyskania wody o wyższej jakości w porównaniu z wodą rzeczną nieoczyszczoną lub źle zarządzaną.
 3. Poziom składników odżywczych: W niektórych przypadkach woda odzyskana może mieć bardziej zrównoważony skład, co może być korzystne dla zastosowań rolniczych w porównaniu z wodą rzeczną, która może zawierać wysokie poziomy niektórych zanieczyszczeń.
 4. Stała jakość: Woda odzyskana jest zazwyczaj produkowana w ramach kontrolowanych procesów, które mogą zapewnić stałą jakość, podczas gdy jakość wody rzecznej może się znacznie różnić w zależności od działań w górnym biegu rzeki, zmian sezonowych i warunków pogodowych.
 5. Wykorzystanie w nawadnianiu oraz inne zastosowania: Rolnicy i gminy mogą chętniej wykorzystywać wodę odzyskaną do nawadniania i innych celów, wiedząc, że jej jakość gwarantuje bezpieczeństwo i skuteczność, mimo obecności pobliskich naturalnych zbiorników wodnych, gdyż te mogą być zanieczyszczone.
- » **Świadomość tych uwarunkowań ma zasadnicze znaczenie dla tworzenia skutecznych strategii zarządzania wodą, szczególnie w regionach borykających się z problemami niedoboru wody lub zanieczyszczenia. Podkreśla to potencjalną wartość wody odzyskanej jako zasobu do zrównoważonego rozwoju i ochrony środowiska.**



Czy odzyskiwanie wody ze ścieków jest ryzykowne?

Całkowite ponowne wykorzystanie wody wiąże się z pewnymi zagrożeniami i wyzwaniami.

Następujące zagrożenia możliwe przy wykorzystywaniu odzyskanej wody ściekowej w regionie Morza Bałtyckiego należy wziąć pod uwagę:

1. Zagrożenia dla zdrowia: Jedną z głównych obaw związanych z odzyskaną wodą ściekową jest potencjalna obecność patogenów i szkodliwych substancji chemicznych. Aby chronić zdrowie publiczne, należy zapewnić, że odzyskana woda spełnia normy bezpieczeństwa odpowiednie dla jej przeznaczenia.
2. Wpływ na środowisko: Nieprawidłowo oczyszczona woda może prowadzić do wprowadzenia do środowiska zanieczyszczeń, takich jak substancje farmaceutyczne, substancje zaburzające gospodarkę hormonalną i metale ciężkie. Może to szkodzić ekosystemom wodnym i pogorszyć jakość wody w Morzu Bałtyckim.
3. Postrzeganie społeczne: Wśród społeczeństwa może pojawić się opór lub nieufność wobec wykorzystania odzyskanej wody ściekowej. Skuteczna komunikacja i zaangażowanie społeczności są niezbędne, aby rozwiać obawy i zdobyć akceptację dla projektów ponownego wykorzystania wody.
4. Ramy regulacyjne: Brak jasnych i spójnych przepisów regulujących jakość i zarządzanie wodą odzyskaną może stanowić wyzwanie. Aby zapewnić bezpieczne i skuteczne praktyki, konieczne jest ustanowienie odpowiednich wytycznych.
5. Koszty infrastruktury: Modernizacja istniejących zakładów uzdatniania wody i rozwój nowej

infrastruktury dla systemów wody odzyskanej może być kosztowny. Pozyskanie finansowania i inwestycji może stanowić barierę, zwłaszcza w regionach o ograniczonych możliwościach ekonomicznych.

6. Wyzwania techniczne: Woda odzyskana musi być uzdatniana, aby spełniała określone normy dla różnych zastosowań (np. nawadnianie, procesy przemysłowe). Wymaga to zaawansowanych technologii uzdatniania i wiedzy specjalistycznej, które mogą się różnić w zależności od lokalizacji.
 7. Zmienność klimatu: Zmiany warunków pogodowych, w tym zmienność opadów i wahania temperatury spowodowane zmianami klimatu, mogą wpływać na dostępność i jakość wody odzyskanej, zmniejszając jej niezawodność jako zasobu.
 8. Nierównowaga składników odżywczych: Chociaż odzyskana woda ściekowa może zawierać składniki odżywcze korzystne dla rolnictwa, może również prowadzić do nierównowagi składników odżywczych w glebach lub zbiornikach wodnych, jeśli nie jest odpowiednio zarządzana, co może potencjalnie prowadzić do eutrofizacji.
 9. Długoterminowa zrównoważoność: Stworzenie solidnych systemów ciągłego monitorowania, oceny i utrzymania projektów związanych z odzyskiwaniem wody ma zasadnicze znaczenie dla zapewnienia ich długoterminowej rentowności i zminimalizowania ryzyka.
- » **Zajęcie się tymi zagrożeniami i wyzwaniami ma kluczowe znaczenie dla pomyślnego wdrożenia ponownego wykorzystania odzyskanej wody ściekowej w regionie Morza Bałtyckiego, zapewniając jej pozytywny wpływ na zrównoważone gospodarowanie wodą i ochronę środowiska.**



Co jeszcze można zrobić?

Odzysk pierwiastków i materiałów ze ścieków to obszar rozwijający się i istotny, którego celem jest promowanie zrównoważonego rozwoju, zmniejszenie wpływu na środowisko oraz tworzenie wartościowych zasobów z odpadów.

Odzysk może obejmować różne technologie i metody, w zależności od rodzaju ścieków i interesujących dla użytkownika materiałów:

1. Składniki odżywcze (azot i fosfor): Fosfor można odzyskiwać w postaci struwitu (fosforanu magnezu i amonu) poprzez wytrącanie ze ścieków bogatych w składniki odżywcze, zwłaszcza ze ścieków pochodzących z fermentacji beztlenowej i osadów ściekowych. Struwit ten można następnie wykorzystać jako nawóz o spowolnionym uwalnianiu. Zaawansowane procesy oczyszczania ścieków mogą usprawnić usuwanie azotu i fosforu, które można następnie ponownie wykorzystać jako nawozy.
 2. Metale można odzyskiwać z odzyskiwanych ścieków przy użyciu technologii takich jak adsorpcja, strącanie i metody elektrochemiczne.
 3. Wartościowe wykorzystanie osadu: Osad powstający podczas oczyszczania ścieków można przetwarzać w celu odzyskania związków organicznych, takich jak kwasy tłuszczowe i enzymy, które można wykorzystać do różnych celów.
 4. Mikroplastiki i zanieczyszczenia można izolować: dzięki technologiom takim jak filtracja, flotacja i obróbka chemiczna można usunąć mikroplastiki i niebezpieczne substancje chemiczne ze ścieków, co otwiera potencjalną drogę do recyklingu niektórych tworzyw sztucznych.
 5. Odzyskiwanie węgla ze ścieków może skutecznie pomóc w ograniczeniu emisji gazów cieplarnianych i usprawnić metody wychwytywania dwutlenku węgla.
- » **Odzysk pierwiastków i materiałów ze ścieków oraz ponownie wykorzystanych ścieków nie tylko przyczynia się do oszczędzania zasobów, ale może również zmniejszyć obciążenie środowiska związane z tradycyjnymi metodami usuwania ścieków. Jednak aby promować wdrażanie tych działań na większą skalę, należy przyjrzeć się takim kwestiom, jak opłacalność procesów odzyskiwania, ograniczenia technologiczne i ramy regulacyjne.**



Zgodność z potrzebami?

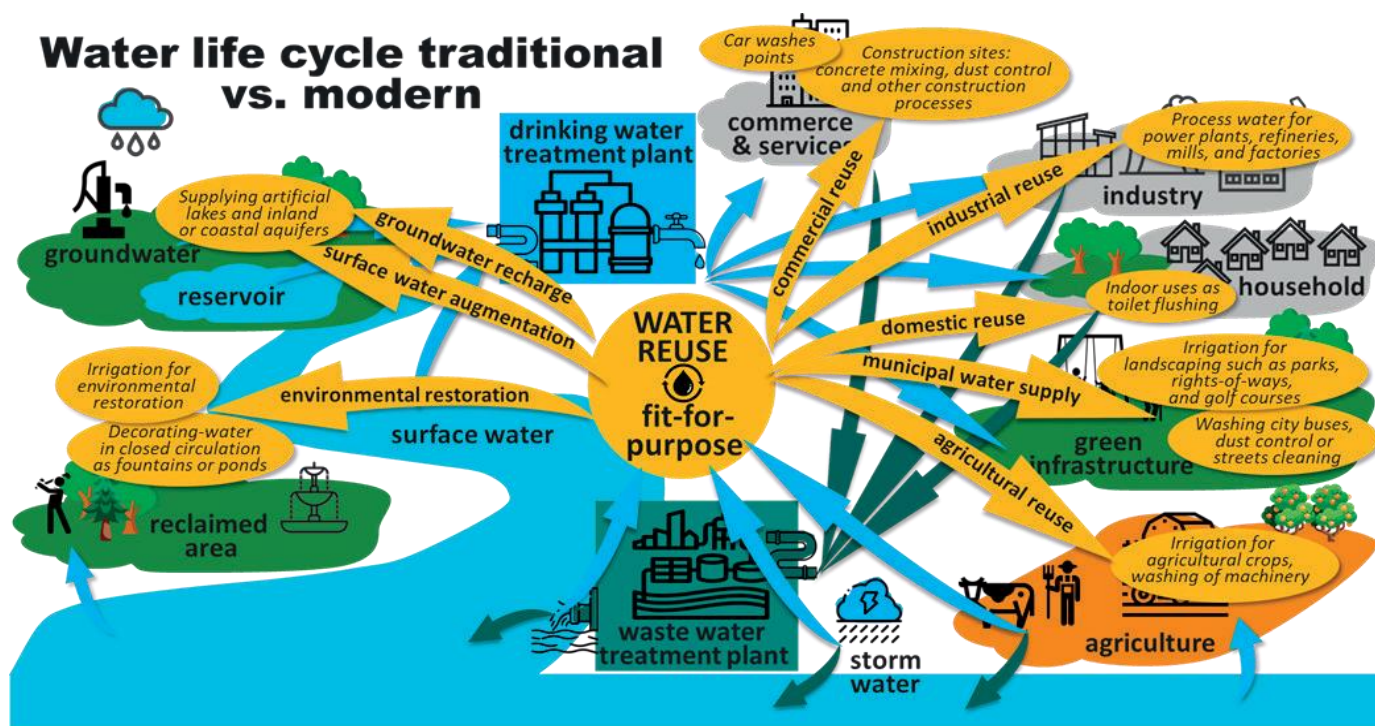
Woda oczyszczana zgodnie z potrzebami to idealne rozwiązanie – nie jest nadmiernie uzdatniana, zawiera odpowiednią ilość składników odżywczych, jest bezpieczna itp.

Koncepcja dostosowywania odzyskiwanej wody do potrzeb jest rozwiązaniem obiecującym, szczególnie w sytuacjach, gdy jakość wody można dobrać do konkretnych zastosowań. Podejście to ma kilka zalet:

1. Efektywne wykorzystanie zasobów: Dzięki uzdatnianiu wody zgodnie z określonymi normami w oparciu o jej przeznaczenie zużywa się mniej energii i środków chemicznych w porównaniu z tradycyjnymi metodami uzdatniania, które mają na celu osiągnięcie wyższego poziomu czystości niż to konieczne.
2. Zarządzanie składnikami odżywczymi: Przykładowo w zastosowaniach rolniczych wykorzystanie oczyszczonych ścieków może zapewnić niezbędne składniki odżywcze (takie jak azot i fosfor), które korzystnie wpływają na wzrost upraw, zmniejszając w ten sposób zapotrzebowanie na nawozy syntetyczne.
3. Bezpieczeństwo: Stosowanie rygorystycznych norm bezpieczeństwa w ramach procesu dostosowania do potrzeb zapewnia uzdatnianie wody odpowiednie do konkretnego zastosowania końcowego. Pomaga to budować zaufanie społeczne do wody ponownie wykorzystywanej.
4. Opłacalność: Dostosowując procesy uzdatniania do zamierzonego zastosowania, społeczności mogą zaoszczędzić koszty i zasoby, które w przeciwnym razie zostałyby wydane na nadmierne uzdatnianie.
5. Zrównoważony rozwój: Podejście to promuje gospodarkę o obiegu zamkniętym poprzez maksymalizację wykorzystania zasobów wodnych, a tym samym oszczędzanie zasobów słodkiej wody i minimalizowanie ilości odpadów.
6. Elastyczność: Dostosowanie oczyszczania do konkretnych potrzeb pozwala na elastyczność w strategiach zarządzania wodą, dostosowując się do różnych wymagań w różnych sektorach.

» Podsumowując, skupienie się na ponownym wykorzystaniu wody dostosowanym do konkretnych celów jest innowacyjną strategią, która odpowiada zarówno na problemy środowiskowe, jak i praktyczne potrzeby społeczności, szczególnie w regionach dotkniętych niedoborem wody lub wrażliwych ekologicznie, takich jak obszar Morza Bałtyckiego.

Rys. 1 przedstawia nasze podejście do odzyskiwania i ponownego wykorzystania wody.



Rysunek 1. Woda dostosowana do potrzeb dzięki procesowi odzyskiwania

3 Legal aspects

Ramy prawne dotyczące ponownego wykorzystania wody odgrywają kluczową rolę w zapewnieniu bezpieczeństwa, wydajności i zrównoważonego charakteru odzyskiwania wody. W niniejszym rozdziale przedstawiono najważniejsze przepisy i dyrektywy regulujące ponowne wykorzystanie wody i praktyki nawadniania. Dokumenty te posłużyły do ustalenia zarówno obowiązkowych, jak i opcjonalnych wymagań pomiarowych dla partnerów projektu i stanowią wytyczne dla zainteresowanych stron w zakresie spełniania norm prawnych i środowiskowych.

Kluczowe dokumenty prawne



[Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady \(UE\) 2020/741 z dnia 25 maja 2020 r. w sprawie minimalnych wymagań dotyczących ponownego wykorzystania wody](#)

Odzyskiwanie wody ze ścieków jest częściowo uregulowane w rozporządzeniu 2020/741. Wprowadza ono podstawowe parametry, które należy monitorować podczas odzyskiwania wody z miejskich ścieków i wykorzystywania jej w rolnictwie. Wprowadza również obowiązek oceny ryzyka dla każdego rozwiązania.

Dzieli ono wodę odzyskaną na klasy w zależności od nawadnianych roślin i metody nawadniania. Rozporządzenie definiuje cztery klasy jakości (A, B, C, D), przy czym klasa A jest najsurowsza i przeznaczona dla upraw spożywanych na surowo (rys. 2).

Class	Class A	Class B	Class C	Class D
Water reuse demands	All food crops consumed raw where the edible part is in direct contact with reclaimed water and root crops consumed raw	Food crops consumed raw where the edible part is produced above ground and is not in direct contact with reclaimed water, processed food crops and non-food crops including crops used to feed milk- or meat-producing animals		Industrial, energy and seeded crops
Irrigation methods	All irrigation methods		Drip irrigation or other irrigation method that avoids direct contact with the edible part of the crop	All irrigation methods
Other demands	Where there is a risk of aerosolization			Where there is a risk of aerosolization
	In the case of irrigation of pastures or forage			

Rysunek 2. Klasy wody odzyskanej zgodnie z rozporządzeniem 2020/741

W tabeli 1 przedstawiono ogólne wymagania nałożone przez rozporządzenie. Inne parametry mogą zostać określone na podstawie oceny ryzyka opisanej w załączniku II do niniejszego rozporządzenia. Minimalna częstotliwość analiz jest zapisana niebieską czcionką.

- 2/t oznacza dwa razy w tygodniu
- 2/m oznacza dwa razy w miesiącu
- BOD₅ – biochemiczne zapotrzebowanie na tlen (ang. *Biochemical Oxygen Demand*).

Tabela 1. Wymogi określone w rozporządzeniu 2020/741

Klasa wody	Orientacyjny cel technologiczny	Jakość wody				
		E. coli (liczba/100 ml)	BOD5 (mg/l)	Całkowita zawartość zawiesin (mg/l)	Mętność (NTU)	Inne
A	Oczyszczanie wtórne, filtracja i dezynfekcja	≤ 10 (1/t)	≤ 10 (1/t)	≤ 10 (1/t)	≤ 5 (ciągłe)	Legionella spp.: <1 000 cfu/l w przypadku ryzyka aerolizacji Nicienie jelitowe (jaja helmintów): ≤1 jajo/l w przypadku nawadniania pastwisk lub upraw paszowych (2/m lub inne)
B	Oczyszczanie wtórne i dezynfekcja	≤ 100 (1/t)	Zgodnie z 91/271/EWG, (zał. I, tab. 1)	Zgodnie z 91/271/EWG, (zał. I, tab. 1)	-	
C		≤ 1000 (2/m)				
D		≤ 10 000 (2/m)				
			(zał. I, sekcja D)	(zał. I, sekcja D)		

Na stronie projektu WISE-Freshwater można sprawdzić czy dany kraj wdrożył już rozporządzenie 2020/741. Istnieje jednak wiele państw członkowskich, które posiadają bardziej szczegółowe akty prawne. Są to oczywiście głównie kraje południowe, które są bardzo dotknięte niedoborem wody.

Ponadto 5 sierpnia 2022 r. Komisja Europejska wydała [Wytyczne mające na celu wsparcie stosowania rozporządzenia 2020/741](#), zawierające wskazówki dotyczące pozwoleń, kar, oceny ryzyka, środków zapobiegawczych i zarządzania sytuacjami kryzysowymi, aby zapewnić sprawne wdrożenie rozporządzenia.



[Dyrektywa Rady z dnia 21 maja 1991 r. dotycząca oczyszczania ścieków komunalnych](#)

Dyrektywa w sprawie oczyszczania ścieków komunalnych ustanawia wymagania dotyczące prawidłowego zbierania, oczyszczania i odprowadzania ścieków komunalnych w celu ochrony zdrowia publicznego i środowiska. Określa ona normy jakości dla oczyszczonych ścieków odprowadzanych do wód powierzchniowych, w szczególności dla oczyszczalni ścieków obsługujących populację powyżej 2000 ekwiwalentów ludności (PE). Dyrektywa nakłada obowiązek monitorowania kluczowych wskaźników jakości wody, w tym biochemicznego zapotrzebowania na tlen (BOD₅), chemicznego zapotrzebowania na tlen (ang. *Chemical Oxygen Demand*, COD), całkowitej zawartości zawiesin (ang. *Total Suspended Solids*, TSS), całkowitej zawartości azotu i fosforu, aby zminimalizować ryzyko eutrofizacji w odbiornikach wodnych. Określa również szczegółowe wymagania dotyczące limitów stężenia, minimalnych wartości procentowych redukcji (w stosunku do dopływu) oraz metod pomiaru każdego wskaźnika w celu zapewnienia jak największej zgodności z przepisami.

Dyrektywa została zaktualizowana przez [Dyrektywę Parlamentu Europejskiego i Rady \(UE\) 2024/3019 z dnia 27 listopada 2024 r. dotyczącą oczyszczania ścieków komunalnych \(wersja przekształcona\)](#).

Dyrektywa ta ustanawia zasady dotyczące zbierania, oczyszczania i odprowadzania ścieków komunalnych w celu ochrony zarówno środowiska, jak i zdrowia ludzkiego, zgodnie z podejściem „Jedno zdrowie”. Wprowadza ona również przepisy dotyczące powszechnego dostępu do urządzeń sanitarnych, zwiększenia przejrzystości w sektorze ścieków komunalnych, stałego nadzoru zdrowia publicznego poprzez monitorowanie ścieków oraz stosowania zasady „zanieczyszczający płaci”.

Dyrektywa odnosi się do współczesnych wyzwań, takich jak nowopowstałe zanieczyszczenia, w tym mikroplastiki i mikrozanieczyszczenia, które mogą szkodzić środowisku nawet w bardzo niskich stężeniach. Podkreśla ona znaczenie regularnego monitorowania tych substancji.

Dyrektywa klasyfikuje mikrozanieczyszczenia w dwóch kategoriach:

- Substancje łatwe do oczyszczenia (np. amisulpryd, karbamazepina, citalopram).
- Substancje łatwe do usunięcia (np. benzotriazol, kandesartan, irbesartan).

Aby zapewnić ochronę środowiska, dyrektywa nakłada wymóg 80% skuteczności usuwania wybranych mikrozanieczyszczeń z tych kategorii.



[Dyrektywa \(UE\) 2020/2184 w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi](#)

Niniejsza dyrektywa ustanawia ramy prawne mające na celu ochronę zdrowia ludzkiego poprzez odpowiednie monitorowanie i uzdatnianie wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi. Określa ona mikrobiologiczne i chemiczne wskaźniki jakości.

Chociaż produkcja wody pitnej nie była celem projektu ReNutriWater, wskaźniki te zostały uwzględnione jako opcjonalne pomiary w ramach pilotażu 1 w celu zwiększenia bezpieczeństwa i dostosowania się do najlepszych praktyk.



[Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/105/WE z dnia 16 grudnia 2008 r. w sprawie norm jakości środowiska w dziedzinie polityki wodnej](#)

Dyrektywa ta ustanawia normy jakości środowiska (ang. *Environment Quality Standards*, EQS) dla substancji, które mogą zanieczyszczać wody powierzchniowe. Do głównych zanieczyszczeń objętych dyrektywą należą metale ciężkie (np. kadm, rtęć i ołów) oraz pestycydy (np. atrazyna i chloropiryfos).

Wymogi te mają na celu zapewnienie, że oczyszczone ścieki spełniają normy bezpieczeństwa środowiskowego. Dyrektywa stanowiła również podstawę do włączenia wykazu mikrozanieczyszczeń do zakresu analitycznego projektu ReNutriWater.



[Decyzja wykonawcza Komisji \(UE\) 2022/1307 z dnia 22 lipca 2022 r. ustanawiająca listę obserwacyjną substancji podlegających monitorowaniu w całej Unii w dziedzinie polityki wodnej zgodnie z dyrektywą 2008/105/WE](#)

Lista obserwacyjna na rok 2022 zawiera nowe substancje zanieczyszczające, które mogą być zagrożeniem dla środowiska wodnego i wymagają monitorowania, ze względu na niewystarczające dane. Są to na przykład antybiotyki, fungicydy i leki, które mogą szkodzić ekosystemom nawet w małych ilościach.

Najważniejsze dodatki do listy obserwacyjnej na rok 2022:

- Antybiotyki: klindamycyna, ofloksacyna
- Inne produkty farmaceutyczne: metformina
- Pestycydy i fungicydy: azoksystrobina, diflufenikan, fipronil

Monitorowanie tych substancji zwiększa bezpieczeństwo wody do nawadniania i jest zgodne ze strategiami środowiskowymi UE, w tym ze strategicznym podejściem UE do substancji farmaceutycznych w środowisku oraz europejskim planem działania „Jedno zdrowie” na rzecz zwalczania oporności na środki przeciwdrobnoustrojowe. Inicjatywy te mają na celu poszerzenie wiedzy na temat występowania i rozprzestrzeniania się środków przeciwdrobnoustrojowych w środowisku.

Lista obserwacyjna określa maksymalne stężenia dla większości badanych mikrozanieczyszczeń. W przypadku tych, dla których nie ustalono limitów, oczekuje się, że zostaną one dodane w przyszłych aktualizacjach.

» FAO Paper No. 29: "Water Quality for Agriculture"

Niniejszy dokument zawiera propozycje wymagań dotyczących stężenia składników odżywczych i metali ciężkich w wodzie odzyskanej wykorzystywanej do nawadniania. Chociaż składniki odżywcze sprzyjają wzrostowi roślin, ich poziom należy dokładnie kontrolować, aby zapobiec tworzeniu się biofilmu i utrzymać odpowiedni stosunek węgla do azotu i fosforu (C:N:P) dla skutecznego nawadniania. W dokumencie Organizacji Narodów Zjednoczonych ds. Wyżywienia i Rolnictwa (FAO) określono maksymalne stężenia metali ciężkich, takich jak kadm ($\leq 0,01$ mg/l) i arsen ($\leq 0,10$ mg/l), aby nie hamowały one wzrostu roślin. Zalecono również maksymalne stężenia pierwiastków śladowych, w tym żelaza (≤ 5 mg/l) i cynku (≤ 2 mg/l), które mogą wspomagać wzrost roślin, jeśli są utrzymywane w bezpiecznych granicach. Ponadto dokument określa typowe zakresy składników odżywczych w wodzie do nawadniania, takich jak azot azotanowy (≤ 10 mg/l), azot amonowy (≤ 5 mg/l), fosfor fosforanowy (≤ 2 mg/l) i potas (≤ 2 mg/l), zapewniając optymalne warunki do wykorzystania w rolnictwie zgodnie z wytycznymi FAO dotyczącymi jakości wody w rolnictwie.

W kolejnej części przedstawiamy prawo regulujące odzyskiwanie i ponowne wykorzystanie wody w Estonii, Francji, Grecji, Hiszpanii, Portugalii, Rumunii, Szwecji, na Węgrzech i we Włoszech.

Prawo regulujące odzyskiwanie i ponowne wykorzystanie wody w wybranych krajach UE



ESTONIA

Estonia jest jedynym krajem bałtyckim, w którym obowiązują przepisy dotyczące odzyskiwania wody ze ścieków. Odpowiednim instrumentem prawnym jest estońska [ustawa wodna](#), która w § 128 wprowadza temat ponownego wykorzystania wody. Ustawa nie określa dopuszczalnych zastosowań oczyszczonych ścieków. Jednak § 128 stanowi, że produkcja wody odzyskanej odnosi się do oczyszczania ścieków, wody kopalnianej, wody z kamieniołomów, wody chłodzącej lub wody z akwakultury w celu przekazania jej stronie trzeciej.



FRANCJA

We Francji kwestia odzyskiwanych ścieków została uregulowana w [kodeksie środowiskowym](#). W porównaniu z przepisami UE, przepisy francuskie są podobne pod względem zastosowań, klasyfikacji i wymogów dotyczących monitorowania wody odzyskanej.



GREECE

Na mocy [wspólnej decyzji ministerialnej](#) ustanowiono środki, warunki i procedury dotyczące ponownego wykorzystania oczyszczonych ścieków. Celem dokumentu jest promowanie ponownego wykorzystania takich ścieków i ochrona zasobów wodnych, przeciwdziałanie skutkom niedoborów wody i suszy w regionie Morza Śródziemnego, a także negatywnym skutkom zmian klimatu, nadmiernej eksploatacji zasobów wodnych i zasolenia wód gruntowych.

Zgodnie z art. 4 ponowne wykorzystanie przewiduje przede wszystkim użycie do nawadniania, które dzieli się na dwa rodzaje: ograniczone i nieograniczone, w zależności od wykorzystania wody odzyskanej, tego, czy uprawy są spożywane na surowo, oraz sposobu ich nawadniania. Artykuł 6 reguluje potencjalne wykorzystanie wody odzyskanej na obszarach miejskich i podmiejskich, w tym do nawadniania terenów zielonych, terenów rekreacyjnych, lasów, cmentarzy, skarp przydrożnych, parków publicznych, ogrodów, terenów wokół hoteli, do gaszenia pożarów, czyszczenia ulic i chodników, fontann ozdobnych, tworzenia i utrzymania jezior i terenów podmokłych oraz do wzmacniania przepływu wód powierzchniowych. Wyraźnie wyklucza się wykorzystanie do picia, kąpeli i czynności domowych. Artykuł 7 dotyczy wykorzystania oczyszczonych ścieków w przemyśle.



HISZPANIA

Hiszpania ma bogate doświadczenie w zakresie ponownego wykorzystania wody, głównie w rolnictwie. W odpowiedzi na potrzebę ustanowienia ram prawnych dotyczących ponownego wykorzystania wody oraz wdrożenia rozporządzenia UE 2020/741, przyjęła [dekret królewski 1085/2024](#) z dnia 22 października 2024 r. Dekret ten zmienia różne inne dekrety królewskie regulujące gospodarkę wodną. Jego głównymi celami są: zapewnienie bezpieczeństwa wody odzyskanej do zamierzonych zastosowań, ochrona zdrowia ludzi, zwierząt i środowiska, promowanie gospodarki o obiegu zamkniętym i adaptacji do zmian klimatu oraz zapewnienie zrównoważonego gospodarowania wodą i ochrony zasobów wodnych poprzez przeciwdziałanie niedoborom i nacisku na ekosystemy wodne. Dekret wykracza daleko poza zastosowania rolnicze, ale zakazuje niektórych kierunków wykorzystania, takich jak bezpośrednie spożycie przez ludzi, przemysł spożywczy, szpitale i placówki medyczne, akwakultura w hodowli mięczaków filtrujących oraz wykorzystanie rekreacyjne w basenach.



PORTUGALIA

Portugalskie [prawo dotyczące zasobów wodnych](#) ustanawia ramy zrównoważonego gospodarowania zasobami wodnymi. Jednym z jego przejawów jest art. 44 ust. 3, który stanowi, że pobór publicznych zasobów wodnych, zwłaszcza do nawadniania ogrodów, przestrzeni publicznych i pól golfowych, powinien być w miarę możliwości uzupełniany alternatywnymi źródłami wody, np. wodą odzyskaną lub wodą deszczową. Aby jeszcze bardziej promować ponowne wykorzystanie wody, art. 60 ustanawia ogólną zasadę, zgodnie z którą wydanie zezwolenia na odprowadzanie ścieków jest uzależnione od potwierdzenia, że nie ma dostępnych alternatywnych metod usuwania ścieków, w tym operacji odzyskiwania. Wymóg ten ma na celu zachęcenie do ponownego wykorzystania wody i zminimalizowanie niepotrzebnego odprowadzania ścieków do środowiska.



RUMUNIA

Zgodnie z art. 5 zaktualizowanej [decyzji nr 188](#) z dnia 28 lutego 2002 r. w sprawie zatwierdzenia norm dotyczących warunków odprowadzania ścieków do środowiska wodnego Rumunia, ze względu na swoje położenie geograficzne w dorzeczu Dunaju i na wybrzeżu Morza Czarnego, a także konieczność ochrony tych obszarów, uznaje całe swoje terytorium krajowe za obszar wrażliwy. Artykuł 6 stanowi, że oczyszczone ścieki mogą być ponownie wykorzystywane, pod warunkiem uzyskania zgody właściwych organów, w zależności od ich pochodzenia i przewidywanego zastosowania.



SZWECJA

[Szwedzkie rozporządzenie \(2024:161\)](#) dotyczy wykorzystania wody odzyskanej do nawadniania upraw rolnych. Stanowi ono uzupełnienie rozporządzenia UE 2020/741. Woda odzyskana może być wykorzystywana do nawadniania upraw rolnych, a użytkownik końcowy jest odpowiedzialny za zapewnienie zgodności z wymaganymi normami jakości wody. Szwedzka Agencja Ochrony Środowiska może wydać dodatkowe przepisy określające niezbędne środki bezpieczeństwa dla takiego wykorzystania. Przed podjęciem takich działań Agencja musi skonsultować się ze Szwedzką Agencją ds. Żywności i Szwedzką Radą Rolnictwa.



WĘGRY

Na Węgrzech [zmieniona ustawa rządowa nr 50/2001 \(IV.3.\)](#) określa zasady wykorzystania i gospodarowania ściekami oraz osadami ściekowymi w rolnictwie. Jej celem jest między innymi wdrożenie rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady UE 2020/741 oraz uregulowanie wykorzystania niektórych rodzajów ścieków przy jednoczesnym uniknięciu szkodliwego wpływu na środowisko, zdrowie ludzi i zwierząt. Prawo zezwala na wykorzystanie oczyszczonych ścieków w rolnictwie, w szczególności do nawadniania upraw przemysłowych, energetycznych i nasiennych. §4 wyjaśnia, że ścieki takie nie mogą być wykorzystywane do upraw przeznaczonych do spożycia przez ludzi lub jako pasza dla zwierząt.

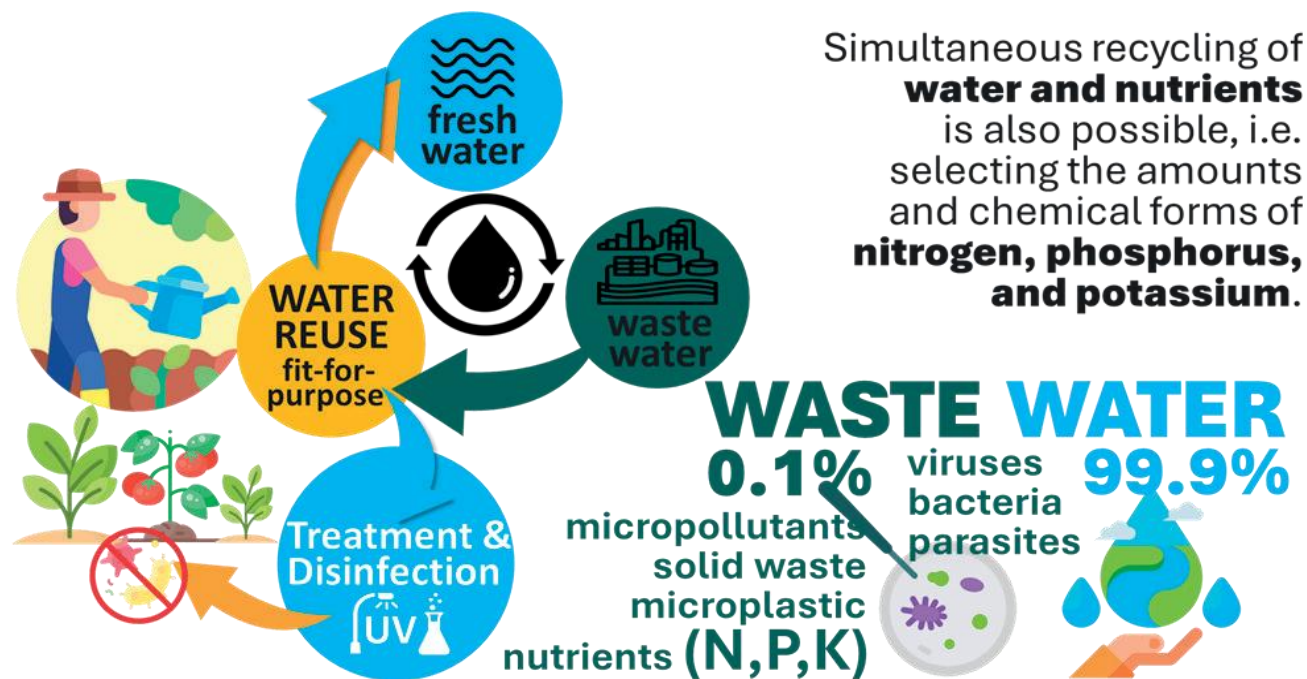


WŁOCHY

We Włoszech ponowne wykorzystanie wody reguluje rozporządzenie określające normy techniczne dotyczące ponownego wykorzystania ścieków w celu wykonania art. 26 ust. 2 [dekretu ustawodawczego nr 152 z dnia 11 maja](#). Rozporządzenie ustanawia normy techniczne dotyczące ponownego wykorzystania ścieków bytowych, komunalnych i przemysłowych. Dozwolone zastosowania wody odzyskanej obejmują nawadnianie upraw, terenów zielonych, terenów rekreacyjnych i sportowych, a także zastosowania w przemyśle i miastach: czyszczenie ulic, systemy grzewcze, systemy chłodzenia i spłukiwanie toalet, woda gaśnicza, woda procesowa, woda do czyszczenia. Zabrania się stosowania wody w kontakcie z żywnością, farmaceutykami i kosmetykami.

4.1 Wprowadzenie do pilotaży

Odzyskiwanie wody ze ścieków stanowi duże wyzwanie, choć na pierwszy rzut oka wydaje się być bardzo łatwe. Ścieki komunalne składają się z wody w ponad 99% objętości (rys. 3), więc w celu oczyszczenia wystarczy usunąć mniej niż jeden procent składu. Jest to jednak bardzo wymagający proces. Chcemy, aby odzyskiwana woda pozostała bogata w składniki odżywcze, ale wolna od zanieczyszczeń, takich jak metale ciężkie, mikroplastiki, farmaceutyki i mikroorganizmy chorobotwórcze.



Rysunek 3. Wyzwania związane z odzyskiwaniem i ponownym wykorzystaniem wody

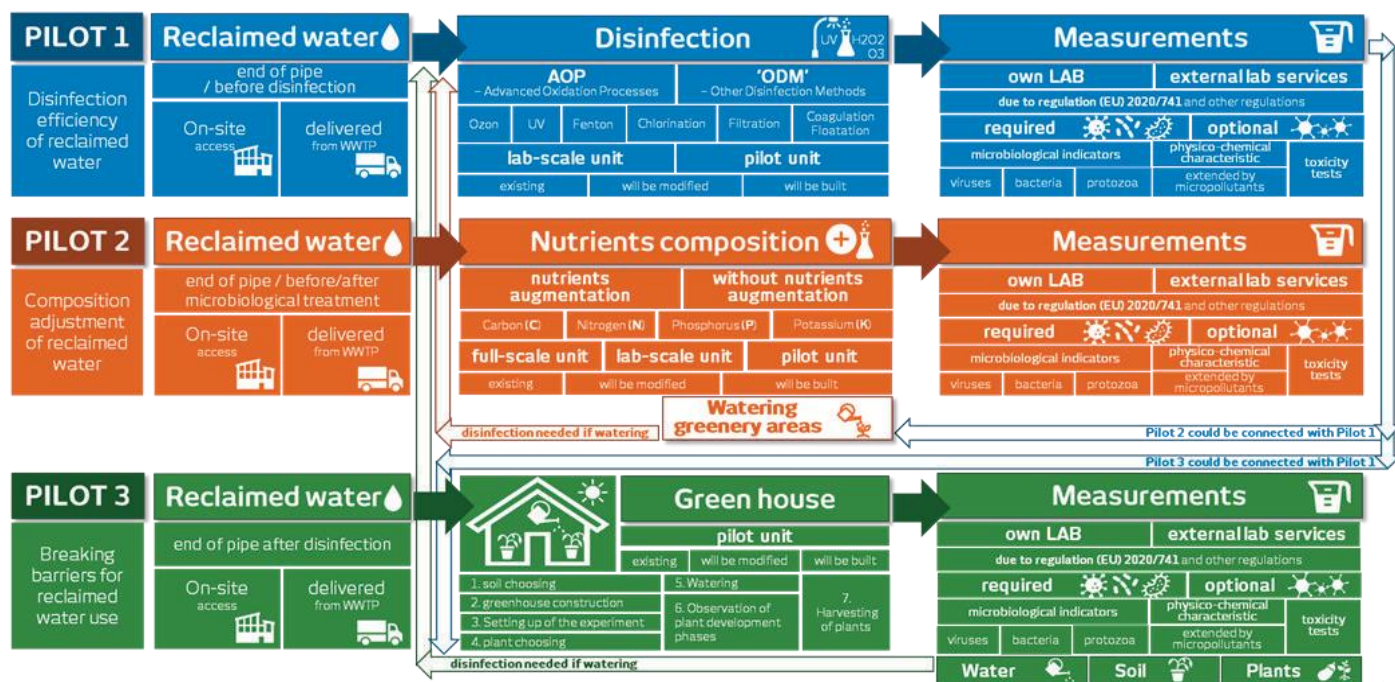
W naszym projekcie postanowiliśmy przedstawić tę kwestię czterem grupom docelowym:

- dostawcom infrastruktury i usług publicznych, głównie operatorom miejskich oczyszczalni ścieków,
- lokalnym władzom publicznym (gminom),
- małym i średnim przedsiębiorstwom z branży turystycznej (operatorom hotelowym) oraz dostawcom technologii,
- pozostałym organizacjom zainteresowanym podjęciem wyzwania.

Postanowiliśmy skupić się na kilku kwestiach, które przybliżyłyby temat naszym grupom docelowym. Przeprowadziliśmy więc trzy pilotażowe projekty i opracowaliśmy narzędzia wspierające rozwój wiedzy decydentów.

Trzy kwestie, na których skupiły się pilotaże (rys. 4):

- dezynfekcja wody odzyskanej
- nawadnianie obszarów miejskich (trawniki, klomby)
- eksperymentalne uprawy szklarniowe



Rysunek 4. Zakres pilotaży



Pilotaż 1: „Skuteczność dezynfekcji wody odzyskanej” skupiał się na dostosowaniu i ocenie skuteczności etapu dezynfekcji w procesie odzyskiwania wody. Głównym celem było opracowanie opartych na badaniach naukowych zaleceń dotyczących optymalizacji procesów dezynfekcji po zastosowaniu konwencjonalnych systemów oczyszczania ścieków.

Główne stacje pilotażu 1 znajdowały się w następujących lokalizacjach:

- Uniwersytet Nauk Stosowanych w Savonii, Kuopio, Finlandia,
- Oczyszczalnia ścieków Warszawa Południe, Warszawa, Polska.

Metody dezynfekcji zostały również przetestowane w pozostałych pilotażach w Polsce, na Łotwie i w Danii. Operatorzy pilotażowi byli wspierani przez naukowców z Politechniki Warszawskiej i Uniwersytetu Łotewskiego.



Pilotaż 2: „Dostosowanie składu wody odzyskanej” koncentrował się na optymalizacji składu składników odżywczych wody odzyskanej, w szczególności azotu i fosforu, aby spełnić wymagania dotyczące jej zamierzonych zastosowań, takich jak nawadnianie lub kształtowanie krajobrazu (np. parki i zieleń miejska).

Lokalizacje, w których prowadzony był pilotaż 2:

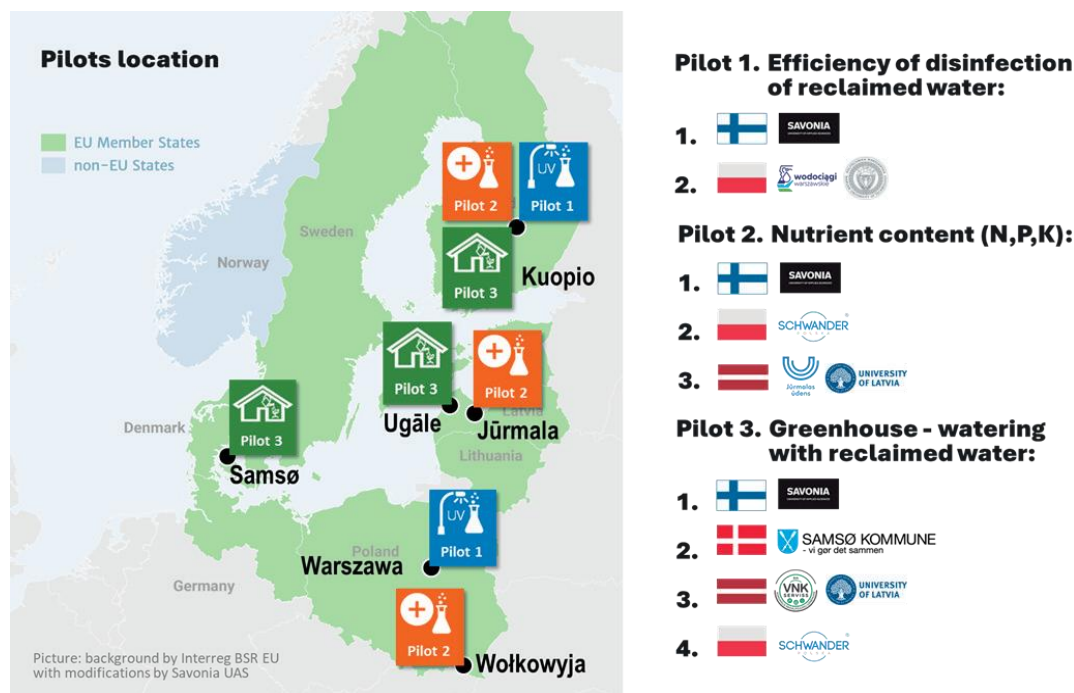
- Wołkowyja (Polska), stacja pilotażowa prowadzona przez Schwander Polska Ltd,
- Jūrmala Water Utility, Łotwa, przy wsparciu Uniwersytetu Łotewskiego.

Ponadto właściwości nawozowe wody odzyskanej zostały przeanalizowane na Uniwersytecie Nauk Stosowanych w Savonii, Kuopio oraz na Politechnice Warszawskiej.



Pilotaż 3: „Przełamanie barier w wykorzystaniu wody odzyskanej” miał na celu opracowanie praktycznych zastosowań w celu wyeliminowania barier w wykorzystaniu wody odzyskanej. Celem było wykazanie, że woda odzyskana może być bezpiecznie wykorzystywana do nawadniania i jako źródło składników odżywczych bez konieczności ponoszenia znacznych nakładów inwestycyjnych w istniejącą infrastrukturę oczyszczania ścieków.

W ramach projektu pilotażowego przeprowadzono próby uprawy różnych roślin w szklarniach przy użyciu wody odzyskanej ze ścieków. Podejście to jest szczególnie istotne w regionach, gdzie woda odzyskana nie jest jeszcze powszechnie akceptowana lub gdzie czynniki zewnętrzne, takie jak niedobór wody, nie są głównymi czynnikami motywującymi do wdrażania zrównoważonych praktyk wodnych.



Rysunek 5. Wykaz lokalizacji pilotaży

Miejsca, w których umieszczono szklarnie:

- Uniwersytet Nauk Stosowanych w Savonii, Kuopio, Finlandia,
- Oczyszczalnia ścieków Samsø, Dania,
- Oczyszczalnia ścieków Ugāle obsługiwana przez VNK Serviss, Łotwa,
- Oczyszczalnia ścieków w Wołkowie, Polska.

W związku z tym w pilotażowych projektach wykorzystano ścieki pochodzące z różnych oczyszczalni (tab. 2).

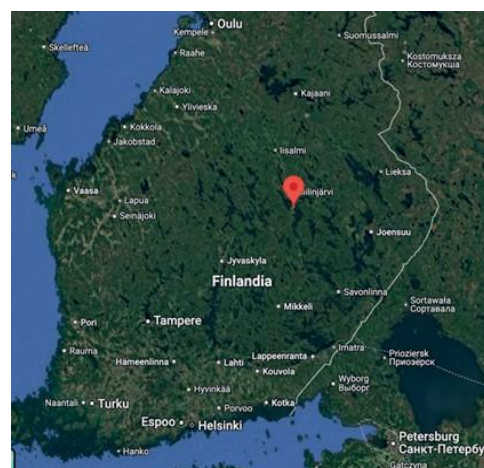
Tabela 2. Podstawowe parametry oczyszczalni ścieków wykorzystanych w projekcie

Nazwa oczyszczalni		Finlandia	Finlandia	Polska	Polska	Łotwa	Łotwa	Dania
		Kuopio	Tahko	Warszawa	Wołkowyja	Jūrmala	Ugāle	Samsø
Parametr	Jednostka	Pilot 1,2,3	Pilot 1,2	Pilot 1	Pilot 2,3	Pilot 2	Pilot 3	Pilot 3
Równoważnik ludności	[RLM]	90 000	3 800	580 000	6 133	35 400	1 035	8 624
Objętość oczyszczanej wody:								
roczna	[m ³ /rok]	6 600 000	400 000	24 378 204	300 000	2 700 000	99 623	426 942
miesięczna	[m ³ /msc]	550 000	33 333	2 031 517	25 000	225 000	9 057	35 579
średni dzienny przepływ	[m ³ /d]	18 333	1 111	66 607	1 000	7 500	317	1 170
maks. dzienny przepływ	[m ³ /d]	40 000	2 500	94 034			940	1 645
Źródła oczyszczonych ścieków:								
bytowe	[%]	70	70	80,4	100	80	30	65
inne niż bytowe	[%]	10	0	0	0	0	0	0
opadowe	[%]	20	30	19,6	0	20	70	35

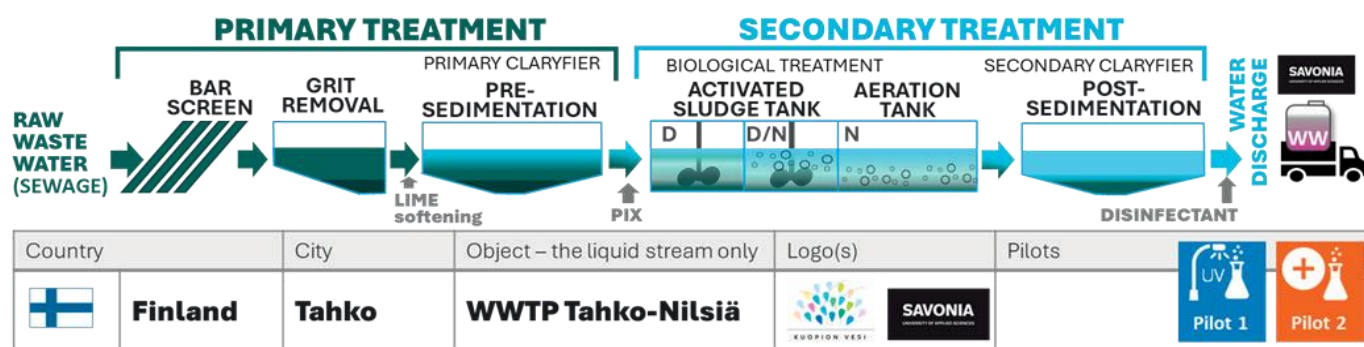
4.2 Projekty pilotażowe

4.2.1 Kuopio

 **Oczyszczalnia ścieków Tahko-Nilsii** znajduje się w środkowej Finlandii, w regionie Północnej Savonii. Jej wydajność wynosi 3800 RLM, przetwarza 400 000 m³ rocznie, przy średnim dziennym przepływie ścieków wynoszącym 900 m³ i maksymalnym 2500 m³/dobę. Oczyszcza 70% ścieków bytowych i 30% ścieków powierzchniowych, ale nie oczyszcza ścieków przemysłowych. Obszar obsługiwany przez oczyszczalnię ścieków jest przeznaczony do celów turystycznych, gdzie uprawia się sport o każdej porze roku. Technologia obejmuje oczyszczanie wstępne na sitach, usuwanie piasku z osadem, a następnie oczyszczanie biologiczne (denitryfikacja, naprzemienne napowietrzanie i nitryfikacja) oraz sedimentację w osadniku wtórnym. Przed odprowadzeniem oczyszczonych ścieków do jeziora są one dezynfekowane. Rys. 7 przedstawia schemat technologiczny.

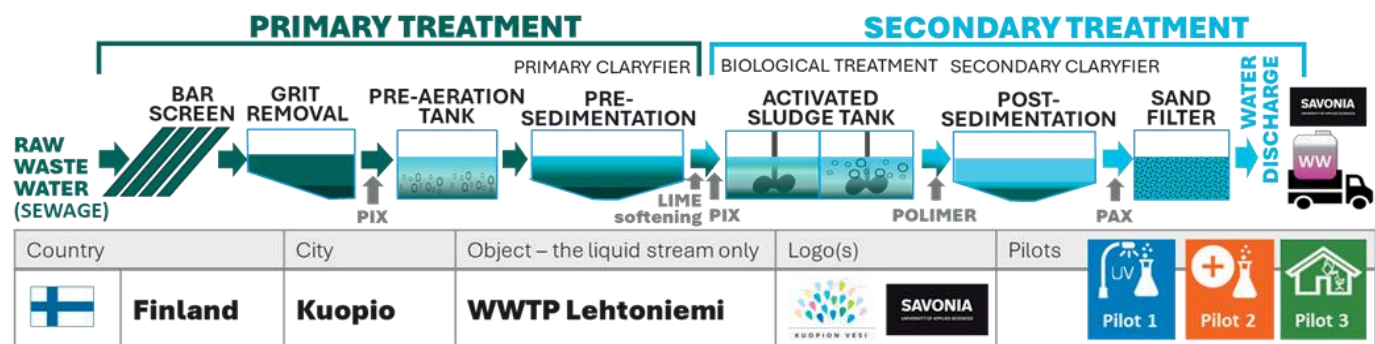


Rysunek 6. Lokalizacja Kuopio w Finlandii



Rysunek 7. Technologia oczyszczalni ścieków Tahko-Nilsii

 **Oczyszczalnia ścieków Kuopio-Lehtoniemi** również znajduje się w środkowej Finlandii, w regionie Północnej Savonii. Jej wydajność wynosi 90 000 RLM. Ilość oczyszczanych ścieków wynosi 6,6 mln m³/rok, 550 000 m³/miesiąc, średni dzienny przepływ wynosi 18 000 m³/dobę, a maksymalny dzienny przepływ wynosi 40 000 m³/dobę. Źródła oczyszczanych ścieków to w 70% ścieki bytowe, w 10% ścieki przemysłowe i w 20% spływy powierzchniowe. Obszar obsługiwany przez oczyszczalnię zamieszkuje ponad 120 tysięcy osób. Miasto oferuje turystom i mieszkańcom połączenie surowej przyrody, wód jeziornych i aktywnego wypoczynku, niezależnie od pogody. Procesy w oczyszczalni ścieków obejmują oczyszczanie mechaniczne, biologiczne i chemiczne, a także zarządzanie osadem. Aktywność mikroorganizmów biologicznych i odpowiednie dodatki chemiczne usuwają substancje organiczne, azot i fosfor ze ścieków, dzięki czemu woda na wylocie rury odpływowej jest ponownie czysta i może powrócić do naturalnego obiegu. Oczyszczone ścieki są gromadzone przez kilka dni w oczyszczalni w jednym ogromnym zbiorniku, zanim zostaną odprowadzone do jeziora. Rys. 8 przedstawia schemat technologiczny.



Rysunek 8. Technologia oczyszczalni ścieków Tahko-Nilsii



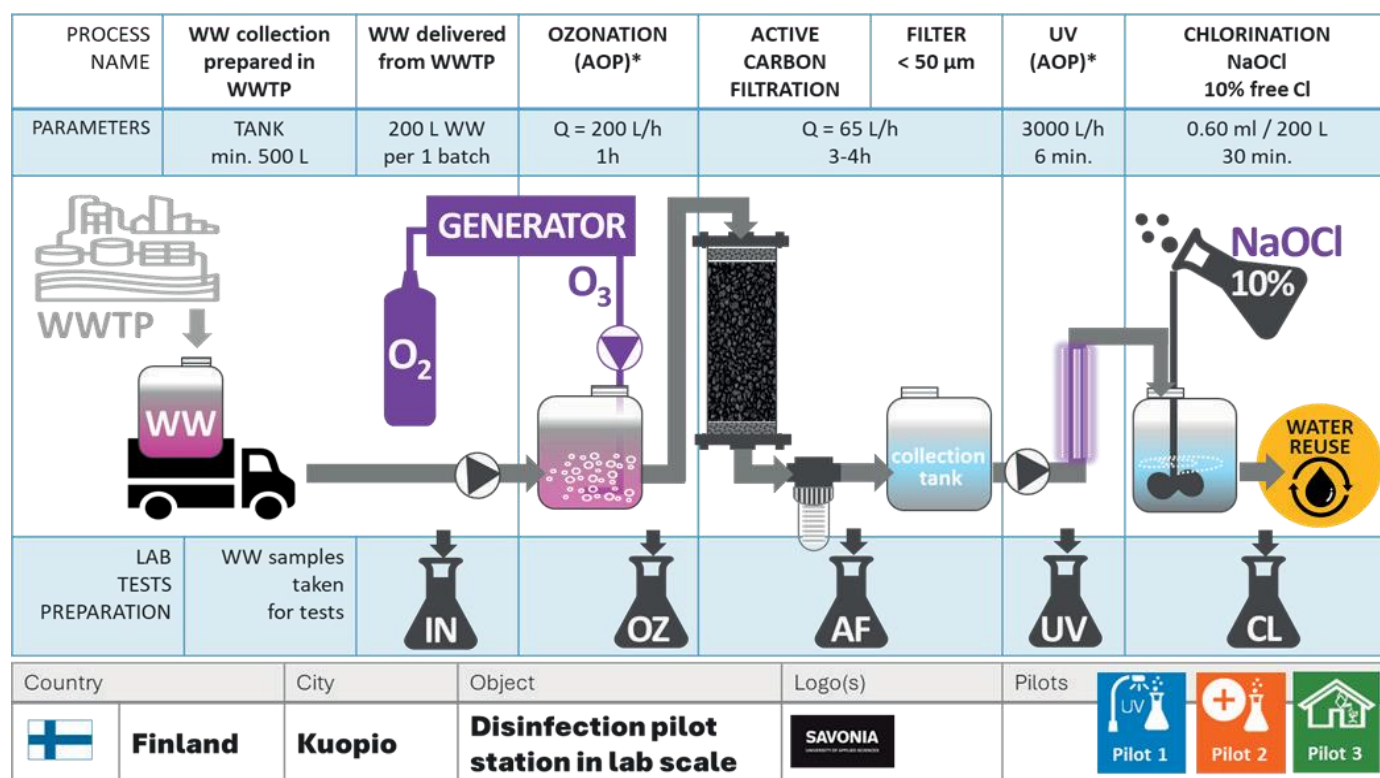
Pilotażowa stacja AOP w skali laboratoryjnej znajduje się w Uniwersytecie Nauk Stosowanych w Savonii.

Oczyszczone ścieki do celów pilotażowych zostały przetransportowane z oczyszczalni ścieków Kuopio-Lehtoniemi lub Tahko-Nilsä w ilości około 500 litrów w celu przygotowania partii poprzez przepuszczenie ich przez stację pilotażową z zaawansowanymi procesami utleniania. Stacja pilotażowa zużywała 200 litrów ścieków w jednej partii. Stacja jest przystosowana wyłącznie do przeprowadzania oczyszczania w partiach w skali laboratoryjnej – aby można było ją wykorzystać w oczyszczalni ścieków do pracy ciągłej, konieczne byłoby zwiększenie jej skali i wprowadzenie modyfikacji.

Rysunek 9 przedstawia proces odzyskiwania wody:

- IN – wlot (ang. inlet). Jest to punkt, w którym ścieki z oczyszczalni są dostarczane bez magazynowania bezpośrednio do badania.
- OZ – ozonowanie,
- AF – sorpcja na węglu aktywnym + filtracja na filtrze strunowym (<50 µm),
- UV – dezynfekcja lampą UV,
- CL – chlorowanie dawką 10% NaOCl.

Ta stacja demonstruje kompleksowy proces uzdatniania wody, łączący zaawansowane utlenianie, adsorpcję, promieniowanie UV i chlorowanie. Zapewnia ona kontrolowane środowisko laboratoryjne w celu optymalizacji parametrów uzdatniania i oceny wydajności systemu. W przyszłości można dodatkowo dostosować system do ciągłej pracy w pełnowymiarowych oczyszczalniach ścieków.



Rysunek 9. Pilotażowa stacja AOP w skali laboratoryjnej umieszczona w Uniwersytecie Nauk Stosowanych w Savonii

Próbki wody do badań pobierano po każdym etapie procesu. Ścieki z oczyszczalni Tahko-Nilsä były oczyszczane partiami od początku 2024 r. do maja 2024 r. z częstotliwością raz w miesiącu (tygodnie: 3, 7, 11, 12, 15, 20) oraz jesienią i zimą 2024 r. (tydzień 44). Ścieki z oczyszczalni ścieków Kuopio-Lehtoniemi były oczyszczane latem z częstotliwością raz w tygodniu (tygodnie: 23-39), ze względu na powiązanie z nawadnianiem upraw szklarniowych w pilotażu 3.

4.2.2 Warszawa

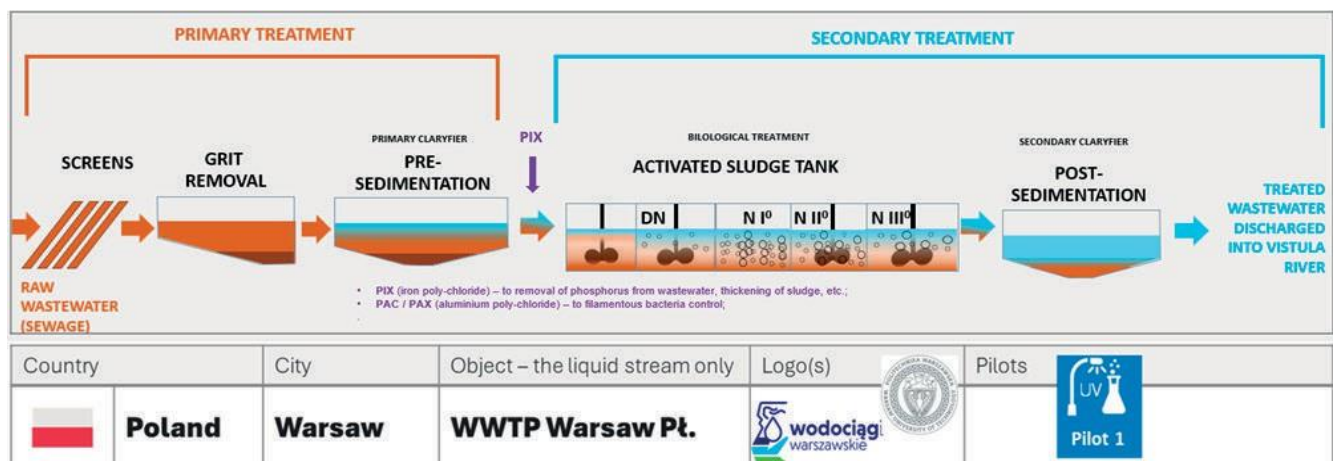


Oczyszczalnia ścieków Południe jest jedną z czterech oczyszczalni ścieków obsługiwanych przez Warszawskie Przedsiębiorstwo Wodociągów i Kanalizacji SA. Znajduje się w południowej części Warszawy.

Oczyszczalnia ścieków Południe została zaprojektowana dla 580 000 RLM. W 2024 r. oczyszczono w niej ponad 24 000 000 m³ ścieków, przy średnim dziennym przepływie 67 000 m³, a maksymalnym 94 000 m³/dobę. 81% napływającej ilości stanowią ścieki bytowe, a około 19% to wody opadowe. Procesy technologiczne obejmują procesy mechaniczne i biologiczne ze zwiększonym usuwaniem składników odżywczych. Oczyszczanie wstępne opiera się na sitach czyszczących, usuwaniu piasku i sedymentacji w osadnikach wstępnych. Następnie ścieki kierowane są do dwóch linii biologicznych. Każda linia składa się z reaktora promieniowego i dwóch osadników wtórnych. Reaktor promieniowy jest podzielony na pięć kolejnych stref o różnych warunkach tlenowych. Są to odpowiednio strefa beztlenowa, strefa anoksydacyjna i trzy strefy tlenowe o różnych stężeniach tlenu. Po przejściu przez reaktor ścieki kierowane są do osadników wtórnych, gdzie szlam oddzielany jest od osadu czynnego. Następnie oczyszczone ścieki odprowadzane są do Wisły. Schemat technologiczny przedstawiono na rys. 11.



Rysunek 10. Lokalizacja oczyszczalni Południe w Warszawie



Rysunek 11. Technologia oczyszczalni ścieków Południe



Pilotażowa stacja wagi półtechnicznej AOP znajduje się w oczyszczalni ścieków Południe.

Stacja składa się z dwóch modułów. Pierwszy moduł służy do usuwania zawieszin i innych zanieczyszczeń ze ścieków przed skierowaniem ich do drugiego modułu. DW drugim module następuje zaawansowany proces utleniania stosowany do pełnej dezynfekcji ścieków i usuwania mikrozanieczyszczeń, w tym antybiotyków, hormonów, pestycydów itp. Proces ozonowania był testowany przy różnych czasach retencji i zmiennych dawkach ozonu. Docelowa stacja pilotażowa o wydajności 5 m³/h, zlokalizowana w oczyszczalni ścieków Południe, składa się z kolejnych procesów wymiany jonowej i dezynfekcji poprzez ozonowanie.

Prace badawcze przeprowadzone w latach 2024-2025 podzielono na dwa etapy. Głównym celem pierwszego etapu było wybranie skutecznego procesu usuwania tzw. pozostałych zanieczyszczeń ze ścieków, w tym całkowitej zawartości zawieszin. Założono, że ścieki po module I będą charakteryzowały się mętnością poniżej 1,0 NTU. Do testów przyjęto dwie technologie (rys. 12). Pierwsza technologia opiera się na procesie filtracji na filtrach tkaninowych. Druga technologia opiera się na procesie wymiany jonowej. Pierwsza faza została zakończona w listopadzie 2024 r. Jako najskuteczniejszy proces wybrano proces wymiany jonowej, pozwalający na osiągnięcie zakładanych wyników, tj. mętności poniżej 1,0 NTU. Druga faza badań polegała na doborze odpowiednich parametrów procesu ozonowania ścieków po procesie wymiany jonowej. Przetestowano różne czasy retencji i równe dawki ozonu. Przez cały okres badań instalacja pilotażowa działała przy ciągłym dopływie ścieków z oczyszczalni ścieków Południe.

Próbki ścieków i wody do badań pobierano przed i po każdym etapie procesu. W pierwszej fazie średnie próbki dzienne pobierano raz w tygodniu. W drugiej fazie częstotliwość pobierania próbek do analizy laboratoryjnej zwiększono do dwóch razy w tygodniu.

Na tej stacji można było zaobserwować kompleksowy proces uzdatniania wody, łączący zaawansowane utlenianie i wymianę jonową. Pilotażowa stacja działa w rzeczywistych warunkach oczyszczalni ścieków, przy ciągłym dopływie ścieków o wydajności od 3 do 5 m³/h. Stacja ma budowę modułową, co pozwala na przyszłe modyfikacje w celu przetestowania innych procesów wykorzystywanych do odzyskiwania wody ze ścieków, w tym sorpcji na węglu aktywnym lub dezynfekcji lampami UV lub poprzez dozowanie odczynników chemicznych.



Rysunek 12. Pilotażowa stacja wagi półtechnicznej umieszczona w oczyszczalni Południe

4.2.3 Wołkowyja



Oczyszczalnia ścieków w Wołkowyi jest jedną z czterech miejskich oczyszczalni ścieków działających w gminie Solina. Ich wydajność jest następująca:

- Oczyszczalnia Berezka – 1 800 m³/dobę (17 500 RLM), rok budowy: 2020,
- Oczyszczalnia Wołkowyja – 1000 m³/dobę (6133 RLM), rok budowy: 2023,
- Oczyszczalnia Solina poniżej zapory – 800 m³/dobę (6000 RLM), rok budowy: 2016,
- Oczyszczalnia Zawóz – 150 m³/dobę (1000 RLM), rok budowy: 2020.

W najbliższej przyszłości planowana jest modernizacja dwóch oczyszczalni ścieków: w Solinie poniżej zapory oraz w Zawozie. Proces projektowania modernizacji oczyszczalni ścieków w Solinie został już zakończony, natomiast prace projektowe dotyczące obiektu w Zawozie są na końcowym etapie.

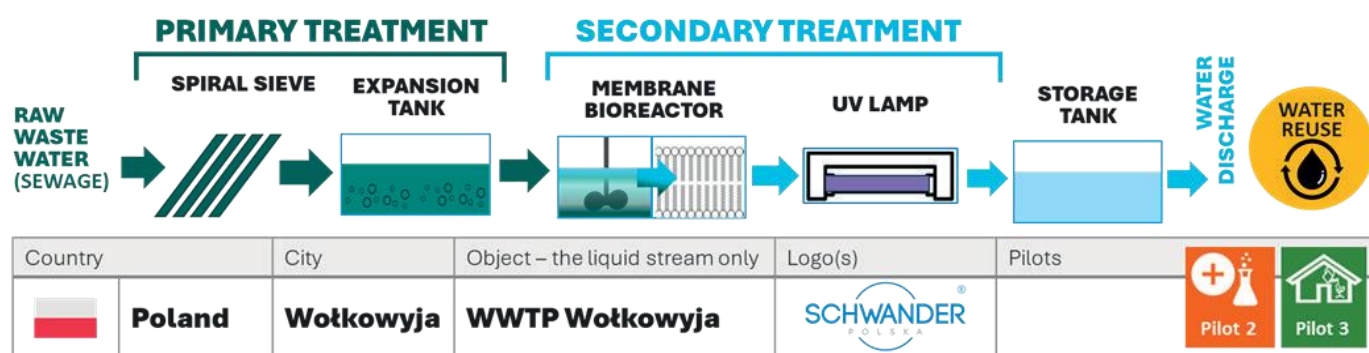


Rysunek 13. Lokalizacja Wołkowyi

Gmina Solina, położona w południowo-wschodniej Polsce, liczy obecnie około 5200 mieszkańców. Ze względu na jej turystyczny charakter i znaczny napływ odwiedzających w sezonie letnim i szczycie turystycznym, lokalne oczyszczalnie ścieków muszą być przygotowane na znacznie większe obciążenia. W okresach szczytowych ilość ścieków może być nawet dziesięciokrotnie większa niż podczas standardowego użytkowania przez mieszkańców, co wymaga odpowiedniej wydajności i sprawności systemu oczyszczania ścieków.

Zapewnienie wydajnej i skutecznej infrastruktury sanitarnej ma kluczowe znaczenie dla ochrony środowiska oraz komfortu zarówno stałych mieszkańców, jak i turystów odwiedzających gminę. Planowana modernizacja i rozbudowa infrastruktury wodociągowej i kanalizacyjnej ma na celu dostosowanie oczyszczalni ścieków do dynamicznych zmian związanych z rozwojem turystyki w regionie.

Oczyszczalnie ścieków w Berezce i Wołkowcy oparte są na technologii MBR (ang. *Membrane Biological Reactor*) (rys. 14). Oczyszczalnie ścieków w Solinie poniżej zapory i Zawozie również zostały zaprojektowane z wykorzystaniem tego rozwiązania. Gmina Solina wybrała technologię MBR ze względu na jej wysoką elastyczność i wydajność w zakresie oczyszczania ścieków, co ma kluczowe znaczenie w tej gminie, ponieważ sezonowa zmienność obciążenia systemu kanalizacyjnego jest niezwykle wysoka. Dzięki zastosowaniu bioreaktorów membranowych i lamp UV możliwe jest osiągnięcie wysokiego poziomu redukcji zanieczyszczeń organicznych i całkowitej dezynfekcji oczyszczonych ścieków, co ma bezpośredni wpływ na środowisko naturalne.



Rysunek 14. Technologia oczyszczalni ścieków w Wołkowcy



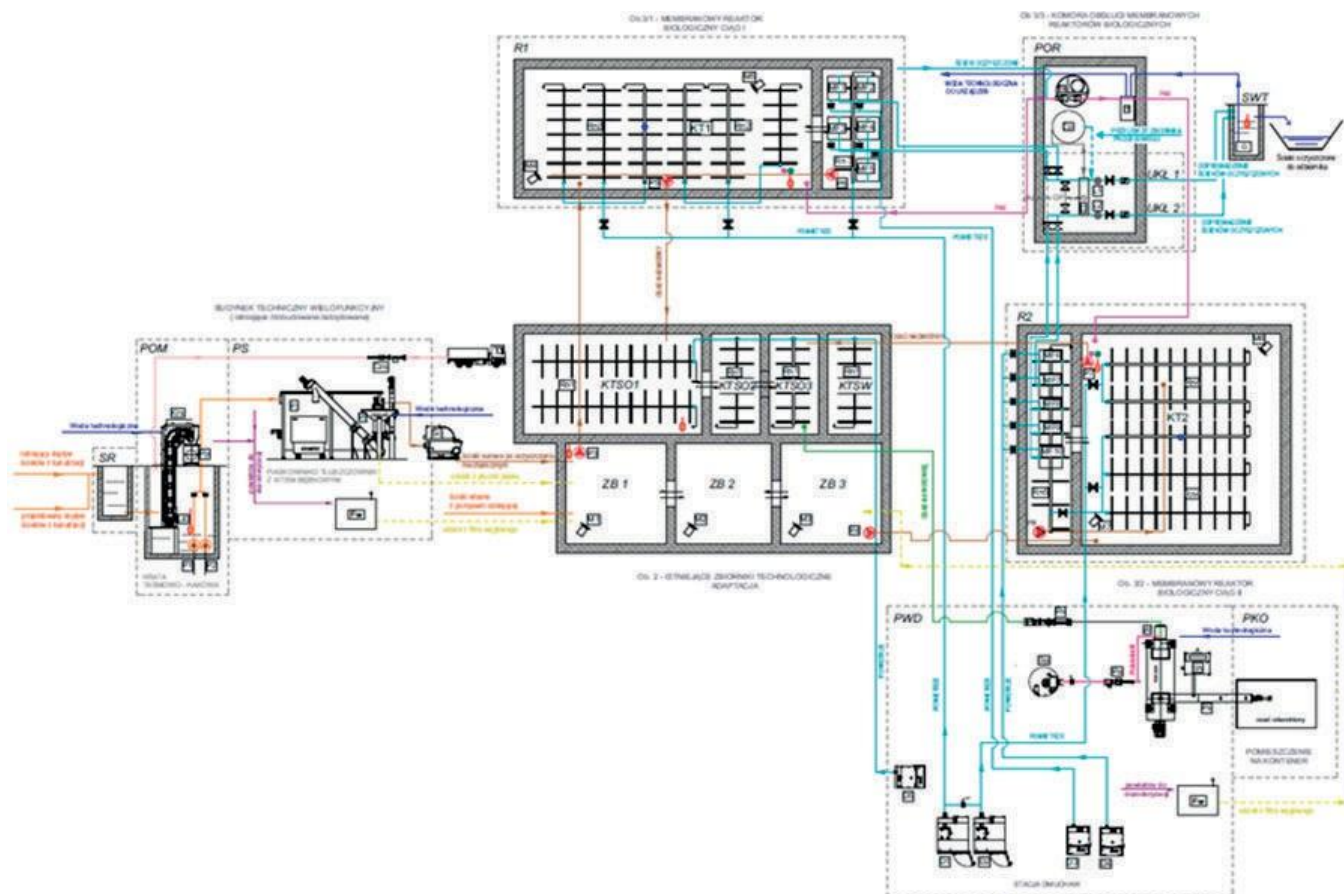
Zalety i specyfikacja technologii MBR

Technologia MBR stanowi połączenie systemu MBR z przepływem grawitacyjnym oraz procesu dezynfekcji lampą UV i jest stosowana do oczyszczania ścieków oraz recyklingu wody ze ścieków. Odzyskana woda może być ponownie wykorzystana między innymi do:

- » do celów rolniczych, do nawadniania upraw,
- » do zastosowań rekreacyjnych, takich jak naśnieżanie stoków narciarskich, nawadnianie terenów zielonych i obiektów rekreacyjnych, takich jak pola golfowe, stadiony sportowe, parki, stawy,
- » do użytku w gospodarstwach rolnych jako woda do celów domowych, z wyjątkiem picia i higieny osobistej,
- » do zastosowań miejskich, czyszczenia ulic i placów, nawadniania terenów zielonych i roślin ozdobnych.

Jakość oczyszczonych ścieków jest zgodna z wymogami rozporządzenia UE 2020/741 i prawa polskiego. Zastosowana technologia MBR pozwala uzyskać jakość oczyszczonych ścieków zgodną z klasą „A” jakości wody odzyskanej.

Dzięki autorskim rozwiązaniom technologicznym technologia MBR charakteryzuje się wysoką elastycznością i odpornością na sezonowe wahania obciążenia związane z ilością napływających ścieków i ruchem samochodów asenizacyjnych, wynikające np. z turystycznego charakteru regionu. W oparciu o autorski algorytm procesowy i specyficzną konfigurację urządzeń procesowych zapewniono stabilną pracę oczyszczalni ścieków w zakresie od 10% (poza sezonem) do 100% obciążenia (sezon turystyczny) oraz płynne przejście między trybami pracy. W przypadku rozwiązań konwencjonalnych taka elastyczność jest trudna do osiągnięcia. Hermetyzacja i izolacja termiczna reaktorów zapewniają ich stabilną i bezawaryjną pracę. Średnia roczna temperatura osadu czynnego w zbiornikach procesowych jest utrzymywana w zakresie 12-16°C, co gwarantuje stabilność procesu. Rysunek 15 przedstawia schemat technologiczny oczyszczalni ścieków z technologią MBR. Technologia MBR składa się z dwóch niezależnych linii procesowych, z których każda działa w trybie trójfazowym. Każda linia procesowa obejmuje komorę beztlenową, hipoksyczną, tlenową i oddzielną komorę filtracyjną. Komory beztlenowe i hipoksyczne są wyposażone w mieszadła komorowe i okna przelewowe, które umożliwiają swobodny przepływ mieszaniny ścieków między komorami. Ponadto w strefie nityfikacji znajduje się rezerwa denityfikacyjna, która działa w przypadku niewystarczającej redukcji azotu. W komorze hipoksycznej znajdują się pompy do recyrkulacji osadu czynnego do komory beztlenowej.



Rysunek 15. Schemat technologiczny oczyszczalni ścieków w

W komorach beztlenowych na dnie każdej z nich zainstalowano membranowe dyfuzory drobnoziarniste oraz 2 mieszadła, które zapewniają mieszanie zawartości komory. Wykorzystuje się również recyrkulację wewnętrzną z komór filtracyjnych do komory hipoksyicznej.

Komora filtracyjna

Ostatnim elementem linii technologicznej jest komora filtracyjna, w której woda jest oddzielana od osadu czynnego za pomocą mikrofiltracji membranowej. Nadmiar osadu jest w sposób ciągły odprowadzany do komory nadmiaru osadu, w zależności od wskazań sondy gęstości, a oczyszczone ścieki są kierowane do dezynfekcji lampą UV. Oczyszczone ścieki są odprowadzane do zbiornika poprzez studnię wody procesowej. W komorach filtracyjnych zainstalowano moduły mikrofiltracji grawitacyjnej firmy Alfa Laval o łącznej powierzchni filtrującej 3860 m². Przepływ mieszaniny ścieków i osadu czynnego z komór tlenowych do komór filtracyjnych odbywa się za pomocą przelewu. Oddzielenie oczyszczonych ścieków od osadu czynnego odbywa się za pomocą grawitacyjnych membran mikrofiltracyjnych w wyniku nadciśnienia około 40 mbar, przy czym zbiornik napienia się 1 m powyżej modułu. Tabela 3 przedstawia parametry procesu filtracji membranowej.

Tabela 3. Parametry procesu filtracji membranowej MBR

Parametr	Jednostka	Wartość
Cykl filtracji	min	12
Czas filtracji	min	9
Relaksacja	min	3
Czas filtracji	min/h	45
Całkowita powierzchnia filtra (10 modułów)	m ²	3860

Czyszczenie membran

Stosowane są dwie metody czyszczenia membran. Pierwsza metoda polega na wtłaczaniu powietrza między arkusze membrany, a druga na okresowym płukaniu chemicznym (co 4 miesiące przez 1 godzinę, przy użyciu 15% podchlorynu sodu (NaOCl) w ilości 0,03 kg na metr kwadratowy powierzchni membrany). Ponadto moduł jest wyposażony w system napowietrzania S-Aerator™. W przypadku tradycyjnych

dyfuzorów wielorurowych problemem jest konieczność usuwania zatorów. Czyszczenie i ponowne uruchamianie dyfuzorów jest procesem pracochłonnym i czasochłonnym. Dyfuzor S- Aerator™ ma konstrukcję jednorzędową, która zapobiega tworzeniu się zatorów. Są one usuwane automatycznie wraz ze wzrostem ciśnienia powietrza w systemie. Opisany powyżej system jest opracowaniem i produktem własnym firmy Schwander Polska®.

Automatyzacja pracy zakładu

Wszystkie operacje w oczyszczalni ścieków są zautomatyzowane i nie wymagają stałej konserwacji. W celu optymalizacji procesów nityfikacji i denityfikacji oraz strącania fosforu w czasie rzeczywistym stosowany jest zaawansowany, autorski system sterowania NSS (Schwander Polska® jest właścicielem praw autorskich do oprogramowania oraz podmiotem uprawnionym do licencjonowania i dostarczania wspomnianego oprogramowania na podstawie wieloletniego doświadczenia). System sterowania zapewnia kontrolę procesu i obsługę w zakresie wpływu na proces, wizualizacji, rejestracji, raportowania, archiwizacji i przetwarzania danych. W oczyszczalni ścieków zastosowano mikroprocesorowy system sterowania obiektem PLC. Sygnalizacja z autonomicznych instalacji jest dostępna na panelu i w systemie SCADA. Szafa zasilająca i sterownicza zawiera systemy sterowania i zabezpieczenia napędów, a także sterowniki PLC z niezbędnymi kartami wejść/wyjść i przełącznikiem Ethernet. W fasadzie szafy wbudowany jest 10-calowy kolorowy ekran dotykowy do lokalnego sterowania i wprowadzania parametrów roboczych. Stanowisko komputerowe dyspozytora znajduje się w sterowni i jest podłączone do sterownika PLC umieszczonego w szafie zasilającej i sterującej. Połączenie odbywa się za pośrednictwem magistrali Ethernet.

System sterowania NSS umożliwia optymalizację procesów nityfikacji i denityfikacji oraz strącania fosforu w czasie rzeczywistym. Monitorowane i regulowane są aktualne warunki pracy reaktora, czas napowietrzania oraz czas mieszania w komorze napowietrzającej reaktora biologicznego. Optymalizacja i określenie czasu trwania tych dwóch faz opiera się na pomiarach stężenia azotu amonowego i azotanowego w komorze napowietrzania, przy czym brana jest pod uwagę nie tylko wartość bezwzględna tego stężenia, ale także tendencja i tempo jego zmian. Moduł optymalizacji nityfikacji i denityfikacji posiada również opcję wyboru optymalnej wartości stężenia tlenu rozpuszczonego wymaganej dla każdej linii technologicznej na czas trwania napowietrzania. Operator ma również możliwość ustawienia stałej wartości stężenia tlenu rozpuszczonego. Jeśli z jakiegoś powodu wartości pomiarowe niezbędne do działania modułu optymalizacyjnego nie są dostępne lub walidacja sygnałów pomiarowych wymaganych do jego działania jest zbyt niska, moduł optymalizacyjny automatycznie przechodzi w tryb czuwania, opierając się wyłącznie na wartościach stężenia azotu amonowego lub azotanu, a w ostateczności na ustawieniach czasowych. Moduł optymalizacji chemicznego strącania fosforu działa w oparciu o pomiar obciążenia ortofosforanowego w ściekach z reaktora biologicznego z zamkniętą pętlą (pomiar stężenia ortofosforanów po punkcie dozowania środka strącającego + pomiar przepływu ścieków dostarczanych do poszczególnych komór osadu czynnego). Dozowanie środka strącającego (beztropniowa regulacja wydajności pompy dozującej) jest optymalizowane w czasie rzeczywistym, tak aby dozowana była wymagana ilość, przy jednoczesnym zapewnieniu osiągnięcia wartości docelowej stężenia fosforu w ściekach z zakładu. Ponadto możliwe jest wprowadzenie do systemu minimalnej i maksymalnej wartości dawki środka strącającego (zadanie). Technologia MBR umożliwia jednocześnie procesy nityfikacji i denityfikacji biologicznego oczyszczania ścieków ze zwiększonym usuwaniem składników odżywczych w jednej komorze.

Hermetyczna izolacja termiczna reaktorów biologicznych (polistyren o grubości co najmniej 15 cm) zapewnia stabilną i bezawaryjną pracę reaktorów. W przypadku rozwiązań konwencjonalnych temperatura otoczenia w ziemie ma duży wpływ na procesy nityfikacji i denityfikacji, co jest mocno niekorzystne.

Napływ wody przypadkowej w technologii oczyszczania ścieków MBR ma niewielki wpływ na proces oczyszczania dzięki zastosowaniu autorskiego algorytmu procesowego. Jest to szczególnie ważne w dwóch przypadkach, które są bardzo częste w aglomeracjach kanalizacyjnych. Pierwszy dotyczy nielegalnego przedostawania się wody deszczowej (nielegalne podłączenia rynien dachowych do systemu odprowadzania wody deszczowej itp.), a drugi dotyczy przedostawania się wód gruntowych przez nieszczelności w systemie kanalizacyjnym. Jest to szczególnie ważne w przypadku wysokiego poziomu wód gruntowych. Oba przypadki mogą wystąpić jednocześnie w danej aglomeracji kanalizacyjnej, co pogłębia problem oczyszczania ścieków. Dzięki sterowaniu urządzeniami za pomocą autorskiego algorytmu procesowego problem ten można znacznie złagodzić i podjąć działania operacyjne w czasie rzeczywistym (zarówno w dzień, jak i w nocy). Dzięki takim środkom zmniejsza się ryzyko pogorszenia parametrów oczyszczonych ścieków, a odbiorca ścieków nie jest narażony na nadmiernie wysokie wartości wskaźników zanieczyszczenia w oczyszczonych ściekach.

Przeznaczenie technologii

Matryca: Ścieki komunalne o następujących parametrach:

- Temperatura: 8-22°C
- BOD5: 300-1000 mg/l
- ChZT: 500-1500 mg/l
- Całkowita zawartość substancji zawieszonych: 200-800 mg/l
- Całkowita zawartość azotu: 20-150 mg/l
- Całkowita zawartość fosforu: 5-30 mg/l
- pH: 5-10

Cele technologiczne

Celem technologii MBR jest oczyszczanie ścieków komunalnych do poziomu umożliwiającego ich ponowne wykorzystanie w gospodarce. Jakość ścieków spełnia wymagania dla wody odzyskanej klasy A zgodnie z rozporządzeniem Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2020/741 z dnia 25 maja 2020 r. w sprawie minimalnych wymagań dotyczących ponownego wykorzystania wody.

Warunki techniczne

Moduły membranowe

Technologia MBR wykorzystuje moduły membranowe o następujących parametrach technicznych:

- Zakres pH: 1-11
- Rozmiar membrany: 0,2 µm
- Maksymalna temperatura: 50°C
- Zalecane ciśnienie transmembranowe: 10-40 mbar
- Typowy zakres przepływu: 10–30 l/m² powierzchni filtra na godzinę
- Powierzchnia filtra 1 modułu: 386 m²
- konstrukcja ramy: AISI 316
- membrana PVDF
- grawitacyjne odprowadzanie permeatu
- producent: Alfa Laval Polska Sp. z o.o.
- typ: MFM 260

Dezynfekcja ścieków

Do dezynfekcji oczyszczonych ścieków stosuje się lampy UV o następujących parametrach:

- Przepuszczalność promieniowania UV min. 98 T 1 cm [%]
- Dawka promieniowania UV: 400 J/m²
- Producent: Xylem Water Solutions Polska Sp. z o.o.
- Typ: System UV Spektron 30e
- Moc: 0,38 kW

Technologia MBR umożliwia:

1. Oczyszczanie ścieków komunalnych do następujących poziomów zanieczyszczeń:

- ChZT: $\leq 25 \text{ mgO}_2/\text{l}$
- BZT5: $\leq 5 \text{ mg O}_2/\text{l}$
- Całkowita zawartość zawiesin: $\leq 2 \text{ mg /l}$
- Całkowita zawartość fosforu $\leq 0,5 \text{ mg/l}$
- Całkowita zawartość azotu $\leq 5 \text{ mg/l}$
- Mętność $\leq 2 \text{ NTU}$
- E. coli $\leq 10 \text{ NTU}/100\text{ml}$
- Jaja robaków pasożytniczych $< 1 \text{ jajo/l}$
- Legionella spp. $< 1000 \text{ IU/l}$

2. Usunięcie co najmniej 90% mikrozanieczyszczeń ze ścieków (np. diklofenak, ibuprofen).

Osiągnięcie powyższych efektów oczyszczania ścieków jest możliwe przy następujących wartościach parametrów procesu:

- Przepływ ścieków: $100\text{-}1000 \text{ m}^3/\text{d}$
- Obciążenie reaktora zanieczyszczeniami organicznymi: $0,10 \text{ kg BOD}_5/ 1 \text{ kg SM}$
- HRT: 23 h
- Stężenie osadu w bioreaktorze: $10\text{-}12 \text{ mg/l}$
- Stężenie tlenu rozpuszczonego: $0,3 \text{ mg/l}$

Technologia MBR łączy tradycyjne biologiczne procesy oczyszczania ścieków z zaawansowaną filtracją membranową. W porównaniu z klasycznymi metodami osadu czynnego pozwala ona na:

- Zwiększona skuteczność usuwania zanieczyszczeń organicznych i składników odżywczych (azotu i fosforu),
- Eliminuje potrzebę stosowania dodatkowych osadników wtórnych,
- Wysoka jakość oczyszczonych ścieków, umożliwiającą ich ponowne wykorzystanie, np. do nawadniania terenów zielonych,
- Zmniejszenie powierzchni potrzebnej do działania oczyszczalni, co jest ważne zwłaszcza na terenach górskich i turystycznych.



W ramach badań utworzono trzy poletka, obsiane tą samą rośliną (trawą), różniące się metodą nawadniania:

- Poletko I – nawadnianie oczyszczonymi ściekami (permeatem) z oczyszczalni ścieków, pochodzącymi z sekwencji biologicznej, w której przeprowadzono proces zwiększonego usuwania składników odżywczych (azotu i fosforu),
- Poletko II – nawadnianie wodą z kranu z lokalnej studni kopanej,
- Poletko III – nawadnianie oczyszczonymi ściekami (permeatem) z drugiej linii technologicznej, w której przeprowadzono proces technologiczny polegający wyłącznie na usuwaniu węgla bez usuwania składników odżywczych.

Badania mają na celu ocenę wpływu różnych metod nawadniania na wzrost i rozwój roślin, co może przyczynić się do optymalizacji wykorzystania oczyszczonych ścieków w rolnictwie i rekultywacji terenów zielonych zgodnie z potrzebami.

Część pilotażu przeprowadzono również w miejscowości Stadła (gmina Podegrodzie).

4.2.4 Jūrmala

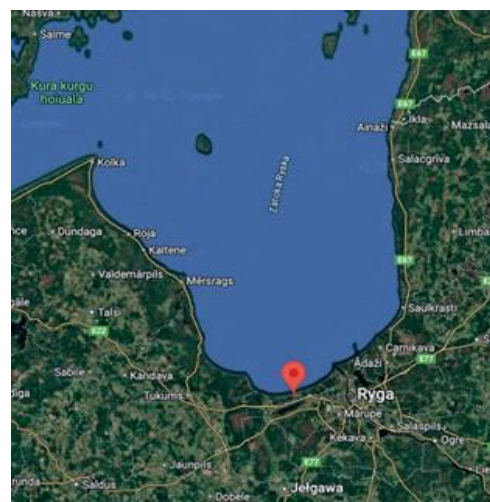


Oczyszczalnia ścieków Jūrmala Water Utility, położona w regionie Sloka, oczyszcza około 70% ścieków (35 400 RLM), a pozostała część jest pompowana do oczyszczalni ścieków Daugavgrīva w Rydze. Ponadto około 90% osadów ze szamb zebranych w Jūrmale jest transportowanych do oczyszczalni ścieków Sloka.

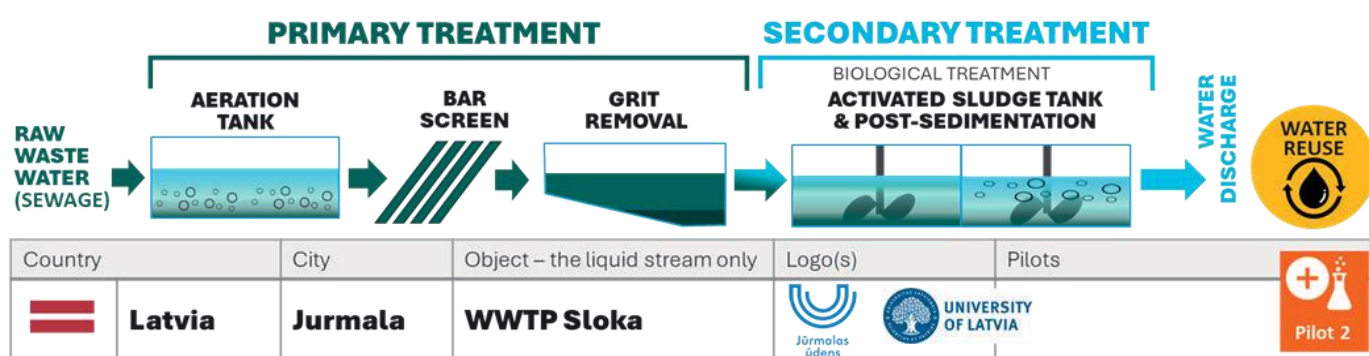
Oczyszczalnia posiada konwencjonalny system oczyszczania wstępnego bez sedymentacji wstępnej, proces osadu czynnego w celu zwiększenia biologicznego usuwania fosforu i azotu oraz oczyszczanie osadu poprzez zagęszczanie mechaniczne i odwadnianie.

Przepływ ścieków dopływających wahał się od 5 300 m³/dobę do 13 500 m³/dobę. Średnia roczna wynosiła 7 450 m³/dobę.

Głównym źródłem ścieków są ścieki komunalne, natomiast ścieki przemysłowe stanowią mniej niż 10% dopływającej wody i pochodzą z placówek medycznych i gastronomicznych.



Rysunek 16. Lokalizacja Jūrmaly



Rysunek 17. Schemat technologiczny oczyszczalni ścieków w Jūrmale

Aby ocenić efektywność wykorzystania wody odzyskanej, utworzono cztery działki trawiaste o powierzchni 1 m² na terenie oczyszczalni ścieków. W sezonie letnim (od kwietnia do września) działki były nawadniane przy użyciu trzech różnych źródeł: nieoczyszczonych ścieków, ścieków oczyszczonych chlorem oraz czystej wody pitnej (rys. 18). Trawę koszono dwa razy w miesiącu, a po wysuszeniu na powietrzu do stałej masy rejestrowano jej masę. Przyrost wysokości obliczano poprzez odjęcie wysokości początkowej (7 cm) od wysokości przed koszeniem. Po wysuszeniu trawy określano jej masę suchą.



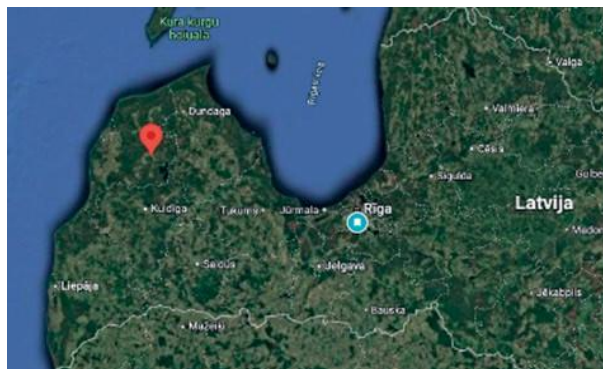
Rysunek 18. Poletka eksperymentalne z trawą

4.2.5 Ugāle



Oczyszczalnia ścieków w miejscowości Ugāle jest jedną z 16 oczyszczalni ścieków obsługiwanych przez VNK Serviss w regionie Venstpils na Łotwie. Oczyszczalnia ta znajduje się 39 km od Ventspils, centrum regionu, i 150 km od Rygi, stolicy Łotwy.

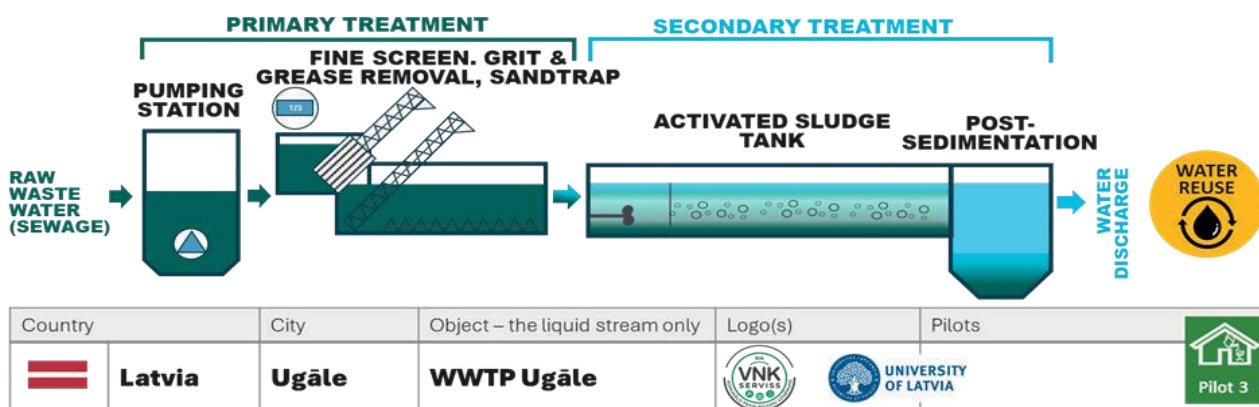
Oczyszczalnia ścieków w miejscowości Ugāle obsługuje 1138 mieszkańców podłączonych do scentralizowanego systemu kanalizacyjnego. Przyjmuje ona również ścieki z indywidualnych systemów kanalizacyjnych 299 mieszkańców, którzy nie są podłączeni do scentralizowanego systemu. Według najnowszych danych, obliczony równoważnik liczby mieszkańców dla oczyszczalni w Ugāle wynosi 1035.



Rysunek 19. Lokalizacja Ugāle

Oczyszczalnia ścieków w miejscowości Ugāle przyjmuje zasadniczo mieszaną ścieków bytowych i opadowych w skali roku, przy średnim stosunku 30:70. W miejscowości Ugāle nie ma zakładów przemysłowych powodujących zanieczyszczenia. Wydajność hydrauliczna wynosi 300 m³/dobę. Ilość ścieków zmienia się w zależności od pory roku i osiąga szczytową wartość 940 m³/dobę w okresie deszczowym w 2024 r. W 2024 r. oczyszczalnia ścieków w Ugāle przetwarzała średnio 317,31 m³ ścieków dziennie, co stanowi 9 056,69 m³ ścieków miesięcznie. W 2024 r. oczyszczalnia ta przetworzyła 99 623,45 m³ ścieków.

Oczyszczalnia ścieków stosuje konwencjonalne oczyszczanie mechaniczne bez wstępnego osadzania i proces aktywowanego osadu w celu ulepszanego biologicznego usuwania azotu i częściowego usuwania fosforu. Oczyszczanie osadu odbywa się w suszarniach poprzez naturalne odparowanie.



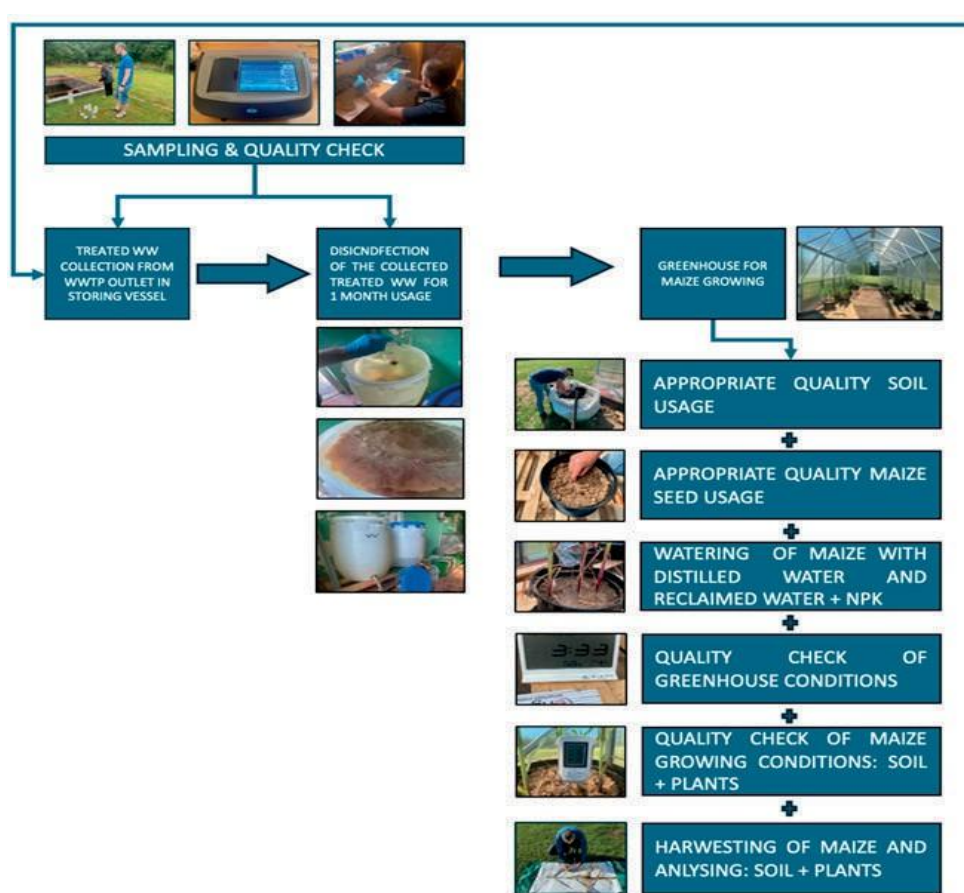
Rysunek 20. Technologia oczyszczalni ścieków

W badaniach pilotażowych w oczyszczalni w Ugāle wykorzystano oczyszczone ścieki, które zostały umieszczone w plastikowym pojemniku, do którego dodano środek dezynfekujący w celu przygotowania wody odzyskanej do podlewania roślin w szklarni. Jako metodę dezynfekcji wybrano kwas nadoctowy, ponieważ jest to nie tylko kwas organiczny, ale także bardzo szybko ulega biodegradacji, nie pozostawiając w wodzie resztek, które mogłyby wpływać na rozwój roślin. Niestety, kwas nadoctowy stosowany do dezynfekcji dostępny na rynku jest połączony z nadtlakiem wodoru, który pozwala utleniać więcej związków w wodzie, ale jest bardziej stabilny niż kwas nadoctowy. Bez dłuższego okresu przechowywania woda z obecnością nadtlaku wodoru może negatywnie wpływać na rośliny. Aby rozwiązać ten problem, do wody po przeprowadzeniu większości reakcji dodano nadmanganian potasu, aby pomóc w rozkładaniu pozostałości nadtlaku wodoru. Ponieważ do dezynfekcji użyto dawki 100 ppm, zniszczyła ona wszystkie patogeny w wodzie, ale obniżyła wartość pH wody do 5,6. Po dodaniu nadmanganianu potasu wartość pH ponownie osiągnęła optymalny poziom, a większość zawieszonych cząstek i innych substancji wytrąciła się w osadach na dnie plastikowego pojemnika.

Warte uwagi wnioski z Ugāle:

- 1) Aby uzyskać wodę odzyskaną klasy A, można stosować mniejsze dawki środka dezynfekującego;
- 2) Wyższe dawki stosowanych materiałów przez pewien czas zwiększają BOD₅ wody (przed podlewaniem roślin konieczne jest przechowywanie wody w dobrze wentylowanym miejscu);

3) Wyższe dawki środka dezynfekującego, a tym samym również ilość stosowanego nadmanganianu potasu w wodzie, zwiększyły stężenie potasu i manganu. Dlatego też znalezienie optymalnej dawki dla wody odzyskanej do konkretnych potrzeb może ograniczyć wspomniane problemy lub całkowicie je wyeliminować.



Rysunek 21. Działania wykonane podczas pilotażu

Podsumowując, zastosowanie wody odzyskanej wykazało pozytywny wpływ na rozwój kukurydzy i wskazuje na odzyskiwanie składników odżywczych ze ścieków. Jednak seria roślin, w przypadku których zastosowano wodę odzyskaną z dodatkami NPK, wykazała oznaki przesycenia składnikami odżywczymi, a ważną rolę w takim wyniku odegrało zwiększone stężenie potasu. W przypadku kukurydzy stosuje się różne optymalne proporcje N:P:K, które zależą od parametrów gleby, stadium rozwoju roślin i innych aspektów, a wśród tych proporcji jako zalecane pojawiają się 1:1:1,7 i 1:1,6:3,3, ale nasza woda odzyskana osiągnęła 3:1:34. Zoptymalizowana dawka dezynfekcji wody poprawi ten stosunek, a za pomocą opracowanego przez ReNutriWater kalkulatora ponownego wykorzystania wody można precyzyjnie oszacować stężenie składników odżywczych, które należy zastosować.

4.2.6 Samsø



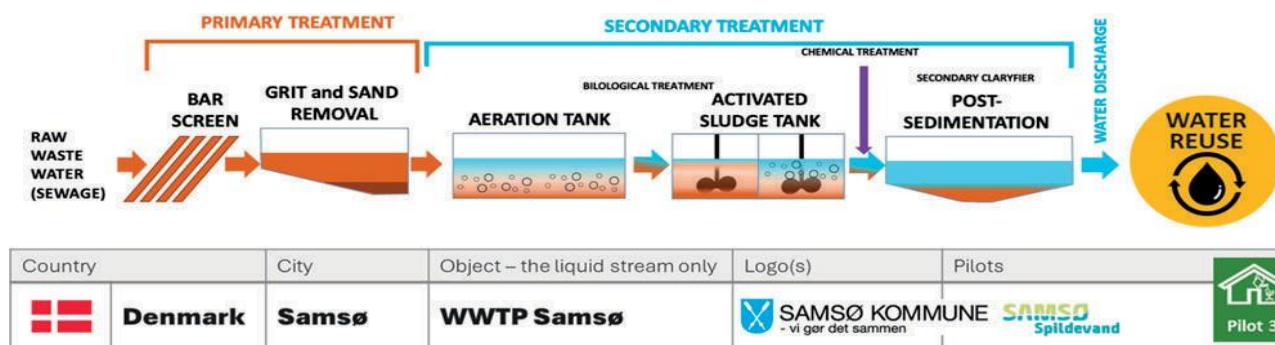
Oczyszczalnia ścieków Samsø znajduje się na wyspie Samsø w Danii. Samsø to niewielka wyspa położona w środkowej części kraju, zamieszkała przez 3700 osób. W miesiącach letnich liczba mieszkańców znacznie wzrasta, ponieważ wyspa jest popularnym celem turystycznym. Szacowana liczba odwiedzających Samsø w ciągu roku przekracza 300 000 osób, w związku z tym oczyszczalnia ścieków przetwarza sezonowo zmienne ilości ścieków bytowych.

Woda odzyskana wykorzystana w pilotażowym projekcie na wyspie Samsø pochodziła z oczyszczalni ścieków Samsø Spildevand A/S, która znajduje się w południowej części wyspy. Oczyszczalnia ta ma wydajność 8600 RLM, przetwarza 427 000 m³ rocznie, a średni dzienny przepływ ścieków wynosi 1170 m³, a maksymalny 1645 m³/dobę. Źródłem ścieków są w 65% ścieki bytowe i w 35% spływy powierzchniowe, bez ścieków przemysłowych.



Rysunek 22. Lokalizacja Samsø w Danii

Technologia oczyszczalni obejmuje różne procesy, takie jak przesiewanie kratowe, usuwanie piasku, żwiru i tłuszczu, oczyszczanie biologiczne i chemiczne oraz osadzanie. W ten sposób ze ścieków usuwane są substancje organiczne, azot i fosfor, co umożliwia powrót wody do naturalnego obiegu. Rysunek 23 przedstawia schemat technologiczny.



Rysunek 23. Technologia oczyszczalni ścieków



Woda odzyskana wykorzystana w tym pilotażu została dodatkowo zdezynfekowana tabletkami bezchlorowymi przed użyciem do nawadniania roślin kukurydzy w dwóch szklarniach znajdujących się na terenie oczyszczalni ścieków. W pilotażu 3 przeszliśmy przez cały proces. Wybraliśmy glebę, przygotowaliśmy doniczki i posadziliśmy kukurydzę. Opiekowaliśmy się roślinami przez cały sezon wegetacyjny i prowadziliśmy badania.

5 Wyniki badań

5.1 Cechy wody odzyskanej

W niniejszym rozdziale przedstawiono kluczowe wyniki pilotażowych projektów. W tabeli 4 zebrano wyniki dotyczące jakości wody odzyskanej. W ramach kontroli jakości ustalono dodatkowe wymagania dla osiągnięcia przez wodę klasy A wynikające z rozporządzenia 2020/741. Rozporządzenie to nakłada wartości parametryczne dla *E. coli*, BOD₅, TSS i mętności. Dodaliśmy wymagania wynikające z dyrektywy w sprawie oczyszczania ścieków komunalnych (obecnie 91/271/EEG) i nowej dyrektywy, która wejdzie w życie w 2027 r. (2024/3019), dyrektywy w sprawie wody pitnej (2020/2184) oraz wytycznych FAO. Należy podkreślić, że ustalone przez nas wymagania nie są równoważne z wymaganiami dla poszczególnych oczyszczalni ścieków. Oznacza to, że jakość wody odzyskanej może nie spełniać naszych wymogów, ale spełnia ona wymagania określone w pozwoleniach na wodę wydanych dla poszczególnych oczyszczalni.

Tabela 4. Średnie wyniki badań jakości wody odzyskanej

Charakterystyka oczyszczonych ścieków		Finlandia	Finlandia	Polska	Polska	Łotwa	Łotwa	Dania
								
		Kuopio	Tahko	Warszawa	Wołkowyja	Ugāle	Jūrmala	Samsø
Parametry:	Wymóg dla klasy A ReNutriWater:	Pilot 1,2,3	Pilot 1,2	Pilot 1	Pilot 2,3	Pilot 2	Pilot 3	Pilot 3
Ekwiwalent ludności	[RLM]	90 000	3 800	580 000	6 133	1 035	35 400	8 624
Fizykochemiczne właściwości wody odzyskanej								
ChZT	125 [mg/l] (2)	9,66	0,50	12	16,00	48,00	11,30	22,30
BOD ₅	10 [mg/l] (1)	0,00	0,00	2,5	-	2,32	4,60	0,50
Całkowita zawartość zawiesin (TSS)	10 [mg/l] (1)	0,40	0,70	<2	2,00	0,002	2,00	2,00
Azot całkowity (TN)	10 [mg/l] (3)	4,43	2,20	7	68,90	8,60	1,78	3,50
Fosfor całkowity (TP)	0,7 [mg/l] (3)	0,07	0,06	0,5	7,70	0,21	3,22	0,74
Całkowity węgiel organiczny (TOC)	37 [mg/l] (3)	5,77	4,04	10	4,00	b.d.	b.d.	33,00
Mętność	5 [NTU] (1)	0,28	0,76	<1	-	1,48	0,60	0,45
pH	8,4 [pH] (4)	6,80	6,55	7	6,50	6,70	7,11	6,96
Przewodność (EC)	3,000 [mS/cm](4)	0,592	0,466	1,3	b.d.	0,591	0,356	0,110
jakość mikrobiologiczna								
<i>E. coli</i>	10 [cfu/100ml](1)	0	0	0	5	5 200	1,200	190
<i>Legionella</i> spp.	1 000 [cfu/l] (1)	0	0	b.d.	0	b.d.	0	10
Jaja helmintów	1 [liczba/l] (1)	0	0	b.d.	b.d.	b.d.	0	b.d.
makroelementy								
Amoniak (N-NH ₄)	5 [mg/l] (4)	0,15	0	0,5	5,40	0,59	0,01	0,18
Azotyny (NO ₂ ⁻)	0,5 [mg/l] (5)	0,10	0,10	0,16	-	0,20	0	0,01
Azotany (N-NO ₃)	10 [mg/l] (4)	3,61	0,60	5,3	61,20	6,60	4,49	0,44
Fosforany (P-PO ₄ ³⁻)	2 [mg/l] (4)	0,57	0,10	0,4	5,70	0,04		0,18
Potas (K ⁺)	2 [mg/l] (4)	9,10	10,75	27	21,60	b.d.	15,70	21,00
mikroelementy								
Miedź (Cu)	0,2 [mg/l] (4)	0,03	0,01	b.d.	0,022	0,40	0,002	0
Cynk (Zn)	2 [mg/l] (4)	0,01	0,02	b.d.	0,025	10,00	0,010	0,003
Nikiel (Ni)	0,2 [mg/l] (4)	0,01	0,01	b.d.	0,005	6,50	0,001	0,003
Kadm (Cd)	0,01 [mg/l] (4)	0,01	0,01	b.d.	0,003	0,38	0,0001	0,05
Chrom (Cr)	0,1 [mg/l] (4)	0,01	0,01	b.d.	0,002	2,00	0,0010	0,02
Rtęć (Hg)	0,0005 [mg/l] (5)	0,03	0,03	b.d.	0,0005	0,07	0,00002	0
Ołów (Pb)	5 [mg/l] (4)	0,01	0,01	b.d.	0,005	1,10	0,001	0,14
Numer referencyjny: (1) – na podstawie 2020/741, (2) – na podstawie 91/271/EEG, (3) – na podstawie 2024/3019, (4) – na podstawie FAO, (5) – na podstawie 2020/2184; b.d. – brak danych								

W przypadku oczyszczalni ścieków w Warszawie przetestowano kilka rozwiązań (wymiana jonowa, filtr tkaninowy, węgiel aktywny, ozonowanie itp.), więc porównanie nie jest możliwe. Tabela zawiera wyniki po wymianie jonowej i dezynfekcji ozonem. Ponieważ ta oczyszczalnia ścieków ma wydajność powyżej 150 000 RLM, wymagania dotyczące azotu całkowitego i fosforu całkowitego są bardziej rygorystyczne. Usuwanie składników odżywczych dotyczy oczyszczania trzeciego stopnia.

5.2 Skuteczność dezynfekcji wody odzyskanej

5.2.1 Metody wstępnej obróbki przed dezynfekcją

Skuteczne ponowne wykorzystanie wody zależy od odpowiedniego przygotowania ścieków przed dezynfekcją. Metody wstępnego oczyszczania odgrywają kluczową rolę w poprawie skuteczności procesów dezynfekcji poprzez usuwanie zanieczyszczeń, które mogą zakłócać inaktywację patogenów. Wstępne oczyszczanie ma również kluczowe znaczenie dla usuwania prekursorów produktów ubocznych dezynfekcji ze ścieków poddanych rekultywacji. Do najczęstszych produktów ubocznych dezynfekcji należą trihalometany (THM), w tym chloroform, bromoform, bromodichlorometan i chlorodibromometan, a także kwasy haloctowe (HAA) (Wang P. i in., 2021). Obecność tych związków jest wysoce niepożądana ze względu na ich niekorzystny wpływ na zdrowie ludzkie i potencjalną rakotwórczość. Dlatego też korzystne może być wdrożenie metod wstępnego oczyszczania mających na celu zmniejszenie zawartości naturalnych substancji organicznych – znanych prekursorów powstawania tych szkodliwych produktów ubocznych dezynfekcji (Evlampidou, I. i in., 2020; Kumari, M. i in., 2022). Procesy te są ukierunkowane na cząstki zawieszone, substancje organiczne i inne rozpuszczalne związki, które mogą pogorszyć jakość wody i utrudnić skuteczność późniejszej dezynfekcji.

Na skuteczność dezynfekcji ma wpływ kilka parametrów jakości wody, w tym zmętnienie i absorpcja promieniowania UV. Zawieszone cząsteczki w ściekach mogą chronić mikroorganizmy przed środkami dezynfekującymi i służyć jako pożywka dla bakterii. Aby zmaksymalizować skuteczność dezynfekcji, poziom zmętnienia powinien być utrzymywany poniżej 1 NTU (Léziart et al., 2019). Zastosowanie odpowiednich metod wstępnego oczyszczania zapewnia spełnienie tych warunków, zwiększając tym samym niezawodność systemów ponownego wykorzystania wody.

W zależności od właściwości oczyszczanych ścieków można zastosować szereg fizycznych i chemicznych metod wstępnej obróbki. Do powszechnie stosowanych metod należą:

- **Koagulacja:** Służy do agregacji drobnych cząstek i umożliwia ich usunięcie poprzez sedymentację i filtrację. Powszechnie stosuje się koagulanty, takie jak siarczan glinu lub wstępnie zhydrolizowane związki glinu, których dawki różnią się w zależności od początkowej jakości ścieków.
- **Filtracja:** Różne techniki filtracji, takie jak filtracja piaskowa, usuwają zawieszone cząstki stałe i zmniejszają zmętnienie. Szybkość filtracji wynosi zazwyczaj od 3 do 15 m/h.
- **Adsorpcja węglem aktywnym:** Metoda ta jest skuteczna w usuwaniu zanieczyszczeń organicznych, zapewniając niższą absorpcję promieniowania UV w oczyszczonych ściekach. Zazwyczaj poprzedza ją filtracja piaskowa w celu optymalizacji wydajności.
- **Inne metody:** W zależności od konkretnych potrzeb związanych z oczyszczaniem można również zastosować dodatkowe procesy, takie jak filtry tkaninowe i wymiana jonowa.

Wybór metody wstępnego oczyszczania i jej parametrów operacyjnych powinien być dostosowany do początkowej jakości ścieków i pożądaných wyników oczyszczania. Aby określić najskuteczniejsze podejście, zaleca się przeprowadzenie indywidualnej oceny popartej testami eksperymentalnymi. Dzięki wdrożeniu odpowiednich strategii wstępnego oczyszczania można znacznie poprawić wydajność i niezawodność procesów dezynfekcji, zapewniając ostatecznie bezpieczeństwo i zrównoważone wykorzystanie wody odzyskanej.



Omówienie wyników

Koagulacja, filtracja piaskowa i adsorpcja na węglu aktywnym

W badaniu oceniono skuteczność różnych metod wstępnego oczyszczania ścieków, w tym koagulacji, filtracji piaskowej i adsorpcji na węglu aktywnym. Eksperymenty przeprowadzono w kontrolowanych warunkach laboratoryjnych, wykorzystując codzienne próbki ścieków pobrane z oczyszczalni ścieków w Warszawie. Celem było ocenienie skuteczności tych metod w usuwaniu zanieczyszczeń, które mogłyby zakłócać kolejne procesy dezynfekcji. Kluczowe wskaźniki jakości ścieków, które zostały przeanalizowane, obejmowały barwę, mętność, chemiczne zapotrzebowanie na tlen (COD) oraz całkowity węgiel organiczny (TOC).

Testowane metody koagulacji obejmowały koagulację powierzchniową i objętościową, w obu przypadkach z użyciem siarczanu glinu i polimerów nieorganicznych PAX-XL 19F i PAX-XL 1911. W koagulacji objętościowej zastosowano te same dawki alunu, PAX-XL 19F i PAX-XL 1911 (1,0, 2,0, 4,0 i 8,0 mg Al/l). W koagulacji powierzchniowej dawki koagulantów alunu, PAX-XL 19F i PAX-XL 1911 wynosiły 0,25, 0,5, 1,0 i 2,0 mg Al/l, przy szybkości filtracji 3 m/h. Filtrację piaskową przeprowadzono przy różnych prędkościach filtracji (3, 5, 10 i 15 m/h), natomiast adsorpcję węglem aktywnym przetestowano przy prędkościach 5, 10 i 15 m/h, co odpowiadało przybliżonym czasom kontaktu wynoszącym 13, 7 i 4 minuty. Najważniejsze wyniki podsumowano w tabelach 4 i 5, które dostarczają informacji na temat skuteczności każdej z metod w redukcji zanieczyszczeń i poprawie ogólnej jakości wody.

Koagulacja

Zarówno koagulacja powierzchniowa, jak i objętościowa wykazały wysoką skuteczność w usuwaniu zanieczyszczeń. Koagulacja powierzchniowa z użyciem siarczanu glinu pozwoliła uzyskać redukcję zabarwienia o 28–49%, natomiast PAX-XL 19F wykazał podobny zakres redukcji wynoszący 26–30%. Usuwanie zmętnienia było również porównywalne, przy czym PAX-XL 19F zmniejszył zmętnienie o 64–75%, a siarczan glinu o 69–76%. Redukcja ChZT była nieco wyższa w przypadku siarczanu glinu (26–30%) w porównaniu z PAX-XL 19F (19–35%), natomiast redukcja TOC była podobna w przypadku obu koagulantów i wynosiła 16–20% dla siarczanu glinu i 18–23% dla PAX-XL 19F (tabela 5).

Tabela 5. Charakterystyka wody odzyskanej i wydajność oczyszczania (η) w testach koagulacji powierzchniowej (średnia $\pm$ odchylenie standardowe)

Wskaźniki		Dawka $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ [mg Al/l]				Dawka PAX-XL 19F [mg Al/l]				Dawka PAX-XL 1911 [mg Al/l]			
		0,25	0,5	1	2	0,25	0,5	1	2	0,25	0,5	1	2
Barwa	[mg Pt/l]	40,67± 4,71	36,33± 5,19	35,67± 4,78	29,33± 4,92	42,67± 3,30	42,67± 3,30	42,67± 3,30	40,00± 1,63	47,00± 4,24	44,33± 3,30	43,00± 2,83	40,33± 2,05
	η [%]	27,56± 3,63	36,97± 5,14	38,08± 4,56	49,15± 5,79	25,64± 0,91	25,64± 0,91	25,64± 0,91	30,09± 2,62	18,16± 2,12	22,69± 2,06	25,00± 0,00	29,53± 2,75
Mętność	NTU	0,69± 0,17	0,60± 0,1	0,55± 0,09	0,54± 0,08	0,79± 0,05	0,72± 0,03	0,60± 0,04	0,55± 0,03	0,75± 0,12	0,66± 0,07	0,52± 0,03	0,50± 0,04
	η [%]	68,95± 6,30	72,77± 3,35	75,03± 3,21	75,61± 2,89	64,21± 1,76	67,36± 1,25	72,96± 1,70	75,09± 0,50	66,15± 4,01	70,00± 2,10	76,29± 0,92	77,50± 1,31
ChZT	[mg O ₂ /l]	16,60± 1,36	16,30± 1,39	16,03± 1,59	15,60± 1,55	18,33± 2,90	17,07± 2,58	15,40± 2,69	14,57± 2,07	17,50± 2,03	16,47± 1,67	15,43± 1,55	15,13± 1,60
	η [%]	25,74± 3,35	27,13± 2,78	28,40± 3,08	30,36± 1,99	18,51± 6,50	24,02± 6,44	31,57± 7,03	35,14± 4,55	21,99± 2,93	26,49± 2,01	31,10± 1,88	32,46± 2,48
TOC	[mg/l]	6,94± 0,34	6,88± 0,34	6,76± 0,34	6,54± 0,34	6,77± 0,16	6,71± 0,16	6,57± 0,16	6,31± 0,17	6,63± 0,13	6,58± 0,13	6,49± 0,14	6,32± 0,16
	η [%]	15,54± 7,55	16,22± 7,48	17,63± 7,40	20,34± 7,17	17,63± 4,70	18,44± 4,69	20,10± 4,67	23,27± 4,65	19,43± 4,10	19,96± 4,09	21,07± 4,09	23,17± 4,07
UV ₂₅₄	[cm ⁻¹]	0,208± 0,020	0,203± 0,020	0,199± 0,023	0,194± 0,022	0,207± 0,024	0,202± 0,024	0,198± 0,022	0,194± 0,023	0,209± 0,022	0,204± 0,02	0,196± 0,022	0,194± 0,023
	η [%]	6,07± 0,48	8,19± 1,08	10,28± 2,07	12,39± 2,23	6,85± 2,68	8,97± 2,58	10,55± 1,77	12,58± 2,55	5,84± 1,44	7,87± 1,28	11,48± 2,17	12,56± 2,43

W testach koagulacji objętościowej siarczan glinu zmniejszył zabarwienie o 22–47%, natomiast PAX-XL 19F osiągnął redukcję o 15–44%. PAX-XL 19F wykazał również najwyższy poziom usuwania zmętnienia (76–82%), podczas gdy siarczan glinu osiągnął nieco niższy wynik 66–75%. Zmniejszenie ChZT

zaobserwowano na poziomie 18–33% dla PAX-XL 19F i 12–34% dla siarczanu glinu, natomiast usuwanie TOC wynosiło od 15 do 25% dla siarczanu glinu i od 13 do 22% dla PAX-XL 19F (tabela 6).

Tabela 6. Charakterystyka wody odzyskanej i wydajność oczyszczania (η) w testach koagulacji objętościowej (średnia $\pm$ odchylenie standardowe)

Wskaźniki		Dawka $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ [mg Al/l]				Dawka PAX-XL 19F [mg Al/l]				Dawka PAX-XL 1911 [mg Al/l]			
		1	2	4	8	1	2	4	8	1	2	4	8
Barwa	[mg Pt/l]	40,67 $\pm$ 4,19	36,67 $\pm$ 4,99	33,67 $\pm$ 4,19	27,67 $\pm$ 1,7	48,67 $\pm$ 5,79	42,67 $\pm$ 5,25	36,00 $\pm$ 2,94	32,00 $\pm$ 2,45	42,33 $\pm$ 6,13	38,33 $\pm$ 5,31	34,33 $\pm$ 4,19	30,33 $\pm$ 3,30
	η [%]	21,89 $\pm$ 6,76	29,74 $\pm$ 7,56	35,46 $\pm$ 6,24	46,77 $\pm$ 3,31	15,38 $\pm$ 5,31	25,64 $\pm$ 6,86	37,18 $\pm$ 3,43	44,19 $\pm$ 2,25	19,37 $\pm$ 2,27	26,94 $\pm$ 1,59	34,40 $\pm$ 1,51	41,87 $\pm$ 3,42
Mętność	NTU	0,62 $\pm$ 0,07	0,53 $\pm$ 0,06	0,52 $\pm$ 0,05	0,43 $\pm$ 0,07	0,53 $\pm$ 0,03	0,45 $\pm$ 0,06	0,41 $\pm$ 0,07	0,38 $\pm$ 0,11	0,64 $\pm$ 0,03	0,52 $\pm$ 0,05	0,44 $\pm$ 0,09	0,39 $\pm$ 0,09
	η [%]	65,90 $\pm$ 3,65	70,43 $\pm$ 6,75	71,05 $\pm$ 7,05	75,05 $\pm$ 8,96	75,65 $\pm$ 2,58	79,25 $\pm$ 3,76	81,21 $\pm$ 4,22	82,40 $\pm$ 5,66	63,74 $\pm$ 10,03	70,47 $\pm$ 9,50	74,16 $\pm$ 11,58	77,04 $\pm$ 10,50
COD	[mg O ₂ /l]	18,51 $\pm$ 2,02	16,13 $\pm$ 1,43	15,97 $\pm$ 1,42	13,83 $\pm$ 1,17	18,37 $\pm$ 1,13	16,20 $\pm$ 0,49	15,40 $\pm$ 0,96	14,87 $\pm$ 1,57	18,17 $\pm$ 2,01	16,30 $\pm$ 1,77	15,60 $\pm$ 1,57	13,95 $\pm$ 1,85
	η [%]	12,39 $\pm$ 1,16	23,40 $\pm$ 4,30	24,17 $\pm$ 4,79	34,35 $\pm$ 2,43	17,50 $\pm$ 1,71	27,05 $\pm$ 3,68	30,83 $\pm$ 1,37	33,44 $\pm$ 2,63	14,01 $\pm$ 3,33	22,86 $\pm$ 1,10	26,09 $\pm$ 2,04	34,02 $\pm$ 4,50
TOC	[mg/l]	6,96 $\pm$ 0,15	6,78 $\pm$ 0,12	6,53 $\pm$ 0,14	6,15 $\pm$ 0,13	7,17 $\pm$ 0,31	7,04 $\pm$ 0,34	6,83 $\pm$ 0,38	6,36 $\pm$ 0,48	7,10 $\pm$ 0,34	6,96 $\pm$ 0,34	6,68 $\pm$ 0,34	6,14 $\pm$ 0,31
	η [%]	15,41 $\pm$ 3,10	17,61 $\pm$ 4,66	20,62 $\pm$ 4,99	25,20 $\pm$ 4,78	12,68 $\pm$ 7,18	14,25 $\pm$ 7,61	16,87 $\pm$ 7,89	22,44 $\pm$ 8,87	13,61 $\pm$ 7,42	15,27 $\pm$ 7,30	18,67 $\pm$ 7,13	25,22 $\pm$ 6,59
UV ₂₅₄	[cm ⁻¹]	0,210 $\pm$ 0,02	0,197 $\pm$ 0,015	0,182 $\pm$ 0,013	0,173 $\pm$ 0,025	0,205 $\pm$ 0,013	0,191 $\pm$ 0,011	0,18 $\pm$ 0,013	0,173 $\pm$ 0,015	0,208 $\pm$ 0,015	0,195 $\pm$ 0,011	0,182 $\pm$ 0,013	0,171 $\pm$ 0,014
	η [%]	5,41 $\pm$ 0,47	11,06 $\pm$ 1,98	17,86 $\pm$ 4,23	2,74 $\pm$ 4,52	7,20 $\pm$ 3,28	13,80 $\pm$ 3,34	18,89 $\pm$ 2,01	22,17 $\pm$ 1,33	6,08 $\pm$ 2,44	12,10 $\pm$ 3,67	17,91 $\pm$ 2,91	23,12 $\pm$ 1,77

Istotnym odkryciem było to, że koagulacja powierzchniowa osiągnęła porównywalną skuteczność oczyszczania jak koagulacja objętościowa, ale przy niższych dawkach koagulantu, co czyni ją bardziej opłacalną opcją. Ponadto obie metody koagulacji skutecznie obniżyły mętność poniżej zalecanego progu 1 NTU, zapewniając lepsze warunki do skutecznej dezynfekcji.

Filtracja piaskowa

Spośród przetestowanych metod filtracja piaskowa charakteryzowała się najniższą ogólną skutecznością usuwania zanieczyszczeń i nie spełniała zalecanego progu mętności wynoszącego 1 NTU, co sprawia, że jest ona nieskuteczną metodą wstępnego oczyszczania stosowaną samodzielnie. Przy najniższych prędkościach filtracji proces ten zmniejszył barwę tylko o 20%, mętność o 40%, ChZT o 8% i TOC o 20% (tabela 7).

Biorąc pod uwagę te ograniczenia, sama filtracja piaskowa nie jest realną opcją wstępnego oczyszczania, zwłaszcza w przypadku ścieków wymagających znacznego zmniejszenia zawartości substancji organicznych przed dezynfekcją. Jej rola może być ograniczona do etapu uzupełniającego po koagulacji lub jako część wieloetapowego procesu oczyszczania, ale nie należy polegać na niej jako podstawowej metodzie wstępnego oczyszczania.

Adsorpcja na węglu aktywnym

Spośród wszystkich przetestowanych metod wstępnego oczyszczania adsorpcja na węglu aktywnym okazała się najskuteczniejsza. Przy najniższych prędkościach filtracji proces ten pozwolił uzyskać 90% redukcję barwy, 88% redukcję ChZT, 55% redukcję mętności i 87% redukcję TOC (tabela 7). Metoda ta jest jednak stosunkowo droga.

Chociaż koagulacja była skuteczna w zmniejszaniu zmętnienia poniżej zalecanego progu i zapewniała znaczne usuwanie zanieczyszczeń organicznych, adsorpcja na węglu aktywnym wykazała najlepsze wyniki oczyszczania, co czyni ją preferowanym wyborem do wstępnego oczyszczania, gdy wymagane są wysokie standardy jakości wody odzyskanej. Ponadto adsorpcja na węglu aktywnym konsekwentnie zmniejszała zmętnienie poniżej zalecanego progu 1 NTU, wzmacniając swoją skuteczność w poprawie jakości wody do dalszej dezynfekcji.

Tabela 7. Charakterystyka wody odzyskanej i wydajność oczyszczania (η) w testach filtracji piaskowej i adsorpcji węglem aktywnym (średnia $\pm$ odchylenie standardowe)

Indicators		Sand Filtration Rates [m/h]				Activated Carbon Filtration Rates [m/h]		
		3	5	10	15	5	10	15
Color	[mg Pt/l]	42.5 $\pm$ 7.5	42.5 $\pm$ 7.5	47.5 $\pm$ 7.5	50 $\pm$ 5.0	5.0 $\pm$ 0.0	5.0 $\pm$ 0.0	5.0 $\pm$ 0.0
	η [%]	19.44 $\pm$ 2.78	19.44 $\pm$ 2.78	9.72 $\pm$ 1.39	4.17 $\pm$ 4.17	90.28 $\pm$ 1.39	90.28 $\pm$ 1.39	90.28 $\pm$ 1.39
Turbidity	NTU	0.99 $\pm$ 0.04	1.13 $\pm$ 0.14	1.24 $\pm$ 0.19	1.42 $\pm$ 0.21	0.73 $\pm$ 0.02	0.81 $\pm$ 0.09	0.79 $\pm$ 0.06
	η [%]	40.18 $\pm$ 10.55	33.03 $\pm$ 5.62	26.57 $\pm$ 4.35	16.18 $\pm$ 5.07	55.83 $\pm$ 8.42	49.28 $\pm$ 15.94	51.26 $\pm$ 13.48
COD	[mg O ₂ /l]	17.8 $\pm$ 0.0	18.55 $\pm$ 0.55	18.65 $\pm$ 0.55	19.15 $\pm$ 0.95	2.19 $\pm$ 1.09	3.52 $\pm$ 2.17	4.08 $\pm$ 2.53
	η [%]	8.05 $\pm$ 4.27	4.31 $\pm$ 1.6	3.79 $\pm$ 1.63	1.30 $\pm$ 0.32	88.43 $\pm$ 6.16	81.32 $\pm$ 12.03	78.34 $\pm$ 14.02
TOC	[mg/l]	6.78 $\pm$ 0.0	6.78 $\pm$ 0.0	6.81 $\pm$ 0.0	6.92 $\pm$ 0.0	1.08 $\pm$ 0.29	1.23 $\pm$ 0.33	1.52 $\pm$ 0.37
	η [%]	20.31 $\pm$ 1.98	17.87 $\pm$ 1.26	17.74 $\pm$ 1.46	16.51 $\pm$ 1.65	87.09 $\pm$ 3.88	85.23 $\pm$ 4.47	81.75 $\pm$ 5.02
UV ₂₅₄	[cm ⁻¹]	0.23 $\pm$ 0.003	0.23 $\pm$ 0.004	0.23 $\pm$ 0.004	0.23 $\pm$ 0.003	0.07 $\pm$ 0.007	0.07 $\pm$ 0.009	0.07 $\pm$ 0.009
	η [%]	3.14 $\pm$ 0.99	4.00 $\pm$ 0.55	4.00 $\pm$ 0.55	4.20 $\pm$ 0.76	69.88 $\pm$ 2.11	69.69 $\pm$ 3.16	69.06 $\pm$ 3.36



Najważniejsze wnioski

- Wyniki badań wskazują, że koagulacja powierzchniowa była równie skuteczna jak koagulacja objętościowa, ale wymagała mniejszych dawek koagulantu, co czyniło ją bardziej wydajną opcją.
- Filtracja piaskowa wykazała najniższą wydajność, charakteryzując się niskimi wskaźnikami usuwania wszystkich badanych wskaźników jakości wody, co potwierdza, że najlepiej nadaje się ona jako metoda uzupełniająca, a nie podstawowa.
- Adsorpcja węglem aktywnym okazała się najsukuteczniejszym procesem, zapewniającym największą redukcję barwy, ChZT, mętności i TOC, wykazując doskonałą zdolność do usuwania zanieczyszczeń organicznych i poprawy jakości wody przed dezynfekcją. Jednak z ekonomicznego punktu widzenia jest to również najdroższa spośród analizowanych metod.
- Wszystkie przetestowane metody wstępnego oczyszczania, z wyjątkiem filtracji piaskowej, pozwoliły obniżyć mętność poniżej zalecanego progu 1 NTU, zapewniając lepsze warunki do skutecznej inaktywacji patogenów.

Wyniki te podkreślają znaczenie doboru metod wstępnego oczyszczania w oparciu o charakterystykę ścieków i cele oczyszczania, przy czym adsorpcja na węglu aktywnym jest najsukuteczniejszą metodą samodzielną, natomiast koagulacja stanowi ekonomiczną alternatywę o umiarkowanej skuteczności usuwania zanieczyszczeń.

5.2.2 Porównanie skuteczności różnych metod dezynfekcji

Dezynfekcja jest niezbędnym etapem oczyszczania ścieków komunalnych, zwłaszcza gdy odzyskana woda ma być ponownie wykorzystana do nawadniania. Jej głównym celem jest ochrona zdrowia publicznego i środowiska poprzez eliminację lub dezaktywację szkodliwych mikroorganizmów. Należą do nich bakterie, wirusy, pierwotniaki i pasożyty, które mogą być obecne w wyniku zanieczyszczenia fekalnego lub innych źródeł. Skuteczna dezynfekcja zmniejsza ryzyko przenoszenia chorób i gwarantuje, że odzyskana woda spełnia normy jakościowe umożliwiające jej bezpieczne wykorzystanie.

Dostępnych jest wiele różnych metod dezynfekcji, z których każda wykorzystuje inne mechanizmy w celu unieszkodliwiania mikroorganizmów. Do powszechnie stosowanych metod należą:

- **Chlorowanie:** Chlorowanie pozostaje jedną z najczęściej stosowanych metod dezynfekcji chemicznej w komunalnych oczyszczalniach ścieków ze względu na swoją prostotę, przystępną cenę i powszechną dostępność. Zazwyczaj stosuje się je w postaci podchlorynu sodu, który jest łatwy w użyciu i zapewnia długotrwałą dezynfekcję (Collivignarelli i in., 2017). Działa poprzez wytwarzanie wolnych form chloru, które utleniają komórki mikroorganizmów, niszcząc błony komórkowe, enzymy i DNA, a ostatecznie dezaktywując patogeny (de Oliveira Freitas et al., 2021). Jednak chlorowanie powoduje również powstawanie produktów ubocznych dezynfekcji (DBP), gdy chlor reaguje z substancjami organicznymi zawartymi w ściekach. Należą do nich trihalometany (THM), kwasy haloctowe (HAA), haloctonitryle (HAN) i haloKetony (HK), które są powiązane z potencjalnymi zagrożeniami dla zdrowia, takimi jak mutagenność i rakotwórczość (Quartaroli i in., 2018; Yang i in., 2020). W związku z tym chlorowanie musi być starannie kontrolowane w warunkach ponownego wykorzystania, aby zachować równowagę między bezpieczeństwem mikrobiologicznym a ryzykiem chemicznym. Typowe dawki chloru stosowane do dezynfekcji ścieków wynoszą od 5 do 20 mg/l (arkusz informacyjny EPA dotyczący technologii oczyszczania ścieków „Dezynfekcja chlorem”, 1999 r.).
- **Promieniowanie UV:** Promieniowanie ultrafioletowe (UV) jest fizyczną metodą dezynfekcji coraz częściej stosowaną w oczyszczaniu ścieków ze względu na swoją skuteczność i bezpieczeństwo dla środowiska. Działa poprzez uszkodzenie DNA mikroorganizmów pod wpływem promieniowania UV, uniemożliwiając im rozmnażanie się. Promieniowanie UV skutecznie zwalcza bakterie, wirusy, pierwotniaki i robaki pasożytnicze, szczególnie w zakresie UV-C (200–280 nm), a jego maksymalna skuteczność wynosi 253,7 nm (González et al., 2023). Kluczową zaletą uzdatniania promieniowaniem UV jest brak stosowania środków chemicznych, co pozwala uniknąć powstawania szkodliwych produktów ubocznych i zachować jakość wody. Proces ten jest szybki i nie zmienia smaku ani składu uzdatnianej wody. Jednak jego skuteczność jest zależna od przejrzystości wody, ponieważ zawieszone cząstki stałe mogą blokować promieniowanie UV i zmniejszać jego skuteczność. Uzdatnianie promieniowaniem UV nie zapewnia również dezynfekcji resztkowej, nie oferując ciągłej kontroli mikrobiologicznej po opuszczeniu systemu uzdatniania przez wodę. Zalecane dawki promieniowania UV wynoszą od 50 do 200 mJ/cm², w zależności od jakości dopływającej wody i celów dezynfekcji (Linden et al., 2002; EPA's Wastewater Technology Fact Sheet Ultraviolet Disinfection, 1999).
- **Ozonowanie:** Ozonowanie wykorzystuje gaz ozonowy (O₃), silny utleniacz, do unieszkodliwiania mikroorganizmów w ściekach. Ozon reaguje z komórkami mikroorganizmów, uszkodzając błony i struktury wewnętrzne, a także pomaga oczyścić wodę poprzez rozkład złożonych zanieczyszczeń organicznych na prostsze, mniej szkodliwe związki. Dzięki temu ozonowanie jest cenne zarówno dla dezynfekcji, jak i ogólnej poprawy jakości wody. Jest wysoce skuteczna w zwalczaniu szerokiej gamy patogenów i nie pozostawia pozostałości chemicznych, ponieważ ozon ulega naturalnemu rozkładowi do tlenu. Jednak ozonowanie wymaga wytwarzania ozonu na miejscu i precyzyjnej kontroli warunków oczyszczania, co sprawia, że jest ono bardziej złożone i kosztowne niż inne metody. Jego skuteczność zależy w dużej mierze od początkowej jakości ścieków i parametrów procesu. Zalecane zakresy operacyjne obejmują dawkę ozonu 3–20 mg/l i czas retencji hydraulicznej 20–40 minut (Lazarova i in., 2013; Levine i in., 2000; Hogard i in., 2021; Barry i in., 2014).

Wybór metody dezynfekcji i jej parametrów operacyjnych powinien być uzależniony od konkretnych właściwości ścieków i zamierzonych celów oczyszczania. Aby określić najskuteczniejsze podejście, zaleca się przeprowadzenie indywidualnej oceny popartej testami eksperymentalnymi. Wdrożenie odpowiednio dobranych strategii inaktywacji mikroorganizmów może znacznie zwiększyć wydajność i niezawodność procesu odzyskiwania wody, zapewniając ostatecznie bezpieczne i zrównoważone wykorzystanie wody odzyskanej.



Omówienie wyników

Chlorowanie, ozonowanie i promieniowanie UV

W badaniu oceniono skuteczność kilku metod dezynfekcji ścieków, w tym chlorowania, ozonowania i promieniowania ultrafioletowego.

Eksperymenty dezynfekcyjne przeprowadzono w dwóch seriach: (i) przy użyciu ścieków z oczyszczalni ścieków „Południe” poddanych wstępnej obróbce metodą wymiany jonowej (IEX) oraz (ii) przy użyciu ścieków z oczyszczalni ścieków „Czajka” poddanych wstępnej obróbce metodą filtracji piaskowej (SF). Obie oczyszczalnie ścieków znajdowały się w Warszawie. Celem eksperymentów była ocena skuteczności dezynfekcji tych metod w oparciu o następujące wskaźniki jakości mikrobiologicznej: całkowita liczba bakterii z grupy coli, *Escherichia coli*, enterokoki kałowe, *Clostridium perfringens*, liczba mikroorganizmów w temperaturze 22°C po 72 godzinach oraz liczba mikroorganizmów w temperaturze 36°C po 48 godzinach. Oprócz parametrów mikrobiologicznych analizowano również wybrane wskaźniki fizykochemiczne, w tym temperaturę, pH, przewodność, barwę, mętność, chemiczne zapotrzebowanie na tlen (COD) oraz 5-dniowe biochemiczne zapotrzebowanie na tlen (BOD₅).

Testowane chemiczne metody dezynfekcji obejmowały chlorowanie podchlorynem sodu i ozonowanie gazem ozonowym. W serii (i) chlorowanie przeprowadzono przy użyciu dawek chloru wynoszących 0,5, 2,0 i 4,0 mg Cl₂/l, przy czasie kontaktu wynoszącym 5, 15 i 20 minut. W serii (ii) zastosowano dawki chloru wynoszące 0,5, 1,0, 2,0 i 4,0 mg Cl₂/l, przy czasie kontaktu wynoszącym 10 i 20 minut. W przypadku ozonowania dawki ozonu dostosowano poprzez zmianę zarówno stężenia ozonu (100% w serii (i); 20%, 40%, 60% i 100% w serii (ii)), jak i natężenia przepływu (3 l/min i 8 l/min w obu seriach). W serii (ii) dało to dawki ozonu wynoszące 16,67, 33,33, 50,00 i 83,33 mg O₃/l przy 3 l/min oraz 5,00, 50,00, 75,00 i 125,00 mg O₃/l przy 8 l/min. W serii (i) zastosowano dawki ozonu wynoszące 83,33 mg O₃/l przy 3 l/min i 125,00 mg O₃/l przy 8 l/min. Dezynfekcję promieniowaniem UV przeprowadzono w serii (ii) przy użyciu trzech różnych dawek: 279, 312 i 484 mJ/cm².

Chlorowanie

Porównanie serii (i) i serii (ii) uwypukla znaczące różnice w skuteczności dezynfekcji, na które prawdopodobnie wpływ miała metoda wstępnego oczyszczania. W serii (i), w której ścieki zostały wstępnie oczyszczone metodą wymiany jonowej, chlorowanie doprowadziło do całkowitej inaktywacji kluczowych wskaźników mikrobiologicznych (*E. coli*, enterokoki kałowe i bakterie z grupy coli ogółem) przy stężeniu 4,0 mg Cl₂/l w ciągu 15–30 minut. Natomiast w serii (ii), w której jako wstępną obróbkę zastosowano filtrację piaskową, *E. coli* i bakterie z grupy coli pozostawały wykrywalne przy wszystkich badanych dawkach chloru i czasach kontaktu – nawet przy stężeniu 4,0 mg Cl₂/l przez 20 minut *E. coli* uległa jedynie częściowej redukcji. Ponadto, chociaż *Clostridium perfringens* było konsekwentnie nieobecne w obu seriach, całkowita liczba mikroorganizmów w temperaturze 22°C i 36°C była znacznie wyższa w serii (ii) i mniej podatna na chlorowanie. Wyniki te sugerują, że wstępna obróbka jonowymienna (seria i) może zwiększyć skuteczność późniejszej dezynfekcji chemicznej w porównaniu z filtracją piaskową (seria ii), szczególnie w zakresie redukcji odpornych populacji mikroorganizmów i osiągnięcia pełnej zgodności z normami mikrobiologicznymi.

Należy również zauważyć, że początkowa jakość ścieków z oczyszczalni przed wstępną obróbką prawdopodobnie przyczyniła się do zaobserwowanych różnic. Ścieki z oczyszczalni „Południe” (seria i) wykazywały niższe obciążenie mikrobiologiczne w punkcie odniesienia – np. *Clostridium perfringens* było już niewykrywalne, a całkowita liczba mikroorganizmów wynosiła poniżej 300 CFU/ml – podczas gdy ścieki z oczyszczalni „Czajka” (seria ii) wykazywały znacznie wyższe wartości początkowe, w tym >2400 CFU/ml w temperaturze 36°C. Te różnice w jakości dopływu, w połączeniu z różnymi metodami wstępnego oczyszczania, należy uwzględnić przy ocenie wyników dezynfekcji.

W tabelach 8 i 9 przedstawiono wyniki inaktywacji mikroorganizmów osiągnięte dzięki chlorowaniu.

Tabela 8. Seria (i) – inaktywacja mikroorganizmów poprzez chlorowanie

Microbial Water Quality Indicator	Unit	"Południe" WWTP Effluent (IEX Pre-Treated)	Contact Time: 5 min			Contact Time: 15 min			Contact Time: 30 min		
			0,5 mg Cl ₂ /l	2,0 mg Cl ₂ /l	4,0 mg Cl ₂ /l	0,5 mg Cl ₂ /l	2,0 mg Cl ₂ /l	4,0 mg Cl ₂ /l	0,5 mg Cl ₂ /l	2,0 mg Cl ₂ /l	4,0 mg Cl ₂ /l
Legionella	CFU/100 ml	0	0	not tested		not tested			not tested		
Total Coliform Bacteria	CFU/100 ml	>80	>80	65	25	>80	33	0	>80	0	0
<i>Escherichia coli</i> Count	CFU/100 ml	>80	>80	0	0	>80	0	0	>80	0	0
Fecal Enterococci Count	CFU/100 ml	>80	>80	>80	0	>80	>80	0	>80	0	0
<i>Clostridium Perfringens</i> Count	CFU/100 ml	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total Microorganisms at 22°C / 72 h	CFU/1 ml	>300	>300	221	38	>300	179	18	>300	20	14
Total Microorganisms at 36°C / 48 h	CFU/1 ml	>300	>300	>300	28	>300	>300	23	52	12	16

Tabela 9. Seria (ii) – inaktywacja mikroorganizmów poprzez chlorowanie

Microbial Water Quality Indicator	Unit	"Czajka" WWTP Effluent (SF Pre-Treated)	Contact Time: 10 min				Contact Time: 20 min			
			0,5 mg Cl ₂ /l	1,0 mg Cl ₂ /l	2,0 mg Cl ₂ /l	4,0 mg Cl ₂ /l	0,5 mg Cl ₂ /l	1,0 mg Cl ₂ /l	2,0 mg Cl ₂ /l	4,0 mg Cl ₂ /l
Legionella	CFU/100 ml	not tested	not tested				not tested			
Total Coliform Bacteria	CFU/100 ml	>80	>80	>80	>80	>80	>80	>80	>80	>80
Escherichia coli Count	CFU/100 ml	>80	>80	>80	>80	>80	>80	>80	>80	16
Fecal Enterococci Count	CFU/100 ml	>80	>80	>80	>80	>80	>80	>80	>80	>80
Clostridium perfringens Count	CFU/100 ml	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total Microorganisms at 22°C / 72 h	CFU/1 ml	1370	1640	390	820	1070	830	710	1450	31
Total Microorganisms at 36°C / 48 h	CFU/1 ml	2430	2080	10600	1470	2020	12000	1220	1960	132

Pod względem fizykochemicznej jakości wody zaobserwowano wyraźne różnice między serią (i) a serią (ii), które odzwierciedlają nie tylko wpływ dezynfekcji, ale także różnice w początkowej jakości ścieków i metodzie wstępnego oczyszczania. Ścieki w serii (i) (poddane wstępnej obróbce IEX) wykazywały znacznie niższe wartości barwy, mętności i ChZT dla wszystkich dawek chloru i czasów kontaktu, co wskazuje na lepszą jakość wyjściową i skuteczniejsze usuwanie substancji organicznych. Natomiast ścieki w serii (ii) (poddane wstępnej obróbce SF) wykazywały znacznie wyższe stężenia barwy (do 93 mg Pt/l) i ChZT (do 34,3 mg/l bez tiosiarczanu sodu), a po chlorowaniu nastąpiło jedynie umiarkowane obniżenie tych parametrów. Wartości przewodności były również konsekwentnie wyższe w serii (i), prawdopodobnie z powodu efektów wymiany jonowej. Poziomy chloru resztkowego były ogólnie wyższe w serii (i), co sugeruje większą stabilność chloru, co mogło przyczynić się do zaobserwowanej poprawy inaktywacji mikroorganizmów. Różnice te podkreślają łączny wpływ wstępnego oczyszczania i podstawowych właściwości ścieków na skuteczność dezynfekcji i ogólną jakość wody. W tabelach 10 i 11 przedstawiono wyniki analizy fizykochemicznej przeprowadzonej na próbkach z serii (i) i (ii).

Tabela 10. Seria (i) – wyniki analizy fizykochemicznej

Physico-Chemical Water Quality Indicator	Unit	"Południe" WWTP Effluent (IEX Pre-Treated)	Contact Time: 5 min			Contact Time: 15 min			Contact Time: 30 min		
			0.5 mg Cl ₂ /l	2.0 mg Cl ₂ /l	4.0 mg Cl ₂ /l	0.5 mg Cl ₂ /l	2.0 mg Cl ₂ /l	4.0 mg Cl ₂ /l	0.5 mg Cl ₂ /l	2.0 mg Cl ₂ /l	4.0 mg Cl ₂ /l
Temperature	°C	18.4	18,6	18,4	18,6	18,8	18,6	18,7	19,3	19,1	19
pH	-	7.33	7,42	7,34	7,41	7,37	7,26	7,38	7,17	7,21	7,23
Conductivity	µS/cm	644	682	709	747	680	707	744	675	702	735
Color	mg Pt/l	19	20	17	13	17	16	16	17	17	13
Turbidity	NTU	0,8	0.9	0.87	0.84	0.84	0.92	0.83	0.87	0.85	0.82
COD	mg/l	14.4	14.7	13	14.1	15.1	14.9	16.4	26.3	14.4	18
Total Chlorine	mg/l	-	0.24	1.45	2.37	0.27	1.36	2.49	0.22	1.34	2.36
Residual Chlorine	mg/l	-	0.16	1.1	1.62	0.06	0.99	1.26	0.07	0.94	1.3

Tabela 11. Seria (ii) – wyniki analizy fizykochemicznej

Physico-Chemical Water Quality Indicator	Unit	"Czajka" WWTP Effluent (SF Pre-Treated)	Contact Time: 10 min				Contact Time: 20 min			
			0.5 mg Cl ₂ /l	1.0 mg Cl ₂ /l	2.0 mg Cl ₂ /l	4.0 mg Cl ₂ /l	0.5 mg Cl ₂ /l	1.0 mg Cl ₂ /l	2.0 mg Cl ₂ /l	4.0 mg Cl ₂ /l
Temperature	°C	16.4	16.6	15.8	15.6	16.1	16.5	16.3	16,5	16,8
pH	-	7,48	7.55	7.69	7.77	7.79	7.55	7.61	7,51	7,68
Conductivity	μS/cm	382	381	387	403	401	391	383	400	412
Color	mg Pt/l	93	91	94	93	86	97	93	91	90
Turbidity	NTU	0.91	0.94	0.94	0.93	0.92	0.94	0.96	0,96	0,98
UV254	cm-1	0.416	0.422	0.418	0.418	0.413	0.416	0.409	0,409	0,411
COD (no sodium thiosulfate)	mg/l	34.3	32.4	31.5	26.5	25.7	31	27.2	2.7	26.6
COD (with sodium thiosulfate)		-	40	31.9	31.5	31.3	28.3	32.8	25.2	31.2
Total Chlorine	mg/l	-	0.3	0.57	1.16	2.34	0.37	0.62	1.18	2.11
Residual Chlorine	mg/l	-	0.27	0.44	0.55	1.59	0.18	0.32	0,7	1.56
BOD ₅	mg/l	3.2	13.8	not tested		7.2	3.6	not tested		2.5

Ozonowanie

Wyniki ozonowania wykazały znaczną inaktywację mikroorganizmów zarówno w serii (i), jak i (ii), przy czym we wszystkich wskaźnikach zaobserwowano poprawę zależną od dawki. W serii (i) (ścieki poddane wstępnej obróbce IEX) całkowite usunięcie *Escherichia coli*, enterokoków kałowych i bakterii z grupy coli osiągnięto przy stężeniu 83,33 mg O₃/l i 125,00 mg O₃/l. Ponadto bakterie *Legionella* i *Clostridium perfringens* były niewykrywalne w stanie wyjściowym i pozostały niewykrywalne po obróbce. Całkowita liczba mikroorganizmów w temperaturze 22°C i 36°C znacznie spadła, z >300 CFU/ml do zaledwie 10–12 CFU/ml. W serii (ii) (ścieki poddane wstępnej obróbce SF) ozonowanie również skutecznie zmniejszyło obciążenie mikrobiologiczne, jednak zaobserwowano wyższe stężenia początkowe i większą zmienność. Podczas gdy *E. coli* i bakterie z grupy coli zostały całkowicie unieszkodliwione przy dawkach ≥50 mg O₃/l, enterokoki kałowe wykazały większą odporność, utrzymując się na niskim poziomie przy wielu dawkach i natężeniach przepływu. Całkowita liczba mikroorganizmów w serii (ii) pozostała ogólnie wyższa, szczególnie przy niższych dawkach ozonu, a redukcja stała się bardziej skuteczna przy 75–125 mg O₃/l.

Tabela 12. Seria (i) i (ii) – wyniki inaktywacji mikroorganizmów osiągnięte dzięki ozonowaniu

Microbial Water Quality Indicator	Unit	"Południe" WWTP Effluent (IEX Pre-Treated)	Flow Rate: 3 l/min	Flow Rate: 8 l/min	"Czajka" WWTP Effluent (SF Pre-Treated)	Flow Rate: 3 l/min				Flow Rate: 8 l/min			
			Dose: 83.33 mg O ₃ /l	Dose: 125.0 mg O ₃ /l		Dose: 16.67 mg O ₃ /l	Dose: 33.33 mg O ₃ /l	Dose: 50.00 mg O ₃ /l	Dose: 83.33 mg O ₃ /l	Dose: 25.00 mg O ₃ /l	Dose: 50.00 mg O ₃ /l	Dose: 75.00 mg O ₃ /l	Dose: 125.00 mg O ₃ /l
Legionella	CFU/100 ml	0	0	nb	not tested	not tested				not tested			
Total Coliform Bacteria	CFU/100 ml	>80	23	0	>80	63	2	0	0	4	1	9	0
<i>Escherichia coli</i> Count	CFU/100 ml	>80	0	0	>80	7	0	0	0	0	0	0	0
Fecal Enterococci Count	CFU/100 ml	>80	0	0	>80	13	>80	>80	0	0	0	0	0
<i>Clostridium perfringens</i> Count	CFU/100 ml	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total Microorganisms at 22°C / 72 h	CFU/1 ml	>300	21	10	1370	530	6	10	28	17	8	16	33
Total Microorganisms at 36°C / 48 h	CFU/1 ml	>300	27	12	2430	68	13	16	41	51	14	8	43

Wyniki te ponownie podkreślają rolę wstępnego oczyszczania i początkowej jakości ścieków w wynikach dezynfekcji. Ścieki poddane obróbce IEX w serii (i) wykazywały lepszą jakość wyjściową i reagowały bardziej jednolicie na ozonowanie. Natomiast ścieki poddane obróbce SF w serii (ii) wymagały wyższych dawek ozonu, aby osiągnąć porównywalne zmniejszenie, szczególnie w przypadku bardziej odpornych grup mikroorganizmów. Tabela 12 przedstawia wyniki inaktywacji mikroorganizmów osiągnięte dzięki ozonowaniu.

Parametry fizykochemiczne jakości wody po ozonowaniu wykazały wyraźne różnice między seriami (i) i (ii), ponownie odzwierciedlając zarówno efekty oczyszczania, jak i podstawowe właściwości ścieków. W serii (i) ścieki poddane wstępnej obróbce IEX wykazały dramatyczny wzrost barwy i mętności przy pomiarze bez tiosiarczanu sodu – prawdopodobnie z powodu produktów ubocznych reakcji – podczas gdy próbki z tiosiarczanem wykazały znacznie niższe wartości, potwierdzając utleniające działanie resztek ozonu. Na przykład barwa wzrosła z 19 do 432 mg Pt/l bez tiosiarczanu, ale spadła do 59 mg Pt/l po zneutralizowaniu. Podobne wzorce zaobserwowano w przypadku mętności i przewodności. Wartości ChZT wzrosły znacznie po obróbce w próbkach niepoddanych obróbce (z 14,4 do 114 mg/l), ale pozostały znacznie niższe w próbkach zneutralizowanych, co wskazuje, że produkty uboczne ozonu zakłócają odczyty ChZT, chyba że zostaną wygaszone.

Natomiast seria (ii), w której wykorzystano ścieki poddane wstępnej obróbce SF, wykazała bardziej spójne zmniejszenie wszystkich parametrów. Barwa zmniejszyła się z 93 do zaledwie 8 mg Pt/l, a mętność spadła z 0,91 do 0,46 NTU wraz ze wzrostem dawek ozonu. ChZT również stopniowo spadał, a najniższą wartość (8,25 mg/l) zaobserwowano przy 83,33 mg O₃/l (3 l/min). Jednak wartości ChZT w próbkach poddanych działaniu tiosiarczanu czasami wzrastały przy wyższych dawkach ozonu, prawdopodobnie z powodu tworzenia się częściowo utlenionych produktów pośrednich.

Ogólnie rzecz biorąc, seria (i) wykazała bardziej złożoną reakcję na ozonowanie, ze znacznymi różnicami między pomiarami po schłodzeniu i bez schładzania, podczas gdy seria (ii) wykazała wyraźniejsze tendencje w zakresie usuwania zanieczyszczeń. Wyniki te podkreślają znaczenie prawidłowego postępowania z próbkami podczas oceny procesów utleniania i sugerują, że filtracja piaskowa może dawać bardziej przewidywalne wyniki w połączeniu z ozonowaniem, choć zaczyna się od niższej jakości ścieków. W tabelach 13 i 14 przedstawiono wyniki analizy fizykochemicznej wykonanej na próbkach z serii (i) i (ii).

Tabela 13. Seria (i) – wyniki analizy fizykochemicznej

Physico-Chemical Water Quality Indicator	Unit	"Południe" WWTP Effluent (IEX Pre-Treated)	Flow Rate: 3 l/min	Flow Rate: 8 l/min
			Dose: 83.33 mg O ₃ /l	Dose: 125.00 mg O ₃ /l
Temperature	°C	18.4	18.7	18.7
pH (no sodium thiosulfate)	-	7.33	7.57	7.69
pH (with sodium thiosulfate)		-	7.72	7.85
Conductivity (no sodium thiosulfate)	μS/cm	644	664	663
Conductivity (with sodium thiosulfate)		-	750	725
Color (no sodium thiosulfate)	mg Pt/l	19	432	367
Color (with sodium thiosulfate)		-	59	37
Turbidity (no sodium thiosulfate)	NTU	0.8	7.43	1.39
Turbidity (with sodium thiosulfate)		-	6.31	1.1
COD	mg/l	14.4	114	79.6
Residual Ozone	mg/l	-	2.03	3.05

Tabela 13. Seria (ii) – wyniki analizy fizykochemicznej

Physico-Chemical Water Quality Indicator	Unit	"Czajka" WWTP Effluent (SF Pre-Treated)	Flow Rate: 3 l/min				Flow Rate: 8 l/min			
			Dose: 16.67 mg O ₃ /l	Dose: 33.33 mg O ₃ /l	Dose: 50.00 mg O ₃ /l	Dose: 83.33 mg O ₃ /l	Dose: 25.00 mg O ₃ /l	Dose: 50.00 mg O ₃ /l	Dose: 75.00 mg O ₃ /l	Dose: 125.00 mg O ₃ /l
Temperature	°C	16.4	16.4	16.6	16.3	17.1	16.9	17.5	17.6	17.8
pH	-	7.48	7.84	7.72	7.83	7.64	8.22	8.22	8.13	7.98
Conductivity	µS/cm	382	402	408	407	409	413	415	414	414
Color	mg Pt/l	93	37	19	16	8	22	17	14	10
Turbidity	NTU	0.91	0.9	0.72	0.6	0.49	0.7	0.58	0.5	0.46
UV ₂₅₄	cm-1	0.416	0.333	0.272	0.262	0.239	0.296	0.269	0.254	0.242
COD (no sodium thiosulfate)	mg/l	34.3	37	24.9	24.4	8.25	24.3	23.8	21.6	18.3
COD (with sodium thiosulfate)		-	31.4	37.7	50.6	93.7	28.8	32.9	43.6	75.2
Residual Ozone	mg/l	-								
BOD ₅	mg/l	3.2	2	not tested		23.4	0	not tested		14.8

Promieniowanie UV

Testy dezynfekcji promieniowaniem UV wykazały wyraźne różnice w inaktywacji mikroorganizmów między serią (i) a serią (ii), odzwierciedlające zarówno zastosowaną dawkę promieniowania UV, jak i początkową jakość ścieków. W serii (i), w której ścieki z oczyszczalni „Południe” zostały wstępnie oczyszczone metodą wymiany jonowej, całkowita inaktywacja wszystkich badanych wskaźników mikrobiologicznych została osiągnięta przy użyciu dawki promieniowania UV wynoszącej 505 mJ/cm², w tym *E. coli*, bakterii z grupy coli i enterokoków. Całkowita liczba mikroorganizmów została zmniejszona z >300 CFU/ml do 6 CFU/ml w temperaturze 22°C i 0 CFU/ml w temperaturze 36°C, co wskazuje na wysoką skuteczność dezynfekcji nawet bez zastosowania promieniowania UV.

Natomiast w serii (ii), w której wykorzystano wstępnie oczyszczone ścieki z oczyszczalni ścieków „Czajka”, wykazano częściową redukcję mikroorganizmów przy wszystkich badanych dawkach promieniowania UV. Chociaż we wszystkich przypadkach nie stwierdzono obecności *Clostridium perfringens*, *E. coli* i bakterie z grupy coli pozostawały wykrywalne przy wszystkich dawkach, a liczba *E. coli* wynosiła od 41 do 44 CFU/100 ml. Enterokoki kałowe nie uległy redukcji i utrzymywały się przez cały czas, co sugeruje odporność lub efekt osłony. Całkowita liczba mikroorganizmów zmniejszała się stopniowo wraz ze wzrostem dawek promieniowania UV, ale pozostawała znacznie wyższa niż w serii (i), wynosząc 720 KOB/ml w temperaturze 22°C i 179 KOB/ml w temperaturze 36°C, nawet przy najniższej dawce (279 mJ/cm²).

Wyniki te podkreślają doskonałą jakość mikrobiologiczną i podatność na oczyszczanie ścieków poddanych obróbce IEX w serii (i), a jednocześnie wskazują na ograniczoną, ale zależną od dawki skuteczność dezynfekcji promieniowaniem UV w oczyszczaniu ścieków o większym obciążeniu, poddanych wstępnej obróbce SF w serii (ii). Tabela 15 przedstawia wyniki inaktywacji mikroorganizmów osiągnięte dzięki naświetlaniu promieniowaniem UV.

Tabela 15. Seria (i) i (ii) – wyniki inaktywacji mikroorganizmów osiągnięte dzięki naświetlaniu promieniami UV

Microbial Water Quality Indicator	Unit	"Południe" WWTP Effluent (IEX Pre-Treated)	UV dose: 505 mJ/cm ²	"Czajka" WWTP Effluent (SF Pre-Treated)	UV Dose:		
					484 mJ/cm ²	312 mJ/cm ²	279 mJ/cm ²
Legionella	CFU/100 ml	0	not tested	not tested	not tested		
Total Coliform Bacteria	CFU/100 ml	>80	0	>80	78	>80	51
<i>Escherichia coli</i> Count	CFU/100 ml	>80	0	>80	41	>80	44
Fecal Enterococci Count	CFU/100 ml	>80	0	>80	>80	>80	>80
<i>Clostridium perfringens</i> Count	CFU/100 ml	0	0	0	0	0	0
Total Microorganisms at 22°C / 72 h	CFU/1 ml	>300	6	1370	430	208	720
Total Microorganisms at 36°C / 48 h	CFU/1 ml	>300	0	2430	105	82	179

Dane fizykochemiczne uzyskane w wyniku eksperymentów dotyczących dezynfekcji promieniami UV dodatkowo podkreślają kontrast między serią (i) a serią (ii). W serii (i), w której ścieki z oczyszczalni „Południe” zostały poddane wstępnej obróbce jonowymiennej, zmiany po podaniu dawki promieniowania UV wynoszącej 505 mJ/cm² były minimalne. Kluczowe parametry, takie jak pH, mętność i barwa, pozostały stosunkowo stabilne, a ChZT nieznacznie spadł z 14,4 do 13,7 mg/l, co wskazuje, że samo mieszanie miało niewielki wpływ na jakość wody, ale nie wpłynęło negatywnie na stabilność ścieków.

W serii (ii), w której wykorzystano ścieki z oczyszczalni „Czajka” poddane wstępnej obróbce SF, ekspozycja na promieniowanie UV dała bardziej zróżnicowane wyniki. Wartości pH i temperatura pozostały stabilne dla wszystkich dawek, natomiast przewodność nieznacznie spadła przy najwyższej dawce promieniowania UV (484 mJ/cm²), co potencjalnie odzwierciedlało pewien stopień degradacji substancji organicznych. Mętność uległa znacznej poprawie przy dwóch niższych dawkach, spadając z 0,91 NTU do 0,55 NTU przy 279 mJ/cm². Absorbancja UV₂₅₄ wykazała umiarkowany spadek, co wskazuje na częściowy rozkład związków organicznych. Jednak wartości ChZT nie zmniejszyły się w sposób stały; podczas gdy przy 484 mJ/cm² zaobserwowano znaczne zmniejszenie (z 34,3 do 14,4 mg/l), wartości przy niższych dawkach były wyższe (25,4–30 mg/l), co sugeruje niepełne utlenienie. Co ciekawe, BOD₅ spadło do 0 mg/l przy najwyższej dawce i pozostało na niskim poziomie 2,8 mg/l przy 279 mJ/cm²,

Wyniki te sugerują, że chociaż dezynfekcja promieniami UV może prowadzić do częściowej poprawy jakości wody – zwłaszcza pod względem zmętnienia i absorbancji UV₂₅₄ – jej skuteczność w zmniejszaniu obciążenia organicznego może być zależna od dawki i ograniczona bez dodatkowych etapów oczyszczania. Seria (i) pozostawała ogólnie bardziej stabilna, podczas gdy seria (ii) wykazywała większą zmienność i mniej przewidywalne wyniki pod wpływem promieniowania UV. Tabele 16 i 17 przedstawiają wyniki analizy fizykochemicznej przeprowadzonej na próbkach z serii (i) i (ii).

Tabela 16. Seria (i) – wyniki analizy fizykochemicznej

Physico-Chemical Water Quality Indicator	Unit	"Południe" WWTP Effluent (IEX Pre-Treated)	UV dose: 505 mJ/cm ²
Temperature	°C	18.4	18.4
pH	-	7.33	7.48
Conductivity	µS/cm	644	664
Color	mg Pt/l	19	23
Turbidity	NTU	0.8	0.94
COD	mg/l	14.4	13.7

Tabela 17. Seria (ii) – wyniki analizy fizykochemicznej

Physico-Chemical Water Quality Indicator	Unit	"Czajka" WWTP Effluent (SF Pre-Treated)	UV Dose:		
			484 [mJ/cm ²]	312 [mJ/cm ²]	279 [mJ/cm ²]
Temperature	°C	16.4	17.7	17.6	17.8
pH	-	7.48	7.54	7.5	7.52
Conductivity	μS/cm	382	348	372	377
Color	mg Pt/l	93	100	99	97
Turbidity	NTU	0.91	1.23	0.66	0.55
UV ₂₅₄	cm ⁻¹	0.416	0.334	0.391	0.4
COD	mg/l	34.3	14.4	25.4	30
BOD ₅	mg/l	3.2	0	not tested	2.8

5.2.3 Dezynfekcja jako element systemu odzyskiwania wody

Eksperymenty pilotażowe przeprowadzono w dwóch etapach:

- **Etap I – wstępne oczyszczanie** – badania miały na celu ocenę skuteczności procesów filtracji tkaninowej (FT) i wymiany jonowej (IER) jako trzeciego etapu oczyszczania ścieków.
- **Etap II – dezynfekcja** – badania miały na celu ocenę skuteczności procesu dezynfekcji ozonem.

ETAP I – WSTĘPNE OCZYSZCZANIE

W pierwszym etapie eksperymenty przeprowadzono na dwóch niezależnych instalacjach zasilanych tym samym strumieniem ścieków oczyszczonych po procesie mechaniczno-biologicznym o podwyższonym stopniu usuwania składników odżywczych. Jakość ścieków odprowadzanych do instalacji spełniała wymagania rozporządzenia Ministra Gospodarki i Żeglugi Śródlądowej z dnia 12 lipca 2019 r. (Dz. U. z 2019 r., poz. 1311) dla oczyszczalni ścieków o równoważnej liczbie mieszkańców powyżej 100 000. Skuteczność obu technologii oceniono na podstawie następujących wskaźników: mętność, całkowita zawartość zawiesin (TSS), całkowita zawartość węgla organicznego (TOC), chemiczne zapotrzebowanie tlenu (COD), całkowita zawartość fosforu (TP) i całkowita zawartość azotu (TN) w próbkach przed i po procesie. **Głównym wymogiem badania było osiągnięcie stabilnej pracy oczyszczalni oraz jakości ścieków wyrażonej wskaźnikiem mętności nieprzekraczającym 1,0 NTU.**

Filtracja tkaninowa

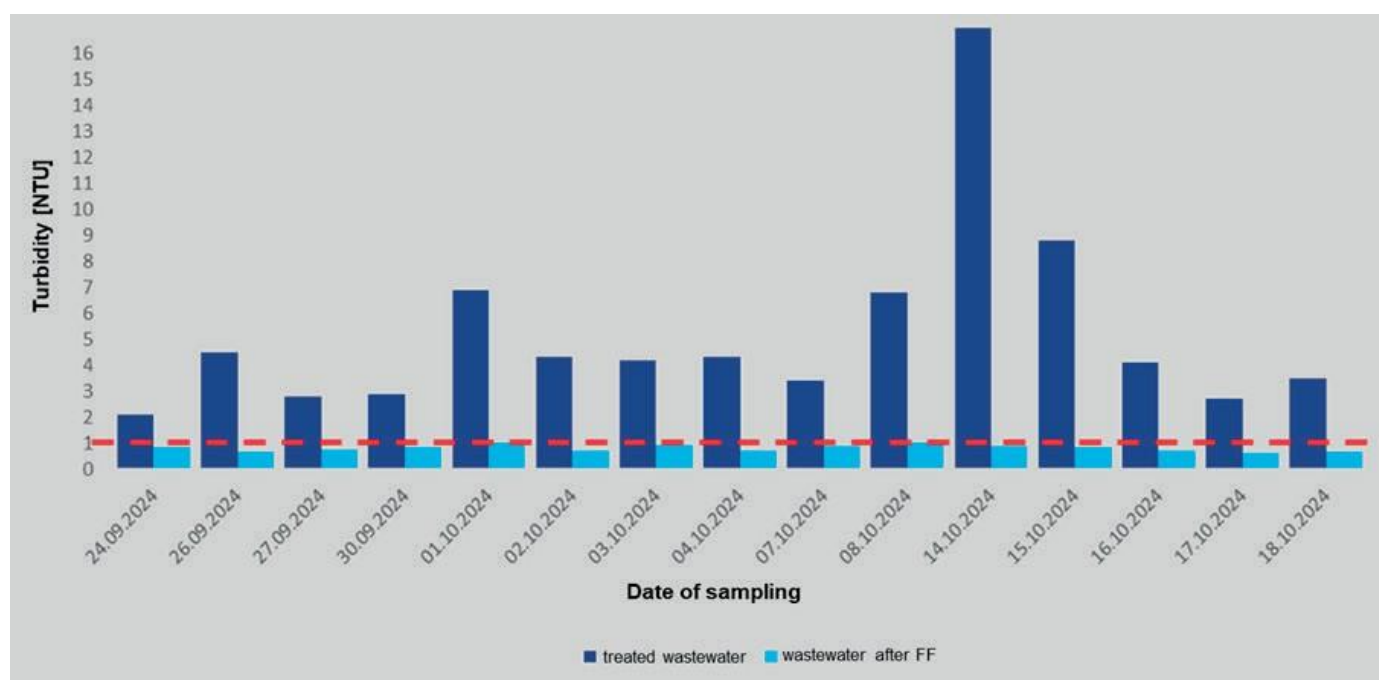
Pierwszym analizowanym systemem były filtry tkaninowe, które dzięki zastosowaniu specjalnych rodzajów tkanin łączą cechy i zalety zarówno filtracji powierzchniowej, jak i objętościowej, co pozwala na bardzo wysoki stopień usuwania cząstek stałych. Ścieki były podawane grawitacyjnie do stalowej komory filtracyjnej z bębniem pokrytym tkaniną filtracyjną o powierzchni 2 m². Zawieszone cząstki stałe i cząsteczki były usuwane ze ścieków podczas filtracji przez tkaninę. Przefiltrowane ścieki wpływały do bębna, skąd były odprowadzane przez komorę wylotową i przelew do zbiornika retencyjnego. Tkanina filtracyjna była czyszczona automatycznie w określonych odstępach czasu, a proces filtracji nie był przerywany podczas cyklu czyszczenia tkaniny. System działał z wydajnością 5-8 m³/h.

Charakterystykę ścieków przed i po procesie filtracji tkaninowej przedstawiono w tabeli 18. Ponadto na rys. 24 przedstawiono wartości zmętnienia ścieków przed i po procesie filtracji tkaninowej.

Tabela 18. Charakterystyka ścieków przed i po procesie filtracji tkaninowej

Date	TSS [mg/l]			TOC [mg/l]			COD [mgO ₂ /l]			TP [mg/l]			TN [mg/l]		
	TW	FF	%R	TW	FF	%R	TW	FF	%R	TW	FF	%R	TW	FF	%R
23/24.09.24	6	2.5	58.3	9.7	9.8	-1.0	25.7	25.7	0.0	0.458	0.329	28.2	3.2	2.5	21.9
25/26.09.24	280	3.8	98.6	13	11	15.4	274	31.5	88.5	9.73	0.611	93.7	13	2.4	81.5
26/27.09.24	9,5	3.7	61.1	12	11	8.3	33.5	27	19.4	0.673	0.407	39.5	4.1	2.7	34.1
29/30.09.24	6	3.2	46.7	12	12	0.0	26.9	26.9	0.0	0.562	0.47	16.4	2.7	2.4	11.1
30/01.10.24	6.2	2.6	58.1	9.9	9.9	0.0	25	22.9	8.4	0.577	0.393	31.9	2.7	2.3	14.8
01/02.10.24	6.2	5.2	16.1	11	9.3	15.5	25.9	25.9	0.0	0.569	0.399	29.9	3	2.4	20
02/03.10.24	5.6	3.2	42.9	11	12	-9.1	26.5	26.7	-0.8	0.568	0.393	30.8	2.9	2.5	13.8
03/04.10.24	4.7	2	57.4	10	9.9	1.0	25.9	24.7	4.6	0.472	0.331	29.9	3.3	2.6	21.2
06/07.10.24	8.2	3	63.4	12	12	0.0	27.1	25.6	5.5	0.591	0.423	28.4	2.9	1.9	34.5
07/08.10.24	25	6	76.0	11	10	9.1	31.5	22.6	28.3	1.12	0.513	54.2	2.7	1.7	37.0
13/14.10.24	1100	6	99.5	150	14	90.7	1340	37	97.2	45.5	0.761	98.3	53	2.3	95.7
14/15.10.24	130	5.1	96.1	14	10	28.6	197	25.3	87.2	5.38	0.571	89.4	6.4	2.3	64.1
15/16.10.24	25	2.2	91.2	11	10	9.1	30.8	23.6	23.4	0.605	0.393	35.0	3.9	3	23.1
16/17.10.24	26	5.6	78.5	13	11	15.4	30.1	24.7	17.9	0.538	0.335	37.7	5.7	3.9	31.6
17/18.10.24	10	3.2	68.0	11	10	9.1	27.7	25.3	8.7	0.44	0.311	29.3	5.2	4.5	13.5
Average	67.5			12.8			25.9			44.8			34.5		

Description: TW – Treated wastewater; FF – fabric filtration; %R – reduction rate; TSS – total suspended solids; TOC – total organic carbon; COD – chemical oxygen demand; TP – total phosphorus; TN – total nitrogen.



Rysunek 24. Wartości zmętnienia przed i po procesie filtracji tkaninowej

Testy wykazały, że pilotażowa instalacja jest niezwykle skuteczna w usuwaniu zanieczyszczeń ze ścieków. Dzięki technologii filtracji tkaninowej instalacja nie tylko osiągnęła cele w zakresie redukcji zanieczyszczeń, ale także zapewniła płynne i stabilne działanie. Parametry jakościowe ścieków po trzecim etapie filtracji pozostały na poziomach nieprzekraczających dopuszczalnych wartości, nawet w przypadku znacznego przekroczenia parametrów w oczyszczonych ściekach odprowadzanych z oczyszczalni ścieków, która służyła również jako medium zasilające dla instalacji pilotażowej (tabela 18). Świadczy to o zdolności systemu do dostosowywania się do zmieniających się warunków pracy, w tym do przyjmowania znacznych ładunków zanieczyszczeń w ściekach wpływających do urządzenia. Efekt osiągnięty dzięki zastosowaniu filtracji tkaninowej ma kluczowe znaczenie dla utrzymania prawidłowego działania całej oczyszczalni. Uzyskane wyniki potwierdzają wysoką skuteczność systemu w zakresie usuwania zmętnienia, która w analizowanym przypadku wyniosła średnio 80% (rys. 24). Średnia wartość tego wskaźnika w oczyszczonych ściekach wyniosła 5,20 NTU, natomiast po filtracji przez filtr tkaninowy wyniosła średnio 0,80 NTU. W przypadku usuwania innych zanieczyszczeń zaobserwowano nieco niższą skuteczność, wynoszącą odpowiednio 67,5%, 12,8%, 25,9%, 44,8% i 34,5% dla TSS, TOC, ChZT, TP i TN.

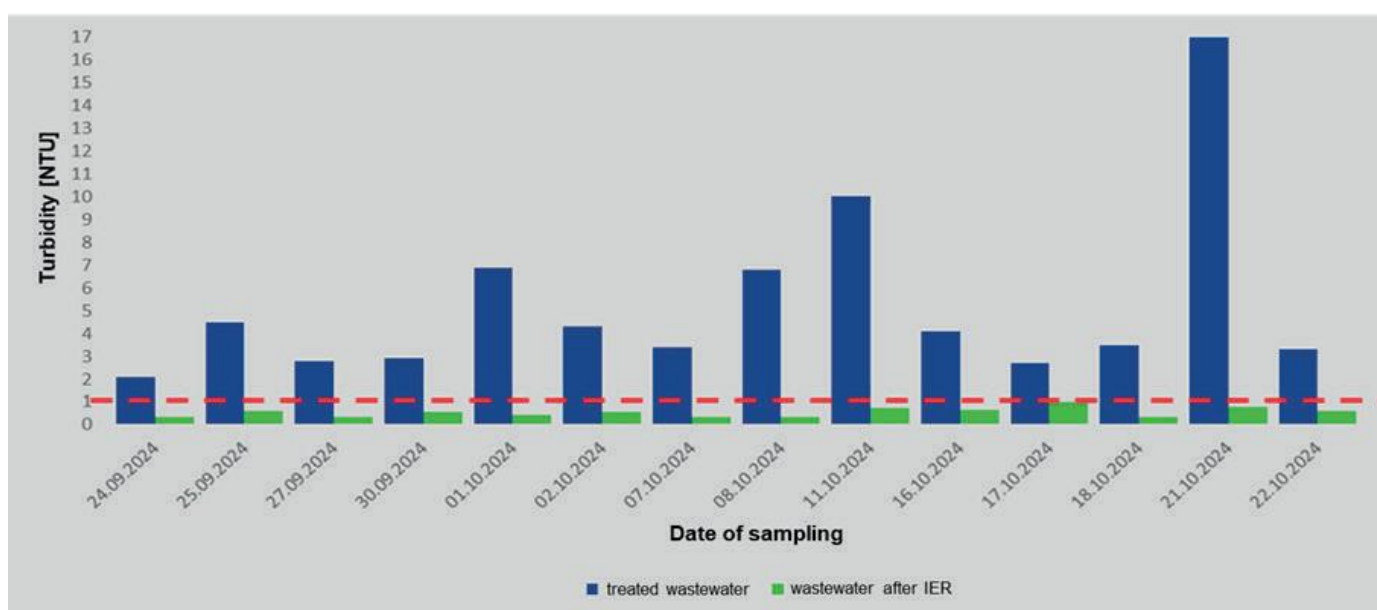
Żywice jonowymienne

Drugim analizowanym systemem była instalacja łącząca kilka rodzajów technologii, takich jak adsorpcja, filtracja mechaniczna i filtracja jonowymienne. Filtracja odbywa się w siedmiu kolumnach, podzielonych na dwa równoległe strumienie. Każda z kolumn jest sterowana przez mikroprocesorowy sterownik z wyświetlaczem. Kolumny 1A i 1B odfiltrowują zanieczyszczenia mechaniczne. Kolumny 2A i 2B redukują zanieczyszczenia organiczne, zmętnienie, barwę i zapach. Kolumny 3A i 3B redukują fosfor i azot. Kolumna 4 służy do dalszego zmniejszenia mętności poprzez filtrację mechaniczną. Kolumny są wypełnione różnymi mediami filtracyjnymi: żwirem, węglem aktywnym, żywicami jonowymi, złożem zeolitowym. System jest zasilany pompą o mocy 1 kW. Do systemu dozowane są trzy odczynniki, które wchodzi w kontakt z medium w zbiorniku reakcyjnym. Odczynniki te mają na celu wytrącenie niektórych zanieczyszczeń i wspomaganie procesu filtracji w kolumnach filtracyjnych. System działa z wydajnością 1 m³/h.

Charakterystykę ścieków przed i po procesie filtracji jonowymiennej przedstawiono w tabeli 19. Ponadto na rys. 25 przedstawiono wartości zmętnienia ścieków przed i po procesie filtracji jonowymiennej.

Tabela 19. Charakterystyka ścieków przed i po procesie filtracji jonowymiennej

Date	TSS [mg/l]			TOC [mg/l]			COD [mgO ₂ /l]			TP [mg/l]			TN [mg/l]		
	TW	IER	%R	TW	IER	%R	TW	IER	%R	TW	IER	%R	TW	IER	%R
23/24.09.24	6	2	66.7	9.7	5.5	43.3	26	14	44.7	0.46	0.07	85.8	3.2	2.9	9.4
24/25.09.24	240	2	99.2	14	6.2	55.7	271	14	94.9	9.09	0.13	98.6	12	2.2	81.7
26/27.09.24	9.5	2.6	72.6	12	6.4	46.7	34	13	60.3	0.67	0.25	63.3	4.1	2.0	51.2
29/30.09.24	6	2	66.7	12	6.7	44.2	27	13	50.6	0.56	0.19	66.2	2.7	2.1	22.2
30/01.10.24	6.2	2	67.7	9.9	6.2	37.4	25	12	50.4	0.58	0.16	72.8	2.7	2.2	18.5
01/02.10.24	6.2	5.7	8.1	11	6.1	44.5	26	13	49.8	0.57	0.16	71.5	3.0	2.3	23.3
06/07.10.24	8.2	2	75.6	12	6.4	46.7	27	11	60.5	0.59	0.12	80.5	2.9	2.9	0.0
07/08.10.24	25	5	80.0	11	6.1	44.5	32	11	63.8	1.12	0.15	86.5	2.7	1.7	37.0
10/11.10.24	1400	2	99.9	200	6.9	96.6	1340	15	98.9	39.2	0.54	98.6	40	1.5	96.3
15/16.10.24	25	2	92.0	11	8.2	25.5	31	18	42.9	0.61	0.48	20.2	3.9	2.4	38.5
16/17.10.24	26	5.6	78.5	13	11	15.4	30	25	17.9	0.54	0.34	37.7	5.7	3.9	31.6
17/18.10.24	10	2	80.0	11	9.7	11.8	28	19	30.0	0.44	0.19	57.3	5.2	4.1	21.2
20/21.10.24	410	2	99.5	21	8.8	58.1	498	19	96.2	36.8	0.23	99.4	18.0	3.2	82.2
21/22.10.24	28	2	92.9	12	8.9	25.8	36	18	49.9	1.07	0.33	68.9	3.9	2.9	25.6
Average	77.1			42.6			57.9			72.0			38.5		



Rysunek 25. Wartości zmętnienia przed i po procesie filtracji jonowymiennej

Przeprowadzone badania wykazały, że zastosowanie żywic jonowymiennych jako metody trzeciego stopnia oczyszczania ścieków pozwala na obniżenie wszystkich analizowanych wskaźników. Największą redukcję, ponad 86%, odnotowano w przypadku mętności. Średnia wartość tego wskaźnika w oczyszczonych ściekach wynosiła 5,00 NTU, natomiast po filtracji przez system żywic jonowymiennych wynosiła średnio 0,50 NTU (rys. 25). W przypadku usuwania innych zanieczyszczeń zaobserwowano nieco niższą skuteczność, wynoszącą odpowiednio 77,1%, 42,6%, 57,9% i 72% dla TSS, TOC, ChZT i TP (tabela 19). Parametrem, który został zredukowany najmniej skutecznie (tylko 38,5%) przy użyciu tej technologii, był TN, ale wynikało to najprawdopodobniej z faktu, że wartości tego wskaźnika były stosunkowo niskie w oczyszczonych ściekach jeszcze przed zastosowaniem trzeciego etapu oczyszczania ścieków (tabela 19).



Najważniejsze wnioski

- **Obie technologie spełniły obowiązkowy parametr mętności poniżej 1**, co ma kluczowe znaczenie dla zmniejszenia dawek ozonu i kosztów.
- Skuteczność usuwania zmętnienia była bardzo wysoka, ponad 80%, w przypadku obu testowanych technologii.
- **Wybrano technologię żywicy jonowymiennnej**, ponieważ osiągnęła ona większą redukcję zawiesin (77%), fosforu (72%) i związków organicznych (57,9% dla ChZT) w porównaniu z filtrami bębnowymi. **Ponadto technologia żywicy jonowymiennnej wymagała niższych nakładów inwestycyjnych i kosztów eksploatacyjnych.**

ETAP II – DEZYNFEKCJA

Jako metodę dezynfekcji zastosowano ozonowanie przy użyciu urządzenia SPID 300. Urządzenie to działa z wydajnością 20 m³/h i jest w stanie wytworzyć maksymalnie 300 g ozonu na godzinę, co stanowi najwyższą dawkę, jaką może wygenerować blok ozonowy. Jest to kompatybilna stacja kontenerowa, która umożliwia ciągłą pracę procesu.

Jeśli chodzi o wyniki, podczas pracy instalacji natężenie przepływu wahało się od 2 m³/h do 4,8 m³/h. Dawkę ozonu (g/h) dostosowano od 20 g/h do 70 g/h. Zwiększenie dawki wynikało z wyników uzyskanych dla parametrów mikrobiologicznych. Pozostałości ozonu w ściekach wynosiły od 0,16 mg/l do 0,70 mg/l. Czas kontaktu ozonu ze ściekami wahał się od 18 minut do 38 minut.

Tabela 20. Parametry techniczne pracy instalacji

Data	Dawka ozonu	Wydajność	Pozostały ozon	Czas kontaktu ozonu ze ściekami
	[m ³ /h]	[g/h]	[mg/l]	[min]
13.02.2025	4,7	20	0,16	18
18.02.2025	4,8	20	0,23	18
20.02.2025	4,7	30	0,21	18
4.03.2025	4,7	50	0,3	24
18.03.2025	3,5	50	0,41	33
20.03.2025	3,5	50	0,71	33
21.03.2025	3,5	50	0,74	33
25.03.2025	3	50	0,3	38
27.03.2025	3,3	50	0,16	35
1.04.2025	3,5	70	0,61	33
8.04.2025	2	70	0,57	30
10.04.2025	3,5	70	0,68	30

DANE FIZYKOCHEMICZNE

Temperatura

Temperatury na wlocie wahają się od 14,6°C do 17,2°C, a średnia wynosi 16,0°C. Wartości temperatury dla uzdatniania na wlocie wykazują stały wzrost w czasie, a najwyższa temperatura została odnotowana 1 kwietnia. Średnia temperatura wynosi 16,0°C, co wskazuje na stosunkowo stabilny zakres temperatur. Temperatury po wymianie jonowej wahają się od 14,4°C do 17,1°C, a średnia wynosi 15,6°C. Obróbka wymianą jonową wykazuje podobną tendencję, a temperatury wahają się od 14,4°C do 17,1°C. Średnia temperatura jest nieco niższa i wynosi 15,6°C, co sugeruje bardziej kontrolowane środowisko temperaturowe.

Temperatury po procesie ozonowania wynoszą od 14,6°C do 17,7°C, a średnia wynosi 16,4°C. Obróbka ozonem konsekwentnie wykazuje wyższe temperatury w porównaniu z innymi metodami obróbki, ze średnią wynoszącą 16,4°C. Najwyższa zarejestrowana temperatura wynosi 17,7°C, co wskazuje, że proces ozonowania może przyczyniać się do wyższych poziomów temperatury.

Dane dotyczące temperatury wskazują, że proces ozonowania generalnie utrzymuje wyższe temperatury w porównaniu z procesami wlotowymi i wymiany jonowej. Proces wlotowy wykazuje stały wzrost temperatury w czasie, podczas gdy proces wymiany jonowej utrzymuje bardziej kontrolowany zakres temperatur. Proces ozonowania konsekwentnie wykazuje najwyższe temperatury.

pH

Wartości pH na wlocie wynoszą od 7,0 do 7,6. Wartości pH dla wody surowej wykazują stabilny zakres, przy czym większość wartości mieści się w przedziale od 7,2 do 7,6. Średnia wartość pH wynosi 7,4, co wskazuje na środowisko lekko zasadowe.

Wartości pH dla procesu wymiany jonowej mieszczą się w zakresie od 7,1 do 7,5. Proces wymiany jonowej wykazuje stały zakres pH, z wartościami między 7,1 a 7,5. Średnia wartość pH wynosi 7,3.

Wartości pH dla procesu ozonowania mieszczą się w zakresie od 7,3 do 7,8. Proces ozonowania wykazuje stale wyższe wartości pH w porównaniu z innymi procesami, ze średnią wynoszącą 7,5.

Wartości pH wynoszą od 7,3 do 7,8.

Dane dotyczące pH wskazują, że obróbka ozonem generalnie utrzymuje nieco wyższy poziom pH w porównaniu z obróbką na wlocie i wymianą jonową. Obróbka na wlocie wykazuje stabilny zakres pH, podczas gdy obróbka wymianą jonową utrzymuje bardziej neutralne środowisko pH. Obróbka ozonem wykazuje konsekwentnie najwyższe wartości pH, co sugeruje, że proces ozonowania może przyczyniać się do powstania bardziej zasadowego środowiska.

Chemiczne zapotrzebowanie na tlen

Wartości ChZT na wlocie wynoszą od 24,1 mg/l do 58,2 mg/l. Wartości ChZT w wodzie surowej wykazują znaczne wahania, przy czym najwyższa wartość została odnotowana 20 lutego, a najniższa 8 kwietnia. Średnia wartość ChZT wynosi 35,5 mg/l, co wskazuje na stosunkowo wysoki poziom zanieczyszczeń organicznych w wodzie.

Wartości ChZT dla procesu wymiany jonowej wahają się od 13,1 mg/l do 30,5 mg/l, a średnia wynosi 21,1 mg/l. Proces wymiany jonowej charakteryzuje się bardziej kontrolowanym zakresem wartości ChZT, przy czym najwyższa wartość została odnotowana 18 lutego, a najniższa 20 marca. Średnia wartość ChZT wynosi 21,1 mg/l, co sugeruje skuteczniejsze zmniejszenie ilości zanieczyszczeń organicznych w porównaniu z oczyszczaniem na wlocie.

Wartości ChZT dla ozonu wahają się od 11,4 mg/l do 29,2 mg/l, przy średniej wynoszącej 18,6 mg/l. Obróbka ozonem konsekwentnie wykazuje niższe wartości ChZT w porównaniu z obróbką na wlocie i wymianą jonową, przy czym najwyższa wartość została odnotowana 18 lutego, a najniższa 20 marca. Średnia wartość ChZT wynosi 18,6 mg/l, co wskazuje na najskuteczniejsze zmniejszenie ilości zanieczyszczeń organicznych spośród trzech metod oczyszczania.

Dane dotyczące ChZT wskazują, że woda na wlocie generalnie charakteryzuje się wyższym poziomem zanieczyszczeń organicznych w porównaniu z metodami wymiany jonowej i ozonowania. Metoda obróbki na wlocie wykazuje znaczne wahania wartości ChZT, podczas gdy metoda wymiany jonowej utrzymuje bardziej stabilny i niższy zakres wartości ChZT. Analiza danych dotyczących ChZT wykazuje, że metoda ozonowania jest najskuteczniejsza w redukcji poziomu zanieczyszczeń organicznych w wodzie w porównaniu z metodami wstępnego oczyszczania i wymiany jonowej. Metoda ozonowania utrzymuje stale niższe wartości ChZT, co wskazuje na lepszą jakość wody. Ogólnie rzecz biorąc, wszystkie metody oczyszczania mieszczą się w granicach wartości <125 mg/l, co sugeruje, że są one skuteczne w utrzymywaniu akceptowalnego poziomu ChZT.

Tabela 21. Zmiany wartości temperatury, pH i ChZT

Data	Temperatura [°C]			pH			ChZT [mg/l]		
	Woda surowa	Wymiana jonowa	Ozonowanie	Woda surowa	Wymiana jonowa	Ozonowanie	Woda surowa	Wymiana jonowa	Ozonowanie
13.02.2025	15,5	15,3	15,8	7,3	7,2	7,3	33,4	17,1	12,2
18.02.2025	14,6	14,8	14,6	7,2	7,2	7,5	43,4	30,5	29,2
20.02.2025	15,6	14,4	15,1	7	7,2	7,4	58,2	30,2	26
4.03.2025	15,3	15,2	15,8	7,4	7,3	7,4	29,7	18,9	25,3
18.03.2025	15,8	15,3	16,9	7,2	7,1	7,7	47,5	19,7	15,2
20.03.2025	15,9	15,8	16,2	7,5	7,5	7,7	27,2	13,1	11,4
25.03.2025	16,5	15,8	17,1	7,4	7,3	7,6	32,5	23,6	20,9
27.03.2025	16,7	16,7	17,7	7,6	7,5	7,6	28,3	23,5	18
1.04.2025	17,2	17,1	17,7	7,6	7,3	7,6	34,8	21,8	19,7
8.04.2025	16,6	15,6	17,3	7,5	7,3	7,8	24,1	17,4	13,6
10.04.2025	16,4	15,3	17	7,5	7,2	7,5	31,4	16,1	13,4
Wartość graniczna	<35°C			6,5-9,5			<125 mg/l		

Całkowita zawartość związków organicznych (ang. *Total Organic Compound, TOC*)

Wartości TOC w wodzie surowej znajdują się w przedziale od 9,7 mg/l do 25 mg/l. Wykazują one wahania, przy czym najwyższą wartość odnotowano 20 lutego, a najniższą 8 kwietnia. Średnia wartość ChZT wynosi 13,7 mg/l, co wskazuje na stosunkowo wysoki poziom zanieczyszczeń organicznych w wodzie.

Wartości TOC dla procesu wymiany jonowej wahają się od 7,4 mg/l do 14 mg/l, a średnia wynosi 9,32 mg/l.

Średnia wartość ozonu wynosi 9,38 mg/l, co jest zbliżone do średniej wartości dla procesu wymiany jonowej. Najwyższa wartość ozonu wynosi 14,0 mg/l, a najniższa 6,4 mg/l, co wskazuje na umiarkowaną zmienność danych.

Biochemiczne zapotrzebowanie na tlen (ang. *Biochemical Oxygen Demand, BOD₅*)

Średnia wartość BOD₅ dla wody surowej wynosi 6,9 mg/l, co wskazuje na umiarkowany poziom substancji organicznych wymagających tlenu do rozkładu. Wartości wahają się od 2,6 mg/l do 18,0 mg/l, co wskazuje na znaczną zmienność.

Średnia wartość BOD₅ dla wymiany jonowej wynosi 3,8 mg/l, czyli mniej niż średnia wartość na wlocie. Wartości wahają się od 0,73 mg/l do 11,0 mg/l, co wskazuje na mniejszą zmienność w porównaniu z wlotem.

Średnia wartość BOD₅ dla ozonu wynosi 5,6 mg/l, co jest wartością wyższą od średniej wartości dla wymiany jonowej, ale niższą od wartości na wlocie. Wartości wahają się od 1,5 mg/l do 12,0 mg/l, co wskazuje na umiarkowaną zmienność.

Parametr wody surowej wykazuje średnio wyższe wartości BOD₅ w porównaniu z wymianą jonową i ozonem, co wskazuje, że początkowa nieoczyszczona woda ma wyższy poziom substancji organicznych.

Całkowita zawartość substancji zawieszonych

Średnia wartość TSS na wlocie wynosi 4,2 mg/l, co wskazuje na umiarkowany poziom zawiesin. Wartości wahają się od 1,6 mg/l do 7,0 mg/l, co wskazuje na znaczną zmienność.

Średnia wartość TSS dla wymiany jonowej wynosi 1,4 mg/l, czyli mniej niż średnia wartość wody surowej. Wartości wahają się od 0,2 mg/l do 3,4 mg/l, co wskazuje na mniejszą zmienność w porównaniu z wartościami wlotowymi.

Średnia wartość TSS dla ozonu wynosi 0,3 mg/l, co jest najniższą wartością spośród trzech metod oczyszczania. Wartości wahają się od 0,1 mg/l do 0,6 mg/l, co wskazuje na minimalną zmienność.

Parametr wlotowy wykazuje średnio wyższe wartości TSS w porównaniu z wymianą jonową i ozonem, co wskazuje, że początkowa nieprzetworzona woda ma wyższy poziom zawiesin. Obróbka wymianą jonową skutecznie obniża poziom TSS, przy niższych średnich wartościach i mniejszej zmienności.

Obróbka ozonem wykazuje najniższy poziom TSS, co wskazuje, że jest ona najskuteczniejsza w redukcji zawiesin.

Tabela 22. Zmiany wartości całkowitej zawartości związków organicznych, biochemicznego zapotrzebowania na tlen i całkowitej zawartości zawiesin stałych

Data	TOC [mg/l]			BOD ₅ [mg/l]			TSS [mg/l]		
	Woda surowa	Wymiana jonowa	Ozonowanie	Woda surowa	Wymiana jonowa	Ozonowanie	Woda surowa	Wymiana jonowa	Ozonowanie
13.02.2025	13	7,9	6,4	8	6	4,5	5,7	<2,0	<2,0
18.02.2025	16	12	13	7	6	11	5,4	3,4	<2,0
20.02.2025	25	14	12	18	11	10	6,8	2,3	<2,0
4.03.2025	10	9,1	14	5	3	12	5,2	<2,0	<2,0
18.03.2025	16	7,9	8,4	10	3	3	7	<2,0	<2,0
20.03.2025	11	7,9	7,9	5,5	0,81	2,3	<2,0	<2,0	<2,0
25.03.2025	12	8,9	9,2	7	4,2	7	2	<2,0	<2,0
27.03.2025	10	9,3	8,2	3	4,9	4	2,6	<2,0	<2,0
1.04.2025	12	8,1	8,3	4,3	1,3	3,6	3,4	0,4	0,3
8.04.2025	9,7	7,4	7,2	2,6	1,1	2,5	2	0,2	0,1
10.04.2025	16	10	8,6	6	0,73	1,5	1,6	0,6	0,6
Wartość graniczna	-			<10 mg/l			<10 mg/l		

Mętność

Średnia wartość mętności wody surowej wynosi 3,1 NTU, co wskazuje na umiarkowany poziom zmętnienia.

Wartości wahają się od 1,7 NTU do 5,8 NTU, co wskazuje na znaczną zmienność. Średnia wartość zmętnienia dla wymiany jonowej wynosi 0,9 NTU, czyli mniej niż średnia wartość na wlocie. Wartości wahają się od 0,4 NTU do 2,2 NTU, co wskazuje na mniejszą zmienność w porównaniu z wlotem.

Średnia wartość mętności dla ozonu wynosi 0,6 NTU, co stanowi najniższą wartość spośród trzech metod oczyszczania.

Wartości wahają się od 0,3 NTU do 1,2 NTU, co wskazuje na minimalną zmienność.

Parametr wlotowy wykazuje średnio wyższe wartości mętności w porównaniu z wymianą jonową i ozonowaniem, co wskazuje, że początkowa nieuzdatniona woda ma wyższy poziom zawieszonych cząstek.

Obróbka wymianą jonową skutecznie zmniejsza poziom zmętnienia, charakteryzując się niższymi wartościami średnimi i mniejszą zmiennością. Obróbka ozonem wykazuje najniższy poziom zmętnienia, co wskazuje, że jest ona najskuteczniejsza w redukcji zawieszonych cząstek.

Przewodność elektryczna

Średnia wartość przewodności elektrycznej na wlocie wynosi 1536 mg/l, co wskazuje na umiarkowany poziom przewodności. Wartości wahają się od 1449 mg/l do 1620 mg/l, co wskazuje na znaczną zmienność.

Średnia wartość przewodności elektrycznej dla wymiany jonowej wynosi 1547 mg/l, czyli jest nieco wyższa od średniej wartości wlotowej.

Wartości wahają się od 1452 mg/l do 1625 mg/l, co wskazuje na podobną zmienność w porównaniu z wartością wlotu.

Średnia wartość przewodności elektrycznej dla ozonu wynosi 1546 mg/l, co jest zbliżone do średniej wartości dla wymiany jonowej.

Wartości wahają się od 1450 mg/l do 1612 mg/l, wykazując umiarkowaną zmienność.

Wszystkie trzy metody oczyszczania wykazują umiarkowany poziom przewodności elektrycznej o podobnym zakresie i zmienności. Średnie wartości dla wlotu, wymiany jonowej i ozonu są zbliżone do siebie, co wskazuje, że metody oczyszczania mają podobny wpływ na przewodność elektryczną.

Tabela 23. Zmiany wartości mętności i przewodności elektrycznej

Data	Mętność			Przewodność elektryczna [mg/l]		
	Woda surowa	Wymiana jonowa	Ozonowanie	Woda surowa	Wymiana jonowa	Ozonowanie
13.02.2025	3,8	1,3	0,93	1 502	1 551	1 563
18.02.2025	4,1	2,2	1,2	1 609	1 625	1 603
20.02.2025	4	1,4	0,9	1 511	1 541	1 543
4.03.2025	2,9	0,55	0,36	1 574	1 572	1 558
18.03.2025	5,8	0,91	0,4	1 563	1 569	1 569
20.03.2025	2,1	0,44	0,54	1 537	1 562	1 576
25.03.2025	1,7	0,65	0,8	1 620	1 618	1 612
27.03.2025	2,3	0,7	0,56	1 605	1 606	1 606
1.04.2025	2,9	0,65	0,38	1 468	1 467	1 462
8.04.2025	2,8	0,61	0,34	1 449	1 452	1 450
10.04.2025	1,9	0,61	0,28	1 462	1 459	1 461
Wartość graniczna	<5NTU			700-3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$		

Fosfor całkowity

Wartości na wlocie wynoszą od 0,37 do 2,53 mg/l, przy średniej wynoszącej 1,16 mg/l. Wartości wymiany jonowej wynoszą od 0,20 do 1,81 mg/l, przy średniej wynoszącej 0,87 mg/l. Wartości ozonu wahają się od 0,23 do 1,77 mg/l, a średnia wynosi 0,90 mg/l.

Najwyższy poziom TP odnotowano 18 marca i wyniósł on 1,77 mg/l, co mieści się w granicach wartości granicznej wynoszącej 2 mg/l. Średni poziom TP wynosi 0,94 mg/l, co wskazuje, że proces ozonowania zasadniczo utrzymuje poziomy TP w granicach dopuszczalnych wartości.

Fosforany

Wartości na wlocie wynoszą od 0,14 do 2,15 mg/l, przy średniej wynoszącej 1,00 mg/l. Wartości wymiany jonowej wynoszą od 0,16 do 1,73 mg/l, przy średniej wynoszącej 0,82 mg/l. Wartości ozonu wynoszą od 0,17 do 1,66 mg/l, przy średniej wynoszącej 0,81 mg/l. Najwyższy poziom P-PO₄ odnotowano 18 marca i wyniósł on 1,66 mg/l, co mieści się w ograniczonym zakresie wartości 0-2 mg/l. Średni poziom P-PO₄ wynosi 0,81 mg/l, co sugeruje, że proces ozonowania skutecznie utrzymuje poziom P-PO₄ w dopuszczalnym zakresie.

Tabela 24. Zmiany wartości fosforu całkowitego i fosforanów

Data	TP [mg/l]			P-PO ₄ [mg/l]		
	Woda surowa	Wymiana jonowa	Ozonowanie	Woda surowa	Wymiana jonowa	Ozonowanie
13.02.2025	0,9	0,42	0,9	0,72	0,38	0,31
18.02.2025	0,52	0,35	0,35	0,28	0,24	0,26
20.02.2025	0,49	0,31	0,3	0,22	0,2	0,2
4.03.2025	0,37	0,2	0,23	0,14	0,16	0,17
18.03.2025	2,53	1,81	1,77	2,15	1,68	1,66
20.03.2025	2,35	1,81	1,7	2,09	1,73	1,59
25.03.2025	1,1	0,92	0,94	0,96	0,89	0,91
27.03.2025	0,95	0,83	0,82	0,85	0,8	0,81
1.04.2025	1,67	1,29	1,29	1,44	1,18	1,27
8.04.2025	0,72	0,65	0,65	0,58	0,55	0,55
10.04.2025	1,17	0,94	0,93	0,98	0,89	0,87
Wartość graniczna	2 mg/l			0-2 mg/l		

Całkowity azot

Wartości na wlocie wynoszą od 7,5 do 19,0 mg/l, przy średniej wynoszącej 10,6 mg/l. Wartości wymiany jonowej wynoszą od 4,0 do 16,0 mg/l, przy średniej wynoszącej 8,1 mg/l. Wartości wahają się od 4,0 do 16,0 mg/l, przy średniej wynoszącej 8,1 mg/l. Najwyższy odnotowany poziom azotu całkowitego miał miejsce 18 lutego i wyniósł 16,0 mg/l, co przekracza dopuszczalną wartość 15 mg/l. Średni poziom azotu całkowitego wynosi 8,1 mg/l, co wskazuje, że chociaż większość pomiarów mieści się w dopuszczalnych granicach, zdarzają się przypadki, w których poziom azotu całkowitego przekracza limit.

Tabela 25. Zmiany wartości azotu całkowitego

Data	TN [mg/l]		
	Woda surowa	Wymiana jonowa	Ozonowanie
13.02.2025	9,9	6,9	6,9
18.02.2025	19	16	16
20.02.2025	13	13	12
4.03.2025	7,5	4,8	4,7
18.03.2025	11	8,7	9
20.03.2025	11	8,6	8,8
25.03.2025	7,9	6,6	6,5
27.03.2025	8,6	8,6	8,4
1.04.2025	9	5,8	5,8
8.04.2025	9	7,4	7,3
10.04.2025	11	8,2	8,2
Wartość graniczna	15 mg/l		

Azot amonowy

Średnia wartość N-NH₄ na wlocie wynosi 3,38 mg/l, co wskazuje na umiarkowany poziom azotu amonowego.

Wartości wahają się od 0,55 mg/l do 15,2 mg/l, co wskazuje na znaczną zmienność. Średnia wartość N-NH₄ dla wymiany jonowej wynosi 2,63 mg/l, czyli mniej niż średnia wartość dla wlotu. Wartości wahają się od 0,5 mg/l do 12,1 mg/l, co wskazuje na podobną zmienność w porównaniu z wlotem.

Średnia wartość N-NH₄ dla ozonu wynosi 2,79 mg/l, co jest zbliżone do średniej wartości dla wymiany jonowej.

Wartości wahają się od 0,56 mg/l do 12,4 mg/l, co wskazuje na umiarkowaną zmienność. Średnie wartości dla wlotu, wymiany jonowej i ozonu są zbliżone do siebie, co wskazuje, że zabiegi mają podobny wpływ na poziom azotu amonowego.

Dwutlenek azotu

Średnia wartość N-NO₂ na wlocie wynosi 0,14 mg/l, co wskazuje na umiarkowany poziom dwutlenku azotu.

Wartości wahają się od 0,06 mg/l do 0,34 mg/l, co wskazuje na znaczną zmienność. Średnia wartość N-NO₂ dla wymiany jonowej wynosi 0,19 mg/l, co jest wartością wyższą od średniej wartości dla wlotu. Wartości wahają się od 0,00 mg/l do 0,96 mg/l, co wskazuje na znaczną zmienność.

Średnia wartość N-NO₂ dla ozonu wynosi 0,01 mg/l, co jest najniższą wartością spośród trzech metod oczyszczania.

Wartości wahają się od 0,00 mg/l do 0,02 mg/l, co wskazuje na minimalną zmienność. Parametr wlotowy wykazuje umiarkowane średnie wartości N-NO₂ w porównaniu z wymianą jonową i ozonem, co wskazuje, że początkowa nieprzetworzona woda ma wyższy poziom dwutlenku azotu. Obróbka wymianą jonową wykazuje wyższe średnie wartości N-NO₂ i znaczną zmienność.

Obróbka ozonem wykazuje najniższe wartości N-NO₂ przy minimalnej zmienności, co wskazuje, że jest ona najskuteczniejsza w obniżaniu poziomu dwutlenku azotu.

Azot azotanowy

Średnia wartość N-NO₃ na wlocie wynosi 7,85 mg/l, co wskazuje na umiarkowany poziom azotu azotanowego.

Wartości wahają się od 5,6 mg/l do 10,0 mg/l, co wskazuje na znaczną zmienność. Średnia wartość N-NO₃ dla wymiany jonowej wynosi 6,50 mg/l, czyli mniej niż średnia wartość wlotowa. Wartości wahają się od 3,5 mg/l do 8,8 mg/l, co wskazuje na znaczną zmienność.

Średnia wartość N-NO₃ dla ozonu wynosi 6,7 mg/l, czyli jest nieco wyższa niż średnia wartość dla wymiany jonowej. Wartości wahają się od 4,1 mg/l do 9,4 mg/l, co wskazuje na umiarkowaną zmienność.

Wszystkie trzy metody oczyszczania wykazują umiarkowany poziom azotu azotanowego o podobnym zakresie i zmienności. Średnie wartości dla wlotu, wymiany jonowej i ozonu są zbliżone do siebie, co wskazuje, że metody oczyszczania mają podobny wpływ na poziom azotu azotanowego.

Tabela 26. Zmiany wartości azotu amonowego, dwutlenku azotu i azotu azotynowego

Data	N-NH ₄ [mg/l]			N-NO ₂ [mg/l]			N-NO ₃ [mg/l]		
	Woda surowa	Wymiana jonowa	Ozonowanie	Woda surowa	Wymiana jonowa	Ozonowanie	Woda surowa	Wymiana jonowa	Ozonowanie
13.02.2025	4,03	2,3	1,89	0,29	0,26	0,01	6,5	5,8	6,2
18.02.2025	15,2	12,1	12,4	0,24	0,96	0,01	5,6	3,5	4,3
20.02.2025	6,09	5,17	5,57	0,34	0,62	0,01	8,2	8,8	9,4
4.03.2025	1,83	1,11	1,67	0,07	0,01	0,02	6,6	4,2	4,1
18.03.2025	1,03	1,31	1,34	0,07	0,01	0,01	10	8,3	8,4
20.03.2025	0,86	0,89	1,05	0,08	0,03	0	10	8,2	8,4
25.03.2025	1,31	0,82	0,89	0,06	0,02	0,01	8,2	5,9	6,2
27.03.2025	1,24	1,15	1,6	0,08	0,01	0,01	7,6	7,7	7,8
1.04.2025	1,65	0,98	0,89	0,14	0,05	0,01	6,1	4,7	4,8
8.04.2025	0,55	0,5	0,56	0,08	0	0	8,1	6,8	6,7
10.04.2025	<0,50	<0,50	<0,50	0,08	0,02	0,01	9,5	7,6	7,6
Wartość graniczna	0-5 mg/l			-			10mg/l		

Potas

Średnia wartość potasu dla wlotu wynosi 35,7 mg/l, co wskazuje na umiarkowany poziom potasu.

Wartości wahają się od 28,1 mg/l do 48,1 mg/l, co wskazuje na znaczną zmienność. Średnia wartość potasu dla wymiany jonowej wynosi 35,3 mg/l, czyli nieco mniej niż średnia wartość dla dopływu.

Wartości wahają się od 27,1 mg/l do 43,5 mg/l, co wskazuje na podobną zmienność w porównaniu z wartościami dla wlotu.

Średnia wartość potasu dla ozonu wynosi 35,17 mg/l, co jest zbliżone do średniej wartości dla wymiany jonowej. Wartości wahają się od 27,3 mg/l do 43,5 mg/l, co wskazuje na umiarkowaną zmienność.

Wszystkie trzy metody oczyszczania wykazują umiarkowany poziom potasu o podobnym zakresie i zmienności.

Średnie wartości dla wszystkich metod są zbliżone do siebie, co wskazuje, że metody te mają podobny wpływ na poziom potasu.

Tabela 27. Zmiany wartości potasu

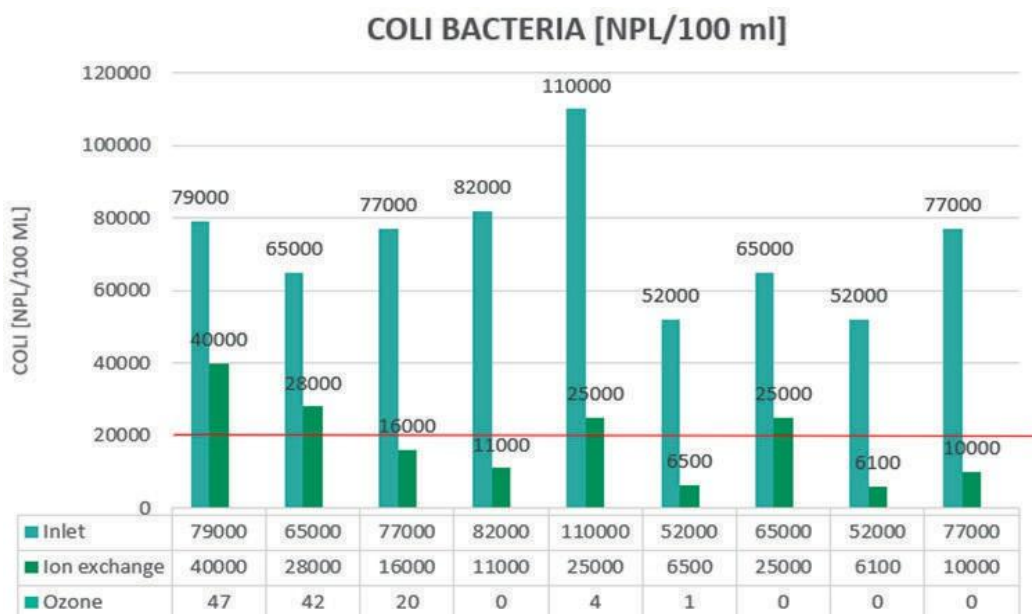
Data	Potas [mg/l]		
	Woda surowa	Wymiana jonowa	Ozonowanie
13.02.2025	31,4	33,4	33,5
18.02.2025	41	43,5	43,5
20.02.2025	35,4	38,3	38,7
4.03.2025	43,6	42,4	41
18.03.2025	31,2	31,5	32,1
20.03.2025	33,1	33	34,6
25.03.2025	48,1	39,7	38,6
27.03.2025	37,5	37,7	37,5
1.04.2025	33,1	32	30,9
8.04.2025	28,1	27,1	27,3
10.04.2025	30,6	29,4	29,2
Wartość graniczna	-		

PARAMETRY MIKROBIOLOGICZNE

Wskaźnikiem dla dalszych prac i doboru parametrów technologicznych były parametry mikrobiologiczne. Poniżej przedstawiono wyniki dla parametrów, które miały zostać osiągnięte w projekcie: bakterie Coli, *Escherichia coli*, całkowita liczba bakterii w temperaturze 36 i 22 °C, *Enterococcus*.

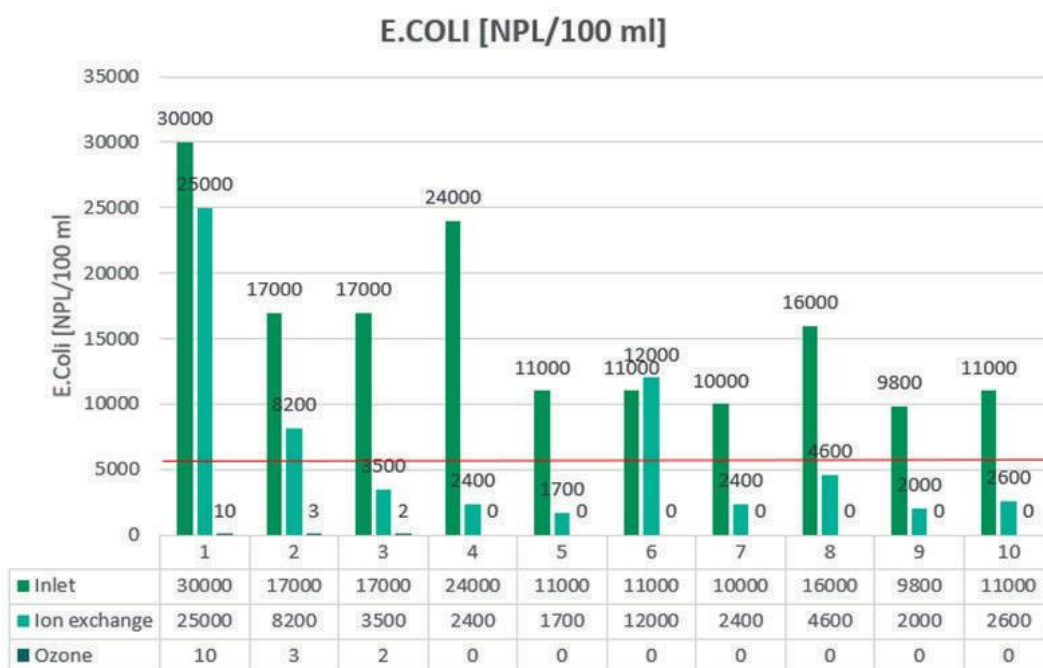
Tabela 28. Lista eksperymentów według daty przeprowadzenia

Eksperyment	Data	Dawka ozonu [g/h]
1	18.02.2025	20
2	20.02.2025	30
3	04.03.2025	50
4	18.03.2025	50
5	20.03.2025	50
6	25.03.2025	50
7	27.03.2025	50
8	01.04.2025	70
9	08.04.2025	70
10	10.04.2025	70



Rysunek 26. Wyniki eksperymentów przeprowadzonych na bakteriach Coli

Średnia wartość bakterii coli dla wlotu wynosi 71 700 NLP/100 ml. Wartości wahają się od 52 000 do 110 000 NLP/100 ml, wykazując znaczną zmienność. Średnia wartość bakterii coli dla wymiany jonowej wynosi 17 340 NLP/100 ml, a zakres wynosi od 5800 do 40 000. Po procesie ozonowania liczba bakterii coli drastycznie spada. Średnia wartość bakterii coli dla procesu ozonowania wynosi 11,5 NLP/100 ml. Wartości dla procesu ozonowania mieszczą się w zakresie od 0 do 47 NLP/100 ml. Dzięki zwiększeniu dawki ozonu do 70 g/h osiągnięto pełną dezynfekcję.



Rysunek 27. Wyniki eksperymentów przeprowadzonych na bakteriach E. coli

Wartości *E. coli* na wlocie wynoszą od 9 800 do 30 000 NLP/100 ml, przy średniej wynoszącej 15 680 NLP/100 ml. Wartości wymiany jonowej wahają się od 1 700 do 25 000, przy średniej wynoszącej 6 440 NLP/100 ml. Wartości ozonu wahają się od 0 do 10 NLP/100 ml, przy średniej wynoszącej 1,5 NLP/100 ml. Dane pokazują, że wartości na wlocie mają umiarkowane rozrzuty wokół średniej z pewną zmiennością. Wartości wymiany jonowej charakteryzują się dużą zmiennością, co wskazuje na znaczne różnice w pomiarach. Wartości ozonu są w większości niskie, z kilkoma wyższymi wartościami. Sugeruje to, że podczas gdy proces wymiany jonowej wykazuje zmienność pod względem skuteczności, obróbka ozonem konsekwentnie daje niskie wartości, co wskazuje na skuteczną dezynfekcję. Dzięki zwiększeniu dawki ozonu do 50-70 g/h osiągnięto pełną dezynfekcję.

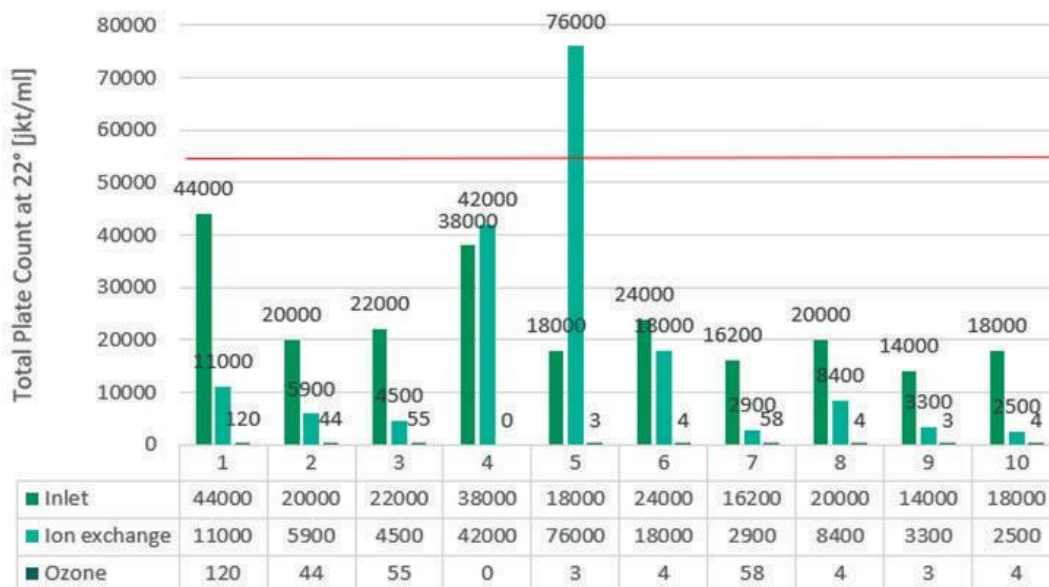
TOTAL PLATE COUNT at 36° C [jkt/ml]



Rysunek 28. Wyniki eksperymentów przeprowadzonych odnośnie całkowitej liczby bakterii w temperaturze 36°C

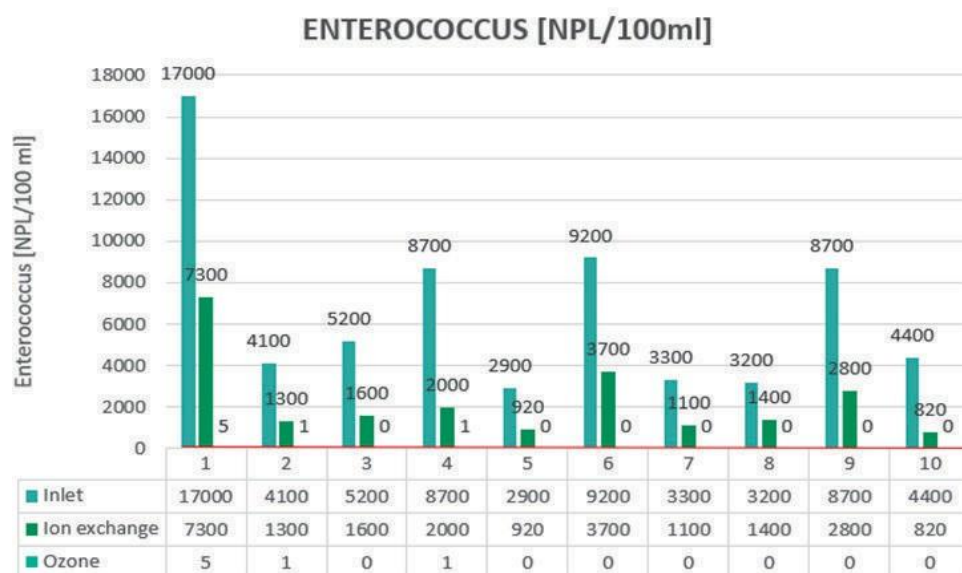
TPC na wlocie w temperaturze 36 °C wynoszą od 6 900 do 20 000 jkt/ml, przy średniej wynoszącej 11 970 jkt/ml. Wartości wymiany jonowej wynoszą od 1 400 do 10 000 jkt/ml, przy średniej wynoszącej 5 260 jkt/ml. Zastosowanie żywicy jonowymiennej powoduje znaczny spadek TPC w próbce. Wartości ozonu wynoszą od 0 do 71 jkt/ml, przy średniej wynoszącej 15,9 jkt/ml. Dzięki zwiększeniu dawki ozonu do 70 g/h osiągnięto pełną dezynfekcję.

TOTAL PLATE COUNT at 22° [jkt/ml]



Rysunek 29. Wyniki eksperymentów przeprowadzonych odnośnie całkowitej liczby bakterii w temperaturze 22 °C

Wartości TPC na wlocie przy temperaturze 22°C wynoszą od 14 000 do 44 000 jkt/ml, a średnia wynosi 23 420 jkt/ml. Wartości wymiany jonowej wykazują szeroki zakres od 2500 do 76 000 jkt/ml, co wskazuje na znaczną zmienność. Wartości ozonu wahają się od 0 do 120 jkt/ml, a średnia wynosi 29,5 jkt/ml. Zastosowanie dawki ozonu wynoszącej 70 g/h spowodowało niepełną dezynfekcję; w próbce obecne są pojedyncze organizmy.



Rysunek 30. Wyniki eksperymentów przeprowadzonych na bakterii *Enterococcus*

Wartości *Enterococcus* na wlocie wahają się od 2900 do 17 000 NPL/100 ml, przy średniej wynoszącej 6670 NPL/100 ml.

Wartości wymiany jonowej wykazują zmienność od 820 do 7300 NPL/100 ml, przy średniej wynoszącej 2294 NPL/100 ml.

Wartości ozonu są w większości niskie, wahają się od 0 do 5 NPL/100 ml, a średnia wynosi 0,7 NPL/100 ml. Przy zastosowaniu dawki ozonu wynoszącej 70 g/h w próbce nie wykryto enterokoków.

Przy zastosowaniu niższych dawek ozonu nie osiągnięto pełnej dezynfekcji. Zwiększenie dawki do 50 g/h pozwoliło na osiągnięcie wymaganych parametrów (zgodnie z: rozporządzeniem Parlamentu Europejskiego i Rady UE 2020/741 z dnia 25 maja 2020 r. w sprawie minimalnych wymagań dotyczących ponownego wykorzystywania wody oraz dyrektywą Parlamentu Europejskiego i Rady UE 2020/2184 z dnia 16 grudnia 2020 r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi). Czerwone linie na powyższych wykresach wskazują wartości graniczne, które muszą być osiągnięte. Udało się zapewnić brak enterokoków w próbkach.

Tabela 29. Pełna dezynfekcja osiągnięta w różnych fazach eksperymentu

Data	Parametr [μg/l]	Wlot	Wymiana jonowa	Ozonowanie
20.03.2025 Dawka ozonu: 14,29 mg/l Czas kontaktu: 33 min Natężenie przepływu: 3,5 m ³ /h	<i>Legionella</i>	0	0	0
	Jaja helmintów	0	0	0
27.03.2025 Dawka ozonu: 15,15 mg/l Czas kontaktu: 35 min Natężenie przepływu: 3,3 m ³ /h	<i>Legionella</i>	0	0	0
	Jaja helmintów	0	0	0
1.04.2025 Dawka ozonu: 20 mg/l Czas kontaktu: 33 min Natężenie przepływu: 3,5 m ³ /h	<i>Legionella</i>	0	0	0
	Jaja helmintów	0	0	0
10.04.2025 Dawka ozonu: 18,4 mg/l Czas kontaktu: 30 min Natężenie przepływu: 3,5 m ³ /h	<i>Legionella</i>	0	0	0
	Jaja helmintów	0	0	0

Ponadto przy dawce 50 g/h i 70 g/h w próbce nie wykryto bakterii *Legionella* ani jaj robaków pasożytniczych.

Co więcej, po osiągnięciu pełnej dezynfekcji poprzez spełnienie wskaźników mikrobiologicznych rozpoczęto serię testów na obecność mikrozanieczyszczeń. Mikrozanieczyszczenia są parametrami wskazanymi w dyrektywie dotyczącej ścieków oraz w rozporządzeniu Parlamentu Europejskiego w sprawie minimalnych wymagań dotyczących ponownego wykorzystania wody. Na każdym etapie obserwuje się zmniejszenie tych parametrów. Jednak po procesie ozonowania wszystkie parametry znajdują się poniżej granicy wykrywalności. W przypadku testów toksyczności odnotowano wzrost, ale nie przekracza on wartości granicznych.

Tabela 30. Zmiany wartości parametrów w różnych fazach eksperymentu (marzec)

Working parameters of pilot installation	20.03.2025 Ozone dose: 14.29 mg/l Contact time: 33 min Flow rate: 3.5 m³/h			27.03.2025 Ozone dose: 15.15 mg/l Contact time: 35 min Flow rate: 3.3 m³/h		
	Inlet	Ion exchange resin	Ozone	Inlet	Ion exchange resin	Ozone
Benzotriazole	4.1	0.21	< 0.02	3.3	0.22	< 0.02
Methylbenzotriazole (som 4+5)	0.63	0.08	< 0.02	0.67	0.08	< 0.02
Carbamazepine	0.88	0.57	< 0.005	0.96	0.71	< 0.005
Diclofenac	2.3	1.4	< 0.01	2.3	1.5	< 0.01
Gabapentin	0.58	0.49	< 0.02	0.78	0.6	0.07
Irbesartan	0.01	0.01	< 0.01	0.02	0.01	< 0.01
Metoprolol	0.74	0.25	< 0.01	0.76	0.4	< 0.01
Sulfamethoxazole	0.27	0.28	< 0.01	0.22	0.3	< 0.01
Furosemide	0.92	0.64	< 0.01	1.0	0.51	< 0.01
Hydrochlorothiazide	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.29	0.21	< 0.01
Azithromycin	0.47	0.18	< 0.01	0.64	0.26	< 0.01
Clarytromycyne	1.2	0.97	< 0.10	4.3	1.8	< 0.10
Propranolol	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.1	< 0.1	< 0.10
Sotalol (β-Adrenergics)	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.1	< 0.1	< 0.10
Trimetoprim	0.08	0.03	< 0.01	0.04	0.02	< 0.01
Citalopram	0.24	0.11	< 0.005	0.19	0.099	< 0.005
Venlafaxine	0.78	0.58	< 0.005	0.56	0.42	< 0.005
Candesartan	0.34	< 0.02	< 0.02	0.26	0.04	< 0.02
Amisulpride	0.32	0.19	< 0.01	0.26	0.19	< 0.01
DELTA-TOX	8	18	24	18	10	17

Tabela 31. Zmiany wartości parametrów w różnych fazach eksperymentu (kwiecień)

Working parameters of pilot installation	01.04.2025 Ozone dose: 20 mg/l Contact time: 33 min Flow rate: 3.5 m³/h			10.04.2025 Ozone dose: 18.4 mg/l Contact time: 30 min Flow rate: 3.5 m³/h		
	Inlet	Ion exchange resin	Ozone	Inlet	Ion exchange resin	Ozone
Benzotriazole	2.6	0.15	< 0.02	4.7	0.58	< 0.02
Methylbenzotriazole (som 4+5)	0.33	0.04	< 0.02	0.76	0.13	< 0.02
Carbamazepine	1.0	0.63	< 0.005	0.69	0.55	< 0.005
Diclofenac	2.5	1.2	< 0.01	2.6	1.6	< 0.01
Gabapentin	0.92	0.64	0.07	0.69	0.67	< 0.02
Irbesartan	0.01	0.01	< 0.01	0.01	0.01	< 0.01
Metoprolol	0.75	0.39	< 0.01	0.63	0.38	< 0.01
Sulfamethoxazole	0.27	0.33	< 0.01	0.22	0.27	< 0.01
Furosemide	1.1	0.26	< 0.01	0.72	0.35	< 0.01
Hydrochlorothiazide	1.1	0.26	< 0.01	0.43	0.35	< 0.01
Azithromycin	0.81	0.41	< 0.01	0.87	0.44	< 0.01
Clarytromycyne	7.4	10	< 0.10	8.9	7.6	< 0.10
Propranolol	< 0.1	< 0.1	< 0.10	< 0.1	< 0.1	< 0.10
Sotalol (β-Adrenergics)	< 0.1	< 0.1	< 0.10	0.7	0.42	< 0.10
Trimetoprim	0.04	0.02	< 0.01	0.07	0.04	< 0.01
Citalopram	0.19	0.098	< 0.005	0.23	0.13	< 0.005
Venlafaxine	0.59	0.45	< 0.005	0.56	0.28	< 0.005
Candesartan	0.28	0.03	< 0.02	0.34	0.06	< 0.02
Amisulpride	0.02	0.16	< 0.01	0.37	0.27	< 0.01
DELTA-TOX	20	11	16	12	15	16

Proces ozonowania w module dezynfekcji pozwolił na osiągnięcie pełnej dezynfekcji mikrobiologicznej (spełniającej wymagane limity, np. brak enterokoków) oraz redukcję mikrozanieczyszczeń poniżej granicy wykrywalności, potwierdzając możliwość ponownego wykorzystania wody. Chociaż po procesach dezynfekcji zaobserwowano wzrost toksyczności, nie przekroczył on wartości granicznych.

Podsumowanie procesu dezynfekcji

Proces ozonowania został wdrożony jako metoda dezynfekcji przy użyciu urządzenia SPID 300, które ma wydajność 20 m³/h i może wytworzyć do 300 g ozonu na godzinę. Podczas pracy natężenie przepływu wahało się od 2 m³/h do 4,8 m³/h, a dawka ozonu była regulowana w zakresie od 20 g/h do 70 g/h, przy czym pozostałości ozonu w ściekach wynosiły od 0,16 mg/l do 0,70 mg/l. Czas kontaktu ozonu ze ściekami wynosił od 18 do 38 minut.

Jeśli chodzi o parametry fizykochemiczne, proces ozonowania konsekwentnie wykazywał wyższe temperatury (średnio 16,4°C) i wyższe wartości pH (średnio 7,55), co wskazuje na bardziej zasadowe środowisko. Stwierdzono, że ozonowanie jest najskuteczniejsze w redukcji chemicznego zapotrzebowania na tlen (ChZT), z najniższymi średnimi wartościami (18,6 mg/l), wszystkie mieszczące się w granicach <125 mg/l. Podobnie, ozonowanie osiągnęło najniższe poziomy całkowitej zawartości zawiesin (TSS) (średnio 0,33 mg/l) i najniższą mętność (średnio 0,61 NTU), wykazując swoją skuteczność w redukcji cząstek zawieszonych. Chociaż ozonowanie spowodowało również zmniejszenie całkowitej zawartości węgla organicznego (TOC) i biochemicznego zapotrzebowania na tlen (BOD₅), ich średnie wartości były porównywalne lub wyższe niż po wymianie jonowej, choć nadal niższe niż na wlocie. Inne parametry, takie jak przewodność elektryczna, fosfor całkowity, fosforany, azot całkowity, azot amonowy, azot azotanowy i potas wykazały podobne efekty we wszystkich badanych metodach (dopływ, wymiana jonowa i ozonowanie), pozostając ogólnie w dopuszczalnych granicach, chociaż azot całkowity czasami przekraczał limit 15 mg/l. Warto zauważyć, że azot azotanowy (N-NO₂) został najskuteczniej zredukowany przez ozonowanie, wykazując najniższą średnią wartość 0,01 mg/l przy minimalnej zmienności.

Pod względem parametrów mikrobiologicznych ozonowanie znacznie poprawiło dezynfekcję:

- Liczba bakterii *Coli* drastycznie spadła do średniej wartości 11,5 NLP/100 ml po ozonowaniu, a pełną dezynfekcję osiągnięto przy dawce ozonu wynoszącej 70 g/h.
- Po ozonowaniu wartości *E. coli* wyniosły średnio 1,5 NLP/100 ml (w zakresie od 0 do 10 NLP/100 ml), co wskazuje na skuteczną dezynfekcję, przy czym pełną dezynfekcję osiągnięto przy dawce 50-70 g/h.
- Całkowita liczba bakterii (TPC) w temp. 36°C osiągnęła pełną dezynfekcję przy dawce ozonu 70 g/h.
- Jednak w przypadku TPC w temperaturze 22°C zastosowanie dawki ozonu 70 g/h spowodowało niepełną dezynfekcję, a pojedyncze organizmy nadal były obecne.
- Po ozonowaniu nie wykryto większości enterokoków, a przy dawce ozonu 70 g/h nie wykryto ich wcale.
- Po procesie ozonowania nie wykryto bakterii *Legionella* i jaj helmintów w próbkach, w tym przy dawkach 50 g/h i 70 g/h.

Ponadto po osiągnięciu pełnej dezynfekcji mikrobiologicznej przeprowadzono badania pod kątem obecności mikrozanieczyszczeń. Wszystkie badane mikrozanieczyszczenia (np. benzotriazol, karbamazepina, diklofenak) zostały zredukowane poniżej granic wykrywalności po procesie ozonowania. Chociaż po procesach dezynfekcji zaobserwowano wzrost toksyczności (DELTA-TOX), wzrost ten nie przekroczył ustalonych wartości granicznych.

Ogólnie rzecz biorąc, proces ozonowania wykazał swoją zdolność do osiągnięcia pełnej dezynfekcji mikrobiologicznej i zmniejszenia stężenia mikrozanieczyszczeń poniżej granic wykrywalności, potwierdzając potencjał ponownego wykorzystania wody.

Podsumowanie badań pilotażowych

W procesach odzyskiwania wody ozonowanie należy uznać za skuteczną metodę dezynfekcji, pod warunkiem że zawieszone cząstki stałe i substancje organiczne zostaną najpierw usunięte w stabilny sposób.

Przy wyborze technologii wstępnego oczyszczania należy uwzględnić podatność systemów na zmienność hydrauliczną i obciążeniową typową dla oczyszczalni ścieków. W rzeczywistych warunkach, gdy dochodzi do nagłego wzrostu stężenia zawiesin (np. po intensywnych opadach deszczu, podczas zmian w systemach technologicznych), filtry tkaninowe zachowują stabilną pracę i nie ulegają zatkaniam, co czyni je technologią

bardziej odporną i bezpieczną w eksploatacji. Są one w stanie skutecznie zmniejszyć zmętnienie nawet przy wysokich poziomach na wlocie (np. 1300 mg/l → 6 mg/l; redukcja >99%, celowe symulacje w celu przetestowania technologii w ekstremalnych warunkach).

Z drugiej strony technologia żywicy jonowymiennej (IER) charakteryzuje się wyższą skutecznością w redukcji wybranych wskaźników jakości ścieków, w szczególności: TOC: 42,6% (w porównaniu z 12,8% dla FT), ChZT: 57,9% (w porównaniu z 25,9%), FO: 72% (w porównaniu z 44,8%), AO: 38,5% (w porównaniu z 34,5%).

Dzięki zastosowaniu kilku rodzajów mediów w jednym systemie (złoża żwirowe, węgiel aktywny, żywice jonowymienne, złoża zeolitowe), IER zapewniają lepszą jakość wody odzyskanej w zastosowaniach wymagających niższych stężeń substancji biogenych lub związków organicznych.

Dlatego zaleca się dobór technologii oczyszczania w zależności od przeznaczenia wody odzyskanej i poziomu stabilności ścieków zasilających system.

Zastosowanie modułowej konstrukcji w systemach odzyskiwania wody pozwala na elastyczne zarządzanie końcową jakością wody. W zależności od potrzeb użytkowników (np. czyszczenie ulic, naśnieżanie, nawadnianie, zastosowania przemysłowe), poszczególne moduły mogą być:

- włączone lub pominięte w procesie (np. dodatkowa filtracja, oczyszczanie węglem lub dezynfekcja promieniami UV),
- przełączane automatycznie przez system sterowania SCADA lub ręcznie, w zależności od pożądanych parametrów wyjściowych,
- łatwo rekonfigurowane w przyszłości — np. poprzez dodanie nowego modułu do usuwania mikrozanieczyszczeń.

Dzięki tej elastyczności system odzyskiwania wody staje się narzędziem operacyjnym, a nie tylko liniowym procesem, umożliwiającym dostosowanie jakości wody do różnych scenariuszy użytkowania oraz dynamicznie zmieniających się wymagań środowiskowych lub prawnych.

Praktyczne wskazówki dla osób wdrażających

» Działanie

Filtry tkaninowe (FT) okazały się praktycznie bezobsługowe – nie wymagały interwencji operatora podczas testów i działały stabilnie nawet przy wysokim dopływie zawiesin. Dzięki temu są one szczególnie korzystne w oczyszczalniach o zmiennym dopływie i ryzyku nagłych przeciążeń hydraulicznych lub obciążeniowych.

System IER (żywice jonowymienne), choć bardzo skuteczny w usuwaniu zanieczyszczeń organicznych i biogenów, okazał się wrażliwy na wzrost stężenia zawiesin. W przypadku chwilowego przekroczenia zawiesin konieczne było ręczne odłączenie systemu, co w praktyce wymagało ścisłego nadzoru. Aby zapewnić ciągłość pracy, konieczne było zaprojektowanie dwóch równoległych linii technologicznych, umożliwiających czyszczenie jednej z kolumn bez przerywania pracy całego systemu.

Ozonator był skuteczny, ale jego integracja z systemem wstępnego oczyszczania ścieków wymagała dalszego udoskonalenia. W sytuacjach awaryjnych, takich jak brak przepływu ścieków przez stację odzyskiwania wody i ozonator, po przywróceniu przepływu system dezynfekcji ozonem wymagał interwencji operatora w celu przywrócenia jego prawidłowego działania. Dlatego zaleca się wdrożenie dodatkowego oprogramowania i zabezpieczeń mechanicznych (np. czujników przepływu, zaworów zwrotnych, systemów blokady logicznej).

» Kontrola i monitorowanie

System był sterowany ręcznie, co znacznie zwiększało nakład pracy operatorów. Konieczność częstego przełączania trybów pracy i reagowania na zmieniające się warunki dopływu ścieków (np. nagłe pojawienie się zawiesin) wymagała stałej obecności personelu. Zaleca się, aby na etapie projektowania instalacji pilotażowej zapewnić co najmniej podstawowy system automatyki (SCADA lub lokalne sterowniki PLC) z możliwością konfiguracji scenariuszy awaryjnych.

W trybie online monitorowano jedynie mętność, co nie pozwalało na bieżącą kontrolę innych parametrów istotnych dla odzysku wody (np. przewodności, chloru, *E. coli*). W przyszłości warto rozważyć włączenie modułów do pomiaru parametrów mikrobiologicznych lub przynajmniej warunków ich rozwoju (T, pH, ORP).

» Integracja z oczyszczalnią ścieków

Testy były trudne do przeprowadzenia w rzeczywistych warunkach pracy oczyszczalni ścieków. Instalacje pilotażowe mają ograniczoną mobilność i wymagają stabilnych punktów połączeń, których często brakuje. Na przykład konieczne było tymczasowe wyłączenie instalacji z powodu czyszczenia lub serwisowania zbiorników zasilających.

W przypadku IER producent wymagał doprowadzenia wody do instalacji, czego nie zaplanowano z wyprzedzeniem. Brak przyłącza zmusił nas do wykorzystania zbiorników na wodę jako tymczasowego źródła wody, co pogorszyło ergonomię pracy.

5.3 Woda odzyskana jako źródło składników odżywczych

5.3.1 Zachowanie równowagi

Woda odzyskana może stanowić cenne źródło składników odżywczych dla roślin. W pilotażu 2 nacisk kładziemy na analizę składu głównych makroskładników odżywczych (azotu – N, fosforu – P i potasu – K) w nawadnianiu roślin niejadalnych, takich jak trawy i kwiaty, przy użyciu wody odzyskanej. Azot, fosfor i potas to trzy niezbędne składniki odżywcze, które odgrywają kluczową rolę w rozwoju roślin. Mają one fundamentalne znaczenie dla zdrowego wzrostu roślin niejadalnych:

- Azot jest podstawowym składnikiem odżywczym wpływającym na wzrost roślin. Ma kluczowe znaczenie dla produkcji białek, enzymów i chlorofilu, który odpowiada za fotosyntezę. W przypadku trawy azot jest niezbędny do szybkiego wzrostu i intensywnego zielonego koloru liści, właśnie ze względu na produkcję chlorofilu. W przypadku kwiatów azot wpływa na ogólny rozwój rośliny, w tym na produkcję zdrowych, silnych pędów i liści. Jednak nadmiar azotu może prowadzić do nadmiernego wzrostu liści kosztem kwitnienia.
- Fosfor jest składnikiem odżywczym, który odgrywa ważną rolę w energii komórkowej roślin, głównie ze względu na jego obecność w ATP (adenozynotrójfosforanie), który jest nośnikiem energii w komórkach. Ma również kluczowe znaczenie dla rozwoju korzeni. W przypadku trawy fosfor wspomaga rozwój silnego systemu korzeniowego, co jest szczególnie ważne dla stabilności i odporności na suszę. W przypadku kwiatów fosfor wspomaga procesy związane z kwitnieniem, a także poprawia zdrowie roślin, zwiększając ich zdolność do przetrwania w trudnych warunkach (np. zimą).
- Potas reguluje wiele procesów metabolicznych w roślinach, w tym transport wody, aktywność enzymów i syntezę białek. Potas pomaga roślinom radzić sobie ze stresem środowiskowym, takim jak susza, zimno lub choroby. Trawa potrzebuje potasu do skutecznego zarządzania wodą, co ma kluczowe znaczenie dla jej trwałości, zwłaszcza w okresach suszy. Potas pomaga również w utrzymaniu zdrowych komórek roślinnych. Kwiaty, podobnie jak trawy, czerpią korzyści z potasu, który zwiększa odporność roślin na choroby i reguluje procesy związane z produkcją nasion i kwitnieniem.

Wszystkie trzy składniki odżywcze muszą być obecne w odpowiednich proporcjach, aby roślina mogła rosnąć, kwitnąć i zachować dobrą kondycję.

Charakterystyka wody odzyskanej w kontekście zapotrzebowania trawy na składniki odżywcze

Średnie dzienne zapotrzebowanie standardowej trawy na wodę w sezonie nawadniania zależy od dziennej temperatury i strefy klimatycznej. Zakres zapotrzebowania na wodę do nawadniania jest bardzo szeroki i wynosi od 1 do nawet 10 litrów na 1 m².

W regionie Morza Bałtyckiego sezon nawadniania trawników trwa od kwietnia do września (np. w Polsce, Danii i na Łotwie). W przypadku krajów położonych na północy sezon jest krótszy, a w Finlandii trwa zazwyczaj od maja do sierpnia. Można założyć, że liczba dni, w których konieczne jest nawadnianie (z wyłączeniem dni z opadami atmosferycznymi), wynosi średnio 150.

Najlepszy stosunek składników N:P:K w nawozie dla trawy zależy od stadium wzrostu trawy i stanu gleby, ale ogólnie dla zdrowego trawnika zaleca się stosunek 3:1:2, 4:1:2 lub 2:1:1.

Ilość azotu (N) potrzebna trawie w sezonie zależy od wielu czynników, takich jak rodzaj trawnika, rodzaj gleby, warunki klimatyczne i intensywność użytkowania trawnika. Ogólnie przyjęte zalecenia dotyczące nawożenia trawnika azotem wskazują, że w ciągu roku należy dostarczyć od 3 do 6 kg azotu na 100 m².

Biorąc pod uwagę powyższe założenia, sezonowe pokrycie zapotrzebowania traw na składniki odżywcze określono na podstawie badań nad procesami wstępnego oczyszczania (przed procesem dezynfekcji) z wykorzystaniem koagulacji, filtracji piaskowej i adsorpcji węglem aktywnym. Procesy te są niezbędne do

zmniejszenia zmętnienia (<1 NTU) i poprawy skuteczności procesów dezynfekcji. W tabeli 32 przedstawiono stężenia N, P i K w oczyszczonych ściekach, a także zmiany tych stężeń po zastosowaniu różnych procesów wstępnego oczyszczania, które doprowadziły do zmniejszenia mętności do < 1 NTU. Wartości obejmują stężenia po koagulacji objętościowej, koagulacji powierzchniowej (z wykorzystaniem trzech koagulantów: $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, PAX-XL19F i PAX-XL1911), filtracji piaskowej (przy czterech różnych natężeniach przepływu: 3, 5, 10 i 15 m/h) oraz adsorpcji węglem aktywnym (przy trzech różnych natężeniach przepływu: 5, 10 i 15 m/h).

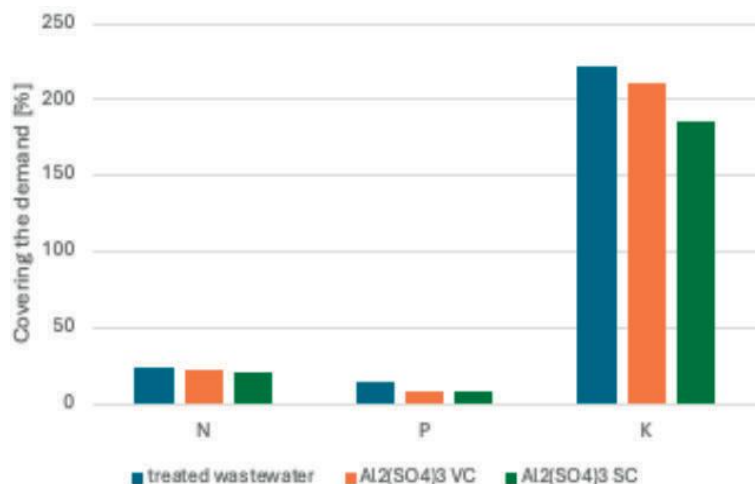
Tabela 32. Stężenia N, P i K w oczyszczonych ściekach (TW) oraz po procesach wstępnego oczyszczania

Indicator:		N [mg/l]	P [mg/l]	K [mg/l]
Treated wastewater (TW)		7.65	1.14	35.57
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	VC	7.28	0.67	33.67
	SC	6.75	0.63	29.70
PAX-XL 19F	VC	6.99	0.88	35.20
	SC	6.22	0.72	32.57
PAX-XL 1911	VC	6.60	0.84	34.23
	SC	6.17	0.65	31.03
Sand filtration [m/h]	3	6.01	0.52	32.85
	5	6.04	0.53	33.55
	10	6.02	0.55	33.65
	15	6.03	0.56	33.70
Activated carbon adsorption [m/h]	5	0.37	0.29	19.25
	10	0.39	0.31	22.35
	15	0.77	0.35	25.25

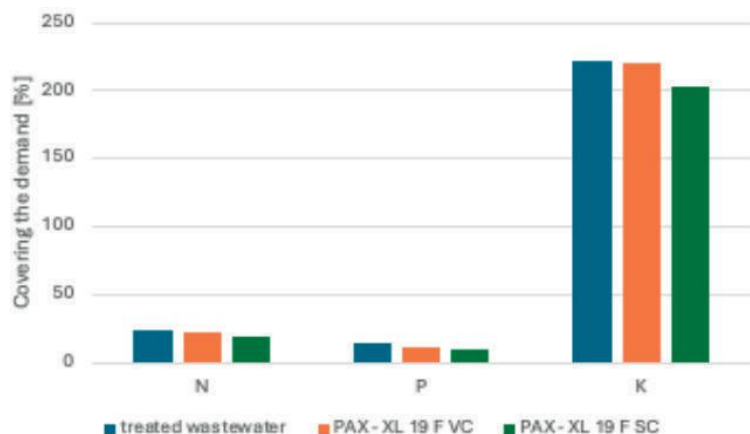
Koagulacja

Rysunki 30, 31 i 32 przedstawiają pokrycie zapotrzebowania trawy na składniki odżywcze w procesie koagulacji objętościowej (VC) i powierzchniowej (SC) w porównaniu z oczyszczonymi ściekami (przed procesami). W badaniu przeanalizowano trzy koagulanty na bazie glinu: $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, PAX-XL19F i PAX-XL1911.

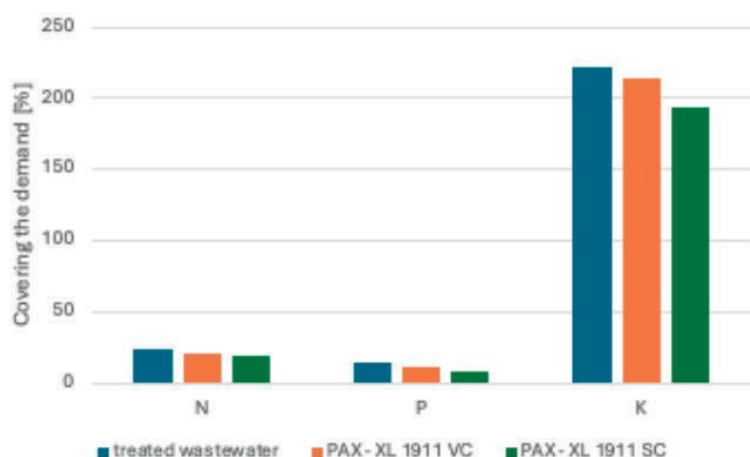
Pokrycie zapotrzebowania na N, P i K w przypadku oczyszczonych ścieków wyniosło odpowiednio 23,9, 14,25 i 222,29%. W przypadku wszystkich analizowanych koagulantów najwyższy poziom pokrycia zaobserwowano dla K i wynosił on od 186 do 220%, dla N poziom pokrycia wynosił od 19,28 do 22,74%, natomiast dla P był najniższy i wynosił od 7,83 do 11,04%.



Rysunek 31. Zaspokajanie zapotrzebowania na N, P i K przy użyciu $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ w procesach koagulacji



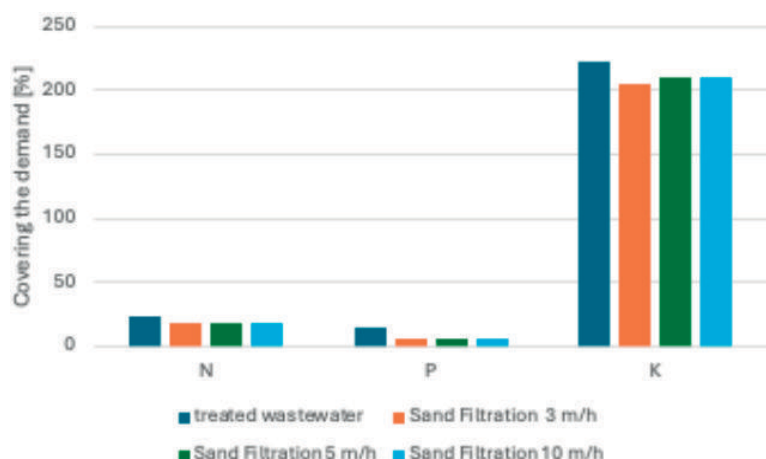
Rysunek 32. Zaspokajanie zapotrzebowania na N, P i K przy użyciu PAX-XL19F w procesach koagulacji



Rysunek 33. Zaspokajanie zapotrzebowania na N, P i K przy użyciu PAX-XL1911 w procesach koagulacji

Filtracja piaskowa

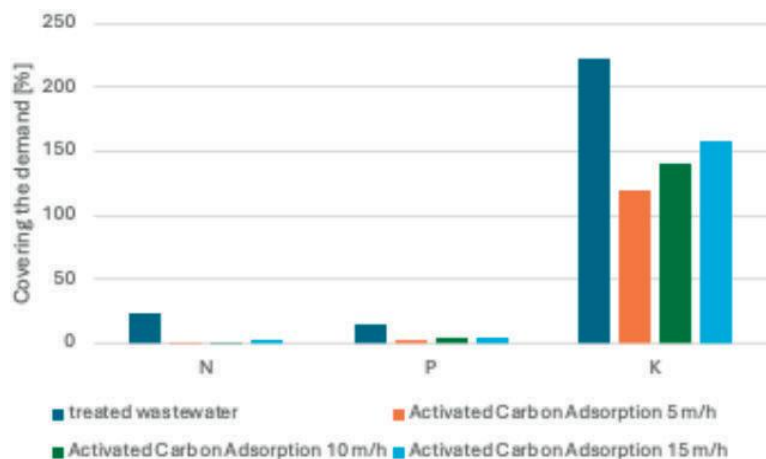
Rysunek 34 przedstawia pokrycie zapotrzebowania trawy na składniki odżywcze w oczyszczonych ściekach i po filtracji piaskowej dla różnych natężeń przepływu (3, 5 i 10 m/h) w porównaniu z oczyszczonymi ściekami (przed procesami). W tym przypadku pokrycie zapotrzebowania na K jest najwyższe i wynosiło 205,31–210,31%, dla N 18,78–18,89%, a dla P 6,54–6,64%.



Rysunek 33. Pokrycie zapotrzebowania na N, P i K w filtracji piaskowej

Adsorpcja na węglu aktywnym

Rysunek 35 przedstawia pokrycie zapotrzebowania na składniki odżywcze dla trawy w oczyszczonych ściekach i po procesie adsorpcji na węglu aktywnym dla różnych natężeń przepływu (5, 10 i 15 m/h). W tym przypadku pokrycie zapotrzebowania na K jest również najwyższe i wyniosło 120,31–157,81%, dla P 3,62–4,39%, a dla N jest najniższe i wyniosło 1,17–2,39%.



Rysunek 35. Pokrycie zapotrzebowania na N, P i K w adsorpcji węgla aktywnego

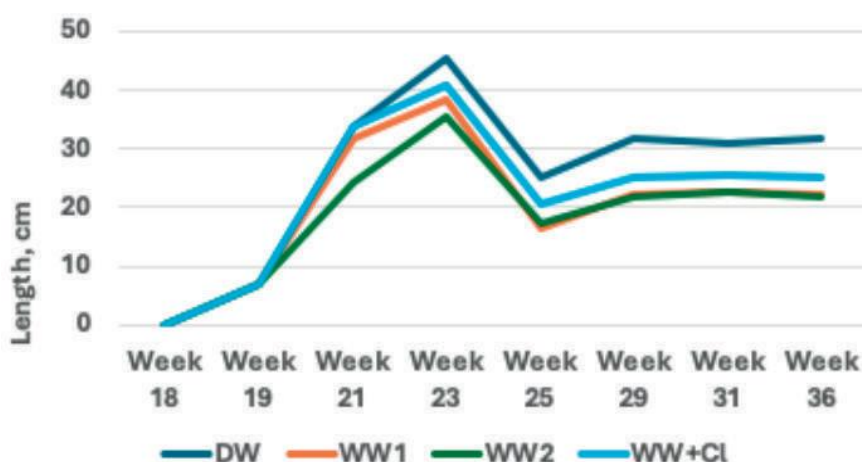


Najważniejsze wnioski

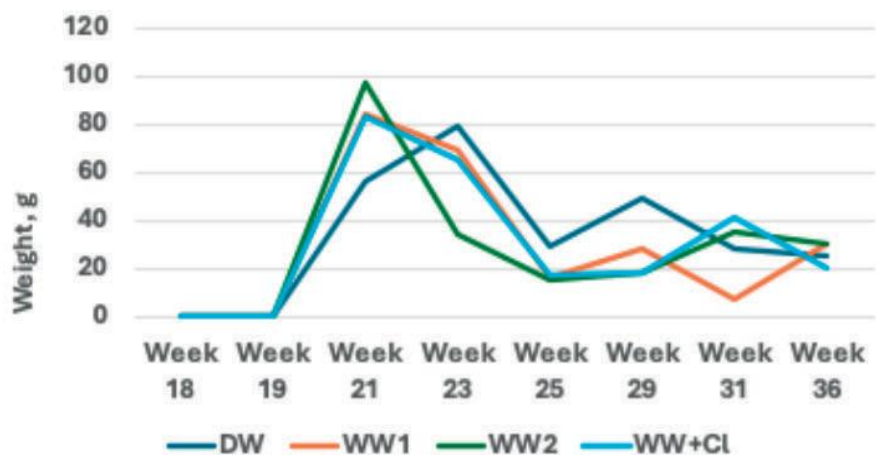
- Zbalansowanie składników odżywczych w wodzie odzyskanej ukazuje jej potencjał jako zrównoważonego źródła do nawadniania roślin niejadalnych.
- W regionach o ograniczonych zasobach słodkiej wody, woda odzyskana stanowi alternatywne źródło do pielęgnacji terenów zielonych. Ponadto wykorzystanie wody odzyskanej pomaga oszczędzać wodę pitną, która jest niezbędna do innych celów. Stanowi ona także opłacalny i przyjazny dla środowiska zasób do pielęgnacji i odżywiania roślin niejadalnych.
- Wykorzystanie wody odzyskanej do nawadniania pomaga zmniejszyć zależność od nawozów syntetycznych, co czyni ją bardziej zrównoważonym wyborem dla kształtowania krajobrazu i terenów zielonych.
- Woda odzyskana zawiera niezbędne składniki odżywcze, takie jak azot, fosfor i potas, które sprzyjają zdrowemu wzrostowi roślin nieprzeznaczonych do spożycia.
- Procesy koagulacji i filtracji piaskowej nieznacznie zmniejszają pokrycie zapotrzebowania na N, P i K. W przypadku adsorpcji węgla aktywnego można zaobserwować drastyczne zmniejszenie zapotrzebowania.
- Przy wyborze procesów wstępnego oczyszczania należy wziąć pod uwagę ocenę ich wpływu na zmiany właściwości nawozowych wody odzyskanej.

5.3.2 Doświadczenie z pilotaży

Zgodnie z wynikami pilotażu 2 z **Jūrmala Water Utility** najlepszy wzrost odnotowano na działkach nawadnianych czystą wodą i wodą chlorowaną. W zbiornikach zawierających oczyszczone ścieki bez chloru zaobserwowano zakwit glonów. W związku z tym postawiliśmy hipotezę, że zmniejszenie zawartości składników odżywczych w ściekach mogło spowodować spadek długości i masy trawy (rys. 36 i 37).



Rysunek 36. Zmiany długości trawy w okresie eksperymentalnym



Rysunek 37. Zmiany masy trawy w okresie eksperymentalnym

Schwander Polska przeprowadził obserwacje na trzech poletkach z różnymi metodami nawadniania, co pozwoliło na porównanie efektów stosowania różnych źródeł wody:

- Poletko I – Nawadnianie permeatem z częściowo usuniętymi składnikami odżywczymi (azotem i fosforem). Permeat to ściek poddany biologicznej obróbce, a następnie mikrofiltracji membranowej i dezynfekcji lampą UV. Woda jest częściowo pozbawiona składników odżywczych (azotu i fosforu), dzięki czemu jest bezpieczniejsza dla środowiska i nie powoduje dodatkowego zanieczyszczenia gleby tymi składnikami. Taka woda może być wykorzystywana jako naturalny nawóz, dostarczający roślinom niezbędnych składników odżywczych, poprawiających ich wzrost i rozwój. Nie dochodzi do nadmiernego nawożenia gleby.
- Poletko II – Nawadnianie wodą z kranu. Jest to klasyczna metoda nawadniania stosowana w tradycyjnym rolnictwie. Woda z kranu, choć nadaje się do podlewania roślin, nie zawiera żadnych dodatkowych składników odżywczych wspomagających wzrost roślin. Z tego powodu rośliny mogą wymagać dodatkowego nawożenia, aby osiągnąć optymalny wzrost.
- Poletko III – Nawadnianie permeatem z drugiej linii oczyszczania (składniki odżywcze nie zostały usunięte). W tym przypadku permeat pochodzi z drugiej linii oczyszczania, gdzie składniki odżywcze (biogeny), takie jak azot i fosfor, nie zostały usunięte. Zawartość biogenów w wodzie może wpływać na wzrost roślin, ale w dłuższej perspektywie nadmiar azotu i fosforu może prowadzić do eutrofizacji gleby. Nadmiar tych składników odżywczych może również zmniejszyć różnorodność biologiczną gleby i prowadzić do obniżenia jej jakości. Ten rodzaj nawadniania może dostarczać roślinom dodatkowych składników odżywczych, ale należy go nadzorować, aby uniknąć nadmiernego gromadzenia się składników odżywczych.

Celem przeprowadzonych badań było sprawdzenie, w jaki sposób różne źródła wody – w tym permeat z oczyszczonych ścieków – wpływają na wzrost, kondycję i plony roślin. Eksperymenty takie są szczególnie istotne w kontekście:

- » **Zrównoważonego rolnictwa: rosnące wyzwania związane z dostępnością wody pitnej i koniecznością jej oszczędzania skłaniają do poszukiwania alternatywnych źródeł wody do nawadniania. Woda z oczyszczalni ścieków, zwłaszcza po odpowiednim uzdatnieniu, może być dobrym rozwiązaniem pozwalającym odzyskać zasoby wodne.**
- » **Recyklingu wody: Wykorzystanie oczyszczonych ścieków, zwłaszcza permeatu, wpisuje się w trend gospodarki o obiegu zamkniętym. Praktyka ta może ograniczyć zużycie wody z sieci wodociągowej, a także zmniejszyć dalszy, niekorzystny wpływ na środowisko.**

5.4 Doświadczenie zdobyte w szklarniach

W ramach pilotażu 3 w jednym sezonie wegetacyjnym uprawiano kukurydzę zwyczajną. Uprawa rozpoczęła się wiosną 2024 r., ale dokładna data rozpoczęcia zależała od warunków pogodowych. Na południu Polski było to możliwe wcześniej niż w Kuopio lub Ugãle. Etapy realizacji uprawy przedstawiono w tabeli 33.



Rysunek 38. Szklarnia ReNutriWater w Samsø, Dania

Tabela 33. Etapy realizacji zadania w ramach pilotażu 3

Part	Tasks	2024 / miesiące											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Soil choosing/ greenhouse construction	Soil searching. Soil sample lab testing (on site)												
	Planning of the experiment												
	Construction of the greenhouse												
	Delivery of soil from the field												
Setting up of the experiment/ plant choosing	Preparation of the experiment: 1) soil testing 2) soil fertilisation												
	Ensuring soil moisture												
	Selection of plants, sowing of the plant seeds												
	Control of humidity in the greenhouse												
Watering/ plant growth	Watering combinations. Elimination of possible pests												
	Water testing												
	Harvesting of plants												

1. Tworzenie odpowiedniej gleby

Skład gleby został określony na początku projektu, podczas spotkań i konsultacji. Wyglądał on następująco:

- Piasek (0,05-2,00 mm): 40-85%
- Muł (0,002-0,05 mm): 0-50%
- Gлина (<0,002 mm): 0-20%

Próbki gleby poddano analizom laboratoryjnym w celu określenia ich składu mineralnego, poziomu składników odżywczych i zdolności zatrzymywania wody. Celem było uzyskanie gleby o ubogim składzie, tak aby rośliny musiały wykorzystywać składniki odżywcze zawarte w wodzie.

2. Wybór szklarni

Do eksperymentu wybrano szklarnię o powierzchni 18 m², wykonaną z konstrukcji aluminiowej i pokrytej płytami poliwęglanowymi.

Szklarnia została zaprojektowana tak, aby chronić rośliny przed bezpośrednim działaniem promieni słonecznych, zapewnić stabilne warunki wilgotności i temperatury oraz chronić je przed ulewnymi deszczami, silnym wiatrem i innymi niekorzystnymi warunkami pogodowymi. Dzięki temu możliwe było precyzyjne kontrolowanie warunków uprawy, co miało kluczowe znaczenie dla powodzenia badań.

3. Wybór doniczek

Każda doniczka miała wyjmowaną wkładkę z uchwyty, które ułatwiały jej wyjmowanie. Na spodzie wkładki wykonano otwory, aby zapewnić odprowadzanie nadmiaru wody (rys. 39).

Wymiary doniczek:

- Średnica: 29,8 cm
- Wysokość: 25,7 cm
- Pojemność: 14 l
- Pojemność wkładu: 10 l



Rysunek 39. Doniczki przygotowane do wysiewu i podzielone na grupy

4. Wysiew i pielęgnacja roślin

W celu porównania rośliny podzielono na grupy i podlewano różnymi rodzajami wody. Do wyboru mieliśmy następujące opcje:

- Nawadnianie wodą destylowaną,
- Nawadnianie wodą destylowaną z dodatkiem nawozów,
- Nawadnianie oczyszczonymi ściekami (dezynfekowanymi lub nie),
- Nawadnianie wodą odzyskaną (ścieki oczyszczone poddane dalszej obróbce, takiej jak filtracja i dezynfekcja),
- Nawadnianie wodą odzyskaną (ścieki oczyszczone poddane dalszej obróbce, takiej jak filtracja i dezynfekcja) z dodatkiem nawozów,
- Nawadnianie wodą pitną.



Rysunek 40. Kiełkująca kukurydza

Przed wysianiem nasion glebę odpowiednio nawilżono wodą z kranu, aby stworzyć optymalne warunki do kiełkowania. Nasiona nie były poddawane żadnej obróbce. Po wysianiu kukurydzy doniczki przykryto ciemną folią perforowaną, aby utrzymać stabilną wilgotność gleby i temperaturę. Warunki te przyczyniły się do szybszego kiełkowania nasion kukurydzy. Po wykiełkowaniu nasion folię usunięto, umożliwiając roślinom swobodny wzrost (rys. 40).

5. Mieszanki nawadniające (obserwacja szkodników roślin)

W Wołkowcy zaplanowano nawadnianie w trzech wariantach:

- **Wariant I:** nawadnianie oczyszczonymi ściekami (permeatem) z oczyszczalni ścieków MBR, pochodzącymi z sekwencji biologicznej, w której przeprowadzono proces zwiększonego usuwania składników odżywczych (azotu i fosforu).
- **Wariant II:** nawadnianie wodą z kranu.

- **Wariant III:** nawadnianie oczyszczonymi ściekami (permeatem) pochodzącymi z drugiej linii technologicznej MBR, w której przeprowadzono proces technologiczny wyłącznie z usuwaniem związków węgla bez usuwania składników odżywczych.

W wariantach I i III odbywało się nawadnianie oczyszczonymi ściekami (permeatem) pochodzącymi z oczyszczalni ścieków w Wołkowyci. Pojemniki zawierające ścieki do podlewania doniczek były chronione przed wysokimi temperaturami panującymi w szklarni.

Prowadzenie szklarni to nie łatwizna. Napotkaliśmy pewne trudności – na przykład w Kuopio, pomimo braku ekstremalnych temperatur, szklarnia była tak nasłoneczniona, że trzeba było ją przykryć siatką cieniującą. W połowie lipca w Wołkowyci, ze względu na wysokie temperatury i przypalanie upraw, konieczne było przeniesienie roślin poza szklarnię (rys. 41, 42). W pierwszej połowie września doniczki zostały ponownie przeniesione do szklarni. Uprawa kukurydzy była prowadzona do połowy listopada.



Rysunek 41. Rosnąca kukurydza zaczyna mieć w szklarni zbyt wysoką temperaturę

6. Zbiory i analiza

Rośliny były pod naszą obserwacją. Zapisywaliśmy postępy wzrostu i robiliśmy zdjęcia roślin w celach porównawczych.

Zbiory upraw rozpoczęły się w różnym czasie. W pierwszej kolejności decyzję o zakończeniu uprawy podjęto na wyspie Samsø, a następnie w Kuopio, Ugale i Wołkowyci.

Rośliny zostały zebrane, oczyszczone z ziemi i zważone.



Rysunek 42. Doniczki przeniesione na zewnątrz

6 Słowo do grup docelowych

6.1 Uniwersytet Nauk Stosowanych w Savonii, Kuopio

Wszystko zaczęło się od ambitnego celu – trzech projektów pilotażowych, których celem było nie tylko sprawdzenie jakości oczyszczonych ścieków. Chodziło o coś więcej: czy odzyskana woda może bezpiecznie powrócić do obiegu, nawadniając uprawy zamiast być odprowadzana do kanalizacji? Zanim jednak choć jedna kropla dotknęłaby gleby, należało przygotować solidy grunt – i tak się stało. Faza planowania była niezwykle skrupulatna. Przeanalizowano wszystkie istotne dyrektywy, rozporządzenia i niuanse prawne UE, a następnie uwzględniono je w projekcie. Lista parametrów do analizy była obszerna – niemal przytłaczająca – ale elastyczna. Partnerzy mogli dostosować ją do swoich budżetów i możliwości technicznych. Nie wszystkie elementy można było zmierzyć, ale dzięki przemyślanemu systemowi priorytetów te najważniejsze znalazły się we wszystkich projektach pilotażowych, zapewniając zdobycie spójnych, interesujących nas informacji.



Rysunek 43. Program pilotażowy na Uniwersytecie Nauk Stosowanych w Savonii

Szklarnie stały się laboratoriami

Działania przeniosły się do szklarni. Obiektem badań stała się kukurydza i dla wielu partnerów była to nieznaną dziedziną. Badania rolnicze stanowiły obcy obszar. Szybko więc zaczęły pojawiać się pytania: jak zapewnić równe warunki dla wszystkich roślin testowych? Ile wody powinna dostawać każda doniczka i jak ujednolicić to w różnych krajach?

Wytyczne zostały przedstawione, jednak z perspektywy czasu można stwierdzić, że mogły one być bardziej przejrzyste i praktyczne. Pomimo różnic w metodach i lokalnych dostosowaniach, pilotaże przebiegały stabilnie. Nie było żadnych poważnych potknięć ani kryzysów. Eksperymenty odbywały się zgodnie z planem, od harmonogramów nawadniania po monitorowanie roślin, aż w końcu zaczęły spływać dane.

Świadomość, bezpieczeństwo i małe zwycięstwa

Co ważne, bezpieczeństwo osób obsługujących pilotażowe projekty nigdy nie zostało zagrożone. Przemyślano i ograniczono możliwe zagrożenia dla zdrowia. Wraz z wynikami laboratoryjnymi uzyskaliśmy efekt domina: wzrosła świadomość społeczna na temat wody odzyskanej, a także realna ciekawość i poparcie dla innowacji w zakresie ponownego wykorzystania ścieków.

Jednak nie wszystko poszło idealnie. Ważna lekcja, którą wyciągnęliśmy z projektu: w prostocie siła. Prostsze eksperymenty pozwalają na dokładniejsze porównania. Nie należy przeciążać procesu zbyt dużą liczbą próbek lub skomplikowanymi analizami – koszty szybko rosną, a przejrzystość maleje.

Przepisy, przeszkody i przyszłe plany

Rolę odegrały również ramy prawne w poszczególnych krajach. Na przykład w Finlandii nadal nie zezwala się na wykorzystywanie wody odzyskanej do nawadniania upraw. Nie musi to jednak stanowić przeszkody – jest to raczej szansa. Bycie jednym z pierwszych, którzy testują nowe rozwiązania, oznacza wytyczanie nowych ścieżek, a nie podążanie za innymi.

Wciąż pozostaje wiele do zbadania. Jak leki, mikro- i nanoplastiki, mikroglina i PFAS wpływają na zdrowie roślin, a także na zdrowie ludzi? Czy zaawansowane technologie oczyszczania są wystarczająco opłacalne, aby można je było stosować na szeroką skalę w miejskich oczyszczalniach ścieków? Na te pytania nie ma jeszcze odpowiedzi. Jednak zebrane przez nas dane stanowią początek. Temat został otwarty. To, co kiedyś wydawało się tylko ściekami, może okazać się zasobem czekającym na odzyskanie.

6.2 VNK Serviss, Ugāle

Upalne dni, czysta woda: łotewski pilotaż, który dezynfekuje przyszłość

Lato w Ugāle na Łotwie było nieubłagane. Ciepło promieniowało z dróg, wsiąkało w glebę i wisiało w powietrzu jak ostrzeżenie. Jednak w oczyszczalni ścieków VNK Serviss upał oprócz bycia zjawiskiem atmosferycznym, miał również znaczenie symboliczne. Projekt pilotażowy realizowany w tym miejscu nie tylko przebiegał zgodnie z harmonogramem, ale przebiegał z wielką intensywnością – taką, jaką może zapewnić tylko silne poczucie celu w działaniu. Kiedy woda staje się kwestią bezpieczeństwa narodowego, liczy się każdy stopień Celsjusza.



Rysunek 44. Partnerzy z wizytą VNK Serviss w Ugāle na Łotwie

W tym małym, zdeterminowanym zakątku Łotwy pilot miał jasny cel: odzyskanie wody, czystej na tyle, aby można ją było bezpiecznie ponownie wykorzystać do nawadniania. Tutaj zakorzenił się cichy sukces – nie tylko na polach kukurydzy lub w arkuszach danych, ale w tworzeniu samej metody. Wyjątkowy wkład Łotwy pochodził z laboratoriów Uniwersytetu Łotewskiego: proces dezynfekcji oczyszczonych ścieków, który odbiegał od tego, co robili inni partnerzy projektu. W przeciwieństwie do konwencjonalnych metod chemicznych, metoda ta od początku była dostosowana do potrzeb rolnictwa. Bezpieczniejsza, bardziej dostosowana do potrzeb, a teraz – dzięki testom – sprawdzona pod kątem skuteczności.

Wyciągnięte wnioski

Oczywiście sukcesy nierzadko wiążą się z bolesnymi lekcjami. W Ugāle lekcje te miały mniej wspólnego z chemią wody, a więcej z logistyką. Okazało się, że planowanie nie dotyczyło tylko rur i pomp. Dotyczyło ono ludzi – i części. Zaopatrzenie nie było tak proste, jak przewidywano. Globalne łańcuchy dostaw, już i tak splątane przez zmieniającą się sytuację geopolityczną, okazały się niestabilne. Opóźnienia w dostawach sprzętu zagrażały harmonogramowi. Marki, które kiedyś wydawały się niezawodne, zawiodły. Potem pojawił się czynnik ludzki. Choroby, urlopy, rezygnacje – naturalne elementy każdego środowiska pracy, ale trudne do uwzględnienia w napiętych harmonogramach pilotażowych. Kiedy projekt zależy od terminów, nieobecność nawet jednej kluczowej osoby może wytrącić całą maszynę z równowagi. W jednym przypadku prawie cała odpowiedzialność za realizację projektu spadła na jednego przeciążonego pracownika. Udało się – ale ledwo. Jak to mówią – następnym razem będziemy mieć plan B.

Odzyskana woda

Ścieki z Ugāle są ściekami komunalnymi, niezłożonymi i stosunkowo czystymi. Nie ma tu przemysłu wprowadzającego zanieczyszczenia do systemu, nie ma też mieszanek chemicznych, które trzeba rozkładać. Ta prostota jest darem, ale także ograniczeniem. Opracowana tutaj metoda sprawdza się w takich warunkach. Jednakże, jeśli ma ona zostać rozszerzona lub przeniesiona do bardziej złożonych środowisk, może wymagać ulepszenia technologicznego i bardziej rygorystycznych protokołów bezpieczeństwa. Co najważniejsze, woda odzyskana nie może być przechowywana w nieskończoność. Po oczyszczeniu i dezynfekcji musi być szybko wykorzystana. Infrastruktura musi odpowiadać nie tylko specyfikacjom technicznym, ale także popytowi rynkowemu. Kto będzie korzystał z wody i kiedy? Odpowiedzi na te pytania muszą zostać udzielone, zanim ruszy maszyna.

Uprawy, zanieczyszczenia i ostrożność

Kukurydza była bezpiecznym wyborem. Poddawana obróbce termicznej przed spożyciem, zapewnia ochronę przed zagrożeniami mikrobiologicznymi. Była idealną uprawą do pierwszego eksperymentu z nawadnianiem wodą odzyskaną, jednak zespół w Ugāle planami wybiega już w przyszłość. Czy mogliby podjąć się bardziej śmiałego przedsięwzięcia? Nawadniać marchewkę, buraki lub ziemniaki – warzywa korzeniowe, które trafiają prosto z gleby na talerz? Kolejny krok będzie testem nie tylko jakości wody, ale także postrzegania społecznego, przepisów i systemów kontroli jakości.

Perspektywy na przyszłość

Pilotażowy projekt w VNK Serviss był pod wieloma względami cichym sukcesem. Przyniósł rezultaty, dostarczył wiedzy i pozwolił opracować metodę, na której warto się oprzeć. Ale być może najważniejsze jest to, że postawił właściwe pytania. Czy możemy zaufać wodzie odzyskanej na tyle, by stosować ją w naszych systemach żywnościowych? Co jest potrzebne, aby zaufanie to było możliwe? Jak zapewnić, że gdy nadejdzie kolejna fala gorąca – dosłownie lub w polityce – będziemy gotowi nie tylko zareagować, ale także dostosować się? W Ugāle już się do tego przygotowujemy.

6.3 Jurmalas Udens, Jūrmala

Większość zaprojektowanych działań pilotażowych przebiegła zgodnie z planem. W ramach projektu przetestowano różne rozwiązania wodne, w tym oczyszczone ścieki z oczyszczalni ścieków, do podlewania trawy i kwiatów w miejscu pilotażowym. W szkołach i na wycieczkach szkolnych odbyły się interaktywne wykłady i praktyczne zajęcia związane z tematyką projektu (rysunki 45 i 46).



Rysunek 45. Dzieci w wieku szkolnym przeprowadzają różne praktyczne eksperymenty związane z wodą

Podlewanie kwiatów (rys. 47) i trawników w ramach projektu pilotażowego również potwierdziło przydatność oczyszczonych ścieków jako skutecznego rozwiązania do nawadniania.

Planując podobny projekt pilotażowy lub praktykę, należy wziąć pod uwagę kilka aspektów. Jednym z nich jest poufność informacji dotyczących dokładnego składu roztworu nawadniającego stosowanego przez firmę zajmującą się zazielenianiem. Choć informacje te byłyby bardzo cenne do celów naukowych, należy pamiętać, że firma ma prawo nie ujawniać składu roztworu nawadniającego, chyba że wymaga tego jakaś państwowa organizacja kontrolna.

Kolejnym aspektem, o którym należy pamiętać, jak wynika z doświadczeń zdobytych podczas projektu pilotażowego, jest przewidywanie i planowanie konserwacji zbiorników na ścieki, jeśli woda jest gromadzona w takich zbiornikach przed wykorzystaniem do nawadniania. Jak opisano bardziej szczegółowo w rozdziale 5, w zbiornikach zawierających oczyszczone ścieki bez chloru doszło do zakwitu glonów. W związku z tym postawiono hipotezę, że redukcja składników odżywczych w ściekach może być spowodowana procesem zakwitu w zbiorniku. Plan na następny okres projektu zakłada dokładne oczyszczenie zbiorników i, w razie potrzeby, powtórzenie tej czynności w celu ustalenia częstotliwości konserwacji i dokładnego wpływu na poziom składników odżywczych.

Aby powtórzyć nasze sukcesy i uniknąć popełnienia błędów, należy zrozumieć, że ścieki są bogate w składniki odżywcze, ale wykorzystanie konkretnych ścieków zależy od ich jakości, preferowanej metody nawadniania i przepisów państwowych. Dlatego też każde ścieki powinny zostać dokładnie przeanalizowane przed wykorzystaniem do nawadniania.

Zainteresowanie i zaangażowanie ze strony szkół okazały się duże – w 2024 r. chętnych było trzynaście placówek edukacyjnych z różnych gmin na Łotwie i ponad 400 uczestników. Podkreśliło to znaczenie edukowania młodszego pokolenia w zakresie tematów, które niekoniecznie są uwzględnione lub wymienione w programach szkolnych, ale mają kluczowe znaczenie w budowaniu kolektywnego zrozumienia dla pojęcia społeczeństwa przyjaznego dla klimatu – w tym wiedzy na tematy związane z wodą.



Rysunek 46. Interaktywny wykład w szkole na temat zagadnień związanych z wodą, m. in. odzyskiwania

Kolejne kroki mogą obejmować rozszerzenie potencjalnego wykorzystania oczyszczonych ścieków w takich obszarach, jak nawadnianie terenów zielonych w całej gminie, nawadnianie boisk sportowych, magazynowanie oczyszczonych ścieków w zbiornikach wykorzystywanych do gaszenia pożarów budynków mieszkalnych.

Dobre praktyki i świadomość społeczna w zakresie ponownego wykorzystania wody i jakości odzyskanych ścieków idą w parze, dlatego warto rozpowszechniać wiedzę i informować społeczeństwo o dostępności zasobów wodnych i ich ogólnym wykorzystaniu, a także edukować społeczeństwo w zakresie wskaźników jakości ścieków, zmieniając postrzeganie „ścieków oczyszczonych” na „zasób” poprzez edukację ekologiczną. Aby osiągnąć ten cel, należy podjąć określone działania – uzyskać rzeczywiste wyniki oparte na nauce i praktyce, a następnie edukować społeczeństwo podczas wizyt w szkołach i wykładów, promować sukcesy naukowe na różnych konferencjach i spotkaniach. Podejmijmy razem działania na rzecz wspólnego celu, jakim jest zbudowanie społeczeństwa przyjaznego dla klimatu!



Rysunek 47. Kwiaty podlewane oczyszczonymi ściekami

6.4 Samsø

Drzwi otwarte w szklarni

Eksperyment szklarniowy w ramach projektu pilotażowego Samsø przebiegł zgodnie z planem. Rośliny kukurydzy dobrze rosły i nie miały szkodników w okresie wegetacyjnym. Jakość wody odzyskanej wykorzystywanej do nawadniania była dobra, a jej użycie było łatwe, ponieważ dwie szklarnie znajdowały się na terenie oczyszczalni ścieków.

Promocja projektu zakończyła się sukcesem, ponieważ wiele osób z okolicy wykazało zainteresowanie tym tematem. Od uczniów po rolników i ogół społeczeństwa – wszyscy odwiedzający byli otwarci na możliwość wykorzystania wody odzyskanej do nawadniania upraw zamiast po prostu odprowadzać ją do morza.



Rysunek 48. Spotkania na miejscu z grupami docelowymi

Planując taki eksperyment w szklarni, należy wziąć pod uwagę wszystkie aspekty – rodzaj metodologii, materiały, parametry gleby, potrzeby roślin, jakość wody, przyrządy analityczne oraz współpracę osób, które będą wykonywać wszystkie prace praktyczne.

W ramach projektu pilotażowego na wyspie Samsø doświadczyliśmy dobrego zgrania między współpracownikami podczas codziennej pielęgnacji roślin, a także podczas cotygodniowych analiz. W miarę możliwości korzystaliśmy z istniejącego sprzętu pomiarowego oczyszczalni ścieków, ale musieliśmy również zakupić nowy sprzęt. Aby wyniki analiz były wysokiej jakości, ważne jest posiadanie wysokiej jakości przyrządów. Niektóre z przyrządów zalecanych w ramach projektu były niskiej jakości, co w pewnym stopniu znalazło odzwierciedlenie w wynikach, zwłaszcza w analizie gleby.

Do uprawy kukurydzy wykorzystaliśmy wiadra dopuszczone do kontaktu z żywnością, głównie po to, aby uniknąć obecności w nich substancji szkodliwych, które mogłyby wpłynąć na wyniki.

Podczas uprawy roślin stwierdziliśmy, że ważna jest kontrola wilgotności powietrza, a także promieniowanie słoneczne. Rośliny powinny mieć odpowiednią ilość światła słonecznego i wody, aby dobrze rosnąć. Podczas upalnych letnich tygodni szklarnia była przykryta tkaninami zaciemniającymi.

Poprawę w uprawie kukurydzy mogłoby przynieść nawadnianie kropłowe. Regularne dostarczanie wody roślinom w ciągu dnia byłoby lepsze dla ich wzrostu niż podawanie większej ilości wody raz dziennie. Podczas nawadniania gleby bardzo uważaliśmy, aby nie rozlać wody z recyklingu na rośliny, ale dzięki nawadnianiu kropłowemu byłoby to łatwiejsze.

Dalsze kroki

W tym eksperymencie wykorzystaliśmy wodę odzyskaną do nawadniania kukurydzy, ale interesujące byłoby sprawdzenie, jak na wodę odzyskaną reagują inne uprawy, takie jak ziemniaki, marchew i inne warzywa korzeniowe. Czy niektóre potencjalne substancje, które mogą pozostać w oczyszczonych ściekach, zostaną wchłonięte przez inne gatunki roślin spożywczych? Interesujące byłoby również przetestowanie jeszcze większej liczby różnych substancji, które potencjalnie pozostają w wodzie odzyskanej, i sprawdzenie, czy można je wykryć w uprawach.

Wszyscy uczestnicy pilotażowego projektu na wyspie Samsø wykazali duże zainteresowanie, ale co z ogółem społeczeństwa? Zgodnie z obowiązującym prawem krajowym w Danii nie można nawadniać upraw spożywczych wodą odzyskaną. Duńczycy nie są przyzwyczajeni do postrzegania wody odzyskanej jako zasobu wykorzystywanego do produkcji żywności. A czy my jesteśmy gotowi włączyć ścieki do cyklu rolnego?

Aby przejść w kierunku zrównoważonego modelu biokrażenia na wyspie Samsø, konieczne jest bardziej systemowe zakotwiczenie i podejście. Dlatego zaangażowanie lokalnych interesariuszy i współpraca międzysektorowa mają kluczowe znaczenie dla przyszłych postępów. Projekt pilotażowy ReNutriWater jest częścią trwającego rozwoju zielonego planu generalnego dla wyspy, który jest powiązany z naszymi planami dostosowania się do zmian klimatycznych, łagodzenia ich skutków i działań na rzecz klimatu.

7.1 WaterSafe

Narzędzia informatyczne stają się coraz bardziej popularne w różnych sektorach gospodarki, od przemysłu i energetyki po rolnictwo i usługi publiczne. Ich rola w optymalizacji procesów, automatyzacji działań i wspieraniu podejmowania decyzji staje się kluczowa w kontekście rosnących wyzwań związanych z efektywnym wykorzystaniem zasobów i ochroną środowiska. W szczególności ich zastosowanie może znacząco przyczynić się do osiągnięcia celów wyznaczonych przez Unię Europejską w zakresie zrównoważonego zarządzania zasobami i przekształcenia tradycyjnego modelu gospodarczego w gospodarkę o obiegu zamkniętym. Jednym z obiecujących obszarów, w których narzędzia informatyczne mogą odegrać znaczącą rolę, jest sektor wodno-kanalizacyjny. W obliczu rosnącego zapotrzebowania na wodę, zmieniających się warunków klimatycznych i potrzeby minimalizowania wpływu działalności człowieka na ekosystemy wodne, nowoczesne technologie cyfrowe mogą stać się kluczowym elementem wspierającym efektywne zarządzanie zasobami wodnymi. Dzięki zastosowaniu zaawansowanych systemów analizy danych możliwe jest zwiększenie efektywności procesów związanych z uzdatnianiem i dystrybucją wody, ograniczenie strat oraz zminimalizowanie negatywnego wpływu na środowisko. Narzędzie WaterSafe zostało opracowane w celu ochrony zasobów wodnych i promowania ponownego wykorzystania wody z ścieków. Jego głównym celem jest umożliwienie użytkownikom – operatorom oczyszczalni ścieków, władzom lokalnym i innym podmiotom zarządzającym gospodarką wodno-ściekową – wyboru optymalnej technologii uzdatniania wody. Dzięki integracji z obowiązującymi przepisami Unii Europejskiej i funkcjami analitycznymi, WaterSafe jest nie tylko wsparciem operacyjnym dla oczyszczalni ścieków, ale także narzędziem umożliwiającym efektywne zarządzanie zasobami wodnymi na poziomie lokalnym i regionalnym. Jego wykorzystanie może znacząco przyczynić się do transformacji sektora wodno-ściekowego, wspierając realizację celów zrównoważonego rozwoju i gospodarki o obiegu zamkniętym.



Rysunek 49. Testowanie cyfrowego narzędzia

7.2 Jak używać WaterSafe?

Korzystając z WaterSafe, można skutecznie zarządzać procesami oczyszczania ścieków i ponownego wykorzystania wody w sposób zgodny z zasadami gospodarki o obiegu zamkniętym. Narzędzie to nie tylko wspiera proces podejmowania decyzji, ale także przyczynia się do ochrony zasobów wodnych i minimalizacji wpływu działalności człowieka na środowisko.

Aby skutecznie wykorzystać narzędzie WaterSafe do analizy i poprawy jakości oczyszczonych ścieków, należy wykonać poniższe kroki:



Krok 1: Wprowadzenie danych dotyczących oczyszczalni ścieków

Należy rozpocząć od wprowadzenia odpowiednich danych dotyczących oczyszczalni (rys. 50). Należy podać aktualne parametry ścieków, w tym stężenia kluczowych wskaźników jakości wody (np. BOD₅, COD, składniki odżywcze) oraz, jeśli to możliwe, więcej informacji na temat patogenów, mikrozanieczyszczeń itp.



Krok 2: Wybór docelowej klasy jakości wody

Trzeba wybrać pożądaną klasę jakości wody, którą chce się osiągnąć. Może ona być oparta na zamierzonym zastosowaniu (np. nawadnianie, odprowadzanie do wód powierzchniowych, ponowne wykorzystanie w przemyśle) lub odpowiednich ramach prawnych/regulacyjnych.



Krok 3: Automatyczna analiza przez WaterSafe

Po wprowadzeniu danych WaterSafe automatycznie porówna parametry ścieków z obowiązującymi normami prawnymi UE. Określi, czy każdy parametr mieści się w granicach limitów prawnych, jest poniżej wymaganego progu (poniżej normy) lub powyżej dopuszczalnego limitu (potencjalnie szkodliwy).



Krok 4: Otrzymanie ukierunkowanych zaleceń dotyczących oczyszczania

Dla każdego parametru, który przekracza lub nie osiąga normy, WaterSafe sugeruje najskuteczniejsze metody oczyszczania (np. filtracja, dezynfekcja, zaawansowane utlenianie). Ponadto system dostarcza kompleksową strategię oczyszczania, która jednocześnie optymalizuje wartości wielu parametrów, wydajność procesu pod względem kosztów i jego wdrożenie techniczne.



Krok 5: Przegląd otrzymanej strategii oczyszczania

Wynikiem jest zoptymalizowany, dostosowany do Państwa potrzeb plan oczyszczania ścieków, zgodny z wybraną przez Państwa docelową klasą jakości wody, wymogami zgodności z przepisami oraz możliwościami technicznymi Państwa oczyszczalni ścieków.



Wskazówka: Przed wdrożeniem proponowanej strategii postępowania należy zawsze przeanalizować ją w kontekście lokalnych uwarunkowań prawnych, możliwości operacyjnych i ograniczeń budżetowych.

Water Reuse Calculator
The more data you provide, the more feedback you will receive

- Check that you have entered all the mandatory data
- Asterisk (*) signifies required field
- Check the units – they must match the ones provided in the form

Characteristics of your WWTP

Population equivalent served by the WWTP* [P.E.]
Agglomeration area served by the WWTP [m2]
Treated wastewater amount
yearly* [m3/year]
monthly* [m3/mth]
daily average flow* [m3/d]
daily maximum flow* [m3/d]
Treated wastewater temperature [°C]
Sources of treated wastewater
domestic (d)* [%]
non-domestic (nd)* [%]
urban runoff (ur)* [%]
sum of (d) + (nd) + (ur) = 100% *

Characteristics of your Wastewater

Physicochemical characteristic of wastewater quality
COD* [mg/l]
BOD5* [mg/l]
Total Suspended Solids (TSS)* [mg/l]
Total Nitrogen (TN)* [mg/l]
Total Phosphorus (TP)* [mg/l]
Total Organic Carbon (TOC)* [mg/l]
Turbidity* [NTU]
pH* [pH]
Electrical Conductivity (EC) [µS/cm]

Microbiological indicators
Escherichia coli (E. coli)* [cfu/100ml]
Legionella spp. [cfu/l]
Helicobacter eggs [eggs/l]

Macronutrients
Ammonia (N-NH4) [mg/l]
Nitrates (NO2-) [mg/l]
Nitrates (N-NO3) [mg/l]
Phosphates (P-PO4+3-) [mg/l]
Potassium (K+) [mg/l]

Micronutrients
Iron (Fe) [mg/l]
Copper (Cu) [mg/l]
Zinc (Zn) [mg/l]
Nickel (Ni) [mg/l]

Harmful metals
Cadmium (Cd) [mg/l]
Chromium (Cr) [mg/l]
Mercury (Hg) [mg/l]
Lead (Pb) [mg/l]

What is the quality of reused water that you would like analyzed?
Due to 2020/741 Regulation (EU) of The European Parliament and of the Council of 25 May 2020 on minimum requirements for water reuse. Minimum requirements apply to reclaimed water intended for agricultural irrigation (Annex I - Table 1).

Class	Class A	Class B	Class C	Class D
Water reuse demands	All food crops consumed raw where the edible part is in direct contact with reclaimed water and root crops consumed raw.	Food crops consumed raw where the edible part is produced above ground and is not in direct contact with reclaimed water, processed food crops and non-food crops including crops used to feed milk- or meat-producing animals.		Industrial, energy and landfilled crops.
Irrigation methods	All irrigation methods.	Drip irrigation or other irrigation method that avoids direct contact with the edible part of the crop.		All irrigation methods.
Other demands	Where there is a risk of aerosolization.		Where there is a risk of aerosolization.	Where there is a risk of aerosolization.

Select the class that fits your water reuse requirements. *

Is there a risk of aerosolization? *

Will the water be used for pastures or animal feed? *

CALCULATE
Click here to read the analysis online.

PDF REPORT
Provide your email to receive the report as a PDF.

Rysunek 50. Formularz do wprowadzania danych

8 Wytyczne dotyczące oceny ryzyka

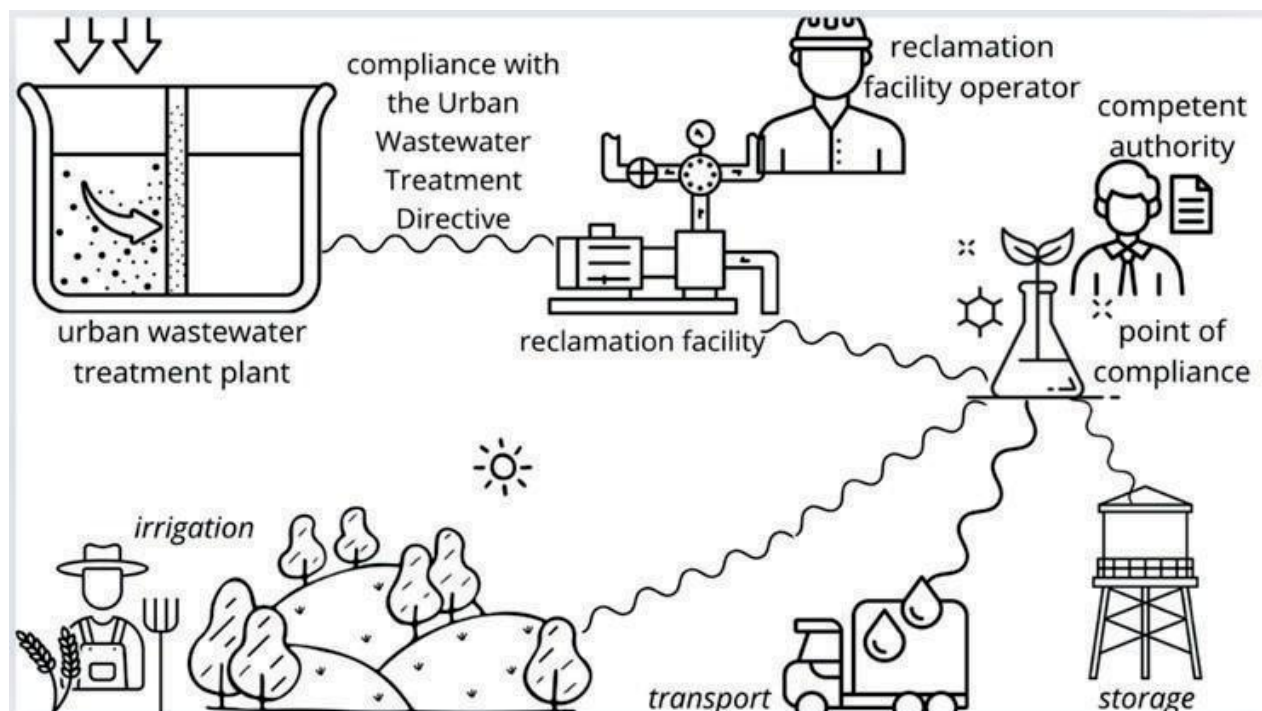
Każde zastosowanie musi być bezpieczne, dlatego niezawodna ocena ryzyka ma kluczowe znaczenie.

Zarządzanie ryzykiem w gospodarce wodnej nie jest nową kwestią. Jednak metodologia musi być dostosowana do konkretnych potrzeb miasta w zakresie zużycia wody.

Nie ma precyzyjnych wytycznych dotyczących zastosowań miejskich, ale warto opierać się na następujących dokumentach:

» **Rozporządzenie (UE) 2020/741 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 25 maja 2020 r. w sprawie minimalnych wymagań dotyczących ponownego wykorzystywania wody.**

Rozporządzenie przedstawia zasadę zarządzania systemem odzyskiwania wody z komunalnych ścieków i wykorzystania wody odzyskanej w rolnictwie (rys. 50). Monitorowanie zgodności jest istotnym elementem systemu. Będzie ono ważnym źródłem danych w Państwa ocenie ryzyka.



Rysunek 51. Schemat koncepcyjny procesu ponownego wykorzystania wody z komunalnych ścieków w rolnictwie, zgodnie z rozporządzeniem 2020/741

Zarządzanie ryzykiem zostało zdefiniowane w rozporządzeniu jako nieodłączny element funkcjonowania systemów odzyskiwania wody. W preambule stwierdzono, że zarządzanie ryzykiem powinno obejmować proaktywną identyfikację ryzyka i zarządzanie nim oraz powinno uwzględniać koncepcję produkcji wody odzyskanej o określonej jakości wymaganej do konkretnych zastosowań. Niezwykle ważne jest opracowanie planu zarządzania ryzykiem.

W rozporządzeniu wprowadzono przydatne definicje

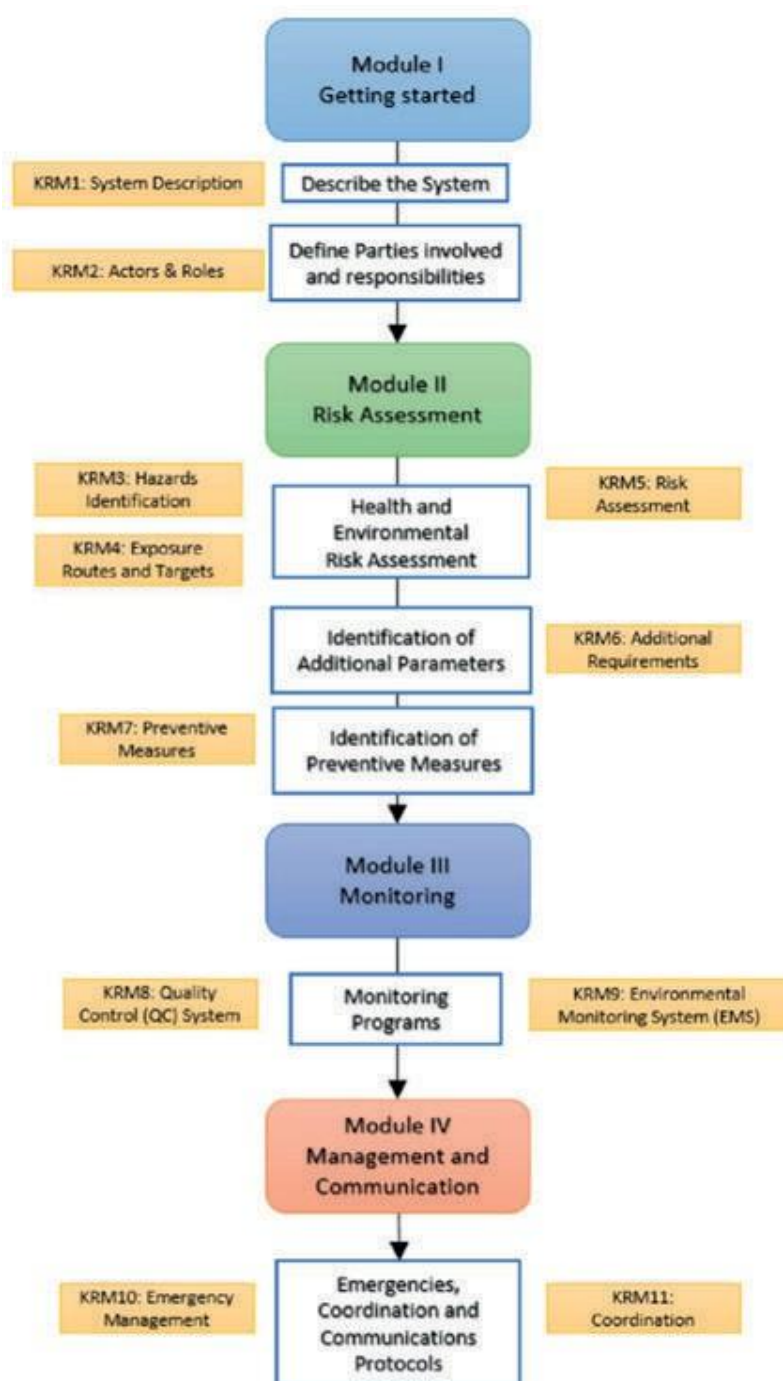
Załącznik II zawiera wykaz działań, które należy podjąć aby ograniczyć ryzyko związane z wykorzystaniem odzyskanej wody do celów rolniczych. Kluczowe elementy zarządzania ryzykiem obejmują:

1. Opis całego systemu ponownego wykorzystania wody,
2. Identyfikację zainteresowanych stron,
3. Identyfikację potencjalnych zagrożeń,
4. Identyfikację środowisk i populacji narażonych na ryzyko,
5. Ocena ryzyka poprzedzoną analizą sytuacji środowiskowej i społecznej. Ten fragment zawiera odwołania do wielu aktów prawnych UE; należy rozważyć, czy trzeba je uwzględnić.
6. Rozważenie konieczności wprowadzenia wymogów bardziej rygorystycznych niż określone w rozporządzeniu.
7. Identyfikację środków zapobiegawczych.

8. Odpowiednie systemy i procedury kontroli jakości.
9. Monitorowanie środowiska w celu zapewnienia informacji zwrotnej na temat jakości.
10. Odpowiednie systemy zarządzania incydentami i sytuacjami awaryjnymi.
11. Zapewnienie ustanowienia mechanizmów koordynacji między różnymi podmiotami w celu zagwarantowania bezpiecznej produkcji i wykorzystania wody odzyskanej.

» **Komunikat Komisji Europejskiej Wytyczne dotyczące stosowania rozporządzenia 2020/741 w sprawie minimalnych wymagań dotyczących ponownego wykorzystania wody 2022/C 298/01.**

Wytyczne wyjaśniają i rozwijają przepisy rozporządzenia. Organizują one metodologię oceny ryzyka opisaną w rozporządzeniu i w przejrzysty sposób przedstawiają kolejne etapy tworzenia systemu zarządzania ryzykiem. Szczegółowo opisują odzyskiwanie wody do celów rolniczych, koncentrując się na kwestiach jakościowych, ilościowych i technologicznych (rys. 52). Niektóre zadania wykraczają poza nasze potrzeby; wykorzystać można niektóre elementy systemu zaproponowane w wytycznych.



Rysunek 52. Kluczowe elementy zarządzania ryzykiem (KRM) związane z ponownym wykorzystaniem wody, uporządkowane w czterech modułach w celu ułatwienia opracowania planu zarządzania ryzykiem, zgodnie z wytycznymi Komisji Europejskiej

» **Water safety plan manual: step-by-step risk management for drinking-water suppliers, wydanie drugie, Światowa Organizacja Zdrowia, 2023 r.**

Podręcznik dotyczący Planu Bezpieczeństwa Wody zawiera praktyczne wskazówki dotyczące wdrażania systemów wody pitnej w bezpieczny sposób zgodnie z zasadami WHO. Podręcznik ten stanowi dopracowany system zarządzania ryzykiem w zakresie zaopatrzenia w wodę pitną, który był udoskonalany przez lata. Jego zasady zostały powtórzone w rozporządzeniu i wytycznych.

» **Sanitation Safety Planning Manual for Safe Use and Disposal of Wastewater, Greywater and Excreta, Światowa Organizacja Zdrowia, 2016 r.**

Wytyczne te są skierowane do podmiotów pragnących bezpiecznie wykorzystywać ścieki i wodę szarą. Chociaż nie jest to naszym celem, reguły tworzenia planu zarządzania ryzykiem zostały jasno opisane, co zainspirowało nas do dalszej pracy. Ponadto proponowana macierz ryzyka stała się podstawą dalszych prac nad oceną ryzyka w projekcie ReNutriWater.

» **ISO 20426:2018 Wytyczne dotyczące oceny ryzyka dla zdrowia i zarządzania nim w przypadku ponownego wykorzystania wody nieprzeznaczonej do spożycia.**

Dokument ISO (Międzynarodowej Organizacji Normalizacyjnej) służy jako wytyczne techniczne dotyczące oceny i zarządzania ryzykiem zdrowotnym związanym z patogenami w wodzie odzyskanej. Obejmują one produkcję, przechowywanie, transport i wykorzystanie wody odzyskanej. Mają zastosowanie do wykorzystania wody odzyskanej z dowolnego źródła.

ISO przedstawia prostą procedurę opartą na wytycznych WHO. Proponuje matryce ryzyka i parametry mikrobiologiczne, które powinny być monitorowane. Minusem jest to, że dostęp do dokumentu jest płatny.

Zakres Planu Bezpieczeństwa Wody Odzyskanej

Zarządzanie ryzykiem oparte na pilotażowych projektach powinno obejmować kroki opisane poniżej.

1. Zbierz zespół

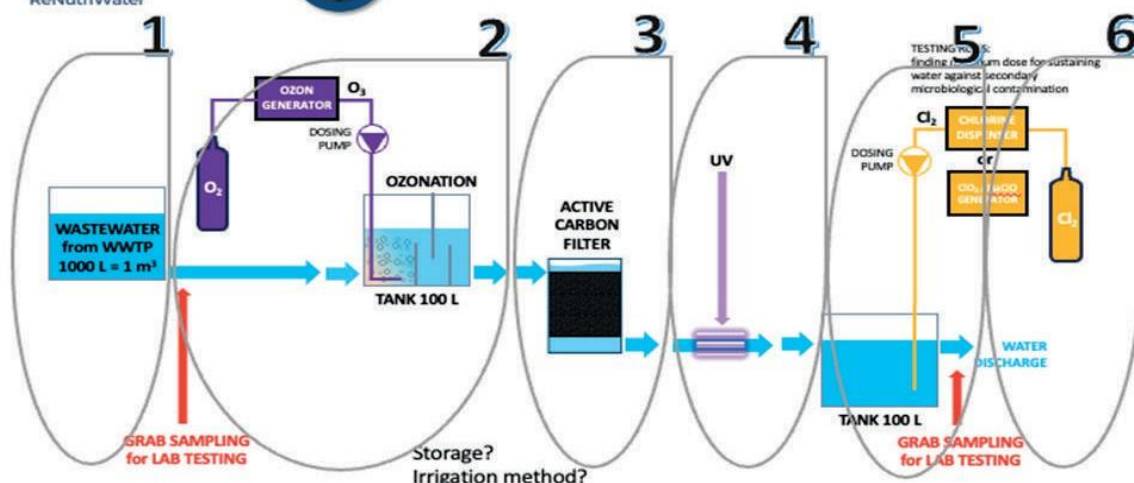
- Jak jest otoczenie oczyszczalni ścieków?
- Jakich kompetencji potrzebujemy?
- Kogo chcą Państwo zaangażować?

Zespół odpowiedzialny za zarządzanie ryzykiem ma kluczowe znaczenie dla systemu. Musi składać się z osób znających technologię, ale także z użytkowników końcowych. Bardzo ważne jest zaproszenie innych interesariuszy, na których mogą mieć wpływ działania pilotażowe lub którzy mogą wpływać na ich funkcjonowanie. Konieczne jest przyciągnięcie osób z administracji publicznej, nauki, rolnictwa, przemysłu oraz organizacji pozarządowych reprezentujących przyrodę i obywateli.

Konieczne jest zidentyfikowanie wszystkich stron zaangażowanych w system ponownego wykorzystania wody oraz określenie ich ról i obowiązków.

2. Opisz projekt pilotażowy

Obejmuje on opis całego systemu odzyskiwania i ponownego wykorzystania wody, od wprowadzenia oczyszczonych ścieków do pilotażowego projektu do punktu użytkowania. Obejmuje on również dane dotyczące miejskiej oczyszczalni ścieków, wykorzystanych technologii i użytkowników końcowych. Rysunek 53 przedstawia przykład podziału procesu na etapy.



Rysunek 53. Podział procesu na etapy w celu identyfikacji zagrożeń

3. Zidentyfikuj zagrożenia i oceń ryzyko

Ten etap ma kluczowe znaczenie dla identyfikacji zagrożeń i niebezpiecznych zdarzeń. Można stosować następujące definicje:

- **Zagrożenie:** czynnik biologiczny, chemiczny, fizyczny lub radiologiczny, który może spowodować szkody dla ludzi, zwierząt, upraw lub roślin, innych organizmów lądowych, organizmów wodnych, gleby lub środowiska w ogóle [art. 3 ust. 7 rozporządzenia (UE) 2020/741]. Zagrożenia mogą mieć kilka rodzajów i muszą być jasno opisane i sparametryzowane.
- **Zdarzenie niebezpieczne:** zdarzenie, w którym ludzie są narażeni na zagrożenie w ramach systemu. Może to być incydent lub sytuacja, która wprowadza lub uwalnia zagrożenie do środowiska, w którym ludzie żyją lub pracują, wzmacnia stężenie zagrożenia lub nie usuwa zagrożenia ze środowiska ludzkiego [WHO, 2016a]. Możemy więc rozumieć to jako niekorzystny scenariusz, który może mieć miejsce w miejscu pracy pilota lub w jego otoczeniu. Będzie on związany z bezpośrednim lub aerozolowym kontaktem ludzi i zwierząt z wodą odzyskaną oraz wpływem wody odzyskanej na rośliny i glebę.
- **Ryzyko:** połączenie prawdopodobieństwa wystąpienia szkody dla zdrowia i ciężkości tej szkody [ISO 20670:2018]. W waszej metodologii połączenie to rozumiane jest jako iloczyn prawdopodobieństwa (P) i dotkliwości (S). Zatem ryzyko $R = P * S$.

Ocena ryzyka rozpoczyna się od identyfikacji zdarzeń niebezpiecznych, tj. tworzenia scenariuszy. Następnie przypisuje się zagrożenia. Istotne znaczenie ma ryzyko związane z cechami fizycznymi pilotów, mikrobiologią i fizykochemią wody odzyskanej. Zagrożenia dzielą się na cztery kategorie:

Q Fizyczne – ilościowe (za dużo/za mało wody)

Ph Fizyczne – uszkodzenie infrastruktury

M Mikrobiologiczne

CH Chemiczne (fizykochemiczne)

Ryzyko można oceniać na podstawie metod jakościowych, półilościowych lub ilościowych.

Metoda ilościowa polega na ocenie prawdopodobieństwa wystąpienia ryzyka i jego skutków, nadając im konkretne parametry. Zaletą metod ilościowych jest obiektywność wyników, dzięki czemu można je porównywać, a wyniki mają wymiar finansowy i procentowy. Wymaga to bardzo szczegółowych danych, których nie posiadamy.

Metoda jakościowa podlega większej subiektywności, a tym samym błędowi, ale z drugiej strony jest znacznie łatwiejsza dla zespołu. Metoda jakościowa polega na indywidualnej ocenie ryzyka w oparciu o doświadczenie i dobre praktyki. Metoda ta wykorzystuje subiektywne miary i oceny, takie jak poziomy opisowe (niski, średni, wysoki). Zaletą metod jakościowych jest to, że nie ma potrzeby kwantyfikowania skutków i częstotliwości zagrożeń. W oparciu o tę metodę wskazujemy ogólne obszary ryzyka, które wymagają uwagi. Możemy ją stosować w przypadku braku konkretnych informacji i danych ilościowych lub zasobów. Następnie przypisujemy konkretne wartości liczbowe do określonego prawdopodobieństwa

i dotkliwości. Dzięki temu otrzymujemy metodę półilościową. Dlatego zarówno ISO, jak i WHO wskazują, że stosowanie tej metody jest uzasadnione (rys. 54).

			SEVERITY (S)				
			Insignificant	Minor	Moderate	Major	Catastrophic
			1	2	4	8	16
LIKELIHOOD (L)	Very unlikely	1	1	2	4	8	16
	Unlikely	2	2	4	8	16	32
	Possible	3	3	6	12	24	48
	Likely	4	4	8	16	32	64
	Almost Certain	5	5	10	20	40	80
Risk Score R = (L) x (S)			<6	7–12		13–32	>32
Risk level			Low Risk		Medium Risk		High Risk
							Very High Risk

Rysunek 54. Półilościowa matryca oceny ryzyka zaproponowana przez WHO i ISO

Cały zespół musi podobnie rozumieć kategorie ryzyka. Nie jest to łatwe ze względu na różne specjalizacje członków zespołu i nieuniknioną subiektywność, której nie da się całkowicie wyeliminować.

Po zidentyfikowaniu zagrożeń i zdarzeń niebezpiecznych w ramach oceny ryzyka należy opracować plan zarządzania ryzykiem, aby zminimalizować potencjalny negatywny wpływ na zdrowie użytkowników końcowych i środowisko.

Niezawodne opracowanie scenariuszy jest najważniejszym zadaniem. Ponadto w wyniku prac nad oceną ryzyka ustalimy, czy przyjęte macierze odpowiadają waszym potrzebom, czy też wymagają modyfikacji.

Liczba scenariuszy zależy od funkcjonalności pilotów. Waszym celem jest jednak opracowanie najbardziej typowych scenariuszy, które można szczegółowo opisać w dalszych pracach.

4. Opracuj i wdroż plan poprawy w celu zminimalizowania ryzyka

Po zidentyfikowaniu zagrożeń i niebezpiecznych zdarzeń w ramach oceny ryzyka należy opracować plan zarządzania ryzykiem, aby zminimalizować potencjalny negatywny wpływ na zdrowie użytkowników końcowych i środowisko. Plan zarządzania ryzykiem opisuje, w jaki sposób zarządzane są maksymalne ryzyko związane z konkretnym zastosowaniem oraz jakie środki kontroli należy wdrożyć, aby zredukować ryzyko resztkowe do minimum lub do akceptowalnego poziomu.

Po wybraniu zdarzeń niebezpiecznych wymagających dodatkowej kontroli należy podjąć maksymalne działania, które doprowadzą do zmniejszenia ryzyka. Dla każdego pilota opracujemy plan działania, który pomoże zwiększyć jego bezpieczeństwo. Może to być procedura badawcza, dodatkowe analizy, instrukcje obsługi, plan komunikacji wewnętrznej itp.

5. Wprowadź sposób na monitorowanie procesu (środki ostrożności)

Wybrany sposób musi dostarczać informacji na temat jakości odzyskiwanej wody. Obserwacja stanowi ważne narzędzie do kontroli ryzyka.

6. Opracuj plan komunikacji i zarządzania

- Procedury zarządzania i komunikacji są niezbędne zarówno w warunkach standardowych i awaryjnych, jak i w sytuacjach kryzysowych.
- Standardowa procedura operacyjna to zestaw instrukcji, które pomagają wam w wykonywaniu rutynowych zadań w warunkach normalnych lub awaryjnych.
- Incydent to zdarzenie odbiegające od normy, wymagające podjęcia działań naprawczych. Jest on szczególnie ważny, ponieważ dostarcza wam wiedzy na temat nietypowych sytuacji i wzbogaca doświadczenie pilotów.
- Sytuacje awaryjne zazwyczaj pojawiają się nieoczekiwanie i wymagają natychmiastowego podjęcia szeroko zakrojonych działań.

9.1 Wprowadzenie do modeli biznesowych

Obecne technologie odzyskiwania ścieków zapewniają wystarczające wyniki pod względem jakości i wydajności. Jednak wdrożenie odzyskiwania i ponownego wykorzystania ścieków w oczyszczalniach ścieków jest skomplikowane ze względu na bariery techniczne, ekonomiczne i społeczne. Kluczowym aspektem wdrożenia ponownego wykorzystania ścieków jest zbadanie warunków rynkowych w sektorze wodnym i analiza realnych ścieżek jego przyjęcia. Aby to osiągnąć, można wykorzystać modelowanie biznesowe (BM) jako skuteczną metodę badania rynku i konceptualizacji strategii. Model biznesowy to ramy opisujące sposób, w jaki organizacja generuje wartość. Wyjaśnia on, w jaki sposób firma obsługuje swoich klientów, osiąga przychody i zarządza swoją działalnością.

W ramach projektu ReNutriWater przeprowadzamy modelowanie biznesowe przy użyciu metodologii Business Model Canvas (BMC), czyli koncepcyjnych ram służących do opracowywania, opisywania i analizowania modeli biznesowych. Ułatwia ona innowacyjne badanie modeli biznesowych w intuicyjny, wizualny sposób. BMC składa się z dziewięciu elementów składowych reprezentujących kluczowe aspekty biznesowe, zorganizowanych w cztery filary: „produkt/propozycja wartości”, „aspekty finansowe”, „interfejs klienta” i „zarządzanie infrastrukturą”. Wszystkie elementy składowe BMC i ich definicje zostały zebrane w tabeli 34. Zdefiniowanie wszystkich filarów i elementów składowych dla danego studium przypadku pozwala na przeprowadzenie kompleksowej analizy ekonomicznej i biznesowej, ułatwiając opracowanie projektu, który można skutecznie zastosować w różnych sektorach gospodarki.

Tabela 34. Elementy składowe BMC i ich definicje

Element BMC	Definicja
Klienci	Ta kategoria określa różne grupy klientów lub organizacji, do których przedsiębiorstwo chce dotrzeć w oparciu o wspólne potrzeby i zachowania.
Propozycja wartości	Kategoria propozycji wartości wyjaśnia, dlaczego klienci wybierają jedną firmę zamiast innej. Charakteryzuje się ona kombinacją produktów i usług, które dostarczają wartość konkretnemu segmentowi klientów.
Kanały	Kategoria kanałów odnosi się do metod i ścieżek, które firma wykorzystuje do nawiązywania kontaktów z klientami i dostarczania Państwu konkretnej propozycji wartości.
Relacje z klientami	Relacje z klientami podkreślają charakter interakcji i relacji, jakie firma nawiązuje z każdym z segmentów klientów.
Strumień przychodów	Strumień przychodów odnosi się do dochodów firmy z działalności biznesowej.
Kluczowe zasoby	Kategoria kluczowych zasobów identyfikuje kluczowe zasoby i aktywa niezbędne do wdrożenia i wsparcia modelu biznesowego.
Kluczowe działania	Kluczowe działania obejmują te działania, które powinny zostać wdrożone i są związane z osiągnięciem celu biznesowego organizacji.
Kluczowe partnerstwa	Blok kluczowych partnerstw identyfikuje szczególnie ważnych interesariuszy firmy i sojusze strategiczne.
Struktura kosztów	Struktura kosztów przedstawia wszystkie koszty operacyjne związane z wdrożeniem modelu biznesowego.

9.2 Zrównoważone modele biznesowe dla sektora wodnego

W porównaniu z tradycyjnymi modelami biznesowymi, zrównoważone modele biznesowe (SBM) uwzględniają również aspekty środowiskowe i społeczne działalności, pomimo czysto ekonomicznej oceny, osiągając w ten sposób tzw. „potrójny wynik”. Obecnie zrównoważone modele biznesowe mają na celu nie tylko przynoszenie korzyści społeczeństwu i środowisku, ale także stanowią solidną podstawę przewagi konkurencyjnej organizacji. Wdrożenie SBM może przynieść organizacji długoterminowe korzyści, a mianowicie:

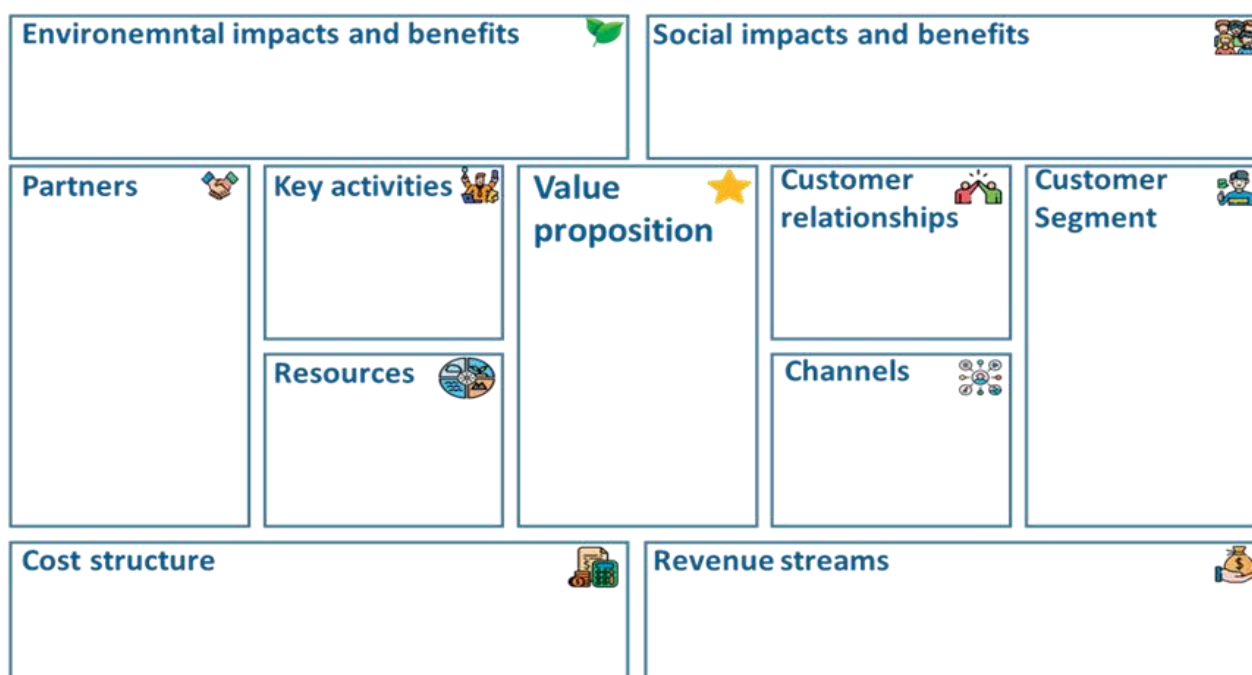
- Zwiększoną odporność działalności
- Lepszy wizerunek umożliwiający nawiązanie nowych współpracy
- Większą innowacyjność
- Zwiększoną efektywność zarządzania zasobami

Sektor wodny ma znaczny potencjał w zakresie wdrażania i rozwoju nowych SBM, głównie ze względu na wysoki potencjał odzyskiwania zasobów, w tym składników odżywczych wody i energii. Dobrze zaprojektowany zrównoważony model biznesowy dla oczyszczalni ścieków może odegrać kluczową rolę w pobudzaniu lokalnej gospodarki, jednocześnie poprawiając jakość życia okolicznej społeczności.

BMC jest szeroko stosowanym podejściem do opracowywania SBM w różnych sektorach gospodarki. Jednak modelowanie biznesowe w sektorze wodnym, zwłaszcza w odniesieniu do ponownego wykorzystania odzyskanej ścieki, jest dziedziną stosunkowo mało zbadaną. W projekcie ReNutriWater stosujemy w tym celu nieco zmodyfikowaną wersję BMC, która została rozszerzona o dwa elementy składowe:

- Skutki społeczne i korzyści
- Skutki środowiskowe i korzyści

Społeczne skutki i korzyści odnoszą się do wpływu działalności gospodarczej na ludzi, społeczności i interesariuszy. Obejmują one tworzenie miejsc pracy, sprawiedliwość społeczną, dobrobyt publiczny i zaangażowanie społeczności. Firmy, które priorytetowo traktują uczciwe praktyki pracy, edukację i współpracę z interesariuszami, mogą zwiększyć zaufanie, odporność i długoterminową wartość poprzez zatrzymanie najlepszych pracowników. Skutki i korzyści środowiskowe odnoszą się do wpływu działalności gospodarczej na zasoby naturalne i ekosystemy. Pozytywny wpływ obejmuje zmniejszenie zanieczyszczenia, ochronę zasobów i przyjęcie zasad gospodarki o obiegu zamkniętym, natomiast negatywny wpływ może obejmować emisje i odpady. Zrównoważone praktyki poprawiają wydajność, zgodność z przepisami i reputację marki, jednocześnie wspierając długoterminowy sukces biznesowy. Taka struktura BM umożliwia holistyczne podejście do tematu i kładzie nacisk na zrównoważone aspekty organizacji. Szablon BMC użyty w projekcie ReNutriWater pokazano na rysunku 55.



Rysunek 55. Szablon modelu biznesowego wykorzystanego w projekcie zgodnie z [Canva Business Models](#)

9.3 Modele biznesowe projektu ReNutriWater

Aby stworzyć modele biznesowe, zastosowaliśmy cztery kolejne etapy:

1. Badania źródłowe i przegląd literatury dotyczącej modelowania modeli biznesowych oraz potencjalnych modeli biznesowych w sektorze wodnym.
2. Opracowanie kwestionariusza obejmującego wszystkie elementy składowe BMC oraz dodatkowe pytania przewodnie.
3. Przeprowadzenie częściowo ustrukturyzowanych wywiadów pogłębionych z kierownikami siedmiu zakładów pilotażowych.
4. Przetworzenie uzyskanych danych i stworzenie 7 modeli biznesowych przy użyciu struktury BMC.

Zebrane dane i opracowane modele biznesowe pozwoliły na przygotowanie indywidualnych planów przeznaczonych dla konkretnych partnerów projektu oraz wyprowadzenie uniwersalnych modeli biznesowych mających zastosowanie do modelowych oczyszczalni ścieków. Dalsze opracowywanie biznesowych modeli pozwoliło na stworzenie zestawu strategii i planów działania dotyczących wdrażania odzyskiwania i ponownego wykorzystania wody.

9.4 Rezultaty procesu tworzenia modeli biznesowych

Proces opracowywania modelu biznesowego w ramach projektu ReNutriWater przyniósł istotne wyniki mające na celu promowanie praktyk ponownego wykorzystania wody w regionie Morza Bałtyckiego poprzez ustrukturyzowane podejście zorientowane na odbiorców. Jednym z kluczowych wyników było określenie wartości dodanej wody odzyskanej, podkreślając jej potencjał jako alternatywnego źródła wody do różnych zastosowań, w tym nawadniania rolnego, procesów przemysłowych i utrzymania terenów zielonych w miastach. Podkreślając ekonomiczne i środowiskowe zalety wody odzyskanej, wykazaliśmy jej potencjał w zakresie zmniejszenia zależności od wody słodkiej, zwiększenia efektywności wykorzystania zasobów i przyczynienia się do realizacji celów gospodarki o obiegu zamkniętym.

Z drugiej strony zidentyfikowano kilka barier wpływających na wdrażanie ponownego wykorzystania wody, które obejmują ograniczenia regulacyjne i związane z polityką, wyzwania technologiczne związane z zapewnieniem jakości wody, przeszkody ekonomiczne, takie jak wysokie koszty inwestycyjne i operacyjne, oraz obawy społeczne związane z postrzeganymi zagrożeniami dla zdrowia i percepcją kulturową. Ponadto jako kluczowe wyzwania wymagające uwagi wskazano brak standardowych ram oceny projektów ponownego wykorzystania wody oraz brak zachęt finansowych.

Aby skutecznie pokonać te bariery, opracowaliśmy i proponowaliśmy strategie dostosowane do różnych obszarów regionu Morza Bałtyckiego, w tym obszarów wiejskich, miejskich i przemysłowych. Proces opracowywania modelu biznesowego został wzbogacony o silny nacisk na perspektywę kierowników oczyszczalni ścieków, których spostrzeżenia i opinie zostały zebrane w celu zapewnienia praktycznej przydatności i wykonalności proponowanych strategii. Wasze opinie pozwoliły zrozumieć ograniczenia operacyjne, kwestie ekonomiczne i wyzwania regulacyjne związane z wdrażaniem systemów ponownego wykorzystania wody. Ponadto całościowy zbiór opinii zainteresowanych stron pozwolił nam uwzględnić różnorodne punkty widzenia i zapewnić, że proponowane modele biznesowe są solidne, elastyczne i zdolne do sprostania wieloaspektowym wyzwaniom związanym z ponownym wykorzystaniem wody. Ostatecznie projekt ReNutriWater położył kompleksowe podstawy do opracowania skutecznych i zrównoważonych modeli biznesowych, które usprawniają praktyki ponownego wykorzystania wody w różnych kontekstach, przyczyniając się do realizacji szerszych celów dotyczących efektywnego gospodarowania zasobami i zasad gospodarki o obiegu zamkniętym w zarządzaniu ściekami.

10 Edukacja, budowanie świadomości – dobre praktyki

W tej sekcji podkreślono znaczenie zwiększania świadomości i promowania edukacji w zakresie bezpiecznego i skutecznego ponownego wykorzystania ścieków. Zawiera ona kompleksowy przewodnik pomagający zrozumieć zarówno techniczne, jak i społeczne aspekty recyklingu ścieków, a jego ostatecznym celem jest uczynienie z niego praktyki dostępnej i odpowiedzialnej dla społeczności, przemysłu i osób prywatnych. Celem tej części jest wymiana doświadczeń i poglądów na temat obszarów tematycznych i kwestii związanych z projektem.

10.1 Terminy używane w komunikacji

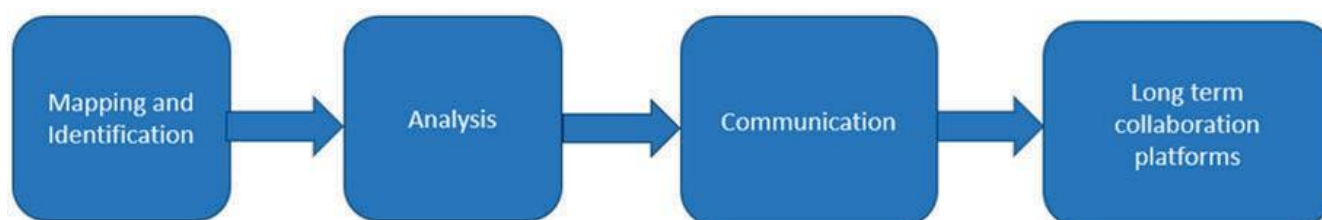
- » **Zdefiniuj kluczowe terminy prostym i przystępnym językiem, aby zapewnić jasność dla wszystkich zainteresowanych stron (np. „woda odzyskana”, „bezpieczne ponowne wykorzystanie”, „odzyskiwanie składników odżywczych”).**
- » **Należy unikać żargonu i terminów technicznych w komunikacji z ogółem społeczeństwa. Warto używać zrozumiałych i pozytywnych sformułowań (np. „woda oczyszczona” zamiast „oczyszczone ścieki”).**
- » **Należy też unikać wyrażenia „czynnik obrzydliwości”. Zamiast tego można powiedzieć np. „pokonanie potencjalnych obaw społecznych”.**
- » **Odpowiadaj na potencjalne obawy jasnym i uspokajającym językiem, kładąc nacisk na bezpieczeństwo, zrównoważony rozwój i korzyści.**
- » **Zapewnij słowniczek często używanych terminów, aby zachować spójność we wszystkich materiałach komunikacyjnych.**

10.2 Scenariusz spotkania z interesariuszami

Pomyślna realizacja projektów ponownego wykorzystania wody często zależy od aktywnego zaangażowania i wsparcia różnych zainteresowanych stron, w tym decydentów politycznych, przedsiębiorstw wodociągowych, przemysłu i społeczeństwa.

Zainteresowana strona – osoba lub grupa osób, instytucji, stowarzyszeń lub firm, które mogą być zaangażowane w projekt bezpośrednio lub pośrednio, pozytywnie lub negatywnie.

Proces angażowania zainteresowanych stron może przebiegać zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 56:



Rysunek 56. Zaangażuj udziałowców



Identyfikacja interesariuszy i ich zaangażowanie to kluczowe etapy skutecznej organizacji i realizacji spotkań z interesariuszami. Osiągnięcie zrównoważonej reprezentacji interesariuszy może sprzyjać zarówno wdrażaniu, jak i ulepszaniu zasad.

W ramach projektu skupiliśmy się na czterech grupach docelowych:

- Dostawcy infrastruktury i usług publicznych, głównie operatorzy miejskich oczyszczalni ścieków,
- Lokalne władze publiczne (gminy),
- Małe i średnie przedsiębiorstwa z branży turystycznej i dostawcy technologii,
- Grupy interesów, organizacje zainteresowane podjęciem omawianego wyzwania

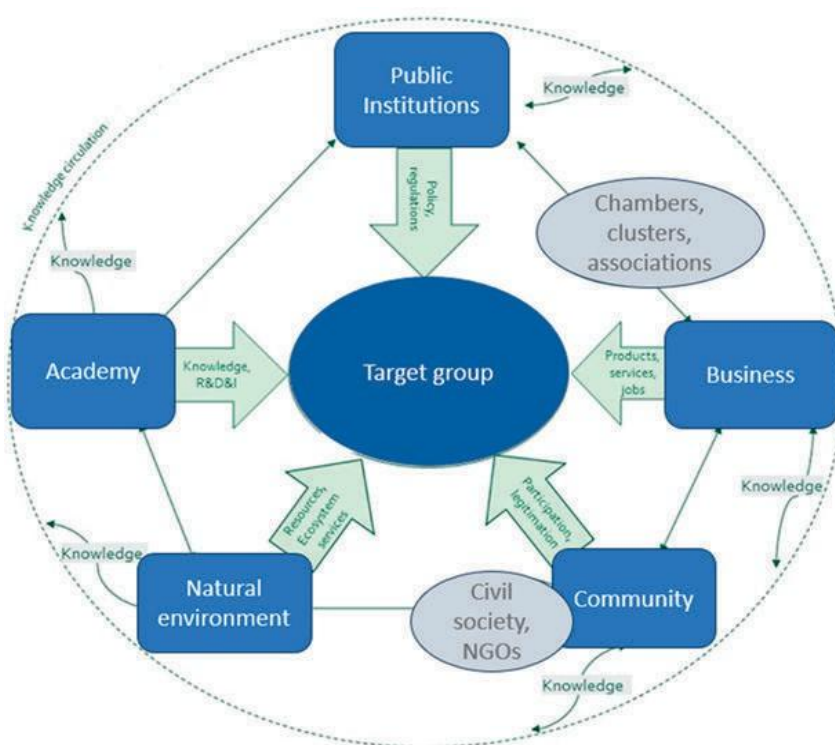
Należy jednak pamiętać, że istnieje wiele innych zainteresowanych stron:

- Ogół społeczeństwa: właściciele nieruchomości, członkowie lokalnych społeczności.
- Przedsiębiorstwa i branże, zwłaszcza te z sektorów wykorzystujących duże ilości wody (np. rolnictwo, budownictwo).
- Szkoły i uniwersytety – angażowanie młodzieży w celu uzyskania długoterminowego wpływu.
- Władze lokalne i decydenci – wspieranie i tworzenie regulacji.
- Specjaliści ds. uzdatniania wody – zapewnienie wiedzy technicznej.

Jednym ze sposobów identyfikacji i zaangażowania interesariuszy jest mapowanie. Główną zaletą mapowania jest uzyskanie wizualnej reprezentacji wszystkich osób, które mogą mieć wpływ na twój projekt, oraz sposobu, w jaki są one ze sobą powiązane.

Zacznij od zidentyfikowania wszystkich potencjalnych interesariuszy – osób, grup lub organizacji, dla których twój projekt może być istotny, takich, które mogą na niego wpływać lub są zainteresowane jego powodzeniem. Na tym etapie postaraj się być jak najbardziej szczegółowy. Zawsze możesz wyeliminować tych, którzy nie pasują, ale także dodać innych na późniejszym etapie projektu.

Wyszukiwanie w internecie i burza mózgów to metody, które się wzajemnie uzupełniają. Aby nikogo nie pominąć, można skorzystać z poniższego schematu (rys. 57).

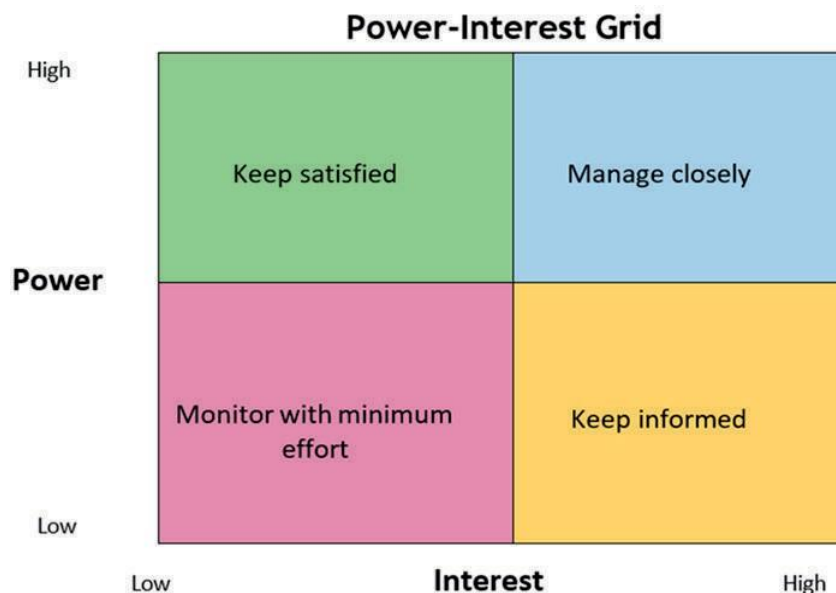


Rysunek 57. Mapowanie interesariuszy



Analiza

Kategoryzowanie ich pod względem ich związku z projektem i wzajemnych relacji jest przydatne dla dalszej komunikacji i planowania działań. Priorytetowe traktowanie interesariuszy zgodnie z tym, którzy mają władzę i mogą wpływać na twój projekt, oraz tych, którzy są nim zainteresowani. W zależności od pozycji interesariusza na siatce władzy i zainteresowania, możesz zdecydować, jakie działania podjąć (Rysunek 58).



Rysunek 58. Jak dbać o interesariuszy?

- **Duży wpływ, duże zainteresowanie**
Są to najważniejsi interesariusze, którzy mogą decydować o sukcesie lub porażce projektu.
- **Duży wpływ, niskie zainteresowanie**
Interesariusze ci mają władzę, ale dopóki będziesz ich informować i zadowalać, nie będą odczuwali potrzeby jej wykorzystywania.
- **Niewielki wpływ, duże zainteresowanie**
Informujcie tych interesariuszy na bieżąco i rozmawiajcie z nimi, aby upewnić się, że nie pojawiają się żadne poważne problemy. Osoby te często mogą być bardzo pomocne w kwestiach związanych ze szczegółami projektu.
- **Niewielki wpływ, niskie zainteresowanie**
Monitorujcie tych interesariuszy, ale nie zanudzajcie ich nadmierną komunikacją.

Aby dowiedzieć się więcej o swoich interesariuszach i poznać ich opinie na temat twojego projektu, można zastosować kilka metod: badania postaw (ankiety), warsztaty, otwarte spotkania, wywiady, tematyczne grupy fokusowe itp.

Nikt nie gwarantuje, że wszyscy interesariusze ostatecznie cię poprą. Jednak im więcej osób i liderów społeczności uda ci się przekonać, tym większe będą twoje szanse na sukces. Komunikacja ma zasadnicze znaczenie. Zaangażuj interesariuszy jak najwcześniej i przekaz im odpowiednią ilość informacji w zależności od ich poziomu zainteresowania i zaangażowania.



Opracowanie planu komunikacji

Komunikacja dostosowana do potrzeb:

1. Opracowanie ukierunkowanych komunikatów i sposobów komunikacji, które przemawiają do różnych interesariuszy: spotkania bezpośrednie, komunikacja online, wydarzenia, rozmowy telefoniczne, nieformalne spotkania. Odpowiednia ilość informacji w zależności od zainteresowania i zaangażowania w projekt.
2. Należy jasno określić, z kim się współpracuje i dlaczego. Plan komunikacji z interesariuszami powinien uwzględniać ich zainteresowania, korzyści, wpływ i uprawnienia oraz określać czas i poziom zaangażowania.
3. Interesariusze mogą się znacznie różnić pod każdym względem, dlatego dla każdego typu interesariuszy należy określić najlepszy sposób komunikacji. Na przykład dla niektórych interesariuszy spotkania bezpośrednie są najskuteczniejszym sposobem komunikacji i rozwiązywania problemów, ale dla innych spotkania na żywo mogą nie być wygodne.
4. Wczesna komunikacja jest ważna, ponieważ ludzie potrzebują więcej czasu na przemyślenie decyzji.

5. Każdemu interesariuszowi należy przekazać odpowiednią ilość informacji w zależności od jego zainteresowania i zaangażowania w projekt. Niektórzy potrzebują tylko streszczenia, podczas gdy inni będą chcieli zagłębić się w temat.

Kilka praktycznych przykładów działań komunikacyjnych z udziałem zainteresowanych stron, zaczerpniętych z doświadczeń SCCIC w ramach projektu ReNutriWater:

- Seminaria i szkolenia dostosowane do potrzeb odbiorców. Dostosowanie oznacza różne formaty i treści dla różnych odbiorców: decydentów, młodzieży, grup interesu, przedsiębiorstw, społeczności.
- Indywidualne spotkania z przedstawicielami grupy docelowej o dużym wpływie.
- Komunikacja z decydentami na szczeblu UE.
- „Poznanie poprzez obserwację” – organizowanie wizyt zainteresowanych stron w pilotażowych projektach w innych krajach.
- Zaangażowanie społeczności: imprezy publiczne, warsztaty, konkursy.
- Media społecznościowe, kampanie komunikacyjne mające na celu przełamanie barier psychologicznych.
- „Przyciągnięcie uwagi odbiorców” innych wydarzeń/szkoleń i krótka prezentacja projektu.



Opracowanie programu i zaproszenia

Dobrze skonstruowany program może pomóc wam uniknąć potencjalnych konfliktów i zmęczenia interesariuszy, które mogą podważyć cel i wyniki spotkań SM, poprzez uwzględnienie sesji interaktywnych, dobór tematów dostosowanych do odbiorców, przy jednoczesnym zapewnieniu równej ilości czasu różnym interesariuszom na podzielenie się swoimi spostrzeżeniami.

Kilka wskazówek dotyczących opracowania programu:

- wybierz ograniczoną liczbę tematów, które można wystarczająco omówić podczas spotkania,
- ustal całkowity czas trwania spotkania, który nie powinien przekraczać czterech godzin,
- rozważ przydzielenie czasu na każdy punkt programu, w tym prezentacje, dyskusje, ćwiczenia integracyjne i przerwy kawowe,
- zostaw czas na wypowiedzi różnych grup zainteresowanych stron, reprezentujących przedsiębiorstwa, administrację publiczną i środowisko akademickie.



Spotkanie i jego logistyka

Przydziel role i obowiązki: moderator, prezenter, osoba mierząca czas, protokolant.

Format: hybrydowy (osobiście + wirtualnie), aby zapewnić szerszy udział oddalonych interesariuszy.

Wykorzystanie interaktywnych narzędzi (np. tablic, ankiet lub platform współpracy online) w celu zebrania opinii i pomysłów podczas spotkania oraz ułatwienia interaktywnych dyskusji zamiast prezentacji jednokierunkowych.

Materiały: Slajdy prezentacji przedstawiające kluczowe pojęcia i dane. Materiały informacyjne lub pakiet zasobów zawierający szczegółowe informacje na temat rodzajów ścieków, technologii oczyszczania i studiów przypadków. Szablony do burzy mózgów lub flipcharty do robienia notatek podczas dyskusji.

Podział czasu: Spotkanie powinno być interaktywne i zwięzłe (około 1,5 do 2 godzin), aby zapewnić aktywny udział uczestników bez ich przeciążania.



Stworzenie trwałych platform do współpracy z zainteresowanymi stronami

Jednym z najtrudniejszych i najbardziej wymagających elementów współpracy z zainteresowanymi stronami jest organizowanie i zarządzanie długotrwałymi platformami. Istnieje wiele różnych platform stworzonych z myślą o współpracy z zainteresowanymi stronami w różnych sektorach, takich jak:

- Lokalnie wspierające grupy,
- Platformy wielopodmiotowe,
- Sieci komunikacyjne,

- Platformy społecznościowe.



Przydatne zalecenia:

- Zainteresowani muszą odnieść korzyści z udziału w projekcie.
- Nie budujcie nierealnych oczekiwań.
- Na początku wyjaśnijcie prawa i obowiązki, bądźcie otwarci i przejrzysti.
- Budujcie zaufanie między zaangażowanymi stronami.
- Zaleca się, aby w projekcie brało udział nie więcej niż 15 osób. W razie potrzeby zaangażujcie więcej zainteresowanych stron w podlegających grupach lub na otwartym forum.
- Zaangażujcie regionalne/krajowe organy finansujące, ponieważ mogą one dostarczyć informacji na temat priorytetów i możliwości finansowania.
- Zbierzcie interesariuszy publicznych i prywatnych o różnych potrzebach i sprawcie, aby zrozumieli wzajemne potrzeby.
- Nie powielajcie struktur: jeśli macie już coś na kształt potrzebnej platformy, zaplanujcie tam nowe działania i zaproście interesariuszy.
- Zapewnijcie wykwalifikowanego „neutralnego” moderatora.
- Udana platforma wymaga czasu i dokładnego przygotowania



Sugestie do przemyślenia

Prowadzenie obserwacji, bycie elastycznym oraz świadomość, że nie istnieje jedno uniwersalne rozwiązanie, to kluczowe czynniki sukcesu.

Stała ocena zadowolenia zainteresowanych stron i dostosowywanie strategii w razie potrzeby przynoszą zmiany.

Budowanie zaufania na poziomie instytucjonalnym i osobistym wpływa na skuteczność podejmowanych działań.

Wiele małych kroków w dłuższej perspektywie może prowadzić do dużych zmian

Działania po spotkaniu

Komunikuj się z uczestnikami: utwórz wspólną platformę internetową (np. listę e-mailową, chat grupowy lub narzędzie do współpracy) w celu bieżącej aktualizacji informacji i koordynacji działań.



Sposoby na skuteczny dialog

Podejście zorientowane na rozwiązania:

Przenieś uwagę z problemów na możliwe rozwiązania i korzyści.

Jasne i pozytywne komunikaty:

Skoncentruj dyskusję na bezpieczeństwie, wydajności i korzyściach dla środowiska, a nie na ryzyku lub ograniczeniach.

Wykorzystanie referencji:

Podziel się historiami sukcesu z podobnych projektów, aby zbudować zaufanie i wiarygodność.

Postępowanie w przypadku dezinformacji:

Z szacunkiem odnoś się do błędnych przekonań, wykorzystując dane i przykłady z życia wzięte, aby wyjaśnić wątpliwości.

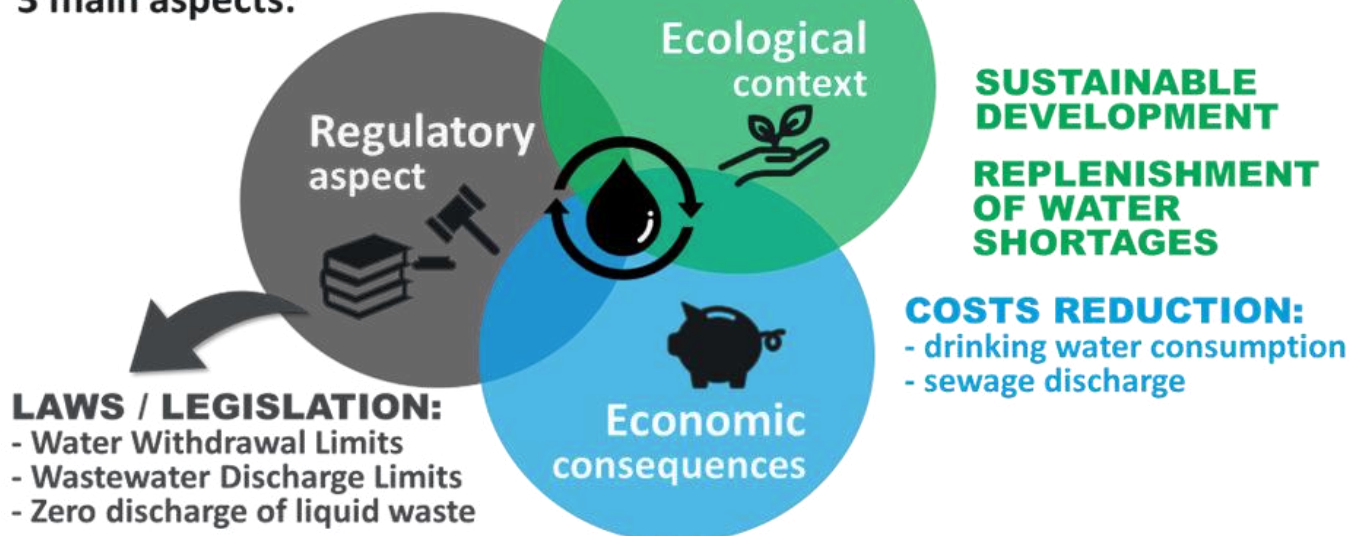
Nie zatajaj prawdy:

Jeśli czegoś nie wiesz, nie zgaduj ani nie zmyślaj faktów – przyznaj, że nie znasz odpowiedzi, ale możesz spróbować ją znaleźć.

11 Podsumowanie i dalsze plany

Projekt okazał się niezwykle interesującym wyzwaniem dla wszystkich partnerów. Nie da się osiągnąć sukcesu bez zaangażowania różnych podmiotów – nauki, biznesu, usługodawców, decydentów i różnorodnych interesariuszy. Jest to doskonały wstęp do dalszych prac nad wdrażaniem i bezpiecznym wykorzystaniem wody odzyskanej w regionie Morza Bałtyckiego (rys. 59).

When choosing a technology, it is essential to consider 3 main aspects:



Rysunek 59. Konteksty projektu



Rysunek 60. Konsorcjum projektu w Jūrmale, Łotwa 2024

Niniejszy podręcznik dedykujemy wszystkim, którzy postrzegają ponowne wykorzystanie jako szansę na zmniejszenie zużycia zasobów naturalnych.

12 Bibliografia

- Barry, M. C., Hristovski, K., & Westerhoff, P. (2014). Promoting hydroxyl radical production during ozonation of municipal wastewater. *Ozone: Science & Engineering*, 36(3), 229-237.
- Collivignarelli, M. C., Abbà, A., Benigna, I., Sorlini, S., & Torretta, V. (2017). Overview of the main disinfection processes for wastewater and drinking water treatment plants. *Sustainability*, 10(1), 86.
- de Oliveira Freitas, B., de Souza Leite, L., & Daniel, L. A. (2021). Chlorine and peracetic acid in decentralized wastewater treatment: disinfection, oxidation and odor control. *Process Safety and Environmental Protection*, 146, 620-628.
- European Union. Directive 2024/3019 of the European Parliament and of the Council of 27 November 2024 concerning urban wastewater treatment (recast). OJ L, 2024/3019, 12.12.2024.
- European Union. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. OJ L 327, 22.12.2000.
- European Union. Directive 2020/2184 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2020 on the quality of water intended for human consumption (recast). OJ L 435.
- European Union. Council Directive of 21 May 1991 concerning urban waste water treatment OJ L 135/40, 30.5.1991.
- European Union. Commission Delegated Regulation (EU) 2024/1261 of 11 March 2024 supplementing Regulation (EU) 2020/741 of the European Parliament and of the Council with regard to technical specifications of the key elements of risk management.
- European Union. Regulation (EU) 2020/741 of the European Parliament and of the Council of 25 May 2020 on minimum requirements for water reuse. OJ L 177, 5.6.2020.
- European Union. Commission Notice Guidelines to support the application of Regulation 2020/741 on minimum requirements for water reuse 2022/C 298/01
- González, Y., Gómez, G., Moeller-Chávez, G. E., & Vidal, G. (2023). UV Disinfection Systems for Wastewater Treatment: Emphasis on Reactivation of Microorganisms. *Sustainability*, 15(14), 11262.
- Hogard, S., Salazar-Benites, G., Pearce, R., Nading, T., Schimmoller, L., Wilson, C., & Bott, C. (2021). Demonstration-scale evaluation of ozone–biofiltration–granular activated carbon advanced water treatment for managed aquifer recharge. *Water Environment Research*, 93(8), 1157-1172.
- Lazarova, V., Liechti, P. A., Savoye, P., & Hausler, R. (2013). Ozone disinfection: main parameters for process design in wastewater treatment and reuse. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 3(4), 337-345.
- Levine, B. B., Madireddi, K., Lazarova, V., Stenstrom, M. K., & Suffet, I. H. (2000). Treatment of Trace Organic Compounds by Ozone–Biological Activated Carbon for Wastewater Reuse: The Lake Arrowhead Pilot Plant. *Water environment research*, 72(4), 388-396.
- Linden, K. G., Shin, G. A., Faubert, G., Cairns, W., & Sobsey, M. D. (2002). UV disinfection of *Giardia lamblia* cysts in water. *Environmental science & technology*, 36(11), 2519-2522.
- Quartaroli, L., Cardoso, B. H., de Paula Ribeiro, G., & Da Silva, G. H. R. (2018). Wastewater chlorination for reuse, an alternative for small communities. *Water Environment Research*, 90(12), 2100-2105.
- Ramm K., Smol M. (2023) Water Reuse – Analysis of the Possibility of Using Reclaimed Water Depending on the Quality Class in the European Countries. *Sustainability*. DOI: 10.3390/su151712781
- U.S Environmental Protection Agency (EPA). 1999. Wastewater Technology Fact Sheet Ultraviolet Disinfection. EPA Office of Water, Washington, D.C
- Yang, J., Monnot, M., Ercolei, L., & Moulin, P. (2020). Membrane-based processes used in municipal wastewater treatment for water reuse: state-of-the-art and performance analysis. *Membranes*, 10(6), 131
- U.S Environmental Protection Agency (EPA). 1999. Wastewater Technology Fact Sheet Chlorine Disinfection. EPA Office of Water, Washington, D.C

13 List partnerów projektu

- PP1. [Izba Gospodarcza „Wodociągi Polskie” \(lead partner\)](#)
PP2. [Centrum Balticum Foundation, Finlandia](#)
PP4. [Uniwersytet Łódzki, Łódź](#)
PP5. [Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk, Polska](#)
PP6. [Uniwersytet Nauk Stosowanych w Savonii, Finlandia](#)
PP7. [Politechnika Warszawska](#)
PP8. [Gmina Samsø, Dania](#)
PP9. [Schwander Polska](#)
PP10. [Miejskie Przedsiębiorstwo Wodociągów i Kanalizacji w mieście stołecznym Warszawie S.A.](#)
PP11. [Oczyszczalnia Ścieków Samsø, Dania](#)
PP12. [Wodociągi Jurmala, Łotwa](#)
PP13. [Izba Handlowo-Przemysłowo-Rzemieślnicza w Siauliai, Litwa](#)
PP14. [VNK serviss Ltd., Łotwa](#)
PP15. [Krajowa Agencja Rozwoju Regionów, Litwa](#)

14 Źródła rysunków

Projekt okładki	ChatGPT, ReNutriWater 2025
Grupowe zdjęcie ze str. 2	ReNutriWater 2024
Rysunki 1-52, 53, 56-60	ReNutriWater 2023-2025
Rysunek 52	Komisja Europejska 2022
Rysunek 54	Światowa Organizacja Zdrowia (WHO) 2016
Rysunek 55	Canva Business Models 2025

RENUTRIWATER

CLOSING LOCAL WATER CIRCUITS BY RECIRCULATING
NUTRIENTS AND WATER AND USING THEM IN NATURE

Interreg
Baltic Sea Region



Co-funded by
the European Union

SUSTAINABLE WATERS
ReNutriWater



The research for this Handbook was funded by the Interreg Baltic Sea Region Programme 2021-2027, project ReNutriWater – Closing local water circuits by recirculating nutrients and water and using them in nature. This project aims to accelerate policymaking and facilitate the implementation of water reuse in the cities. ReNutriWater contributes to the EU Strategy for the Baltic Sea Region (EUSBSR) Policy Area Nutri and Policy Area Tourism. Its contents are the sole responsibility of the project partners' representatives and do not necessarily reflect the views of the European Union or the Managing Authority/Joint Secretariat of the Interreg Baltic Sea Region Programme 2021-2027.

ReNutriWater

Podręcznik o odzyskiwaniu wody



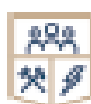
Instytut Gospodarki
WODOCIĄGI POLSKIE



CENTRUM
BALTICUM



UNIVERSITY
OF LATVIA



Mineral and Energy
Economy Research
Institute
Polish Academy of Sciences

SAVONIA

University of Applied Sciences



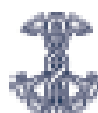
SAMSØ KOMMUNE
- vi gør det sammen

SCHWANDER
POLSKA



WATSWW
waterworks

SAMSØ
Spildevand



SIAULIAI CHAMBER
OF COMMERCE,
INDUSTRY AND CRAFTS



Interreg
Baltic Sea Region



Co-funded by
the European Union

SUSTAINABLE WATERS

ReNutriWater



Zamykanie lokalnych obiegów wodnych poprzez recykulację składników odżywczych i wody oraz wykorzystanie ich w przyrodzie