



WSKAŹNIKI PORÓWNAWCZE EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ

Benchmarking dla regionu Morza Bałtyckiego
w ramach projektu IWAMA – Interaktywna Gospodarka Wodna

OCENA EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ OCZYSZCZANIA ŚCIEKÓW

Zestawienie kluczowych danych z oczyszczalni ścieków w regionie Morza Bałtyckiego

W ramach projektu IWAMA współfinansowanego przez Interreg Region Morza Bałtyckiego, dane pozyskane z 66 oczyszczalni ścieków poddano ocenie pod kątem zużycia energii w procesach usuwania zanieczyszczeń ze ścieków. Informacje zostały przekazane przez Szwecję, Finlandię, Rosję, Estonię, Łotwę, Litwę, Polskę, Białoruś i Niemcy.

Dane przedstawione w niniejszym raporcie informują o aktualnym zapotrzebowaniu na energię oczyszczalni ścieków w regionie Morza Bałtyckiego, o różnej wielkości i stanie wyposażenia, objętych zróżnicowanymi wymogami prawnymi i restrykcjami odnośnie zawartości związków organicznych i substancji biogenych w odpływie (w większości zgodnie z HELCOM). W ramach projektu Interreg BSR - Interaktywna Gospodarka Wodna (IWAMA) potrzebne dane zgromadzono na podstawie kwestionariusza skierowanego do poszczególnych oczyszczalni. Łączną liczbę 66 odpowiedzi (rok referencyjny 2015) analizowano w celu określenia zużycia energii na usuwanie związków organicznych i biogenych. W niniejszym raporcie zawarto ogólne informacje dotyczące ładunków zanieczyszczeń poddawanych oczyszczaniu oraz skuteczności procesów oczyszczania. Opracowano także wskaźnik porównawczy efektywności energetycznej w odniesieniu do stopnia redukcji związków biogenych, który będzie stosowany w różnych krajach. Dlatego też niniejszy raport zawiera opis zastosowanej metodologii.

Analiza zgromadzonych danych wykazała, że stosowane w regionie technologie różnią się z znacznie pod względem uzyskiwanej efektywności oczyszczania i zużycia energii. Nie ma jednak wyraźnej zależności między analizowanymi regionami. Czynniki wpływającymi na wyniki efektywności są wiek oczyszczalni ścieków i zainstalowanych urządzeń, zaangażowanie i dobre przeszkolenie pracowników oraz dostępność środków finansowych na modernizację. Innowacyjność oraz efektywna gospodarka zasobami zależy również od wymogów prawnych lub dostępności środków finansowych.

Wyzwania stojące przed operatorami oczyszczalni w całym regionie Morza Bałtyckiego to poprawa efektywności energetycznej przy jednoczesnym utrzymaniu lub poprawie efektywności usuwania zanieczyszczeń. Dzięki analizie porównawczej możliwe jest wskazanie ewentualnych niedociągnięć w pracy całej oczyszczalni. Dlatego wszystkie uczestniczące w projekcie oczyszczalnie ścieków otrzymały indywidualną informację zwrotną, w tym sugestie, jakie działania mogłyby doprowadzić do poprawy wyników w przyszłych analizach porównawczych.

Połowa uwzględnionych oczyszczalni ścieków wykorzystuje mniej niż $37 \text{ kWh}/(\text{RLM}_{\text{ChZT},120} \cdot \text{rok})$. Jednak tylko 20% z nich zużywa mniej niż $23 \text{ kWh}/(\text{RLM}_{\text{ChZT},120} \cdot \text{rok})$. Zaproponowano, aby ta wartość posłużyła jako poziom odniesienia skierowany do wszystkich oczyszczalni w regionie, przy założeniu, że głównym zadaniem pozostaje efektywne oczyszczanie ścieków.

Zaleca się kontynuację i rozszerzenie analizy porównawczej kluczowych wskaźników jako motywacji do zoptymalizowanej pracy oczyszczalni ścieków.

Zebrane informacje są dostępne dla wszystkich interesariuszy. Zaproponowane kryteria można wykorzystać jako cel miękki, aby promować zwiększanie efektywności oczyszczalni. Wskaźniki są przedstawione w sposób czytelny na wykresach, co daje innym oczyszczalniom ścieków możliwość ich porównania z wartościami własnych obliczeń. Duże odchylenia od sugerowanego punktu odniesienia wskazują na potrzebę przeprowadzenia szczegółowego audytu energetycznego zakładu.

SPIS TREŚCI

1 WSTĘP	1
2 OCENA JAKOŚCI I WALIDACJA DANYCH	2
3 PODSTAWOWE PARAMETRY OCZYSZCZALNI ŚCIEKÓW	2
3.1. Równoważna liczba mieszkańców	2
3.2. Charakterystyka ilościowa i jakościowa ścieków surowych.....	3
3.3. Procesy oczyszczania.....	4
3.4. Wskaźnik obciążenia	6
3.5. Wiek osadu.....	7
4 EFEKTYWNOŚĆ OCZYSZCZANIA	8
4.1. Usuwanie związków organicznych (ChZT)	9
4.2. Usuwanie azotu.....	10
4.3. Usuwanie fosforu	11
5 ZUŻYCIE ENERGII	12
5.1. Specyficzne zużycie energii kWh/(RLM _{ChZT,120} · rok).....	13
5.2. Specyficzne zużycie energii kWh/kgChZT _{us}	14
5.3. Specyficzne zużycie energii kWh/kgO ₂	15
6 PRODUKCJA ENERGII	17
7 WNIOSKI	20
LITERATURA	IV
ZAŁĄCZNIKI	V
A.1 – Obliczenia zapotrzebowania na tlen	V
A.2 – Frakcjonowanie ChZT	VII
A.3 – Obliczenia wieku osadu	IX

Uwaga edytora: W tym raporcie przecinek jest używany jako znacznik dziesiętny.

WYKAZ RYSUNKÓW

Rysunek 1 – Podział 66 uczestniczących w projekcie oczyszczalni ścieków na 4 regiony	1
Rysunek 2 – Podział oczyszczalni ścieków według wielkości zgodnie z zaleceniami HELCOM 28E/5 (2007)	3
Rysunek 3 – Stosowane technologie oczyszczania ścieków	4
Rysunek 4 – Stopień wykorzystania oczyszczania wstępnego	5
Rysunek 5 – Stosowane metody usuwania fosforu	5
Rysunek 7 – Wykorzystanie filtracji ścieków	5
Rysunek 6 – Stosowane metody dezynfekcji	5
Rysunek 9 – Wskaźnik obciążenia na podstawie ChZT, według regionu	6
Rysunek 8 – Wskaźnik obciążenia na podstawie ChZT, wykres zbiorczy	6
Rysunek 11 – Efektywność usuwania zanieczyszczeń	8
Rysunek 13 – Efektywność usuwania ChZT, według regionu	9
Rysunek 12 – Efektywność usuwania ChZT, wykres zbiorczy	9
Rysunek 14 – Efektywność usuwania azotu, wykres zbiorczy	10
Rysunek 15 – Efektywność usuwania azotu, według regionu	10
Rysunek 16 – Efektywność usuwania fosforu, wykres zbiorczy	11
Rysunek 17 – Efektywność usuwania fosforu, według regionu	11
Rysunek 19 – Specyficzne zużycie energii [kWh/(RLM _{ChZT,120} · rok)], według regionu	13
Rysunek 18 – Specyficzne zużycie energii [kWh/(RLM _{ChZT,120} · rok)], wykres zbiorczy	13
Rysunek 21 – Specyficzne zużycie energii [kWh/(RLM _{ChZT,120} · rok)] w stosunku do stopnia obciążenia	14
Rysunek 23 – Specyficzne zużycie energii [kWh/kgChZT _{us}], według regionu	14
Rysunek 22 – Specyficzne zużycie energii [kWh/kgChZT _{us}], wykres zbiorczy	14
Rysunek 24 – Wpływ wieku osadu na kWh/kgO ₂	16
Rysunek 25 – Specyficzne zużycie energii kWh/kgO ₂ w stosunku do kWh/(RLM _{ChZT,120} · rok)	16
Rysunek 26 – Specyficzna produkcja biogazu [l/(RLM _{ChZT,120} · d)], n = 27	17
Rysunek 27 – Specyficzna produkcja biogazu w stosunku do zawiesiny organicznej [l/kg Z _{org}], n = 16	17
Rysunek 28 – Średnia dobowa produkcja biogazu [m ³] w stosunku do RLM _{ChZT,120} , n = 27	18
Rysunek 29 – Współczynnik konwersji biogazu na energię elektryczną, n = 23	18
Rysunek 30 – Stopień samowystarczalności energetycznej, n = 23	19
Rysunek 31 – Frakcjonowanie ChZT według Sieker [2018]	VII
Rysunek 32 – Frakcjonowanie ChZT według [DWA-A 131, 2016]	VIII

WYKAZ TABEL

Tabela 1 – Przepływ jednostkowy (głównie na podstawie RLM _{ChZT,120})	3
Tabela 2 – Stężenie ChZT w dopływie do oczyszczalni	3
Tabela 3 – Stosunek ChZT/BZT ₅ w ściekach dopływających do oczyszczalni ścieków	4
Tabela 4 – Stosunek ChZT/N w ściekach dopływających do oczyszczalni ścieków	4
Tabela 5 – Wymagania dotyczące usuwania zanieczyszczeń ze ścieków wg zalecenia HELCOM 28E/5 (2007)	8
Tabela 6 – Stężenie ChZT w odpływie z oczyszczalni ścieków	9
Tabela 7 – Stężenia azotu w odpływie z oczyszczalni ścieków	10
Tabela 8 – Stężenia fosforu w odpływie z oczyszczalni ścieków	11
Tabela 9 – Przegląd i ocena analizowanych wskaźników	12
Tabela 10 – Parametry niezbędne do obliczenia zapotrzebowania na tlen	VI

SYMBOLE I SKRÓTY

Symbole	Jednostka	Objaśnienie
B_{d,BZT_5}	[kg/d]	Dobowy ładunek BZT_5
C_{XXX}	[mg/l]	Stężenie parametru XXX w homogenizowanej próbce
$MLSS_{AT}$	[g/l]	Stężenie osadu czynnego w komorze napowietrzania
OU_c	[mg/l]	Zużycie tlenu w procesie usuwania związków węgla
RLM	[RLM]	Równoważna liczba mieszkańców
$RLM_{ChZT,120}$	[RLM]	RLM na podstawie ładunku 120 g ChZT/(RLM·d)
$RLM_{N,11}$	[RLM]	RLM na podstawie ładunku 11 g N/(RLM·d)
RLM_{proj}	[RLM]	RLM projektowane
S_{XXX}	[mg/l]	Stężenie parametru XXX w przefiltrowanej próbce/frakcja rozpuszczalna
T_{AT}	[°C]	Temperatura w komorze napowietrzania
V_{aer}	[m ³]	Objętość komory napowietrzania
V_{anox}	[m ³]	Objętość komory beztlenowej
X_{XXX}	[mg/l]	Stężenie parametru XXX w osadzie po filtracji/frakcja zawieszinowa

Skróty	Objaśnienie
CHP	Elektrociepłownia biogazowa
SBR	Sekwencyjny reaktor biologiczny
OŚ	Oczyszczalnia ścieków
ChZT	Chemiczne zapotrzebowanie tlenu
BZT_5	Biochemiczne zapotrzebowanie tlenu

Indeksy	Objaśnienie
aer	napowietrzanie
AT	komora napowietrzania
BM	biomasa
degrad	degradowalny
eff	odpływ z oczyszczalni
inB	doptyw do stopnia oczyszczania biologicznego
inf	doptyw do oczyszczalni
SS	osad nadmierny
Tot	całkowity
Z_{og}	zawiesina ogólna

1 WSTĘP

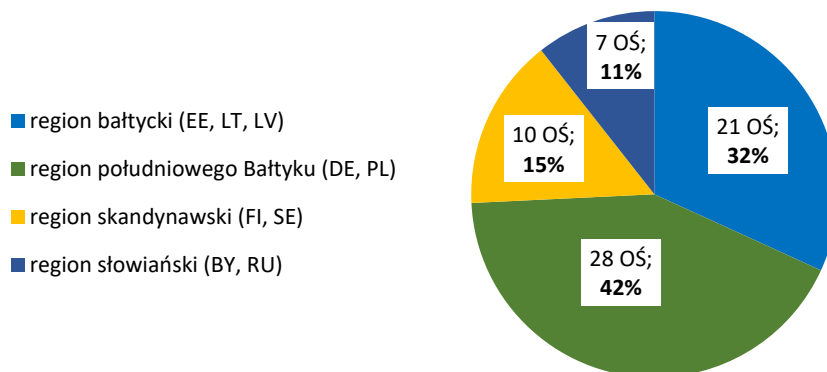
Sektor oczyszczania ścieków charakteryzuje się dużym zużyciem energii w porównaniu do innych odbiorców komunalnych, natomiast inteligentne zarządzanie energią nie jest powszechnie stosowane w regionie Morza Bałtyckiego. Innowacyjne podejście realizowane przez projekt IWAMA oznacza zmniejszenie wpływu związków organicznych i substancji biogennych na Morze Bałtyckie przy niskim poziomie zużycia energii, ponieważ istnieje związek między efektywnym usuwaniem tych związków i zrównoważonym wykorzystaniem energii w procesie oczyszczania.

Dane liczbowe są niezbędne do oceny ogólnej sytuacji i opracowania wskaźnika porównawczego. Dostarczają informacji na temat obecnego stanu oczyszczalni ścieków, objętych różnymi wymogami prawnymi i restrykcjami co do zawartości związków organicznych i substancji biogennych w odpływie (głównie według HELCOM). Podczas gdy krajowe analizy porównawcze są akceptowaną i powszechnie stosowaną metodą, nowe podejście zapewnia międzynarodowy przepływ informacji pochodzących z różnych uwarunkowań prawnych i poziomów zaawansowania technologicznego.

W celu zebrania danych opracowano jednolite ankiety z prośbą o podanie odpowiednich danych procesowych związanych zarówno z zarządzaniem energią, jak i gospodarką osadową. Najważniejsze dane liczbowe dostarczono z prawie 70 oczyszczalni ścieków w dziewięciu różnych krajach: Estonii, Litwie, Łotwie, Polsce, Niemczech, Finlandii, Szwecji, Białorusi i Rosji. Bazę wszystkich informacji poddano ocenie i wykorzystano do opracowania ujednoczonego porównawczego wskaźnika zużycia energii w odniesieniu do usuwania związków biogennych. Ze względu na brak danych szczegółowych niektóre elementy zbioru zostały wyłączone z dalszej analizy. Ostateczna baza danych zawiera informacje z 66 oczyszczalni ścieków. Aby opracować złożony wzorzec przedstawiający efektywne usuwanie biogenów przy najniższym możliwym zużyciu energii, konieczne było ograniczenie uwagi do mniejszej liczby danych zawierających wszystkie niezbędne informacje. W celu dalszego wykorzystania kwestionariusz może zostać skorygowany tak, aby gromadzono jedynie informacje konieczne do obliczeń. Aby zapewnić anonimowość przy przetwarzaniu danych, wszystkie wyniki zostały zaprezentowane poprzez przypisanie oczyszczalni ścieków do czterech regionów:

- region bałtycki (Estonia, Litwa i Łotwa)
- region południowego Bałtyku (Polska i Niemcy)
- region skandynawski (Finlandia i Szwecja)
- region słowiański (Białoruś, Rosja, w tym Kaliningrad)

Chociaż całkowita liczba wyników jest wystarczająca, należy wspomnieć, że zarówno pod względem regionalnym, jak i technologicznym dostrzegalne są pewne dysproporcje. Jak pokazano na rysunku 1, udział poszczególnych regionów jest nierównomierny. Region południowego Bałtyku reprezentowany jest przez znaczną grupę 28 oczyszczalni ścieków, co stanowi prawie połowę wszystkich obiektów. Prawie jedna trzecia należy do regionu bałtyckiego. Region skandynawski jest reprezentowany przez 10 oczyszczalni, a pozostałe 7 znajduje się w regionie słowiańskim.



Rysunek 1 – Podział 66 uczestniczących w projekcie oczyszczalni ścieków na 4 regiony

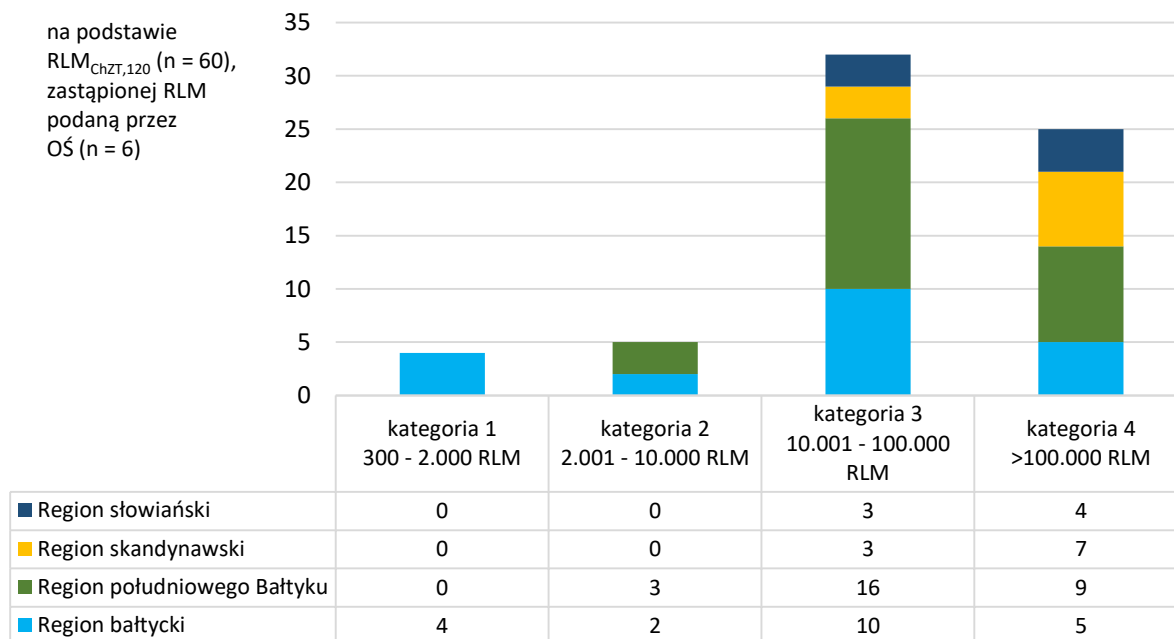
2 OCENA JAKOŚCI I WALIDACJA DANYCH

Do oceny przyjęto łącznie 66 zestawów danych, w których konieczne było uwzględnienie ogromnych różnic w zakresie kompletności i spójności danych. W pierwszej kolejności sprawdzono i porównano dane dotyczące substancji biogennych za pomocą prostych obliczeń obciążenia i bilansów masy. W ten sposób można było wykryć oczywiste błędy przy obliczeniach i pomyłki w jednostkach. Nie wzięto pod uwagę nieprecyzyjnych danych oznaczonych operatorami matematycznymi, takimi jak "mniej niż" (np. "<3 mg/l") lub opisanych przedziałami (np. "85-95%" skuteczności usuwania). Ponadto, w miarę możliwości brakujące dane uzupełniano danymi obliczonymi. Czasami brakowało wartości stężeń lub obciążeń, a podawano średni przepływ rzeczywisty. Za pomocą podstawowych zależności matematycznych brakującą wartość można było w prosty sposób wyznaczyć. Wielokrotnie wprowadzano zamienniki dla stężeń i ładunków wpływających do reaktora biologicznego. Ponieważ często brakowało właściwych danych pomiarowych, zostały one zastąpione przez zredukowane stężenia lub ładunki. Współczynniki redukcji dla oczyszczania wstępnego przyjęto z normy DWA-A 131 (2016). Zależą one od czasu retencji ścieków w osadnikach wstępnych, ale ponieważ nie był on badany, przyjęto ogólne założenie 0,75 - 1 godz. W większości przypadków rzeczywista redukcja osiągnięta dzięki wstępnemu oczyszczaniu i obliczona na podstawie dostępnych danych pokrywa się z założonym współczynnikiem redukcji.

3 PODSTAWOWE PARAMETRY OCZYSZCZALNI ŚCIEKÓW

3.1. Równoważna liczba mieszkańców

Równoważna liczba mieszkańców (RLM) jest nieodzowną podstawą przy obliczaniu szczegółowych wskaźników i opracowywaniu wzorca porównawczego dla oczyszczalni ścieków. W kontekście tego raportu RLM odnosi się do podstawowego ładunku 120 g ChZT/(RLM·d). Na rysunku 2 przedstawiono strukturę wielkości 66 oczyszczalni ścieków, głównie w oparciu o $RLM_{ChZT,120}$. Kiedy wartość ChZT w dopływie nie była znana, zastąpiono ją przez RLM wskazany przez oczyszczalnię. W regionie Morza Bałtyckiego stosowane są różne klasyfikacje wielkości oczyszczalni. W niniejszym raporcie podział ten jest zgodny z zaleceniami HELCOM 28E/5 (2007). Poza wspomnianymi wcześniej dysproporcjami między regionami, istnieją również różnice wielkościowe wyrażone na rysunku 2. Widać wyraźnie dominację większych oczyszczalni ścieków obsługujących ponad 10 000 RLM. Dwie mniejsze kategorie wielkości (<10 000 RLM) stanowią zaledwie 14% ogólnej liczby oczyszczalni ścieków i reprezentowane są głównie przez region bałtycki. Prawie połowa wszystkich oczyszczalni jest przypisana do kategorii 3 (10 001 – 100 000 RLM), w której występują oczyszczalnie ze wszystkich regionów, przy czym najwięcej z krajów południowego Bałtyku. Pozostałe 38% oczyszczalni należy do kategorii 4, z równomiernym rozkładem na poszczególne regiony.



Rysunek 2 – Podział oczyszczalni ścieków według wielkości zgodnie z zaleceniami HELCOM 28E/5 (2007)

3.2. Charakterystyka ilościowa i jakościowa ścieków surowych

Dobowa jednostkowa wielkość przepływu ścieków różni się w poszczególnych regionach, najniższe wartości występują w regionie południowego Bałtyku (patrz Tabela 1). Różnice te nie były przedmiotem dalszych badań. Również stężenia ChZT w dopływie wykazują duże zróżnicowanie (patrz Tabela 2). Można wywnioskować, że określone natężenia przepływu mają wpływ na aspekty energetyczne i zawartości zanieczyszczeń, ponieważ w dopływie do niektórych oczyszczalni częściowo dominują wysokie stężenia związków organicznych, podczas gdy w innych obiektach stężenia te są niskie. Ścieki w regionie południowego Bałtyku są na przykład tak mało rozcieńczone, że w dopływie występuje prawie dwukrotnie większe stężenie ChZT niż w przypadku takiego samego ładunku ścieków w regionie skandynawskim.

Tabela 1 – Przepływ jednostkowy (głównie na podstawie $RLM_{ChZT,120}$)

	min	max	mediana
	[l/($RLM_{ChZT,120} \cdot d$)]		
region bałtycki	60	385	165
region południowego Bałtyku	46	241	120
region skandynawski	134	294	218
region słowiański	148	303	171

Tabela 2 – Stężenie ChZT w dopływie do oczyszczalni

	min	max	mediana
	[mg ChZT/l]		
region bałtycki	320	1.573	741
region południowego Bałtyku	498	2.637	1.002
region skandynawski	416	896	557
region słowiański	396	813	704

Stosunek ChZT i BZT_5 jest wskaźnikiem biodegradowalności dopływających ścieków. Krótkie podsumowanie przedstawiono w Tabeli 3. Ponad 80% oczyszczalni wykazało wpływ przemysłu, ale niekoniecznie odzwierciedlone jest to wysokimi wskaźnikami ChZT/ BZT_5 .

Tabela 3 – Stosunek ChZT/BZT₅ w ściekach dopływających do oczyszczalni ścieków

ChZT/BZT ₅	Region bałtycki [n]	Region południowego Bałtyku [n]	Region skandynawski [n]	Region słowiański [n]
<2	2	7	0	3
2-4	14	21	9	4

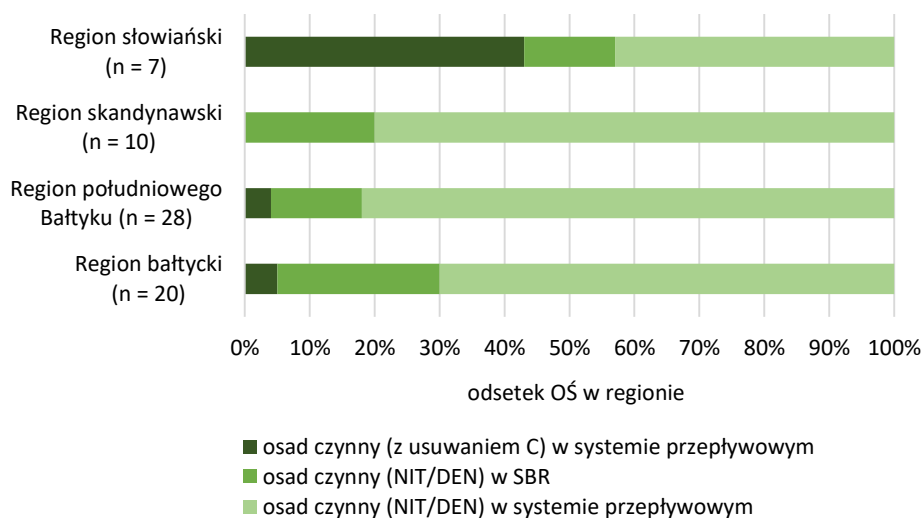
Stosunek ChZT/N jest wyznaczany na podstawie jakości ścieków w dopływie. Jeśli ChZT/N jest niższy niż 10, może brakować substratu, który ogranicza proces denitryfikacji. W około 30% oczyszczalni wskaźnik ten znajduje się poniżej wspomnianej wartości (patrz Tabela 4). Powszechną metodą wspomaganie procesu oczyszczania poprzez dozowanie źródła węgla, np. metanolu. Oczywiście wiąże się to z dodatkowymi kosztami.

Tabela 4 – Stosunek ChZT/N w ściekach dopływających do oczyszczalni ścieków

ChZT/N	Region bałtycki [n]	Region południowego Bałtyku [n]	Region skandynawski [n]	Region słowiański [n]
<10	8	8	1	2
>= 10	8	18	8	5

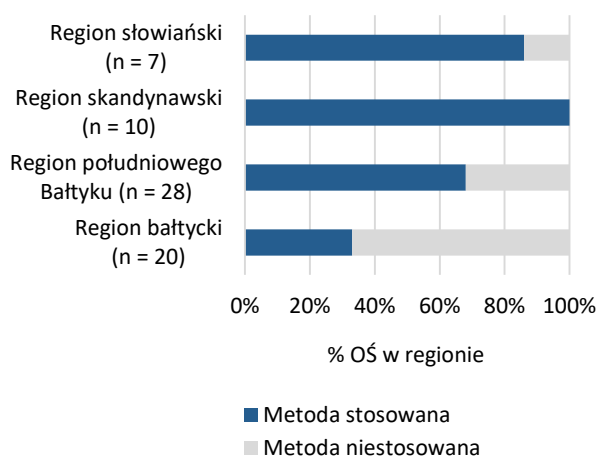
3.3. Procesy oczyszczania

W badanych oczyszczalniach przeprowadzono analizę poszczególnych etapów i procesów oczyszczania ścieków. Stosowane technologie oczyszczania przedstawiono na rysunku 3. We wszystkich regionach jako dominującą lub nawet wyłącznie stosowaną technologię można uznać system osadu czynnego z nityfikacją i denitryfikacją. Znaczna część oczyszczalni wykorzystuje tę metodę w sekwencyjnym reaktorze biologicznym (SBR), który jest najczęściej stosowany w regionie Morza Bałtyckiego. Większość korzysta jednak z konwencjonalnych wielostopniowych systemów przepływowych. Nietypowe rozwiązania zastosowane zostały tylko na dwóch oczyszczalniach ścieków z regionu południowo-bałtyckiego. Jedna z nich wykorzystuje system osadu czynnego w połączeniu ze złożem biologicznym zraszanym, reaktorem USB i dwustopniową biofiltracją. Druga stosuje reaktor sekwencyjny typu CASS (Cyclic Activated Sludge System). Ponieważ tę ostatnią można rozumieć jako rodzaj technologii SBR (sekwencyjnego reaktora biologicznego), na rysunku 3 zaliczono ją właśnie do tej grupy. System osadu czynnego z samym usuwaniem węgla został wskazany w prawie połowie oczyszczalni z regionu słowiańskiego i tylko w niewielu oczyszczalniach ścieków w regionie bałtyckim i południowo-bałtyckim.

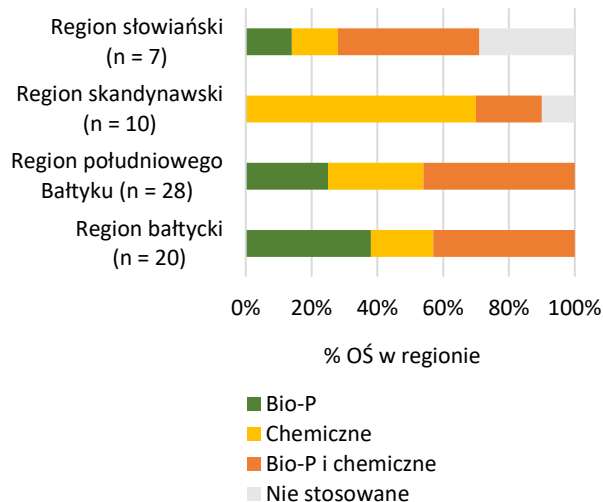


Rysunek 3 – Stosowane technologie oczyszczania ścieków

Na rysunku 4 przedstawiono częstość stosowania wstępnego oczyszczania ścieków. Około 65% analizowanych oczyszczalni stosuje pierwszy stopień oczyszczania. Wykorzystywany jest on we wszystkich oczyszczalniach krajów skandynawskich. W regionie słowiańskim dotyczy on ponad 80%, a w regionie południowego Bałtyku około 70%. Najmniejszy, około 33% udział stwierdzono w regionie bałtyckim. Oczyszczalnie, które nie stosują oczyszczania wstępnego, w większości przypadków były raczej małymi lub średnimi zakładami obsługującymi mniej niż 100 000 RLM_{ChZT,120} i przepływie mniejszym niż 20 000 m³/d. Wyjątek stanowiła duża oczyszczalnia w regionie południowo-bałtyckim, odbierająca duże ilości ścieków przemysłowych, dlatego zamiast oczyszczania wstępnego zastosowano inne metody podczyszczania ścieków. Co ciekawe, 8 na 9 estońskich oczyszczalni i wszystkie 3 oczyszczalnie ścieków na Łotwie nie stosują oczyszczania wstępnego.



Rysunek 4 – Stopień wykorzystania oczyszczania wstępnego

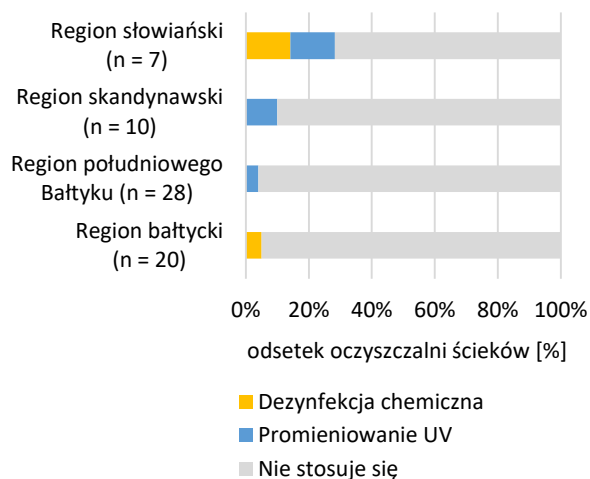


Rysunek 5 – Stosowane metody usuwania fosforu

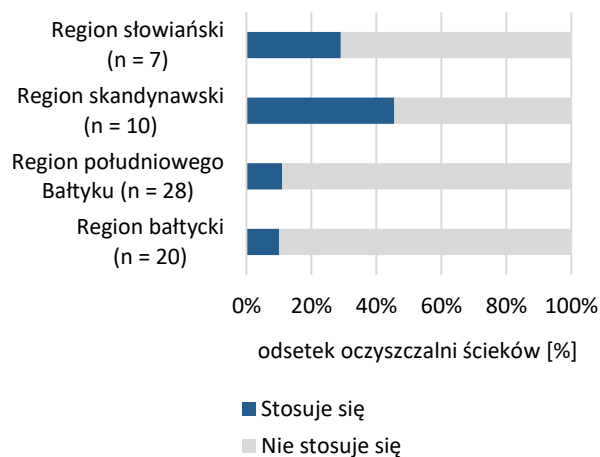
Na rysunku 5 przedstawiono częstość stosowania procesów usuwania fosforu. Tylko nieliczne oczyszczalnie ścieków w regionie słowiańskim i skandynawskim nie usuwają fosforu. Poza tym zastosowanie biologicznego usuwania fosforu „Bio-P”, procesów chemicznych lub kombinowanych jest dość równomierne. Wśród oczyszczalni skandynawskich wyraźnie widać jednak koncentrację na chemicznym usuwaniu fosforu, natomiast żadna z nich nie stosuje metody „Bio-P” jako samodzielnej technologii.

Na rysunkach 6 i 7 zestawiono rzadko stosowane metody dezynfekcji oraz filtracji ścieków. Dezynfekcja chemiczna została odnotowana tylko w jednej oczyszczalni w regionie bałtyckim i jednej w słowiańskim. Podobnie dezynfekcja promieniami UV stosowana była w jednej oczyszczalni odpowiednio w regionie słowiańskim, skandynawskim i południowo-bałtyckim. Wszystkie pozostałe czyszczalnie nie stosują żadnych metod dezynfekcji.

Filtracja ścieków jest stosowana głównie w Skandynawii, a następnie w regionie słowiańskim. Z tego stopnia oczyszczania korzysta tylko około 10% oczyszczalni ścieków w regionie bałtyckim i południowego Bałtyku.



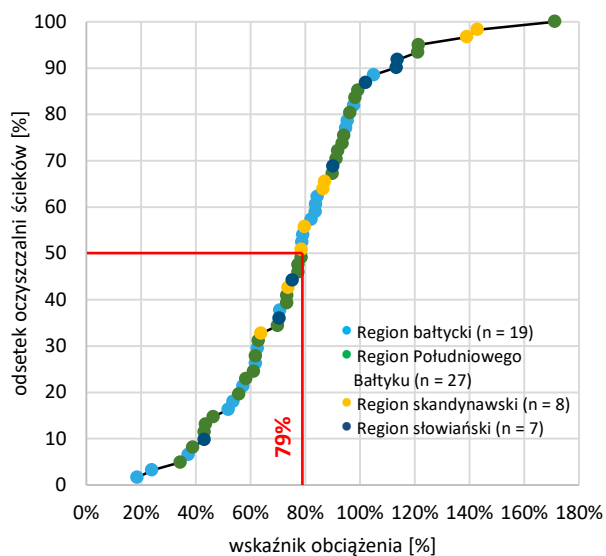
Rysunek 6 – Stosowane metody dezynfekcji



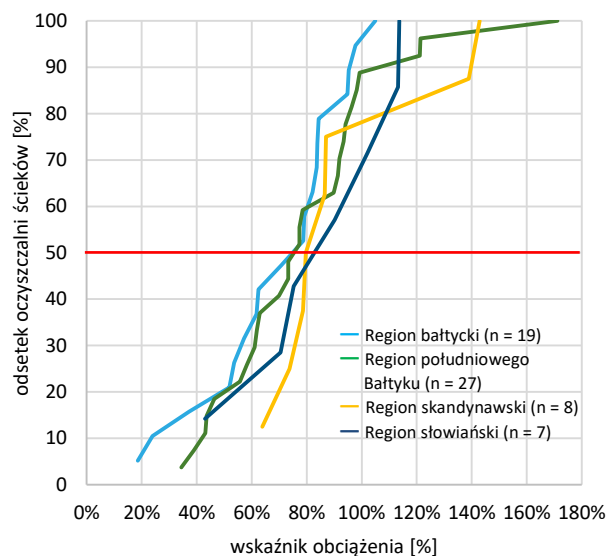
Rysunek 7 – Wykorzystanie filtracji ścieków

3.4. Wskaźnik obciążenia

Wskaźnik obciążenia (DU – degree of utilization) wyraża faktyczny poziom wykorzystania dostępnej przepustowości oczyszczalni. Innymi słowy, opisuje, w jakim stopniu wielkość instalacji odpowiada rzeczywistym warunkom, co może mieć znaczący wpływ na wydajność energetyczną oczyszczalni ścieków. Wskaźnik DU został określony przez odniesienie rzeczywistej wartości $RLM_{ChZT,120}$, jak opisano powyżej, do wymiarowanej wartości RLM. Na rysunku 8 i 9 przedstawiono stopień obciążenia oczyszczalni odpowiednio w sposób ogólny i lokalny. Zaobserwowano duży zakres DU, od 20 do 170%, przy medianie wynoszącej około 80%. W skali regionalnej występujące zróżnicowanie jest niewielkie. Według DWA-A 131 (2016) oczyszczalnie ścieków powinny być zaprojektowane w oparciu o wielkość 85% rzeczywistego obciążenia. Zasadniczo prawie wszystkie oczyszczalnie w regionie bałtyckim są niedociążone, podczas gdy w pozostałych regionach przeciążone jest 10–30% oczyszczalni. W odniesieniu wskaźnika obciążenia do azotu ($RLM_{N,11}/RLM_{proj}$) mediana zmniejsza się do około 70% oraz 65% w odniesieniu do fosforu.



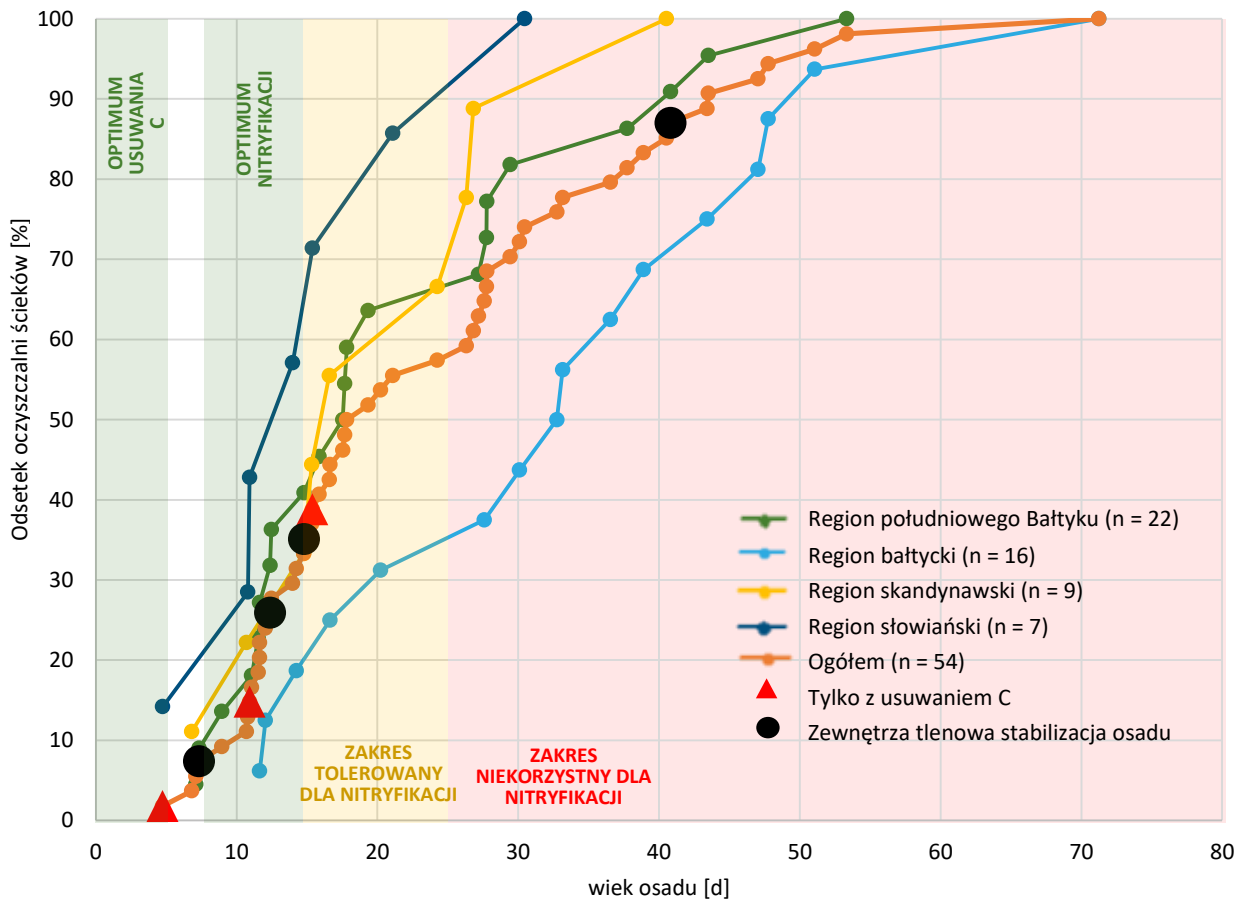
Rysunek 8 – Wskaźnik obciążenia na podstawie ChZT, wykres zbiorczy



Rysunek 9 – Wskaźnik obciążenia na podstawie ChZT, według regionu

3.5 Wiek osadu

Wiek osadu opisuje średni czas retencji osadu w części biologicznej oczyszczalni. Rysunek 10 ilustruje obliczony na podstawie BZT_5 wiek osadu, w ujęciu regionalnym i całościowym. Ogółem, wiek osadu wynosi od 5 do 71 dni. Różnice między regionami są dość widoczne. Podczas gdy 50% oczyszczalni w krajach słowiańskich utrzymuje wiek osadu poniżej 12 dni, wiek osadu w takim samym odsetku oczyszczalni regionu bałtyckiego wynosi mniej niż 32 dni, co stanowi ogromną różnicę 20 dni. Kraje skandynawskie i południowo-bałtyckie zajmują pośrednią pozycję, ze średnim wiekiem osadu wynoszącym około 17 dni, co odpowiada ogólnemu wiekowi osadu równemu około 18 dni. Dalsze szczegóły dotyczące metodyki obliczania wieku osadu podano w załączniku.

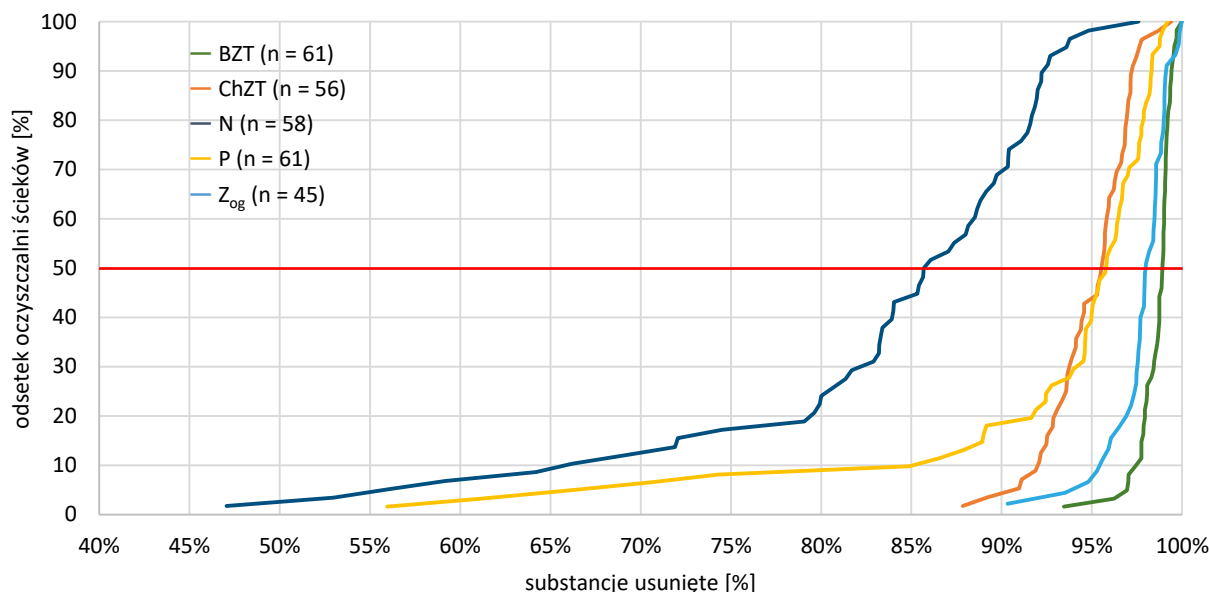


Rysunek 10 – Wiek osadu na podstawie BZT_5 , w ujęciu regionalnym i ogólnym

Zbyt wysoki wiek osadu wiąże się z mniejszą produkcją biogazu (w warunkach beztlenowych) i może również negatywnie wpływać na jakość osadów. Przy krótszym wieku osadu produkcja biogazu jest większa, jednak w chłodniejszym klimacie i porze roku pojawia się problem biologicznego usuwania azotu. Bardzo niskie lub bardzo wysokie wartości wieku osadu mogą wskazywać na problemy z oczyszczaniem biologicznym albo na problemy z powiązаныmi danymi.

4 EFEKTYWNOŚĆ OCZYSZCZANIA

Usuwanie związków organicznych i substancji biogenych jest głównym celem oczyszczalni ścieków i podlega regulacjom prawnym. Wskaźniki usuwania zanieczyszczeń są związane ze zużyciem energii, a także z jej produkcją. Na rysunku 11 przedstawiono wydajność usuwania ze ścieków charakterystycznych wskaźników zanieczyszczeń. Poszczególne linie na wykresie odpowiadają typowym parametrom zanieczyszczeń, przy czym BZT₅ okazał się najlepiej rozkładalny, średnio jego redukcja wyniosła około 99%. W przypadku zawiesiny ogólnej uzyskano około 98% skuteczność usuwania. ChZT i fosfor usuwany jest na poziomie około 96%. W przypadku azotu stopień redukcji wynosi średnio 86%.



Rysunek 11 – Efektywność usuwania zanieczyszczeń

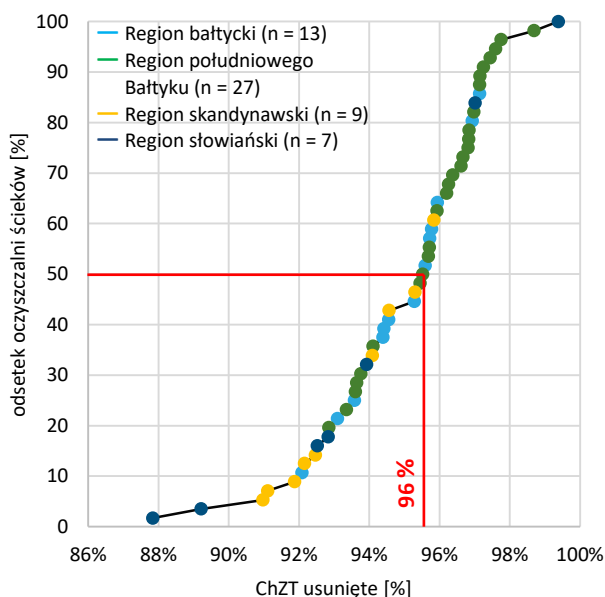
Regulacje prawne dotyczące limitów stężeń parametrów zanieczyszczeń lub wymaganej procentowej redukcji różnią się w poszczególnych krajach. Międzynarodowa komisja HELCOM integruje prawie wszystkie kraje biorące udział w badaniu, jedynym państwem niebędącym członkiem jest Białoruś. Zalecenie HELCOM 28E/5 (2007) podsumowane w tabeli 5 odnosi się tylko do usuwania BZT₅, N_{og} i P_{og}. Starsza wersja z 1999 r. (zalecenie HELCOM 20E/6) odnosiła się do ChZT i zalecała minimalną 80% redukcję. Zalecenia HELCOM przyjęto jako punkt odniesienia, ponieważ ich ograniczenia dotyczące stężeń w ściekach oczyszczonych są w większości przypadków bardziej rygorystyczne niż przepisy krajowe.

Tabela 5 – Wymagania dotyczące usuwania zanieczyszczeń ze ścieków wg zalecenia HELCOM 28E/5 (2007)

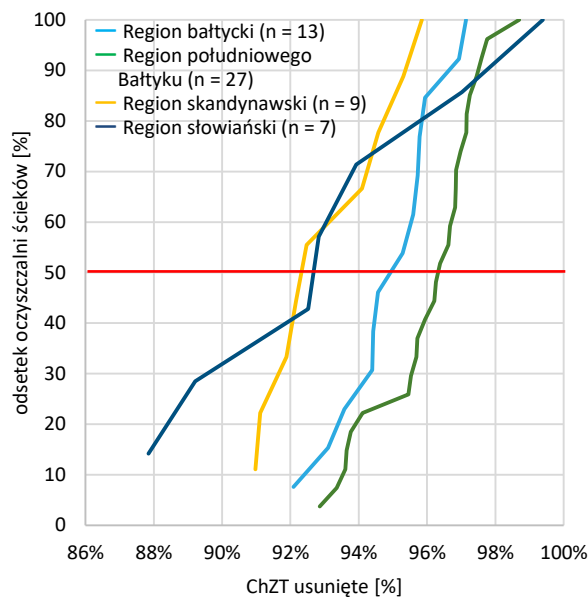
	BZT ₅		N _{og}		P _{og}	
	redukcja [%]	limit w odpływie [mg/l]	redukcja [%]	limit w odpływie [mg/l]	redukcja [%]	limit w odpływie [mg/l]
grupa 1 (300 – 2 000 RLM)	80	25	30	35	70	2
grupa 2 (2000 – 10 000 RLM)	80	15	30		80	1
grupa 3 (10 001 – 100 000 RLM)	80	15	70 - 80	15	90	0,5
grupa 4 (> 100 000 RLM)	80	15	70 - 80	10	90	0,5

4.1. Usuwanie związków organicznych (ChZT)

Na rysunku 12 i 13 przedstawiono skuteczność usuwania ChZT obliczoną na podstawie dostarczonych danych w dopływie/odpływie. W regionie bałtyckim ogólna mediana skuteczności usuwania ChZT ustala się na poziomie około 96%, co prawie równa się wartości z regionu południowego Bałtyku, który jest najbardziej aktywny pod względem dostępności danych. W regionie bałtyckim mediana wydajności usuwania wynosi około 95%, podczas gdy region skandynawski i słowiański osiągają średnie usuwanie ChZT na poziomie około 93%. Region słowiański wykazuje największe różnice od 88 do 99% eliminacji ChZT. Wartości stężeń ChZT we wszystkich regionach zestawiono w tabeli 6.



Rysunek 12 – Efektywność usuwania ChZT, wykres zbiorczy



Rysunek 13 – Efektywność usuwania ChZT, według regionu

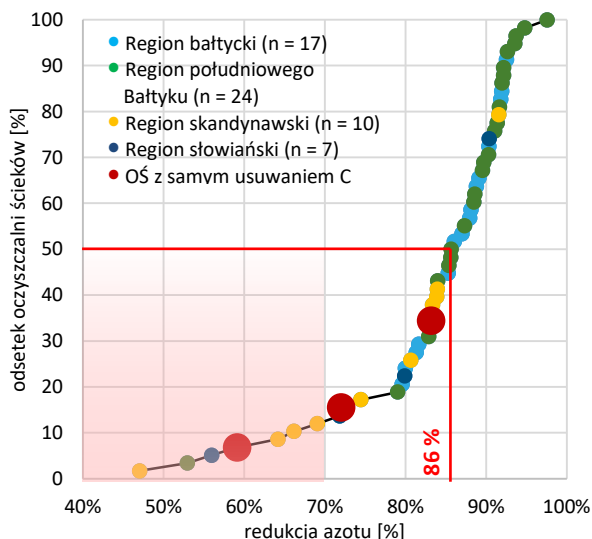
Tabela 6 – Stężenie ChZT w odpływie z oczyszczalni ścieków

	n	min	max	mediana
		[mg/l]		
Region bałtycki	13	29	61	41
Region południowego Bałtyku	27	19	164	34
Region skandynawski	9	30	52	41
Region słowiański	7	5	86	34

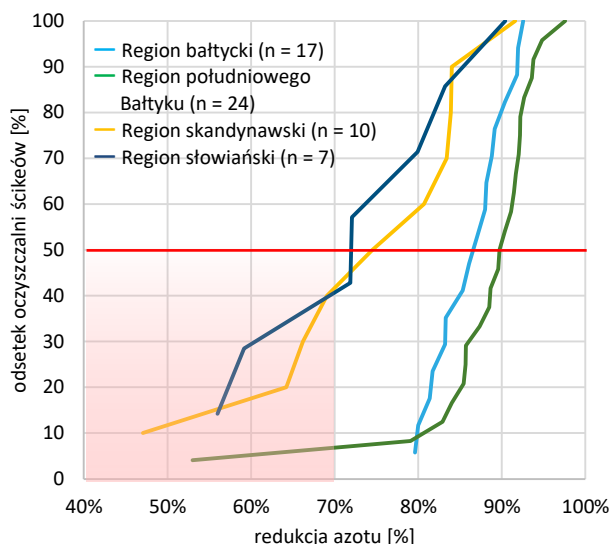
Minimalny stopień redukcji ChZT wynoszący 80% jest zachowany we wszystkich oczyszczalniach. To samo dotyczy BZT₅ (nie pokazano), z wyjątkiem jednej oczyszczalni ścieków w regionie słowiańskim, która nie spełnia kryteriów wymaganego stężenia w odpływie.

4.2. Usuwanie azotu

Na rysunku 14 i 15 przedstawiono wydajność usuwania azotu. Ogólna mediana stopnia redukcji wynosi około 86%. Regiony południowo-bałtycki i bałtycki wykazują najlepsze wyniki usuwania azotu, a mediana wynosi odpowiednio około 90% i 87%. W regionie skandynawskim i słowiańskim średnia redukcja azotu wynosi około 75%. Oczyszczalnie z technologią osadu czynnego, ale bez procesu nitrifikacji/denitrifikacji (z samym usuwaniem C) znajdują się na gorszych pozycjach, jak się spodziewano.



Rysunek 14 – Efektywność usuwania azotu, wykres zbiorczy



Rysunek 15 – Efektywność usuwania azotu, według regionu

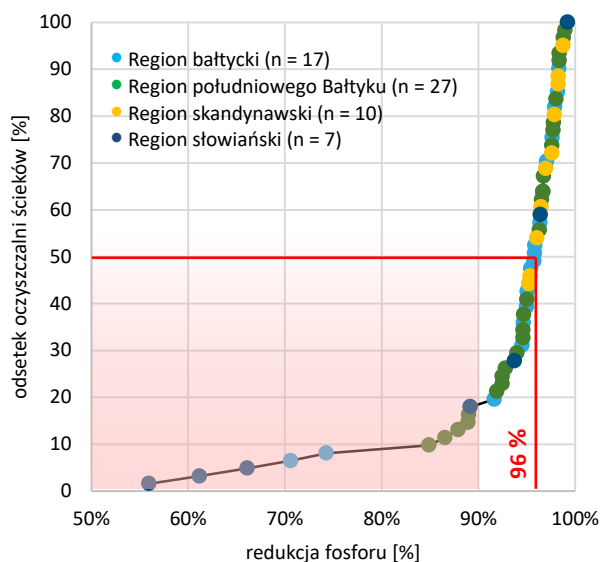
Na powyższych wykresach kolorem czerwonym przedstawiono również zalecenie HELCOM, pokazujące minimalną redukcję azotu na poziomie 70% dla grup większych oczyszczalni, jako że są one tutaj głównie reprezentowane. Na rysunku 14 widać, że około 12% nie spełnia podanego wymogu redukcji. Wraz z drugim kryterium dopuszczalnych stężeń w odpływie (patrz tabela 7), oczyszczalnie niespełniające wymogów stanowią do 20% wszystkich badanych zakładów.

Tabela 7 – Stężenia azotu w odpływie z oczyszczalni ścieków

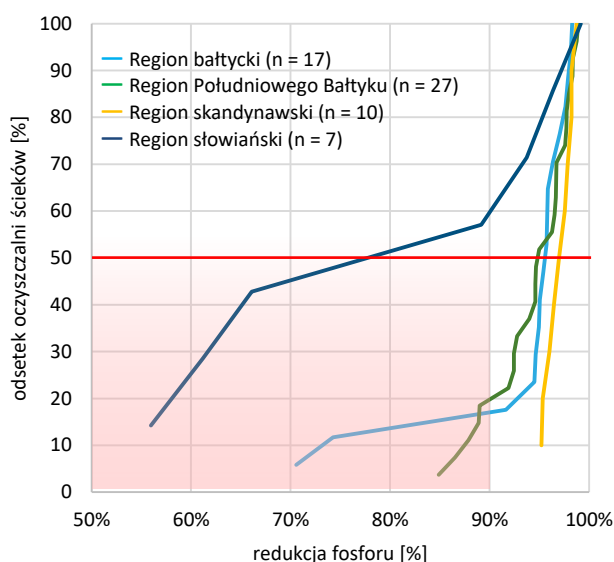
	n	min	max	mediana
		[mg/l]		
Region bałtycki	17	5	17	9
Region południowego Bałtyku	24	2	32	8
Region skandynawski	10	4	18	13
Region słowiański	7	7	28	14

4.3. Usuwanie fosforu

Rysunki 16 i 17 pokazują skuteczność usuwania fosforu. W tym wypadku mediana wyników ze wszystkich analizowanych oczyszczalni wynosi około 96%. W ujęciu regionalnym można zauważyć, że region skandynawski, pomimo innych wskaźników usuwania zanieczyszczeń, zajmuje czołową pozycję, z medianą wynoszącą około 97%, następnie region bałtycki i region południowego Bałtyku odpowiednio około 96% i 95%. Najniższą efektywność usuwania fosforu stwierdzono w regionie słowiańskim, gdzie średnia redukcja fosforu wynosi około 80%.



Rysunek 16 – Efektywność usuwania fosforu, wykres zbiorczy



Rysunek 17 – Efektywność usuwania fosforu, według regionu

Pod względem zastosowanych procesów usuwania fosforu nie było danych wskazujących na to, że jeden proces zapewnia lepsze wyższe wskaźniki usuwania niż inne. W odniesieniu do zaleceń HELCOM, usuwanie fosforu w większych oczyszczalniach powinno wynosić co najmniej 90%. Na powyższych wykresach limit ten jest zaznaczony na czerwono. Biorąc pod uwagę oba kryteria HELCOM (stopień redukcji i dopuszczalne stężenie w odpływie), prawie 40% oczyszczalni nie spełnia zadanych zaleceń. Stężenia fosforu w ściekach oczyszczonych w analizowanych regionach zestawiono w tabeli 8.

Tabela 8 – Stężenia fosforu w odpływie z oczyszczalni ścieków

	n	min	max	mediana
		[mg/l]		
Region bałtycki	20	0,2	2,6	0,4
Region południowego Bałtyku	27	0,2	2,6	0,5
Region skandynawski	10	0,1	0,3	0,2
Region słowiański	7	0,1	2,9	0,9

5 ZUŻYCIE ENERGII

Na całkowite zapotrzebowanie na energię oczyszczalni ścieków mają wpływ różne czynniki. W przypadku stosowania procesu osadu czynnego, największa część energii elektrycznej jest wykorzystywana na dostarczenie tlenu do systemu napowietrzania. Na całkowite zapotrzebowanie wpływają ponadto inne etapy oczyszczania, a zwłaszcza pompowanie i mieszanie ścieków. Co więcej, zapotrzebowanie na energię zależy od sprawności elektrycznej zainstalowanych urządzeń. Aby przeanalizować wszystkie czynniki wpływające na efektywność energetyczną potrzebny jest szczegółowy audyt energetyczny oczyszczalni ścieków. Dzięki analizie kluczowych danych i ich odniesieniu do wartości referencyjnych można uzyskać wskazówki dotyczące optymalizacji zapotrzebowania na energię.

Podczas gdy w ostatnich latach promowano energooszczędne oczyszczanie ścieków, w literaturze podawano różne zalecane do stosowania wskaźniki oceny efektywności energetycznej oczyszczalni (patrz tabela 9). Niniejszy raport przedstawia najczęściej stosowane wskaźniki z zaleceniem obliczania kWh/kgO₂, co pozwala na powiązanie efektywności energetycznej z efektywnością usuwania zanieczyszczeń.

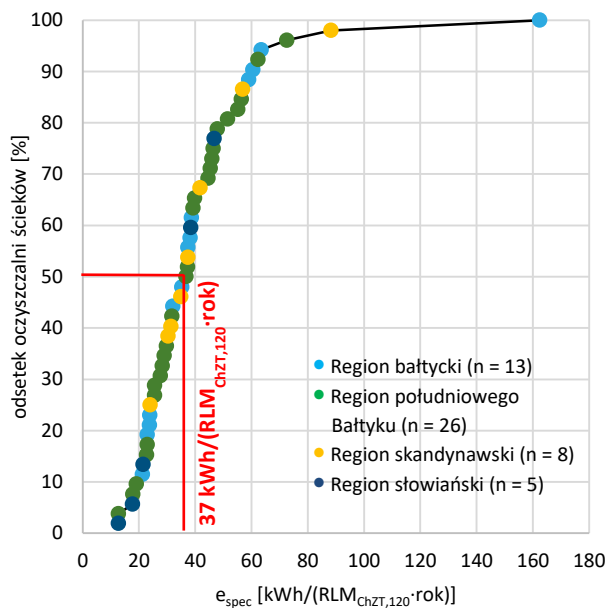
Tabela 9 – Przegląd i ocena analizowanych wskaźników

Główny wskaźnik	Zużycie energii odniesione do	Ocena
kWh _{tot} /m ³	1 parametru: m ³	Ze względu na to, że stężenie zanieczyszczeń w ściekach różni się znacznie w poszczególnych regionach (przedstawione w tabeli 2 dla ChZT), wskaźnik kWh/m ³ traci sens, gdy jest wyłącznie brany pod uwagę, a ma uzasadnienie w przypadku porównywania tylko urządzeń hydraulicznych. Poza tym, nie ma odniesienia do sprawności oczyszczania. Z tych powodów nie zalecamy tej wartości jako głównego kryterium.
kWh _{tot} /(RLM·rok)	2 parametrów: C _{ChZT,inf} , m ³	Powszechnie akceptowane kryterium, może być z łatwością wyznaczone. Jednakże nie odnosi się do efektywności oczyszczania.
kWh _{tot} /kgChZT _{us}	3 parametrów: C _{ChZT,inf} , C _{ChZT,eff} , m ³	Wskaźnik łatwy do określenia, uwzględnia co najmniej skuteczność usuwania ChZT. Jeśli jednak wydajność usuwania ChZT w zbiorze danych jest podobna, wyniki odpowiadają wskaźnikowi kWh _{tot} /(RLM·rok), dlatego wskaźnik ten nie wnosi dodatkowej informacji.
kWh _{tot} /kgO ₂	12 parametrów: C _{ChZT,inf} , C _{ChZT,eff} , C _{N,inf} , S _{orgN,eff} , S _{NH4-N,eff} , S _{NO3-N,eff} , X _{SS,inf} , V _{aer} , V _{anox} , MLSS _{AT} , B _{BZT5,inf} , T _{AT}	Nowo przyjęty wskaźnik obejmuje kilka parametrów i uwzględnia sprawność usuwania ChZT, a także azotu. Wadą tego kryterium jest długi czas potrzebny do jego wyznaczenia i brak uproszczonego sposobu szacowania.

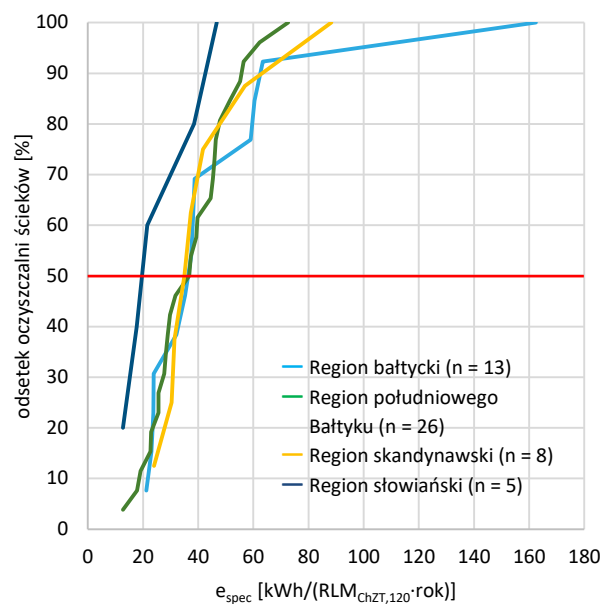
Jako wartość referencyjną wybrano zapotrzebowanie na tlen, w celu lepszego odzwierciedlenia skuteczności usuwania zanieczyszczeń. Szczegóły sugerowanej metody obliczeń znajdują się w załączniku. W kolejnych podrozdziałach zostaną szczegółowo przedstawione poszczególne wskaźniki porównawcze. Pomimo przeanalizowania głównego kryterium [kWh/m³], nie zostanie tutaj przedstawione z powodów wymienionych powyżej.

5.1. Specyficzne zużycie energii $\text{kWh}/(\text{RLM}_{\text{ChZT},120} \cdot \text{rok})$

Powszechnie przyjęty i często stosowany wskaźnik oparty jest na całkowitym zapotrzebowaniu na energię w odniesieniu do skorelowanego $\text{RLM}_{\text{ChZT},120}$. Został on przedstawiony na rysunku 18 i 19 w sposób ogólny i regionalny. Mediana wyników wynosi około $37 \text{ kWh}/(\text{RLM}_{\text{ChZT},120} \cdot \text{rok})$, co odpowiada medianie dla regionu bałtyckiego, południowego Bałtyku i skandynawskiego. W regionie słowiańskim wykazano najlepsze wyniki, przy medianie wynoszącej zaledwie $22 \text{ kWh}/(\text{RLM}_{\text{ChZT},120} \cdot \text{rok})$. Jednakże uwzględnionych zostało tylko 5 oczyszczalni ścieków, co traktowane jest jako powód niereprezentatywności wyniku.

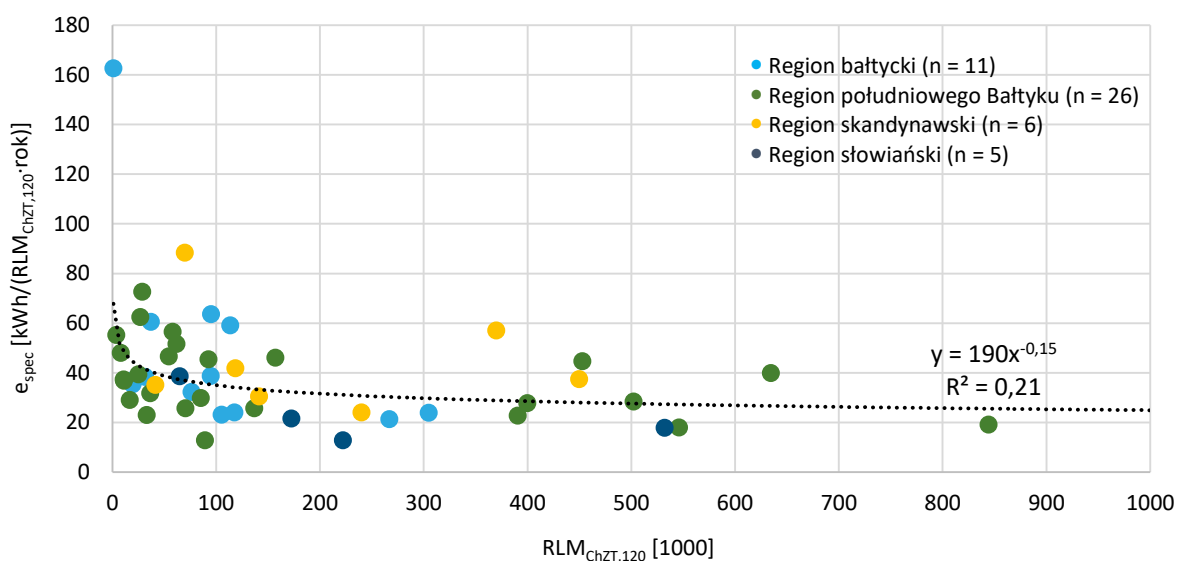


Rysunek 18 – Specyficzne zużycie energii $[\text{kWh}/(\text{RLM}_{\text{ChZT},120} \cdot \text{rok})]$, wykres zbiorczy



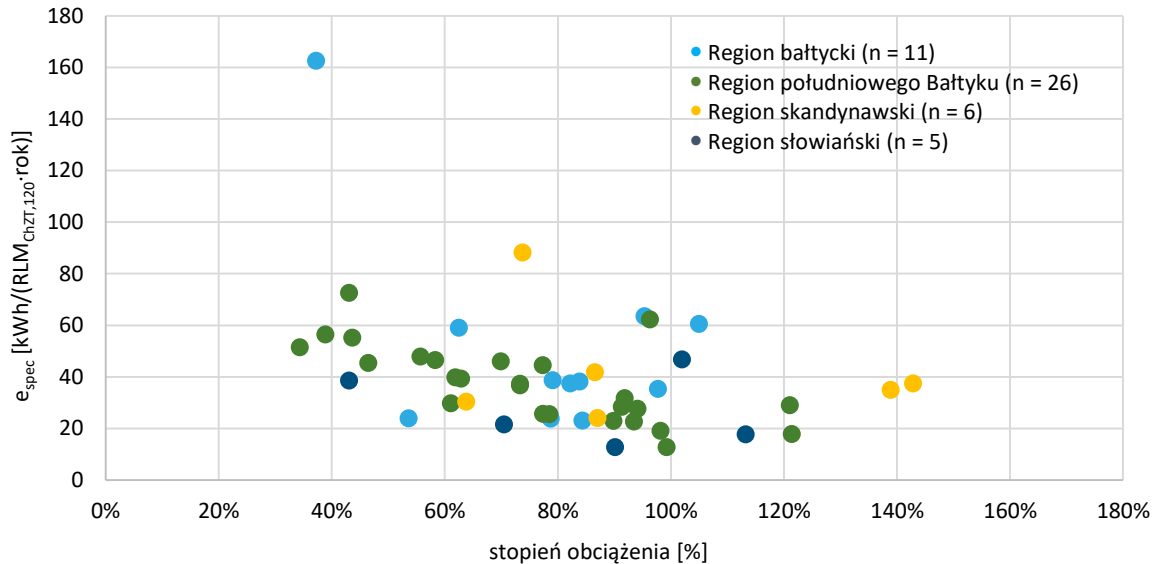
Rysunek 19 – Specyficzne zużycie energii $[\text{kWh}/(\text{RLM}_{\text{ChZT},120} \cdot \text{rok})]$, według regionu

Na rysunku 20 przedstawiono wskaźnik $\text{kWh}/(\text{RLM}_{\text{ChZT},120} \cdot \text{rok})$ w odniesieniu do RLM. Wskazano zależność większej efektywności energetycznej dużych oczyszczalni ścieków niż mniejszych instalacji, ale zastosowana funkcja wykazuje jedynie niski współczynnik korelacji. Co więcej, większe oczyszczalnie mogą wykorzystywać efekt skali, ponieważ dysponują dużymi i na ogół bardziej wydajnymi urządzeniami, zwłaszcza większymi pompami i generatorami.



Rysunek 20 – Specyficzne zużycie energii $[\text{kWh}/(\text{RLM}_{\text{ChZT},120} \cdot \text{rok})]$ w stosunku do RLM $[\text{RLM}_{\text{ChZT},120}]$

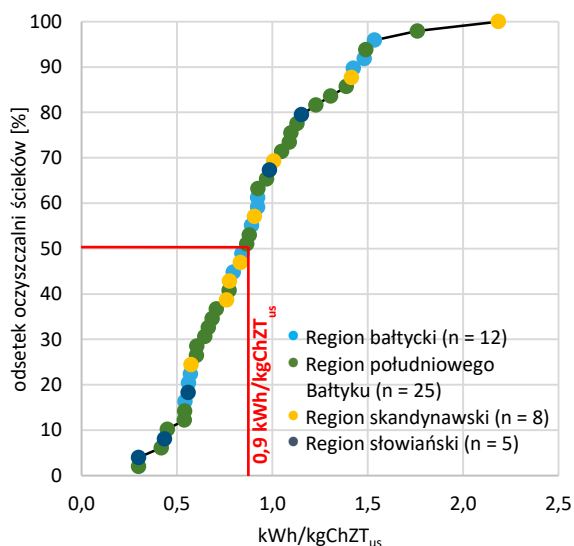
Co więcej, stopień obciążenia może mieć znaczący wpływ na pracę oczyszczalni ścieków, jak pokazano na rysunku 21. Najniższe jednostkowe zużycie energii znajduje się w przedziale 90-100% wykorzystanej wydajności. Duże niedociążenie wiąże się z gorszymi parametrami energetycznymi. Częściowo można to również zauważyć dla przeciążonych oczyszczalni ścieków, chociaż w tym przypadku brakuje wystarczających danych.



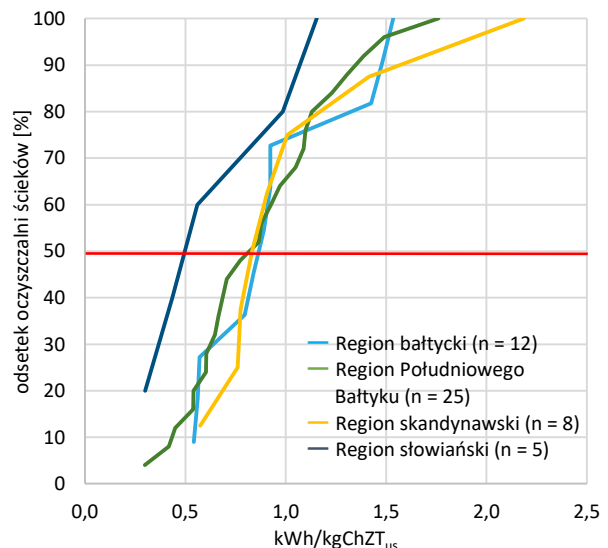
Rysunek 21 – Specyficzne zużycie energii [$\text{kWh}/(\text{RLM}_{\text{ChZT},120} \cdot \text{rok})$] w stosunku do stopnia obciążenia

5.2. Specyficzne zużycie energii $\text{kWh}/\text{kgChZT}_{\text{us}}$

Innym podejściem jest zdefiniowanie wskaźnika całkowitego zużycia energii w odniesieniu do usuniętego ChZT (Rysunek 22 i 23). Ponieważ jednak prawie wszystkie oczyszczalnie uzyskują podobne wydajności usuwania ChZT $> 90\%$, nie ma znaczącej różnicy w stosunku do parametru RLM opartego na ładunku ChZT.



Rysunek 22 – Specyficzne zużycie energii [$\text{kWh}/\text{kgChZT}_{\text{us}}$], wykres zbiorczy



Rysunek 23 – Specyficzne zużycie energii [$\text{kWh}/\text{kgChZT}_{\text{us}}$], według regionu

5.3. Specyficzne zużycie energii kWh/kgO₂

Tlen jest głównym czynnikiem wpływającym na efektywność usuwania związków organicznych i biogenych, a także zużycia energii. W związku z tym specyficzne zużycie energii związane z zapotrzebowaniem na tlen [kWh/kgO₂] uznaje się za dokładnie wykazujące związek między usuwaniem zanieczyszczeń a zużyciem energii. Jak dotąd ten parametr nie jest powszechnie stosowany, lecz jego przydatność została sprawdzona na potrzeby tego raportu.

Ze względu na wymaganą dużą ilość danych, wskaźnik ten można określić tylko dla 31 oczyszczalni ścieków (region bałtycki n = 9, południowego Bałtyku n = 15, skandynawski n = 2, słowiański n = 5). Często nie podawano wartości dla form azotu w odpływie, takich jak azot amonowy lub azotanowy, lub brakowało informacji potrzebnych do oszacowania wieku osadu.

Poniższe parametry przeanalizowano w celu sprawdzenia ich wpływu, a tym samym użyteczności nowo zastosowanego wskaźnika [kWh/kgO₂].

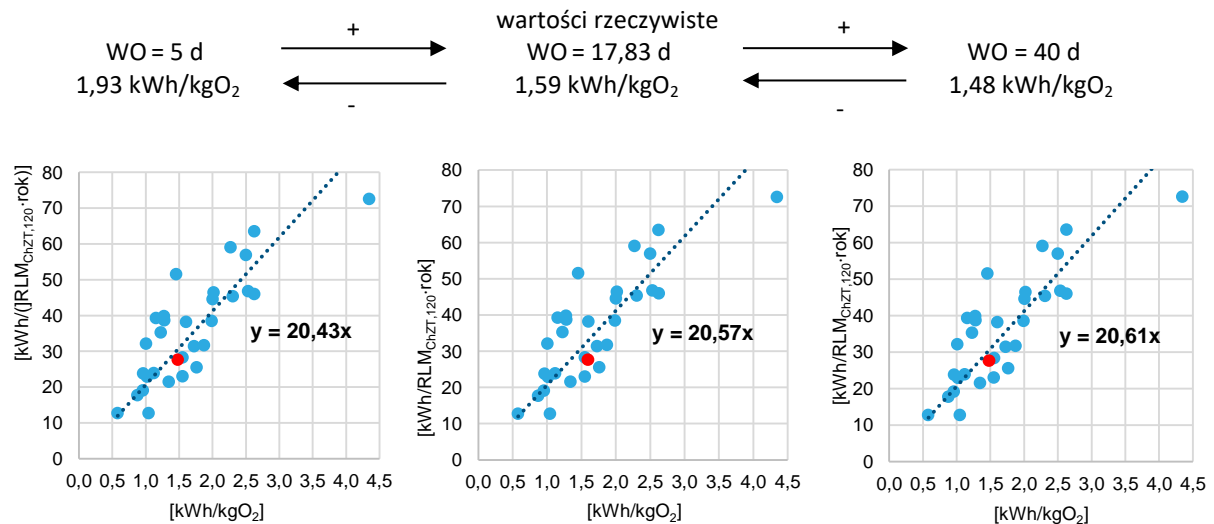
- Rok budowy
- Wiek osadu
- Temperatura w komorze napowietrzania
- Frakcje ChZT
- Etapy oczyszczania
- Udział ścieków komunalnych/przemysłowych
- Zastosowanie oczyszczania wstępnego
- Stosunek ChZT/BZT

Rok budowy:

Dla potrzeb tej analizy, rok budowy/przebudowy stopnia oczyszczania biologicznego sięga od 1984 r. do 2015 r. We wszystkich regionach uwzględniono starsze i nowsze oczyszczalnie. Mimo, że najnowsza z nich charakteryzuje się najlepszym wskaźnikiem kWh/kgO₂, stwierdzono również, że najstarszy zakład znajduje się w pierwszej dziesiątce (7 miejsce). Zasadniczo stwierdzono, że dla zakresu wartości tego wskaźnika rok budowy/przebudowy nie wykazuje żadnego wpływu na wydajność określoną kWh/kgO₂. To samo spostrzeżenie dotyczyło roku budowy w odniesieniu do kWh/(RLM_{ChZT,120} · rok).

Wiek osadu:

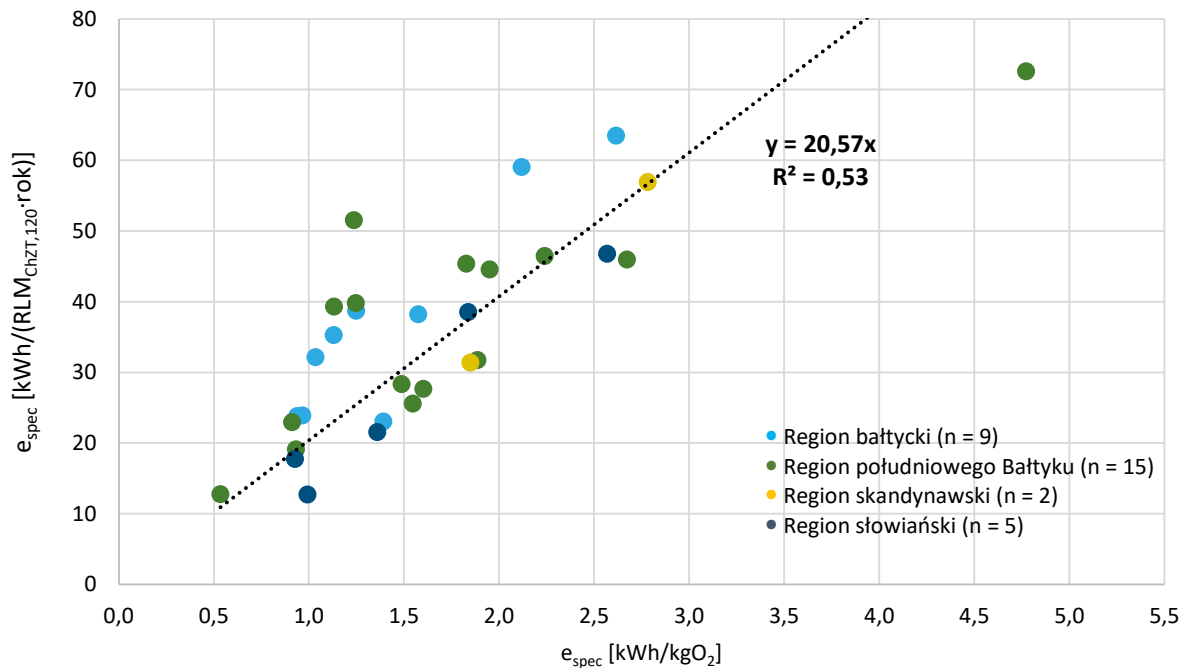
Wiek osadu uznaje się tu jedynie za zmienną wpływającą na zapotrzebowanie na tlen, a nie bezpośrednio na zużycie energii elektrycznej, które jest utrzymywane na stałym poziomie dla lepszego porównania. Stwierdzono, że wiek osadu ma raczej słaby wpływ na zapotrzebowanie na tlen. Na rysunku 24 pokazano wpływ gwałtownego zwiększenia i zmniejszenia wieku osadu. Zgodnie z oczekiwaniami zapotrzebowanie na tlen zmniejsza się, gdy obniża się wiek osadu. W konsekwencji wzrasta wskaźnik kWh/kgO₂. Oczyszczalnie ścieków o wyższym wieku osadu wydają się być bardziej energooszczędne. Wniosku tego nie należy jednak wyciągać, a przedstawionych zmian nie można uznawać za realistyczne uwarunkowania, ponieważ zużycie energii wzrośnie również, gdy wzrośnie zapotrzebowanie na tlen.



Rysunek 24 – Wpływ wieku osadu na kWh/kgO₂

Zależność między kWh/(RLM_{ChZT,120} · rok) i kWh/kgO₂ (patrz rys. 25) była rozpoznawalna i może być opisana za pomocą funkcji liniowej, ale cechuje ją jedynie niewielki współczynnik korelacji. Oba kryteria porównawcze, zarówno kWh/(RLM_{ChZT,120} · rok)], jak i nowsze podejście [kWh/kgO₂] często wykazują podobne wyniki w ocenie wydajności energetycznej oczyszczalni ścieków. Ponieważ kWh/(RLM_{ChZT,120} · rok) nie uwzględnia skuteczności oczyszczania, kWh/kgO₂ charakteryzuje w sposób bardziej realny efektywność energetyczną oczyszczalni. Niemniej jednak ustalenie wartości wskaźnika [kWh/kgO₂] jest bardzo skomplikowane i może nie mieć zastosowania w przypadku zakładów mających ograniczone możliwości gromadzenia wszystkich niezbędnych danych.

Porównując wyniki klasyfikacji oczyszczalni dla obu wskaźników, wykryto odchylenia w przedziale 10–20%, zarówno negatywne, jak i pozytywne, co prawie równoważy ogólną sytuację.

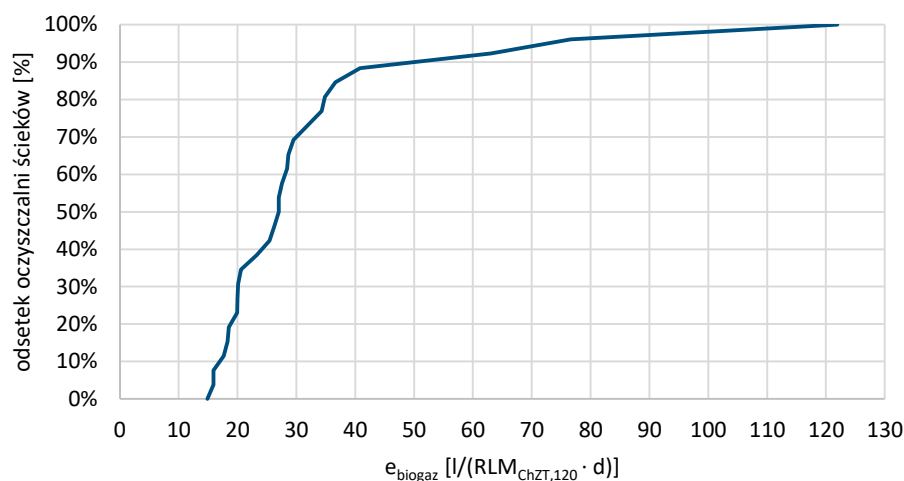


Rysunek 25 – Specyficzne zużycie energii kWh/kgO₂ w stosunku do kWh/(RLM_{ChZT,120} · rok)

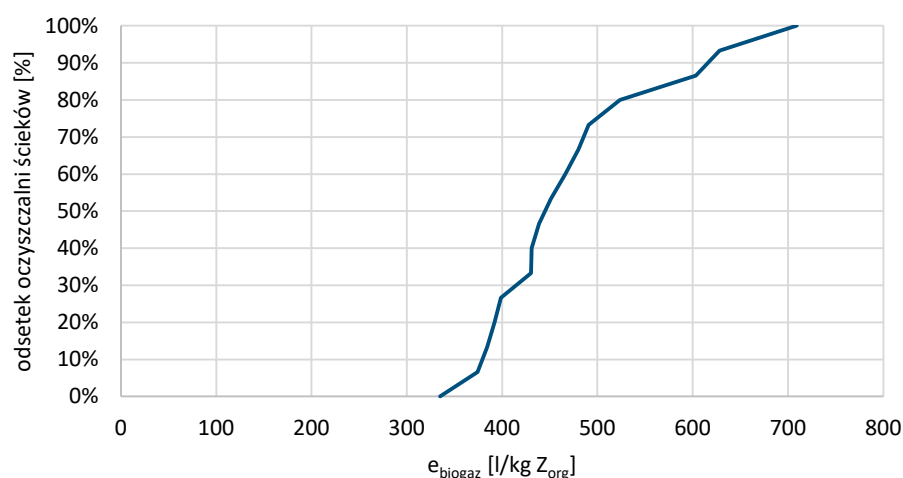
6 PRODUKCJA ENERGII

Zapotrzebowanie na energię (elektryczną) nawet w przypadku oczyszczalni o bardzo energooszczędnych procesach i wyposażeniu wciąż pozostaje znaczne. Dlatego w celu zmniejszenia wpływu na środowisko zaleca się stosowanie odnawialnych źródeł energii. Biogaz wytwarzany w powszechnie stosowanych beztlenowych procesach przeróbki osadów może być wykorzystany do produkcji ciepła i energii elektrycznej w procesie kogeneracji. Zgodnie z odpowiedziami ankiety, 23 oczyszczalnie ścieków wykorzystują wyprodukowany biogaz, a 27 przyznało stosowanie fermentacji. Możliwość prowadzenia fermentacji beztlenowej jest zwykle związana z wielkością oczyszczalni (najniższa podana wartość to 29 000 RLM_{ChZT,120}). Inne, raczej niezależne od procesu oczyszczania ścieków metody produkcji energii, takie jak energia wiatrowa, słoneczna (2 obiekty) i wodna (1 obiekt), nie są jeszcze powszechnie stosowane.

Prostym sposobem porównywania oczyszczalni z beztlenową przeróbką osadów jest obliczenie rzeczywistej produkcji biogazu w odniesieniu do RLM. Połowa oczyszczalni produkuje ponad 27 l/(RLM_{ChZT,120} · d) (Rysunek 26). Baza danych obejmuje oczyszczalnie ścieków, które przetwarzają tylko własne osady, a także te, które przyjmują osady z zewnątrz i/lub kofermenty. Rozpatrując wydajność produkcji biogazu w stosunku do ładunku zawiesiny organicznej (Z_{org}) w osadzie poddawanym fermentacji, 50% oczyszczalni osiąga ponad 400 l/kg Z_{org} (rysunek 27), ale tylko około 20% uzyskuje wartości wyższe niż 500 l/kg Z_{org} .

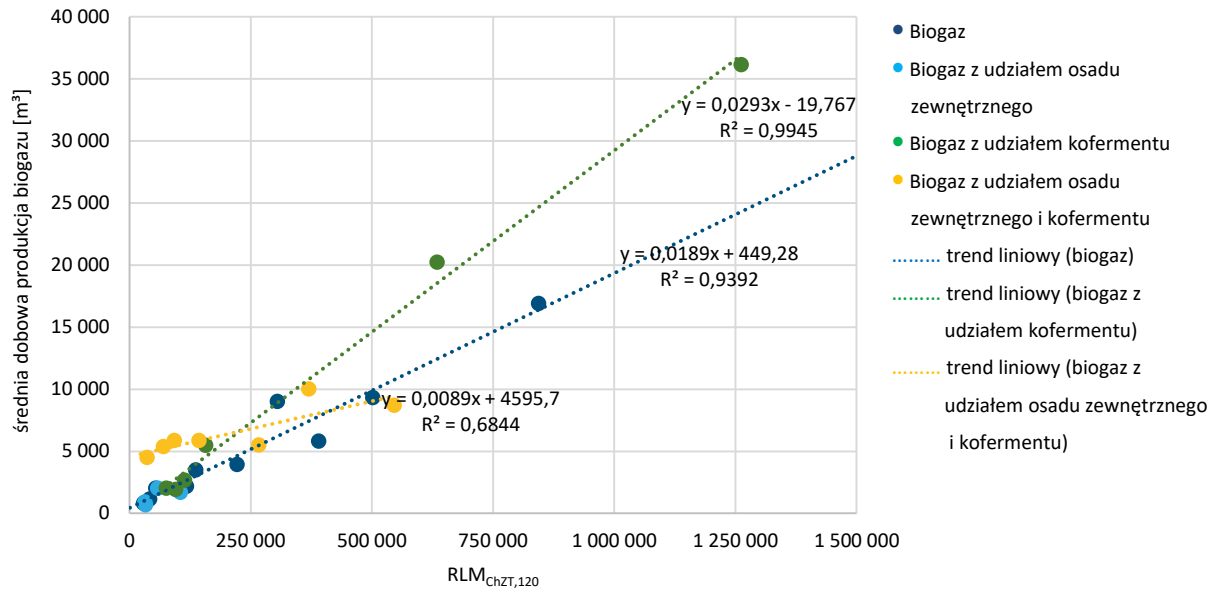


Rysunek 26 – Specyficzna produkcja biogazu [l/(RLM_{ChZT,120} · d)], n = 27



Rysunek 27 – Specyficzna produkcja biogazu w stosunku do zawiesiny organicznej [l/kg Z_{org}], n = 16

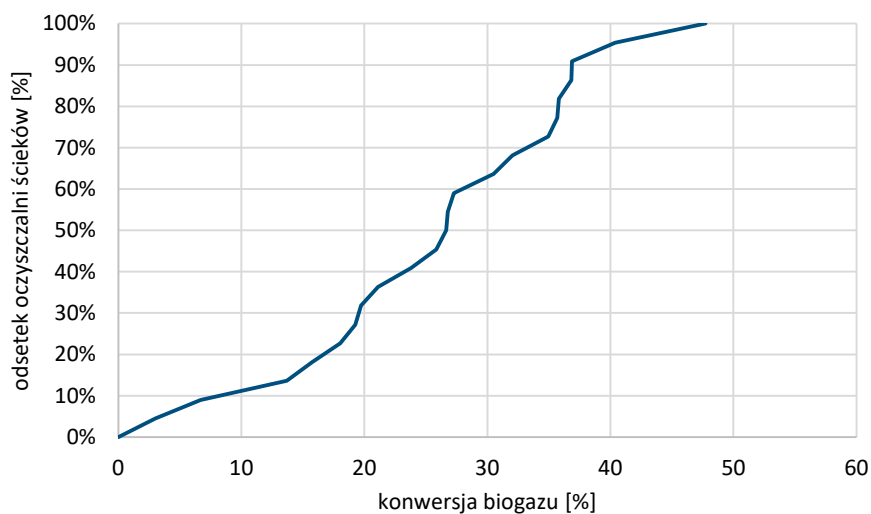
Szczegółowa analiza produkcji biogazu w odniesieniu do RLM i zawiesiny organicznej nie wykazała szczególnych tendencji w zakresie stosowanych substratów. Niemniej jednak, wykres średniej dobowej produkcji biogazu w stosunku do liczby przyłączonych mieszkańców w oparciu o ładunek ChZT wykazuje większy potencjał instalacji wykorzystujących zarówno osady zewnętrzny, jak i kofermenty, zwłaszcza biorąc pod uwagę oczyszczalnie ścieków poniżej 150 000 RLM_{ChZT,120} (rysunek 28). Produkcja biogazu jest na podobnym poziomie jak w przypadku oczyszczalni o 2–3 razy większej RLM_{ChZT,120}.



Rysunek 28 – Średnia dobowo produkcja biogazu [m^3] w stosunku do RLM_{ChZT,120}, n = 27

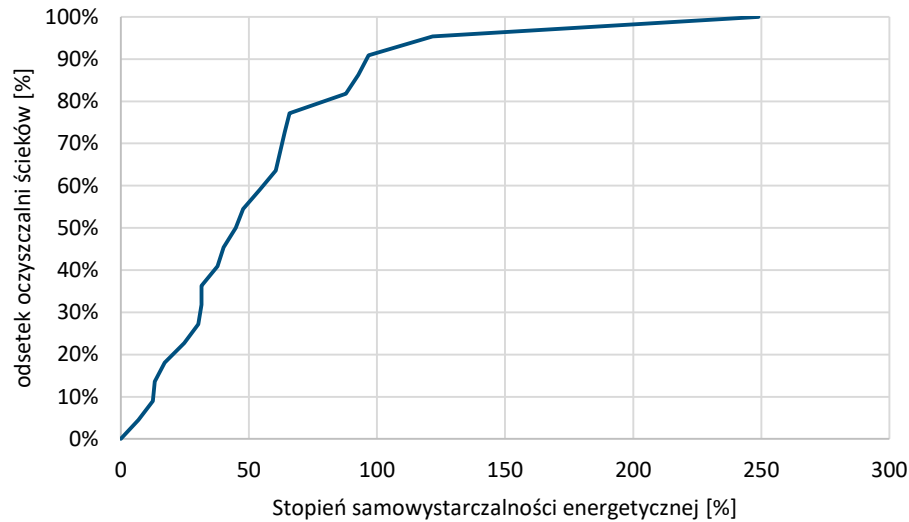
Uzyskany biogaz jest w większości przypadków wykorzystywany do produkcji energii elektrycznej i ciepła. Inne stosowane rozwiązania, takie jak uszlachetnianie biogazu w celu eksploatacji pojazdów lub zasilanie lokalnej sieci gazowej, nie zostały wymienione w odniesieniu do roku sprawozdawczego.

Dla oceny sprawności instalacji kogeneracji kluczowa jest szybkość konwersji biogazu. Na podstawie średniej zawartości metanu w biogazie (54–67%) parametr ten opisuje, w jakim stopniu biogaz jest przekształcany w energię elektryczną w odniesieniu do wartości teoretycznej. Zakłada się, że wykorzystywana jest całkowita ilość biogazu. Szybkość konwersji gazu fermentacyjnego wynosi ponad 26% w odniesieniu do percentyla 50% (rysunek 29). 20% oczyszczalni podało wartości wskazujące na bardzo wydajny współczynnik konwersji biogazu wynoszący powyżej 35%.



Rysunek 29 – Współczynnik konwersji biogazu na energię elektryczną, n = 23

Na podstawie dostarczonych danych na temat całkowitego zapotrzebowania na energię elektryczną i całkowitej rocznej produkcji energii, obliczono stopień samowystarczalności energetycznej, który przedstawiono na rysunku 30. Połowa rozpatrywanych oczyszczalni ścieków osiąga stopień samowystarczalności na poziomie 45%. Cztery oczyszczalnie ścieków osiągają wartości wyższe niż 80%. W porównaniu do energii elektrycznej uzyskanej z biogazu, pozostałe źródła energii elektrycznej przyczyniły się na tyle nieznacznie do całkowitej produkcji energii, że wartości te zostały pominięte.



Rysunek 30 – Stopień samowystarczalności energetycznej, n = 23

Na podstawie 20 odpowiedzi z regionu bałtyckiego i południowego Bałtyku, skąd większość informacji zostało przekazanych, 40% oczyszczalni wykazuje zapotrzebowanie na ciepło z zewnątrz, z kolei 35% jest w stanie pokryć zapotrzebowanie energetyczne na prowadzenie beztlenowej przeróbki oraz na ogrzewanie budynków i/lub inne procesy, takie jak suszenie.

7 WNIOSKI

Raport zawiera przegląd zagadnień dotyczących efektywności oczyszczania, jak i kwestii energetycznych dotyczących 66 oczyszczalni ścieków w regionie Morza Bałtyckiego. W ramach projektu IWAMA współfinansowanego z Interreg Regionu Morza Bałtyckiego zebrano dane ze Szwecji, Finlandii, Rosji, Estonii, Łotwy, Litwy, Polski, Białorusi i Niemiec.

Większość obliczeń w raporcie oparta jest na wartości 120 g ChZT/(RLM·d), zwłaszcza klasyfikacja oczyszczalni ścieków. W wyniku przeprowadzonej analizy zaobserwowano nawet dwukrotne różnice w stężeniu zanieczyszczeń w ściekach surowych pomiędzy analizowanymi regionami. Uzyskane efektywności usuwania zanieczyszczeń spełniają zalecenia HELCOM 28/E5 w prawie wszystkich przedstawionych przypadkach.

Zebrane dane wykazały, że różne technologie są stosowane z różnym skutkiem, jeśli chodzi o wysoką efektywność oczyszczania w połączeniu z niskim zużyciem energii. Nie zaobserwowano jednak wyraźnej zależności regionalnej.

Do obliczeń głównych wskaźników zużycia energii przyjęto różne podejścia. Wyniki porównano z czasochłonnymi obliczeniami opartymi na wielkości zużycia tlenu w procesach oczyszczania. Korzyści wynikające z obliczeń wskaźnika opartego na zużyciu tlenu zdają się jednak nie rekompensować nakładu pracy potrzebnego na jego obliczenie. Porównywalne wyniki uzyskuje się stosując wskaźnik oparty o RLM.

Połowa oczyszczalni ścieków uwzględnionych w analizie wykorzystuje mniej niż 37 kWh/(RLM_{ChZT,120} · d). Jednak tylko 20% zużywa mniej niż 23 kWh/(RLM_{ChZT,120} · d). Zaproponowano, aby ta wartość posłużyła jako poziom odniesienia skierowany do wszystkich oczyszczalni w regionie, biorąc pod uwagę, że głównym zadaniem jest efektywne oczyszczanie ścieków.

Ocenie poddano także produkcję energii z biogazu. Specyficzna produkcja biogazu osiągnięta przez 50% oczyszczalni jest większa niż 27 l/(RLM_{ChZT,120} · d), podczas gdy 20% osiąga ponad 34 l/(RLM_{ChZT,120} · d).

Wyzwania stojące przed operatorami oczyszczalni ścieków w całym regionie Morza Bałtyckiego to poprawa efektywności energetycznej przy jednoczesnym utrzymaniu lub poprawie efektywności usuwania zanieczyszczeń. Rosnące wymagania dotyczą wszystkich, niezależnie od kraju, oczyszczalni ścieków. Dzięki analizie porównawczej możliwe jest wskazanie ewentualnych niedociągnięć w pracy całej oczyszczalni.

Zaleca się kontynuowanie i rozszerzenie analizy głównych wskaźników porównawczych w regionie Morza Bałtyckiego jako motywacji do zoptymalizowanej eksploatacji oczyszczalni ścieków.

Zebrane informacje są dostępne dla wszystkich interesariuszy. Zaproponowane kryteria można wykorzystać jako cel miękki, aby zachęcić do zwiększania wydajności oczyszczalni. Wskaźniki są przedstawione w sposób czytelny na wykresach, co daje innym oczyszczalniom ścieków możliwość ich porównania z wartościami własnych obliczeń. Duże odchylenia od sugerowanego punktu odniesienia wskazują na potrzebę przeprowadzenia szczegółowego audytu energetycznego zakładu.

LITERATURA

- DWA-A 131 (2016) DWA-A 131: Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen, German Association for Water, Wastewater and Waste (DWA), Hennef
- DWA-A 216E (2015) DWA-A 216E: Energy Check and Energy Analysis – Instruments to Optimise the Energy Usage of Wastewater Systems, German Association for Water, Wastewater and Waste (DWA), Hennef
- HELCOM (1999) HELCOM Zalecenie 20E/6 (1999)
- HELCOM (2007) HELCOM Zalecenie 28E/5 (2007)
- LfU (1998) Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (1998): Handbuch Wasser 4: Stromverbrauch auf kommunalen Kläranlagen, Karlsruhe
- Sieker (2018) Fraktionierung des CSB Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH; dostępny online: <http://www.sieker.de/de/fachinformationen/abwasserbehandlung/klaeranlagensimulation/article/fraktionierung-des-csb-181.html> (data dostępu: 6.07.2018)

ZAŁĄCZNIKI

A.1 – Obliczenia zapotrzebowania na tlen

Odpowiednie stężenie tlenu jest niezbędnym warunkiem zapewnienia skutecznego oczyszczania biologicznego i uznawane jest za kluczowy czynnik wpływający na efektywność usuwania zanieczyszczeń, a także na zużycie energii. Najbardziej energochłonnymi elementami na oczyszczalni są dmuchawy, które zużywają średnio ok. 44% całkowitej ilości energii potrzebnej do prawidłowego przebiegu procesu w oczyszczalni opartej na technologii osadu czynnego z nityfikacją i denityfikacją [LfU, 1998]. Rekomenduje się obliczanie wskaźnika efektywności energetycznej opartego na zapotrzebowaniu na tlen zgodnie metodyką przedstawioną poniżej. Uzyskane wyniki obliczeń pozwalają na ocenę efektywności energetycznej oczyszczalni poprzez ich odniesienie do wskaźnika specyficznego zużycia energii wyrażonego w kWh/kgO₂, który jest głównym wskaźnikiem oceniającym efektywność energetyczną w powiązaniu z usuwaniem związków biogenych.

Rozpatrując proces osadu czynnego (w tym nityfikację i denityfikację) z oddzielną linią stabilizacją osadu, jak ma to miejsce w przypadku wszystkich oczyszczalni biorących udział w badaniu, konieczne jest zapewnienie wymaganej ilości tlenu rozpuszczonego w strefach napowietrzania reaktora biologicznego w celu skutecznego usuwania węgla oraz nityfikacji. W strefie anoksydacyjnej, która jest wykorzystywana do denityfikacji, dostępny jest tlen w formie NO₃⁻. W wyniku zachodzących procesów tlen jest wiązany i usuwany z układu w postaci CO₂ i H₂O. Biorąc pod uwagę powyższe całkowity pobór tlenu (OU) obejmuje:

$$OU = OU_{\text{usuwanie } C} + OU_{\text{NIT}} - OU_{\text{DEN}}$$

1. Usuwanie węgla: Zapotrzebowanie na tlen rozpuszczony w celu zapewnienia warunków tlenowych dla wzrostu mikroorganizmów heterotroficznych, które przekształcają rozpuszczone, organiczne składniki ścieków w nieorganiczne produkty końcowe

Pobór tlenu: 1,2 kg O₂/kg BZT₅ [ATV-DVWK-A 131, 2000]

$$OU_{d,C} = Q \cdot OU_c / 1000 \left[\frac{kgO_2}{d} \right]$$

$$OU_c = C_{\text{ChZT, degrad, inB}} + C_{\text{ChZT, dos}} - X_{\text{ChZT, BM}} - X_{\text{ChZT, inert, BM}} \left[\frac{mg}{l} \right]$$

2. Nityfikacja: $NH_4^+ + 2O_2 + 2HCO_3 \rightarrow NO_3^- + 2CO_2 + H_2O$

Zapotrzebowanie na tlen rozpuszczony dla zapewnienia warunków tlenowych bakteriom autotroficznym (nityfikantom), które utleniają amoniak do azotanów

Pobór tlenu: 4,3 kgO₂/kg N [DWA-A 131, 2016]

$$OU_{d,N} = Q \cdot 4,3 \cdot (S_{NO_3,D} - S_{NO_3,inB} + S_{NO_3,eff}) / 1000 \left[\frac{kgO_2}{d} \right]$$

3. Denityfikacja $NO_3^- + 2H^+ + 10[H] \rightarrow N_2 + 6H_2O$ [H] oznacza materię organiczną

Zapotrzebowanie na tlen związany, dostępny w postaci produktów końcowych nityfikacji (NO₃⁻); redukcja utlenionych związków azotu do azotu gazowego przez bakterie heterotroficzne w warunkach anoksydacyjnych

Pobór tlenu: 2,86 kgO₂/kg S_{NO₃,D} [DWA-A 131, 2016]

$$OU_{d,D} = Q \cdot 2,86 \cdot S_{NO_3,D} / 1000 \left[\frac{kgO_2}{d} \right]$$

Powyższe obliczenia bilansu tlenu wykonane zostały na podstawie wytycznych DWA-A 131 (2016).

Przy obliczaniu zapotrzebowania na tlen do usuwania węgla niezbędne jest szczegółowe frakcjonowanie ChZT, które zostało omówione w kolejnym rozdziale. Ponadto niezbędne są dane dotyczące biomasy i wieku osadu (patrz poniżej). Dotyczy to także nityfikacji i denityfikacji, dla których niezbędne są również dane dotyczące przemian azotowych. W tabeli 10 przedstawiono przegląd parametrów wpływających na poszczególne obliczenia bilansu tlenu. Kolorem niebieskim wyróżniono parametry niezbędne do prawidłowego obliczenia zapotrzebowania na tlen, natomiast kolorem jasnoniebieskim zaznaczone te parametry, które są przydatne w obliczeniach, ale mogą być zastąpione innymi. Pozostałe wymienione parametry można wyprowadzić z tych zaznaczonych na niebiesko lub z naukowo udowodnionych zależności.

Tabela 10 – Parametry niezbędne do obliczenia zapotrzebowania na tlen

Parametr	Jednostka	Pobór tlenu podczas usuwania węgla	Pobór tlenu podczas nityfikacji	Produkcja tlenu podczas denityfikacji
Przepływ	[m ³ /d]	✓	✓	✓
C_{ChZT,inB} (jeśli brak: C _{ChZT,inf})	C _{ChZT,degrad,inB}	[mg/l]	✓	-
S_{ChZT,inert,inB} = S _{ChZT,inert,eff} = C _{ChZT,eff}		[mg/l]	✓	-
X_{ChZT,inert,inB} = X _{ChZT,inert,eff}		[mg/l]	✓	✓
(C_{ChZT,dosed})	[mg/l]	(✓)	-	-
X_{ChZT,inB}	[mg/l]	✓	-	-
X_{SS,inB} (jeśli brak: X _{SS,inf}) (jeżeli brak obu, można zastosować metodę frakcjonowania Siekera, która pomija ten parametr)	[mg/l]	✓	-	-
X_{ChZT,BM}	[mg/l]	✓	✓	✓
X_{ChZT,inert,BM}	[mg/l]	✓	✓	✓
C_{N,inB} (jeśli brak: C _{N,inf})	S _{NO3,0}	[mg/l]	-	✓
S_{orgN,eff}		[mg/l]	-	✓
S_{NH4-N,eff}		[mg/l]	-	✓
S_{NO3-N,eff}		[mg/l]	-	✓
X_{orgN,BM}		[mg/l]	-	✓
X_{orgN,inert}		[mg/l]	-	✓
S_{NO3,inB} (jeśli brak, należy założyć S _{NO3,inB} = 0)	[mg/l]	-	✓	-
Objętość komory napowietrzania V_{aer}	Wiek osadu WO	[m ³]	✓	✓
Objętość komory anoksydacyjnej V_{anox}		[m ³]	✓	✓
MLSS_{AT}		[g/l]	✓	✓
B_{BZT5,inB} (jeśli brak: B _{BZT5,inf} albo dobową produkcja osadu nadmiernego)		[kg/d]	✓	✓
Temperatura w komorze napowietrzania	[°C]	✓	✓	✓
Stosunek ścieków miejskich/przemysłowych	Wpływ na czynniki wyznaczające frakcje ChZT	[-]	✓	-
Stosowanie oczyszczania wstępnego		[-]	✓	-
Czas zatrzymania w osadnikach wstępnych lub objętość osadników wstępnych		[h]/[m ³]	✓	-

Łatwo rozkładalny ChZT nie jest uwzględniany w obliczeniach ponieważ jest on brany pod uwagę podczas projektowania/wymiarowania oczyszczalni ścieków i w tym przypadku zależy od rodzaju stosowanych procesów, takich jak predenitryfikacja, denitryfikacja symultaniczna lub naprzemienna.

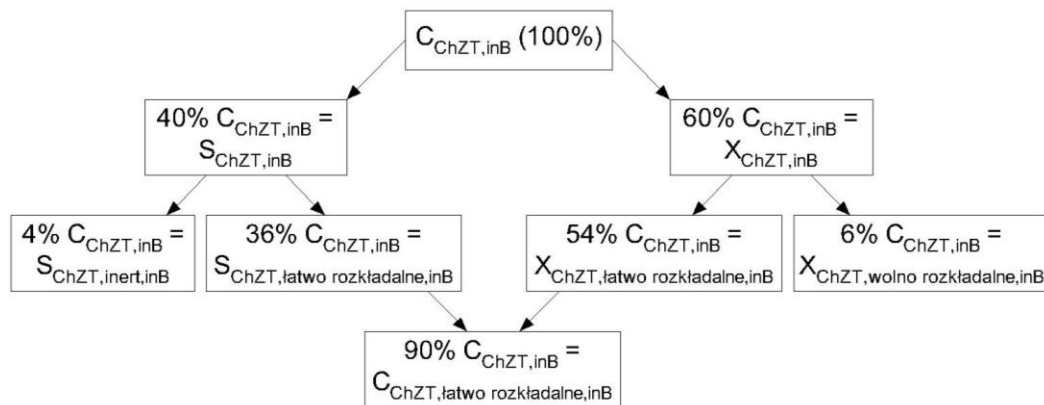
A.2 – Frakcjonowanie ChZT

Frakcjonowanie ChZT zależy od stężenia ChZT w dopływie do reaktora biologicznego ($C_{\text{ChZT},\text{inB}}$) lub, innymi słowy, od stężenia ChZT po oczyszczeniu mechanicznym. Około 65% oczyszczalni wykorzystuje etap oczyszczania wstępnego, z czego ponad połowa podała pomierzone wartości stężenia ChZT po tym etapie. Dla pozostałych oczyszczalni obliczono stężenie ChZT po oczyszczeniu wstępnym bazując na stężeniu w dopływie i przyjmując stopień redukcji z wytycznymi DWA-A 131 (2016).

Na podstawie $C_{\text{ChZT},\text{inB}}$ dokonano podziału na frakcję substancji organicznych rozpuszczonych ($S_{\text{ChZT},\text{inB}}$) i substancji organicznych w zawieszynie ($X_{\text{ChZT},\text{inB}}$). Dla porównania i sprawdzenia poprawności obliczeń wzięto pod uwagę dwa podejścia. Drugie podejście według DWA-A 131 jest oceniane jako normatywne/właściwe.

1. Podejście opisane przez (Sieker, 2018):

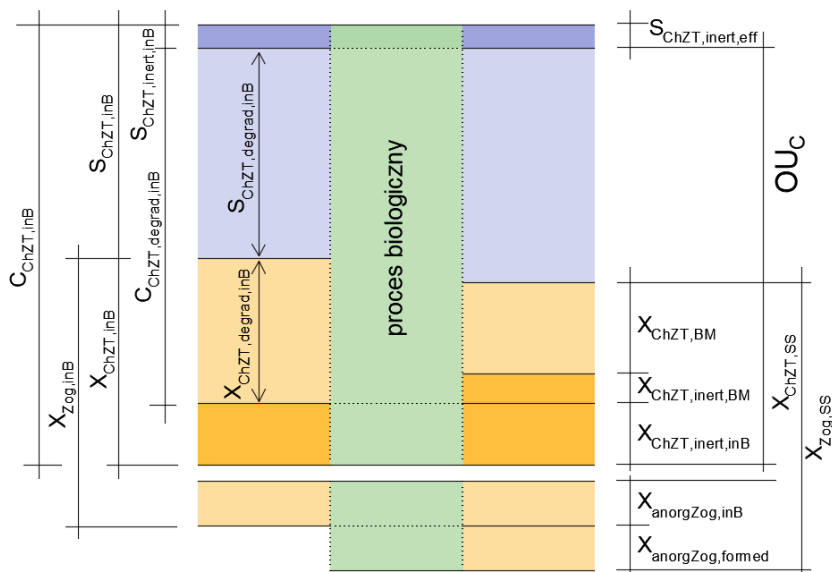
Podejście przedstawione na rysunku 31 jest bardzo ogólne i można je zastosować jako szybki i uproszczony przegląd rozpuszczonych i zawieszinowych frakcji w ściekach poddawanych oczyszczeniu biologicznemu. Metoda ta nie uwzględnia różnych rodzajów ścieków jak również nie pozwala na wyznaczenie powstającej biomasy lub zawiesiny mineralnej, co jest wymagane do obliczeń zapotrzebowania na tlen.



Rysunek 31 – Frakcjonowanie ChZT według Sieker [2018]

2. Podejście według DWA-A 131:

Podejście przedstawione na rysunku 32 pozwala na dokładniejsze frakcjonowanie ChZT. W celu dokonania szczegółowej charakterystyki ścieków poszczególne frakcje obliczane są na podstawie opracowanych formuł oraz zalecanych współczynników.



$$C_{\text{ChZT},\text{inB}} = S_{\text{ChZT},\text{inB}} + X_{\text{ChZT},\text{inB}} \quad [\text{mg/l}]$$

Rysunek 32 – Frakcjonowanie ChZT według [DWA-A 131, 2016]

W podejściu zgodnym z wytycznymi DWA-A 131 uwzględnia się rodzaj ścieków (komunalne/przemysłowe), jak również sposób oczyszczania i czas zatrzymania ścieków w obiektach oczyszczania wstępnego.

Porównując oba podejścia stwierdzono znaczne rozbieżności w obliczonych stężeniach poszczególnych frakcji. Uzyskane metodą Siekera stężenia frakcji zawiesinowej (X) i rozpuszczonej (S) są odpowiednio wyższe i niższe niż te obliczone wg wytycznych DWA. Jednakże, ostatecznie odchylenia dla poszczególnych frakcji i rozkładalnego biologicznie ChZT ($C_{\text{ChZT},\text{degrad},\text{inB}}$) są na podobnym poziomie ze średnim odchyleniem około 10%.

Podejście Siekera dostarcza bardziej użytecznych danych niż podejście DWA, gdzie stężenie $X_{\text{ChZT},\text{inB}}$ jest powiązane ze stężeniem zawiesiny ogólnej. Wiele niemieckich oczyszczalni nie określa wartości stężenia frakcji rozpuszczonej, co nie pozwala na dokładne wyznaczenie frakcji zawiesinowej i w efekcie wiarygodnego zapotrzebowania na tlen. Dlatego też $X_{\text{ChZT},\text{inB}}$ wyznaczono w oparciu o metodę Siekera. $X_{\text{ChZT},\text{inB}}$ wpływa wyłącznie na $C_{\text{ChZT},\text{degrad},\text{inB}}$ i jak wyjaśniono w poprzednim akapicie, odchylenie między tymi dwoma podejściami wynosi około 10%. W związku z powyższym taki sposób podejścia do frakcjonowania jest dopuszczalny.

A.3 – Obliczenia wieku osadu

Do obliczenia wieku osadu rozpatrywane były trzy metody:

1. Wiek osadu na podstawie ładunku BZT ₅ :	$WO = \frac{(V_{aer} + V_{anox}) \cdot MLSS_{AT}}{L_{BZT5,inB}} [d]$
2. Wiek osadu na podstawie obliczonej dobowej produkcji osadu: 3. Wiek osadu na podstawie obliczonej dobowej produkcji osadu podanej przez oczyszczalnię:	$WO = \frac{(V_{aer} + V_{anox}) \cdot MLSS_{AT}}{SP_d} [d]$

O ile odchylenia między pierwszą i drugą metodą są stosunkowo niskie, o tyle w przypadku trzeciej metody opartej na wielkości produkcji osadów podanej przez oczyszczalnię, uzyskane wyniki były znacząco inne. Analiza tych rozbieżności wykazała, że obliczona teoretyczna produkcja osadów była od 3 do 5 razy większa niż produkcja osadów podana przez oczyszczalnię ścieków. Przyczyną błędów mogą być błędnie wprowadzone dane lub niewłaściwe dane dotyczące kubatur obiektów.

Pomimo tego, że druga metoda obliczania wieku osadu jest bardziej zaawansowana ponieważ uwzględnia produkcję osadu w procesie usuwania węgla i fosforu, do potrzeb niniejszego opracowania zastosowano metodę opartą na BZT₅. Wyniki uzyskane tą metodą nie odbiegają znacząco od tych obliczonych metodą drugą.

WWW.IWAMA.EU

Projekt IWAMA ma na celu usprawnienie gospodarki ściekowej w regionie Morza Bałtyckiego poprzez rozwój wiedzy operatorów oczyszczalni ścieków i wdrożenie pilotażowych inwestycji ukierunkowanych na poprawę efektywności energetycznej oczyszczalni i usprawnienie gospodarki osadowej.
Projekt jest finansowany z programu Interreg Region Morza Bałtyckiego 2014-2020.

Budżet: EUR 4.6 million

Czas trwania: Marzec 2016 – Kwiecień 2019

WSKAŹNIKI PORÓWNAWCZE EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ

Data publikacji: July 2018

Autorzy: Stefan Rettig, Karin Schulz, Matthias Barjenbruch, Iyad Al-Zreiqat
Technische Universität Berlin, Department of Urban Water Management,
TIB1-B16, Gustav-Meyer-Allee 25, 13355 Berlin, Germany
E-mail: stefan.rettig@tu-berlin.de

Wydawca: City of Turku

ISBN: 978-952-5991-38-3 (PDF)

