

Gospodarka o obiegu zamkniętym w oczyszczalni ścieków

Monika Żubrowska-Sudoł

Zakład Zaopatrzenia w Wodę i Odprowadzania Ścieków
Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska
Politechnika Warszawska

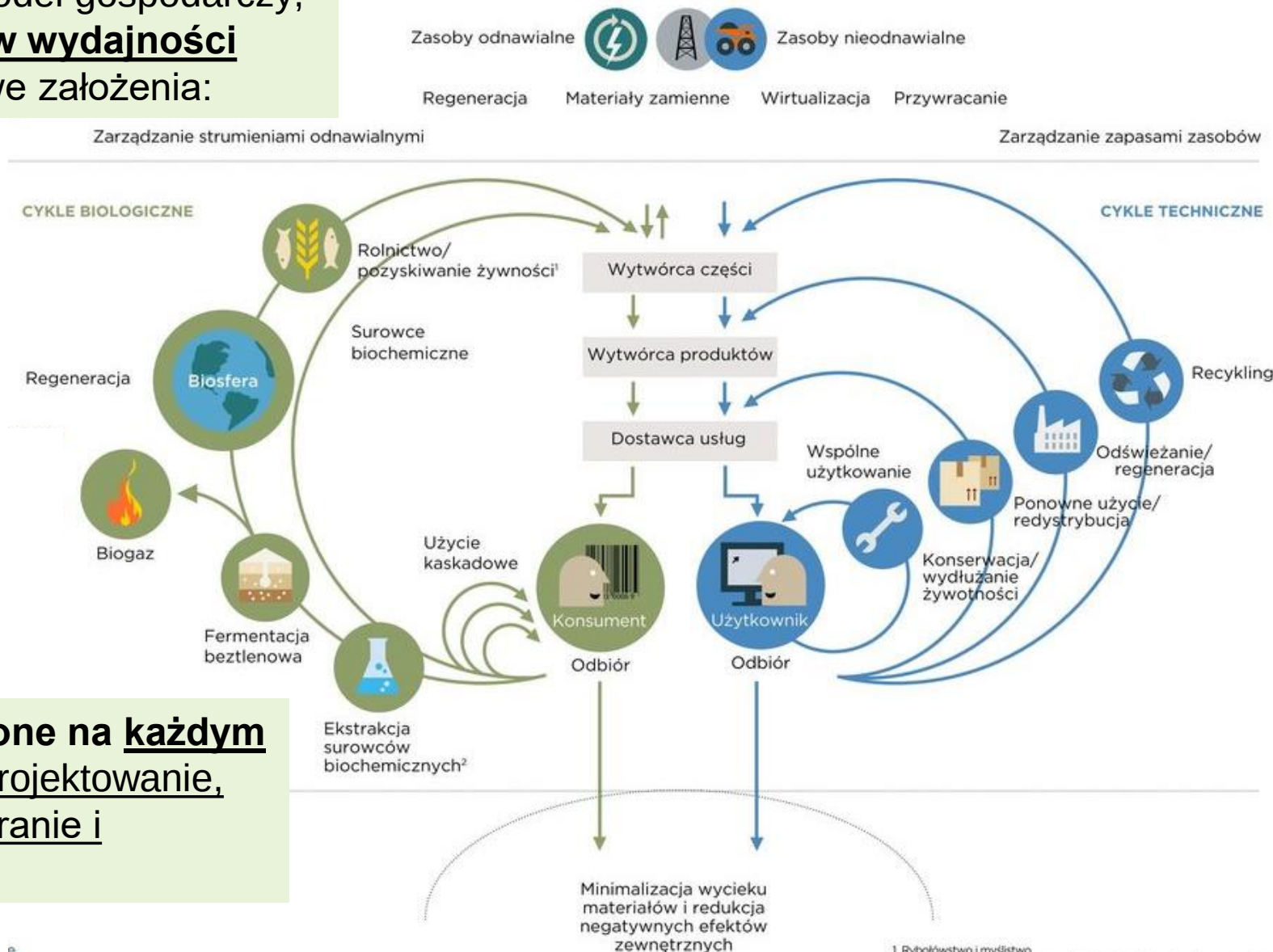


Gospodarka o obiegu zamkniętym - definicja

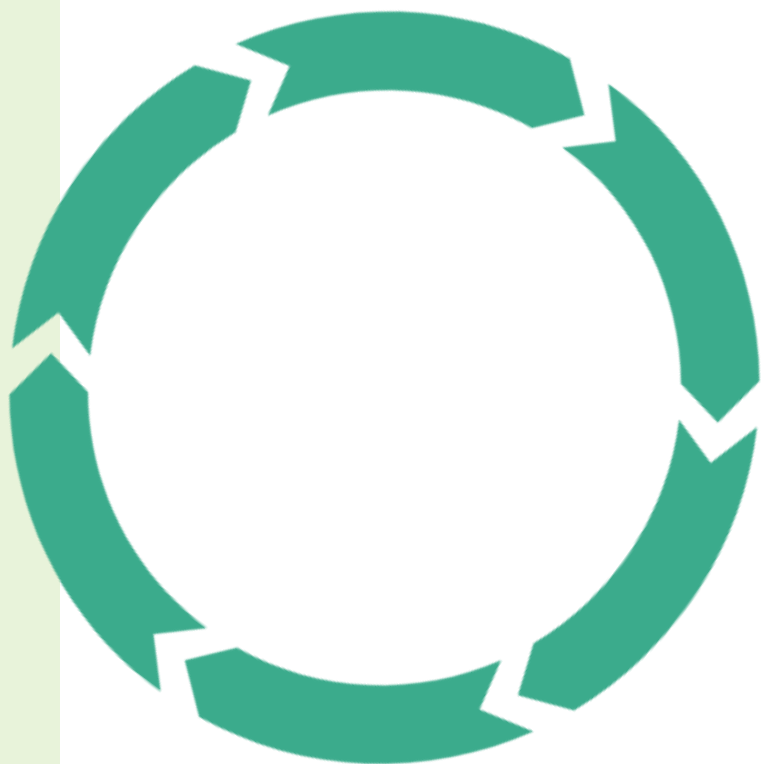
Gospodarka o obiegu zamkniętym to model gospodarczy, w którym przy zachowaniu warunków wydajności spełnione są następujące podstawowe założenia:

- a) Wartość dodana surowców/zasobów, materiałów i produktów jest maksymalizowana lub
- b) Ilość wytworzonych odpadów jest minimalizowana, a powstające odpady są zagospodarowywane zgodnie z hierarchią sposobów postępowania z odpadami (zapobieganie powstawaniu odpadów, przygotowywanie do ponownego użycia, Recykling, inne sposoby odzysku, unieszkodliwienie)

Powyższe założenia powinny być spełnione na każdym etapie cyklu życia (pozyskanie surowca, projektowanie, Przetwórstwo, produkcja, konsumpcja, zbieranie i zagospodarowanie odpadów).

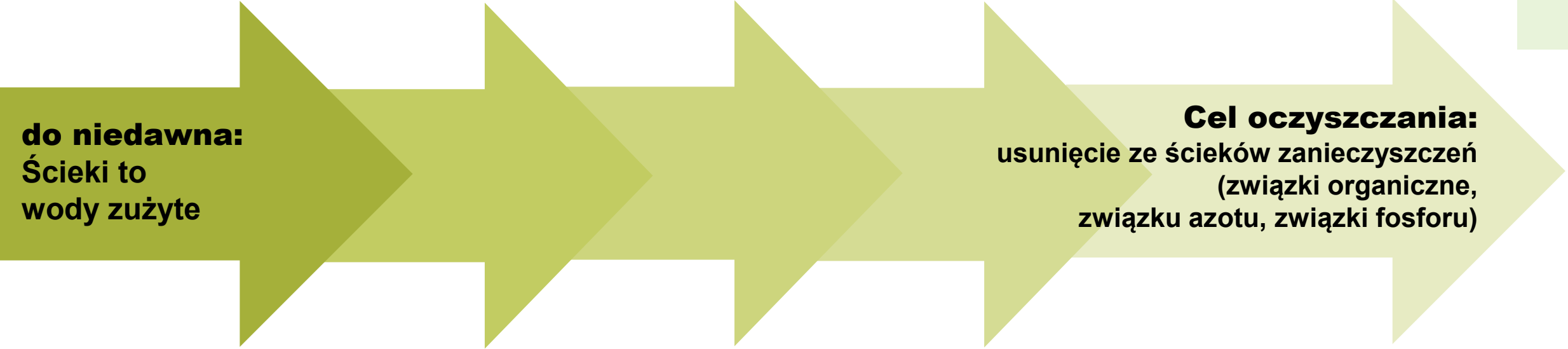


Koncepcja 6 R



- Odmów (refuse)
- Ogranicz (reduce)
- Używaj ponownie (reuse)
- Naprawiaj (recover)
- Oddaj do recyklingu (recycle)
- Zastanów się co możesz zrobić (rethink)

Oczyszczalnia ścieków w ujęciu konwencjonalnym



do niedawna:
Ścieki to
wody zużyte

Cel oczyszczania:
usunięcie ze ścieków zanieczyszczeń
(związki organiczne,
związku azotu, związki fosforu)

Oczyszczalnia ścieków w ujęciu konwencjonalnym

do niedawna:
Ścieki to
wody zużyte

Cel oczyszczania:
usunięcie ze ścieków zanieczyszczeń
(związki organiczne,
związku azotu, związki fosforu)

Oczyszczalnia ścieków wobec wyzwań GOZ

już dziś:
Ścieki to
źródło cennych
surowców i energii

- zasobooszczędność
- zmniejszenie zależności od zasobów nieodnawialnych
- niskoemisyjność
- nowe miejsca pracy
- nowe modele biznesowe

Cel oczyszczania:
usunięcie ze ścieków zanieczyszczeń
przy maksymalnym odzysku
surowców i energii

edukacja = akceptacja społeczna

Implementacja GOZ w oczyszczalniach ścieków



Szeroki wachlarz dostępnych rozwiązań technicznych/technologicznych

Oczyszczalnie ścieków wdrażają rozwiązania zgodne z GOZ

Doskonalenie istniejących rozwiązań

Poszukiwanie nowych rozwiązań

Model gospodarki o obiegu zamkniętym



**Wdrażanie rozwiązań
technicznych
odpowiadających
wyzwaniom GOZ**



**Model gospodarki
o obiegu zamkniętym**

Wdrażanie modelu gospodarki o obiegu zamkniętym



Wdrażanie rozwiązań
technicznych
odpowiadających
wyzwaniom GOZ

GOZ

Wdrażanie modelu gospodarki o obiegu zamkniętym

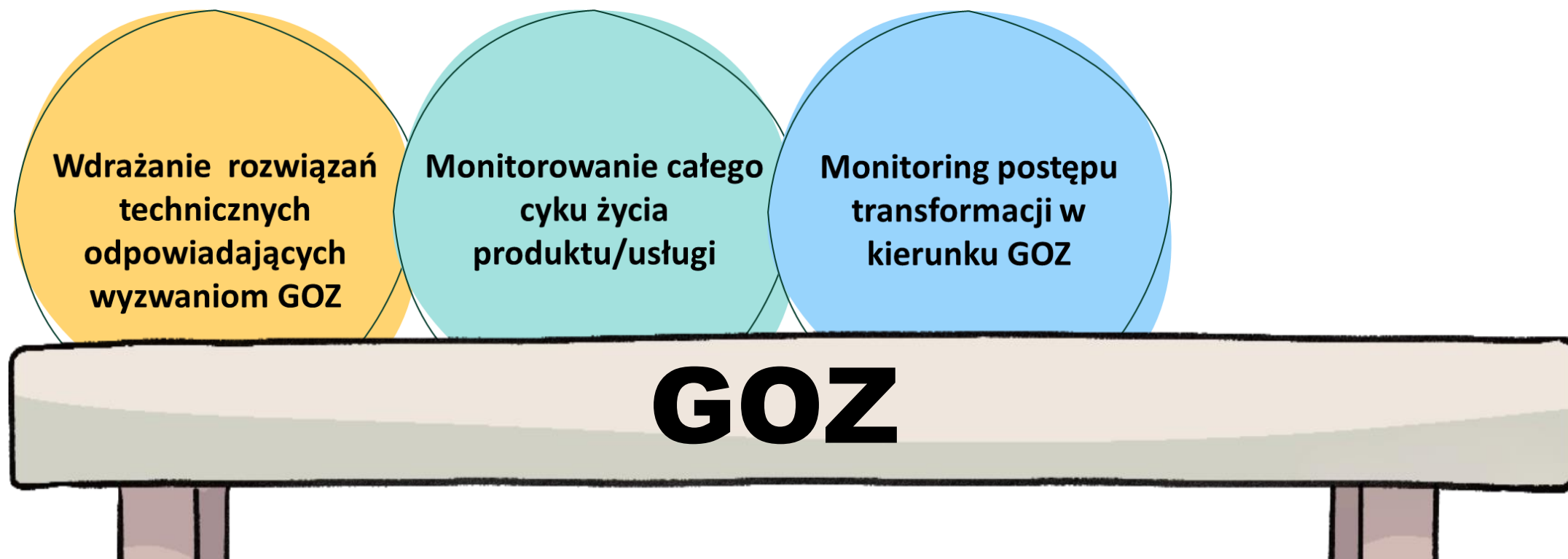


Wdrażanie rozwiązań
technicznych
odpowiadających
wyzwaniom GOZ

Monitorowanie całego
cyku życia
produktu/usługi

GOZ

Wdrażanie modelu gospodarki o obiegu zamkniętym



Wdrażanie modelu gospodarki o obiegu zamkniętym



Wdrażanie rozwiązań
technicznych
odpowiadających
wyzwaniom GOZ

Monitorowanie całego
cyku życia
produktu/usługi

Monitoring postępu
transformacji w
kierunku GOZ

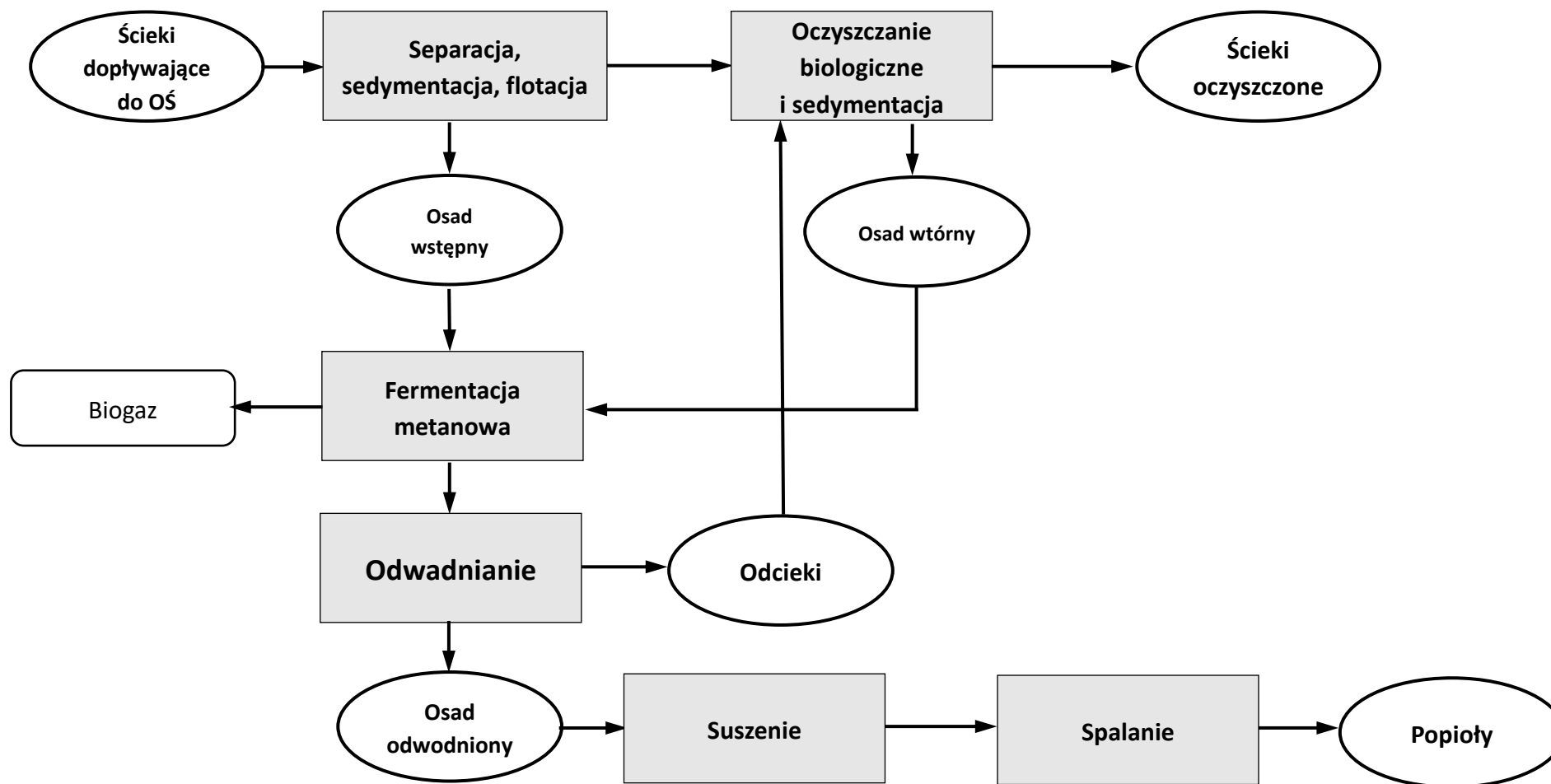
Budowanie
świadomości
społecznej
(edukacja, rzetelna informacja,
polityka prosumencka...)

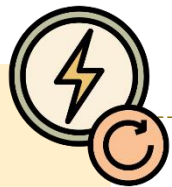
GOZ



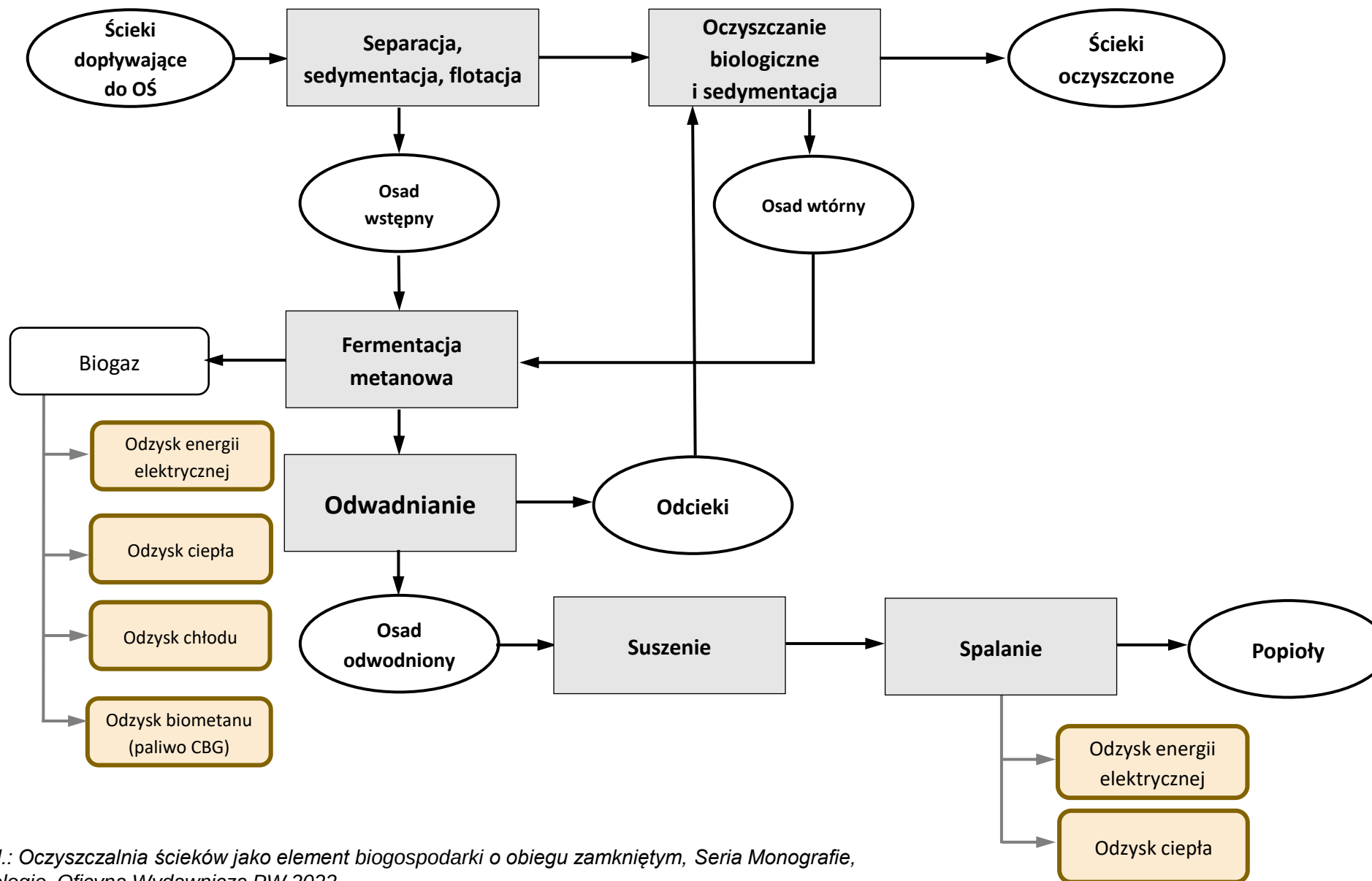
Wdrażanie rozwiązań technicznych odpowiadających wyzwaniom GOZ

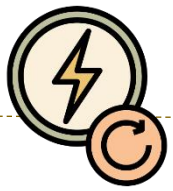
Schemat blokowy oczyszczalni ścieków





Odzysk energii





Odzysk energii



Wykorzystanie biogazu w komunalnych oczyszczalniach ścieków

DO KOŃCA XX WIEKU

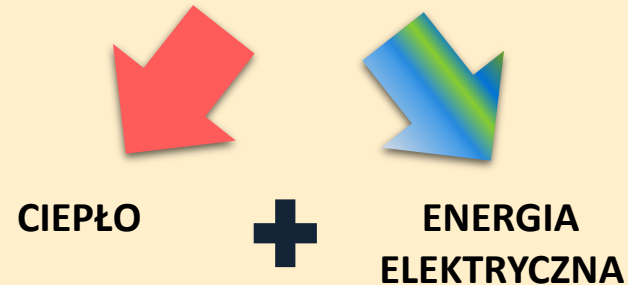
- Produkcja ciepła
- Spalanie w pochodni (do 40% produkowanego biogazu)



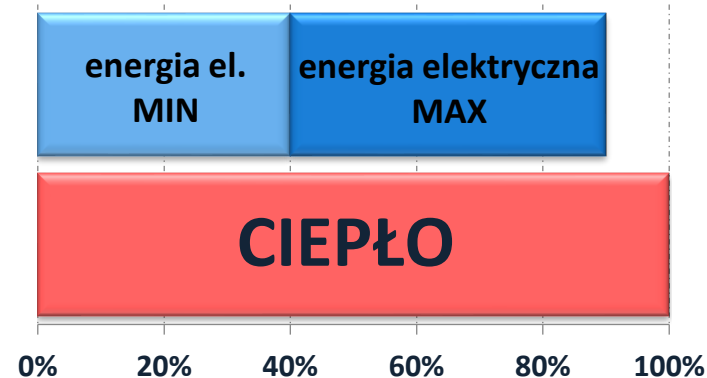
JUŻ OBECNIE POWSZECHNA PRAKTYKA

KOGENERACJA

CHP (ang. Combined Heat and Power)



Pokrycie zapotrzebowania na ciepło i energię elektryczną oczyszczalni



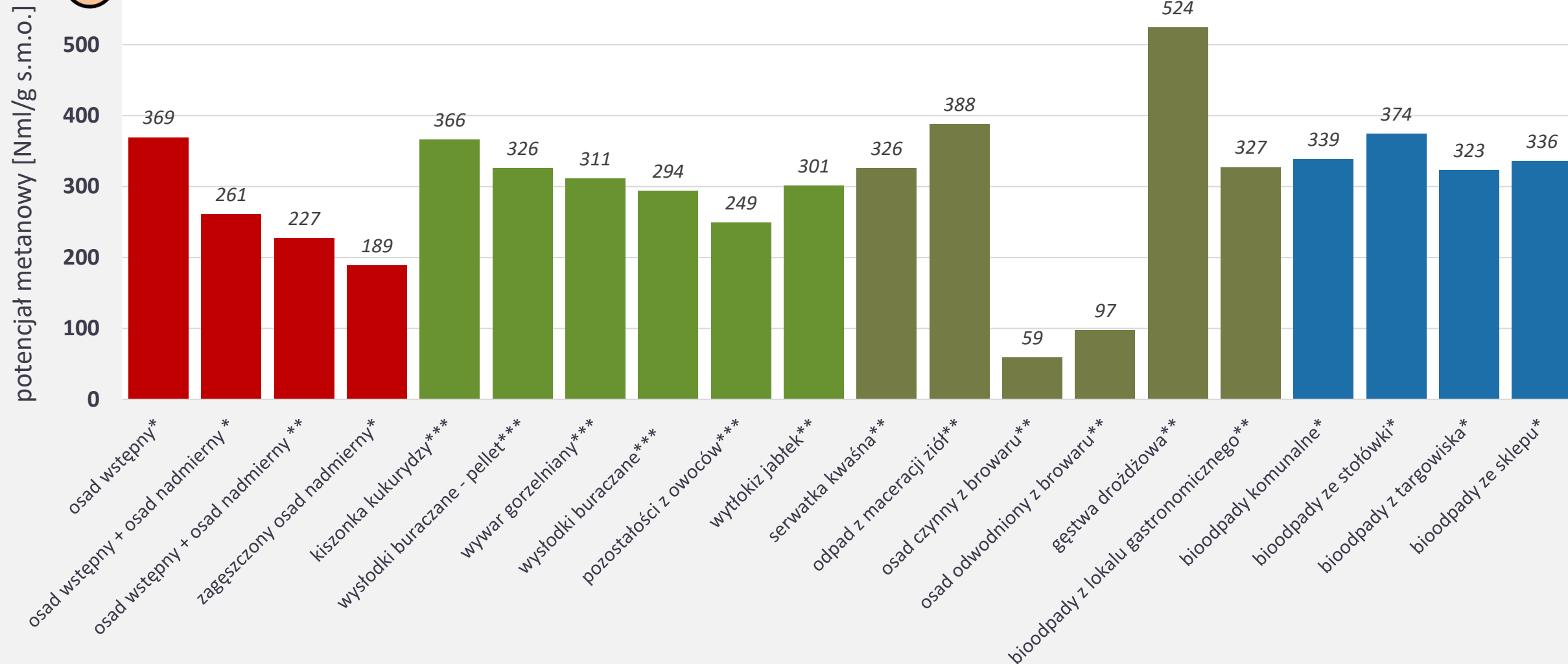
Do czego zmierzamy

- Oczyszczalnia obiektem samowystarczalnym energetycznie
- Produkcja nadwyżki energii w stosunku do potrzeb własnych oczyszczalni ścieków
- Produkcja biometanu
- Rozwój trigeneracji
- Produkcja wodoru
- Mikrobiologiczne ogniwa paliwowe





Kofermentacja – POTENCJAŁ METANOWY



*Żubrowska-Sudoł M., Walczak J. *Analiza możliwości wzrostu produkcji energii odnawialnej w oczyszczalniach ścieków poprzez wykorzystanie procesów kofermentacji oraz dezintegracji substratów* (Projekt badawczy, 2021-2022)

** Marczewski P. *Analiza potencjału metanowego wybranych pozostałości odpadów organicznych* (Praca dyplomowa magisterska, promotorzy: Żubrowska-Sudoł M., Sytek-Szmeichel K., 2023)

*** Żubrowska-Sudoł M., Walczak J., Garlicka A., Sytek-Szmeichel K., Umiejewska K. *Opracowanie technologii przygotowania substratów wykorzystywanych w kofermentacji metanowej metodami dezintegracji - Dezmetan* (Projekt badawczy, 2018 – 2021)



POTENCJAŁ METANOWY wywaru gorzelnianego



Fot. Internet



Ilość wywaru
gorzelnianego
produkowana w gorzeli
w ciągu roku

26 400 ton



452 200 m³ metanu



Przyjmując sprawność
produkcji energii elektrycznej
na poziomie 40%
i wartość opałową metanu na
poziomie 35,73 MJ/m³

Ciepło = 6 463 GJ
 $E_{\text{elektr.}} = 1\,795 \text{ MWh}$



pełne zapotrzebowanie na energię elektryczną
dla oczyszczalni ścieków o RLM = 48 520

lub

uzyskanie samowystarczalności energetycznej
dla oczyszczalni ścieków o RLM = 88 218 przy
założeniu, iż proces monofermentacji zapewnia
uzyskanie 45% samowystarczalności
energetycznej



Fot. www.mpwik-blonie.pl/

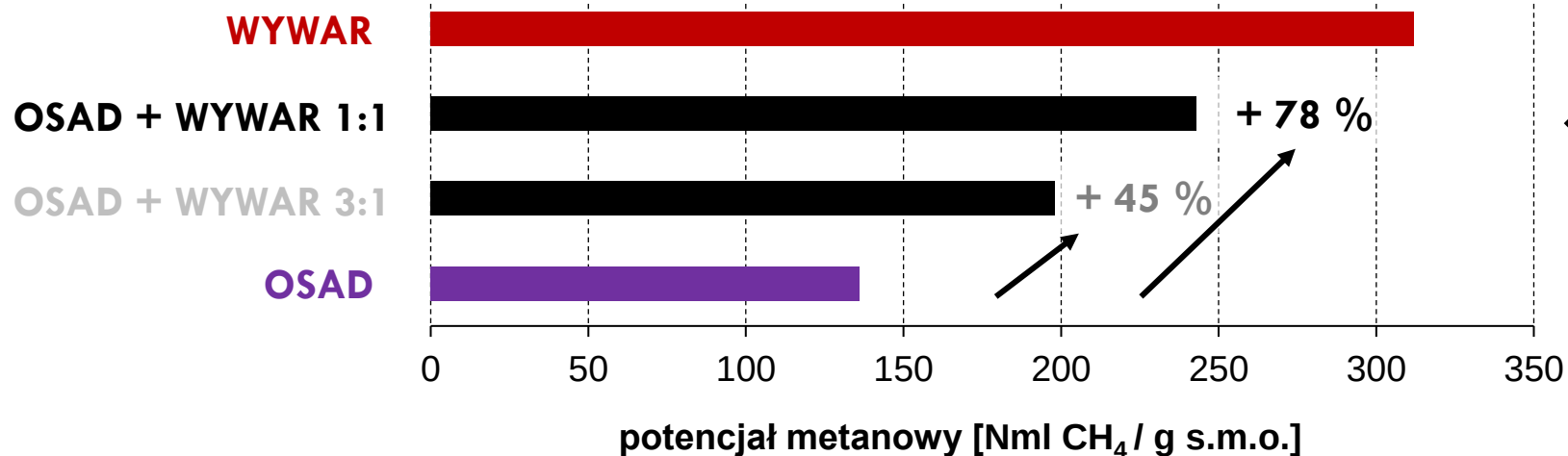
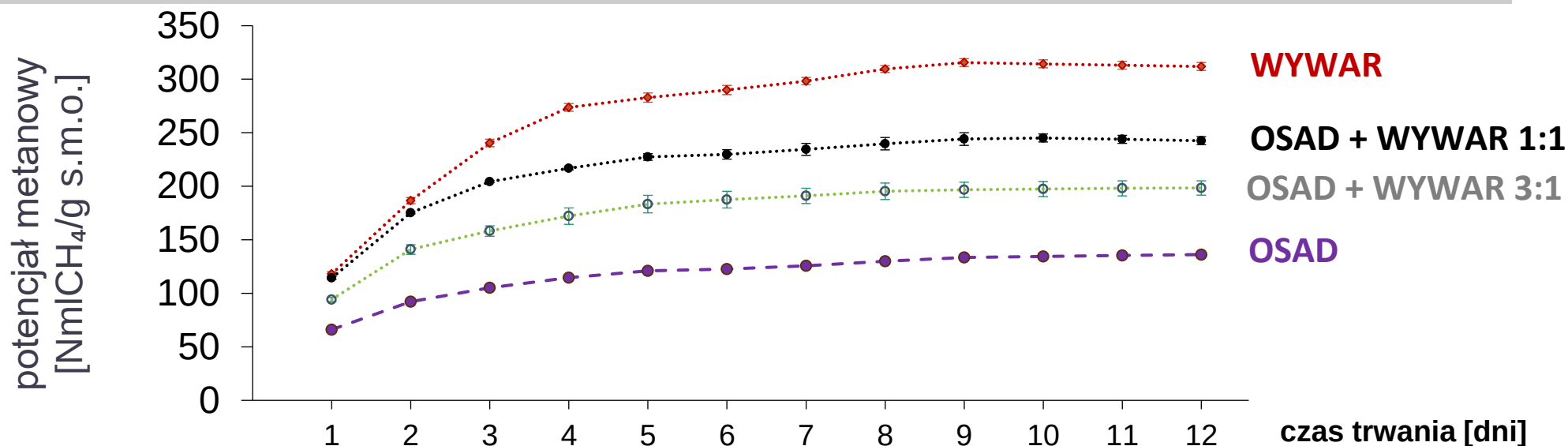
Według danych IWAMA – Interactive Water Management project jednostkowe zużycie energii w oczyszczalni ścieków wynosiło minimum 37 kWh / RLM / rok

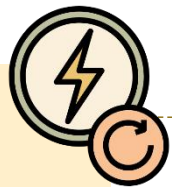


POTENCJAŁ METANOWY osadu nadmiernego i wywaru gorzelnianego

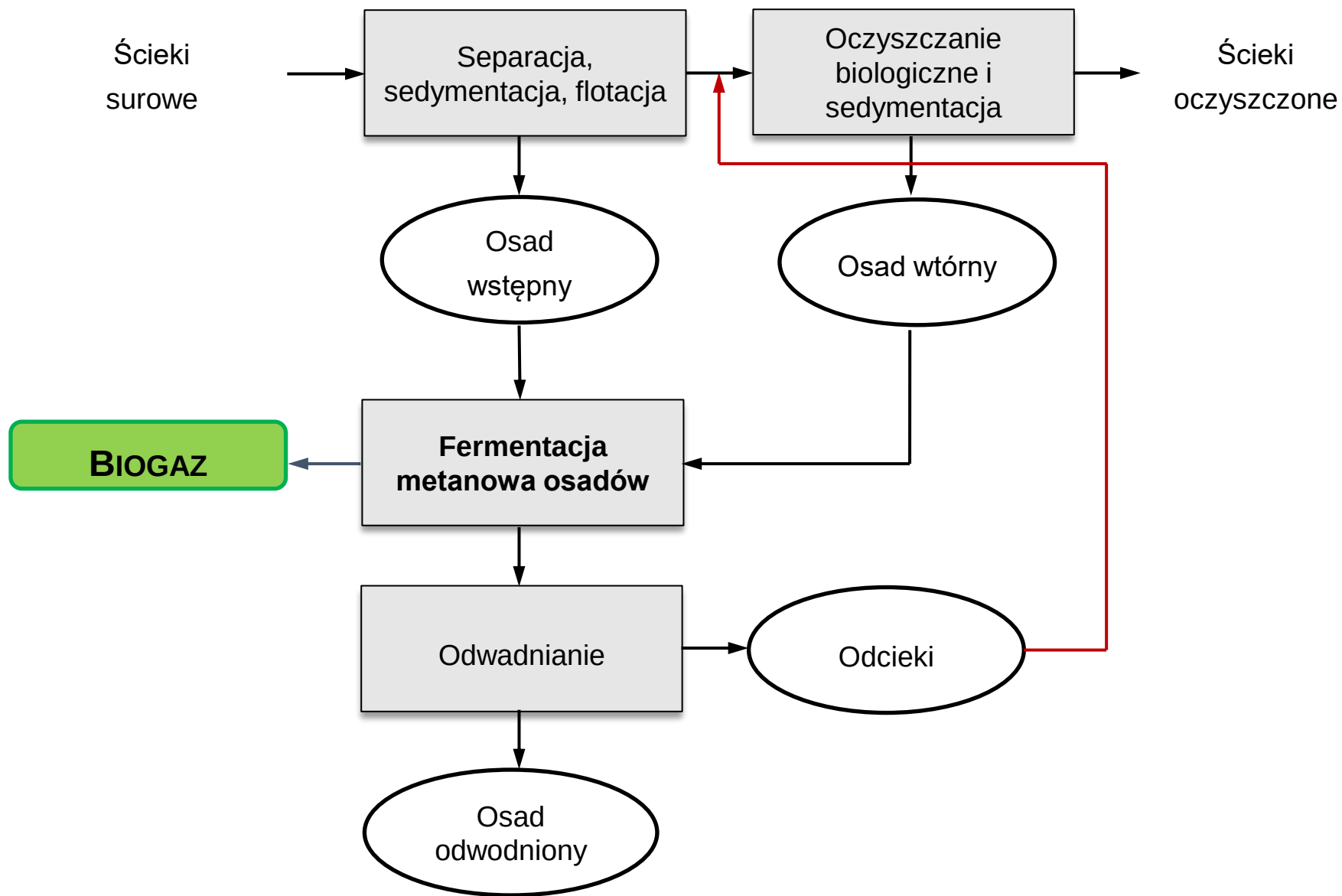


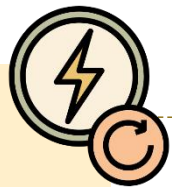
KOFEERMENTACJA



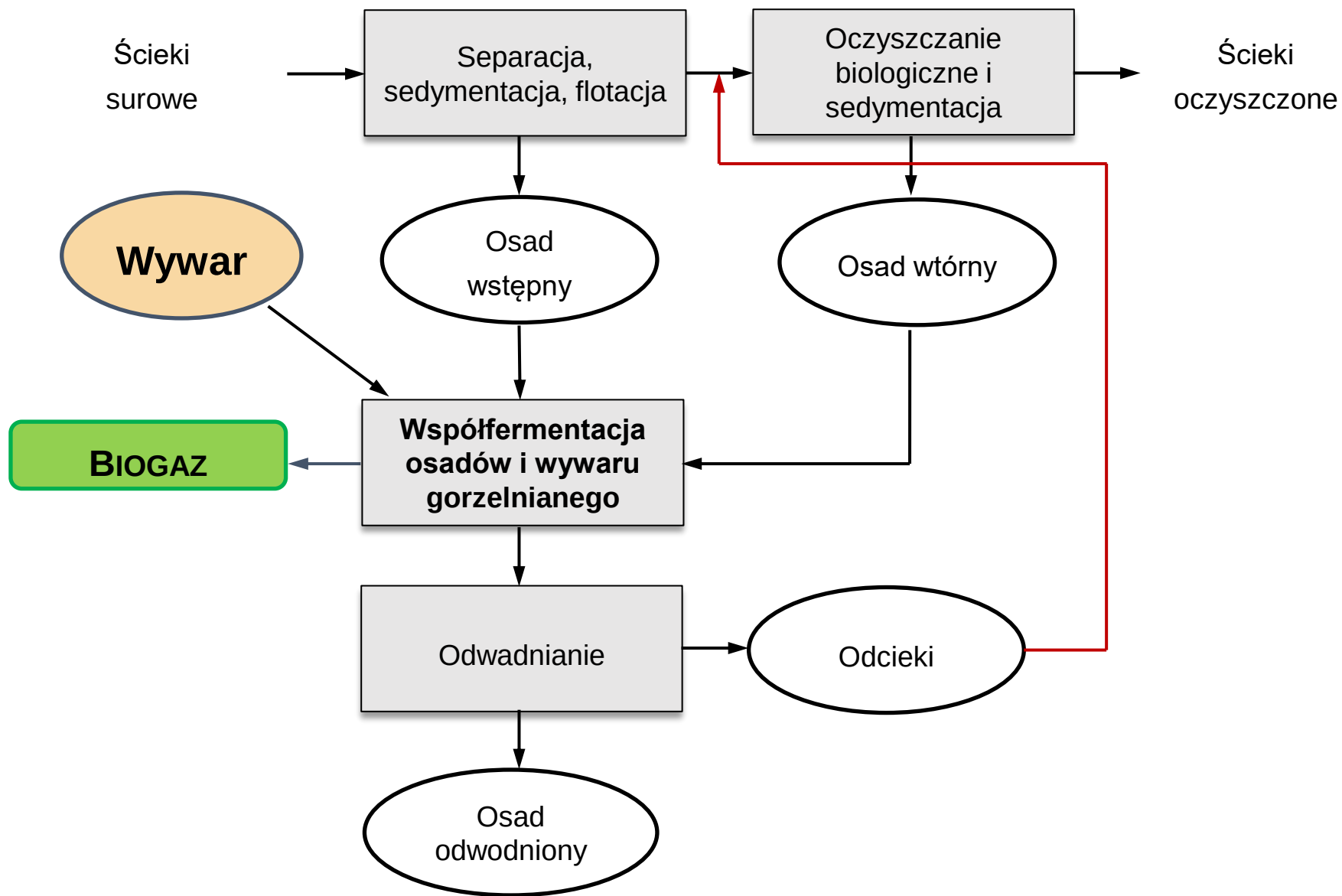


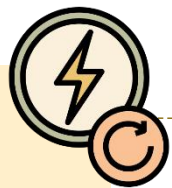
Wpływ kofermentacji na jakość odcieków



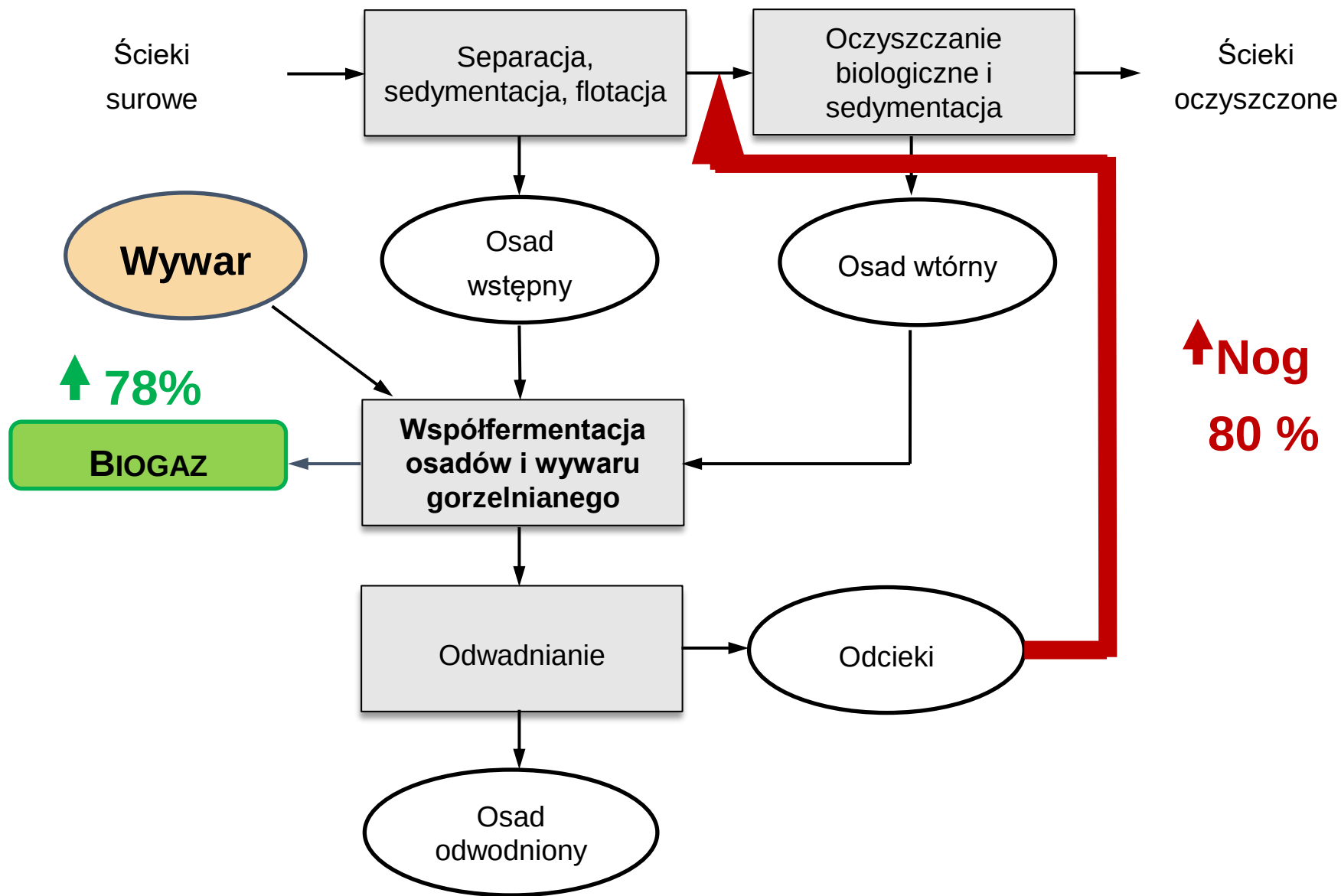


Wpływ kofermentacji na jakość odcieków





Wpływ kofermentacji na jakość odcieków





Minimalizacja zużycia energii elektrycznej poprzez zastosowanie naprzemiennego napowietrzania



Straty energii podczas napowietrzania mogą sięgać **nawet 40% całkowitego zużycia energii w całym procesie**

50-75% całkowitego zużycia energii w konwencjonalnych oczyszczalniach ścieków wiąże się **zasilaniem dmuchaw napowietrzających**

Jedną ze skutecznych metod zmniejszenia zużycia energii elektrycznej przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej efektywności usuwania zanieczyszczeń jest **naprzemienne napowietrzanie**



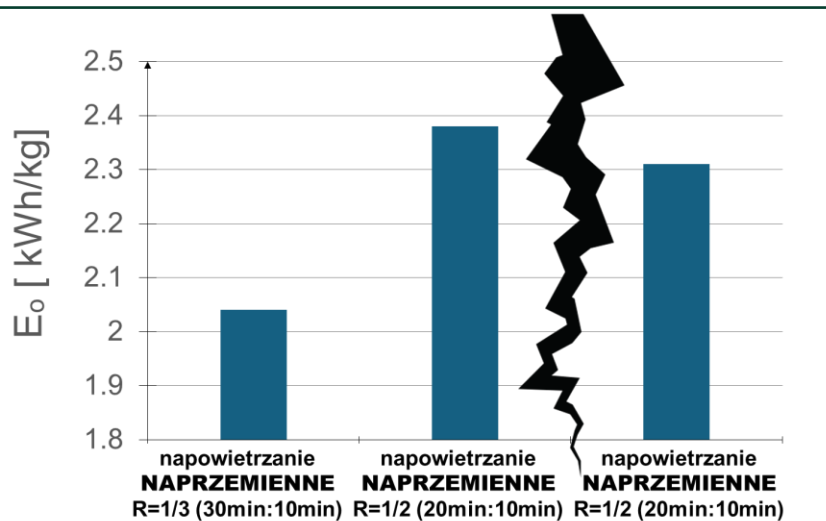
Minimalizacja zużycia energii elektrycznej poprzez zastosowanie naprzemiennego napowietrzania



50-75% całkowitego zużycia energii w konwencjonalnych oczyszczalniach ścieków wiąże się zasilaniem dmuchaw napowietrzających

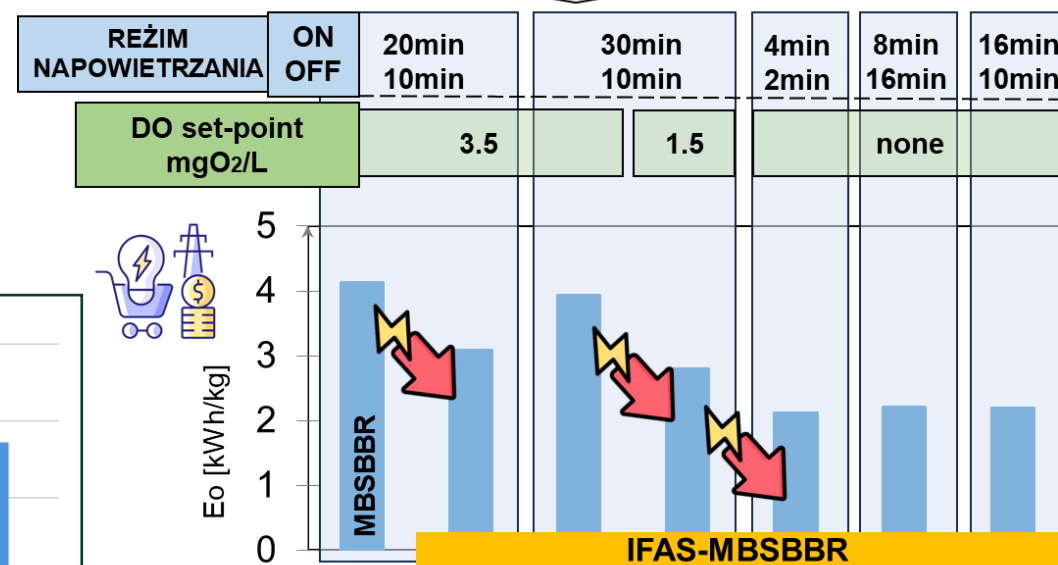
Straty energii podczas napowietrzania mogą sięgać **nawet 40%** całkowitego zużycia energii w całym procesie

Jedną ze skutecznych metod zmniejszenia zużycia energii elektrycznej przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej efektywności usuwania zanieczyszczeń jest **naprzemienne napowietrzanie**

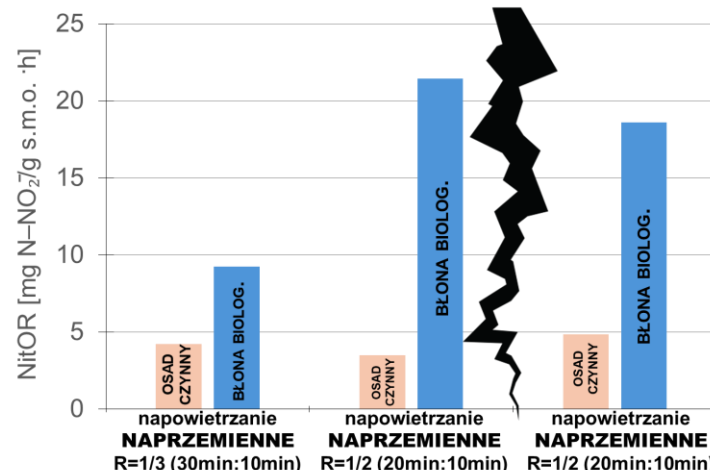
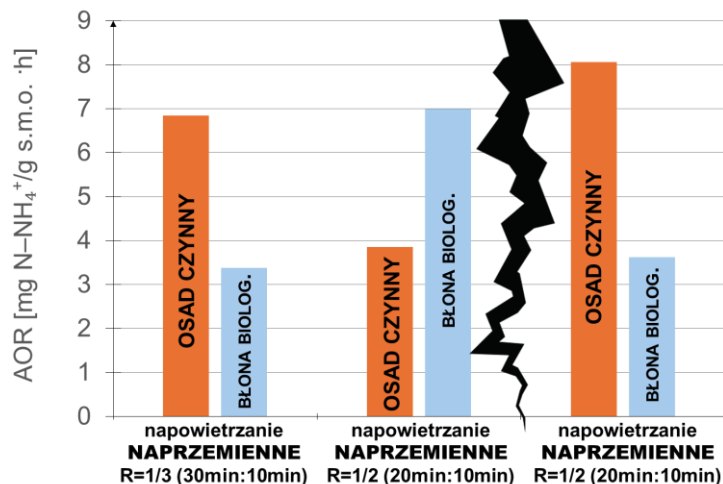


Zastosowanie różnych wariantów strategii naprzemiennego napowietrzania jako rozwiązania zmniejszającego koszty energii

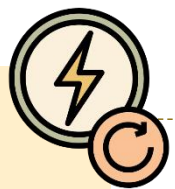
w oczyszczalniach ścieków



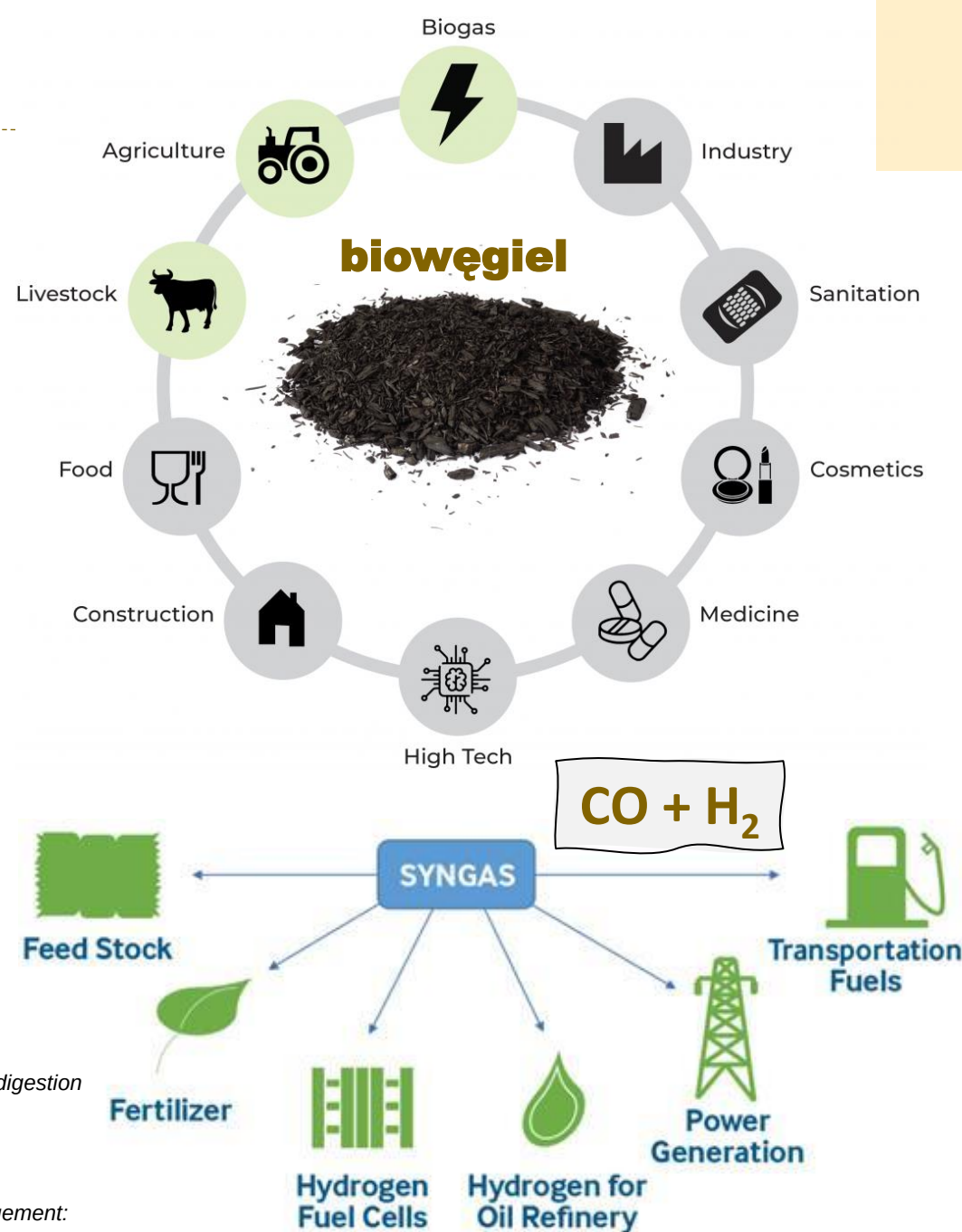
Na podstawie: Zajac, O., Zielinska, M., & Zubrowska-Sudol, M. (2024). Enhancing wastewater treatment efficiency: A hybrid technology perspective with energy-saving strategies. *Bioresource Technology*, 399, 130593.



Na podstawie: Zajac, O., Zubrowska-Sudol, M. (2023). Nitrification kinetics, N₂O emission, and energy use in intermittently aerated hybrid reactor under different organic loading rates. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20 (9), 10061–10074.



Odzysk energii

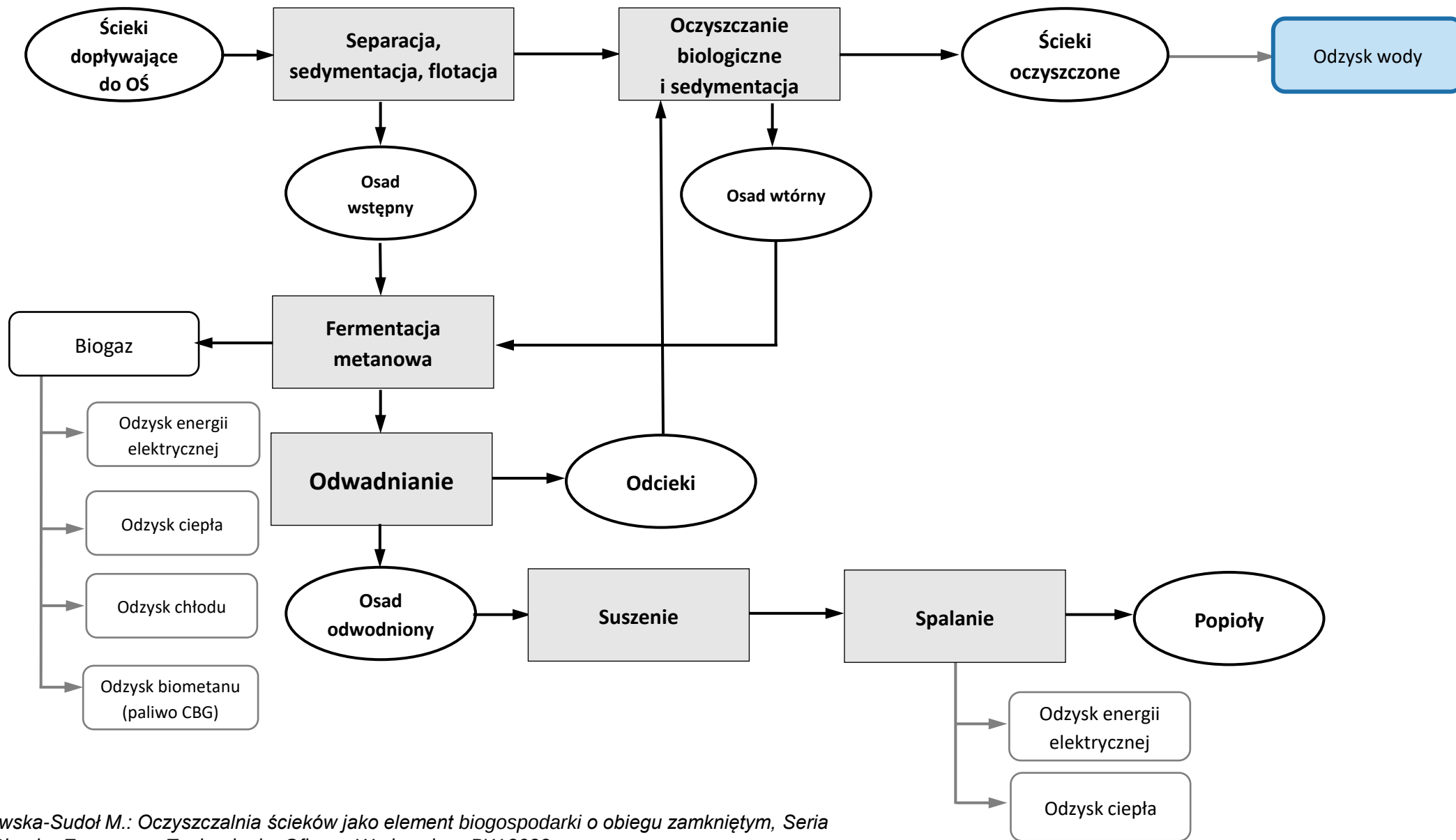


Źródła:

- Li Ch., Wang X., Zhang G., Li J., Li Z., Yu G., Wang Y. 2018: A process combining hydrothermal pretreatment, anaerobic digestion and pyrolysis for sewage sludge dewatering and co-production of biogas and biochar: Pilot-scale verification, *Bioresource Technology*, 254, 187-193.
- Raheem A., Sikarwar V. S., He J., Dastyar W., Dionysiou D. D., Wang W., Zhao M. 2018: Opportunities and challenges in sustainable treatment and resource reuse of sewage sludge: A review, *Chemical Engineering Journal*, 337, 616-641.
- Çelik, Ahmet & Bellitürk, Korkmaz & SAKIN, Erdal. (2020). Chapter 14: Agriculture Friendly Bio-Fertilisers in Waste Management: Vermicompost and Biochar.
- <https://www.munters.com/pl/munters/cases/kevin-revamp-of-syngas-scrubber/>



Odzysk wody

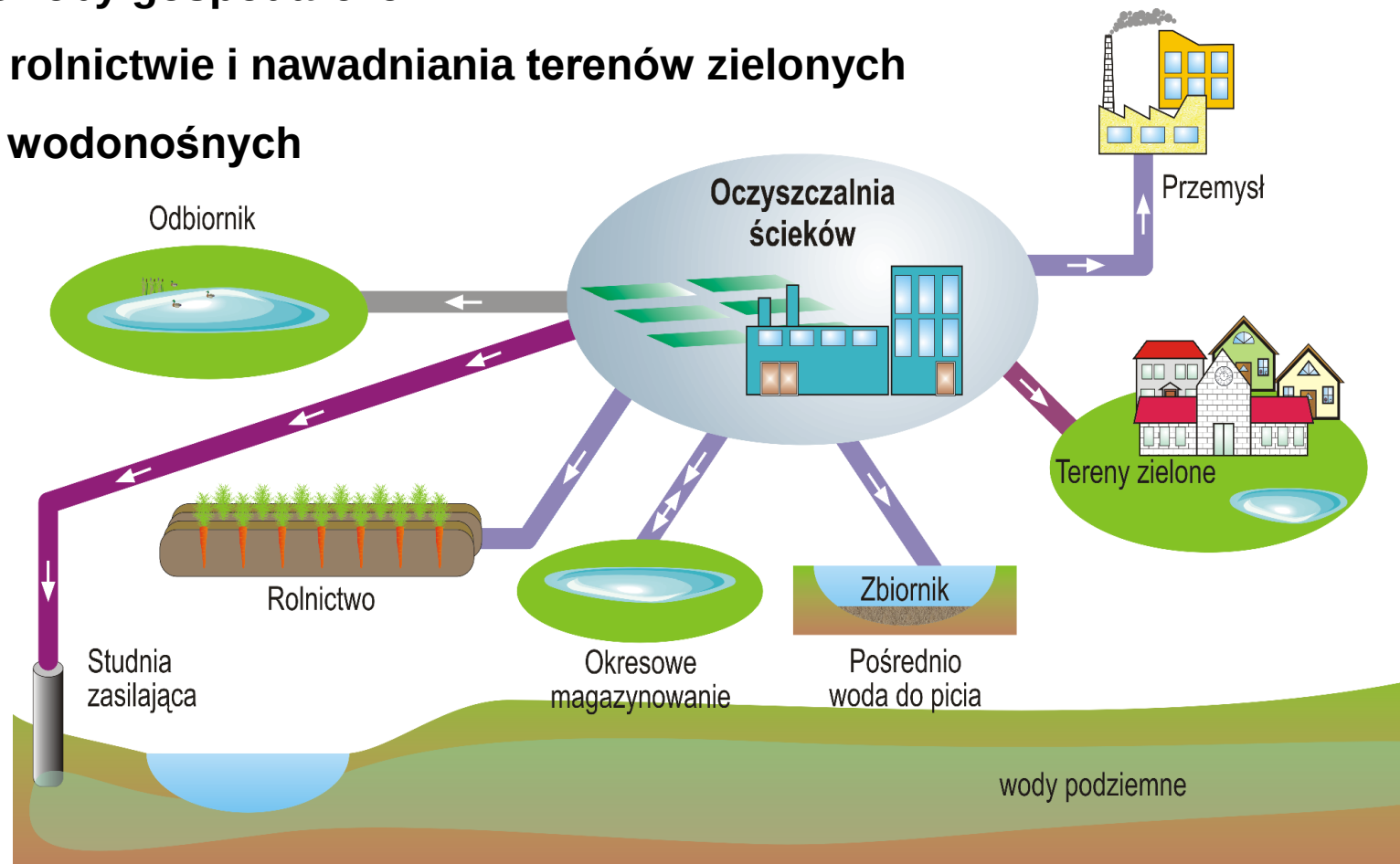




Odzysk wody



- Odzysk wody do celów technologicznych
- Odzysk wody do wykorzystania w przemyśle
- Odzysk wody do spożycia i na potrzeby gospodarcze
- Odzysk wody do wykorzystania w rolnictwie i nawadniania terenów zielonych
- Odzysk wody do zasilania warstw wodonośnych



Cel projektu:

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

Interreg
Baltic Sea Region



Co-funded by
the European Union

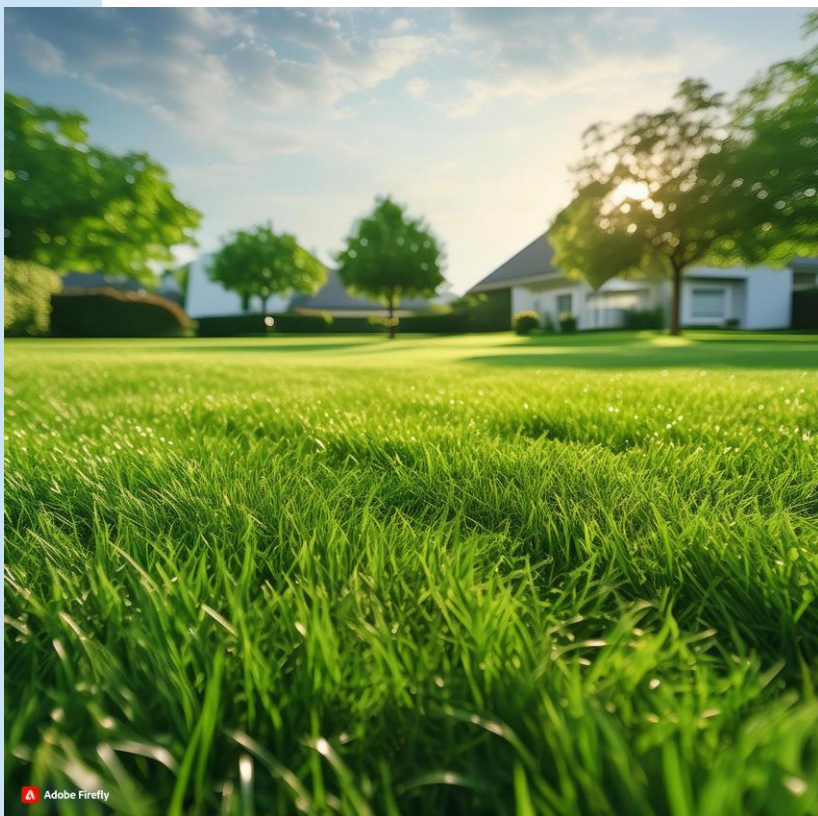


SUSTAINABLE WATERS

ReNutriWater

Pokrycie zapotrzebowania na składniki nawozowe (założenia do obliczeń)

Wybrana roślina:



Sezonowa dawka na 100 m²
(zakładając N:P:K – 4:1:2)

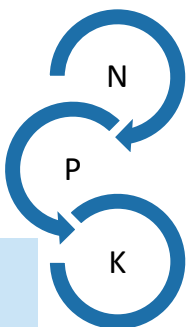
N	2.4 kg
P	0.6 kg
K	1.2 kg

Założone zapotrzebowanie na wodę 0,5 – 3,0 l/m²

Sezonowe zapotrzebowanie na wodę:

7 500 l/100 m² (5 miesięcy × 30 dni × 0,5 l/ (m² × dzień))

45 000 l/100 m² (5 miesięcy × 30 dni × 3,0 l/ (m² × dzień))



Jakość ścieków po koagulacji

Wskaźnik [mg/l]	PAX - XL 19 F	
	KO	KP
N	7,0	6,2
P	0,88	0,72
K	35,2	32,6

Pokrycie zapotrzebowania na składniki nawozowe dla traw

Pokrycie zapotrzebowania [%]	Ścieki z oczyszczalni	PAX - XL 19 F	
		KO	KP
N	2,39-14,34	2,19-13,11	1,95-11,67
P	1,43-8,55	1,10-6,63	0,90-5,42
K	22,23-133,38	22,00-132,00	20,35-122,13

Mniejsza wartość dotyczy obliczeń pokrycia zapotrzebowania na wodę w wysokości 0,5 l/m², a większa dla 3,0 l/m².

KO – koagulacja objętościowa, KP – koagulacja powierzchniowa



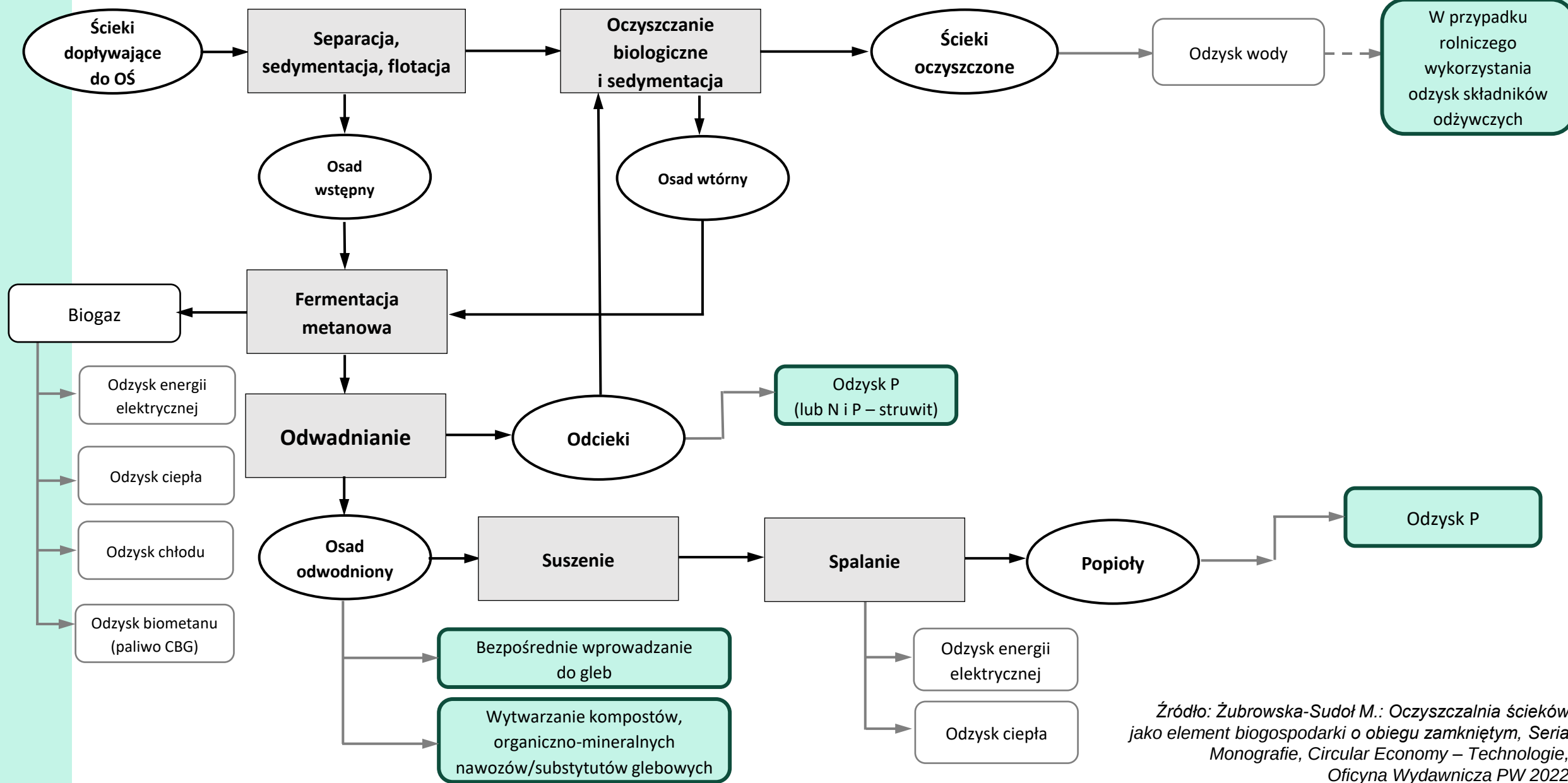
Odzysk fosforu



- Wyczerpywanie złóż fosforytów – problem światowej gospodarki
- Dwie trzecie aktualnych rezerw fosforytów zidentyfikowanych w najnowszych badaniach International Fertilizer Development Center [Międzynarodowy Ośrodek Badań nad Nawozami] (IFDC) pochodzi z Maroka/Sahary Zachodniej, Chin i Stanów Zjednoczonych
- Fosfor to składnik odżywczy dla roślin, którego nie można zastąpić innym pierwiastkiem – 90 % światowego wydobycia tego surowca wykorzystywane jest do produkcji nawozów
- Deficyt fosforytów może doprowadzić do kryzysu produkcji żywności
- Przy obecnym poziomie zużycia złóż fosforytów w ciągu 50-100 lat ulegną one wyczerpaniu
- Fosforyty w 2014 i fosfor w 2017 znalazły się w wykazie surowców krytycznych dla Unii Europejskiej ze względu na ich duże znaczenie gospodarcze i na wysokie ryzyko dostaw
- Oczyszczalnie ścieków komunalnych – obiekty charakteryzujące się wysokim potencjałem odzysku fosforu
- W krajach Unii Europejskiej całkowita ilość fosforu zawartego w ściekach komunalnych przekracza 2000 t P_2O_5 na dobę



Odzysk fosforu



Źródło: Żubrowska-Sudoł M.: Oczyszczalnia ścieków jako element biogospodarki o obiegu zamkniętym, Seria Monografie, Circular Economy – Technologie, Oficyna Wydawnicza PW 2022



Odzysk fosforu – potencjał odzysku



Ścieki/Odcieki		Osady ściekowe		Popioły z termicznego przekształcania osadów	
Nazwa	Potencjał odzysku	Nazwa	Potencjał odzysku	Nazwa	Potencjał odzysku
DXV Crystalactor	~ 40%	AQUA RECI	~ 60%	SEPHOS	b.d.
Ostara PEARL Reactor	~ 20%	Seaborne (Gifhorn)	~ 40%	AshDec	~ 85%
AirPrex	~ 15%	PHOXNAN	~ 50%	RecoPhos	~ 85%
Phosnix	b.d.	Metoda Stuttgardzka	~ 40%	PASCH	~ 70%
P-RoC	~ 27%	MEPHREC	~ 65%		
		KREPRO	b.d.		



Odzysk fosforu – legislacja motorem rozwoju



Niemcy,
październik 2017 r.

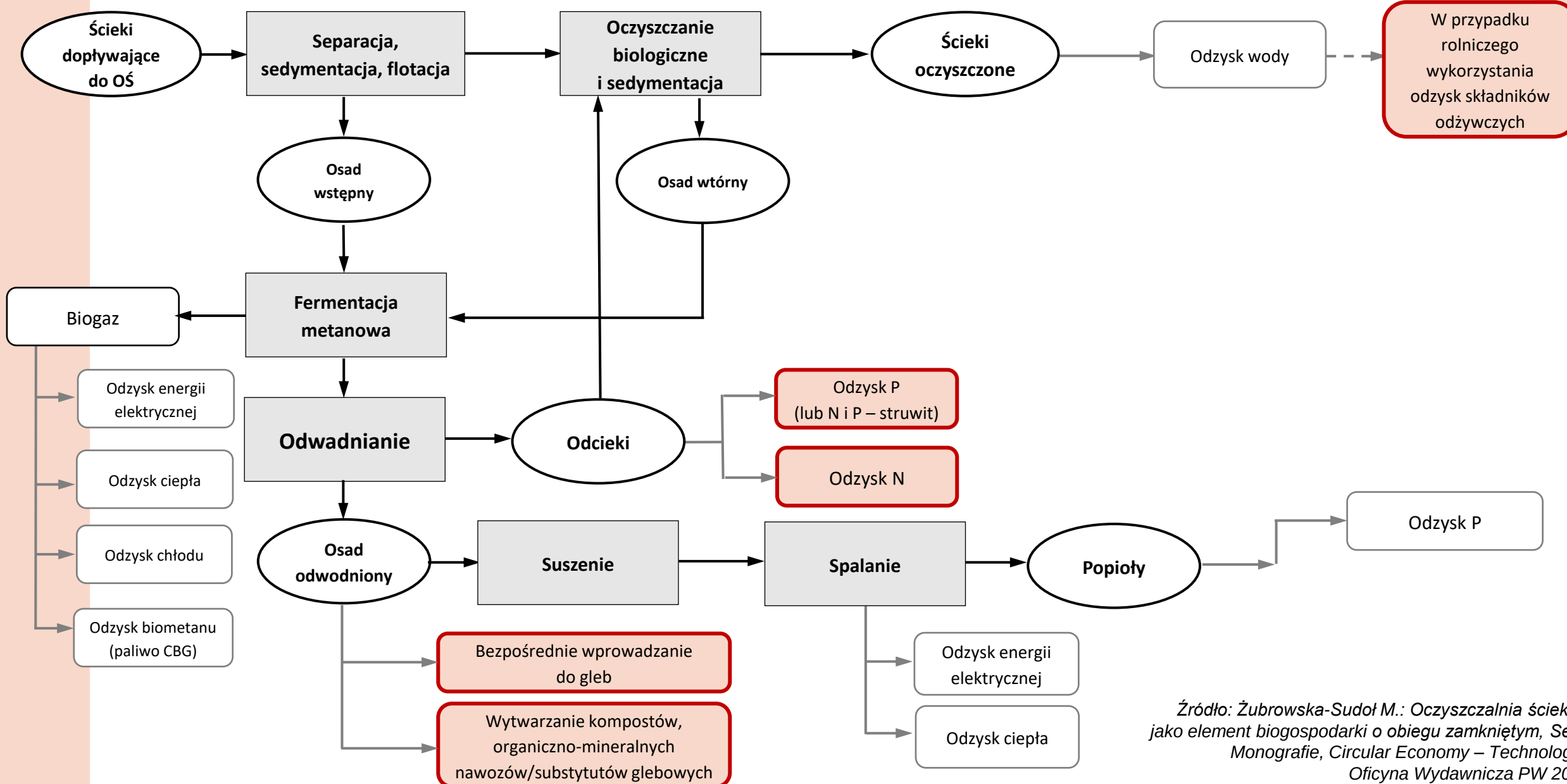
**Rozporządzenie
dotyczące
odzysku fosforu
z osadów ściekowych
i popiołów po termicznym
przekształcaniu osadów**

Przyjęte przepisy szczegółowo definiują:

- 1) wielkość oczyszczalni ścieków, których obowiązek ten dotyczy: powyżej 50 tys. RLM
- 2) termin wdrożenia odzysku P (od 2029 roku dla oczyszczalni o RLM powyżej 100 tys. i od 2032 roku dla oczyszczalni od 50 do 100 tys. RLM)
- 3) termin opracowania koncepcji odzysku P (do końca 2023 roku)
- 4) minimalną zawartość fosforu w osadach (20 g/kg s.m.), powyżej której oczyszczalnie muszą wprowadzić odzysk P
- 5) minimalną efektywność odzysku (z osadów: 50%, z popiołów po ich termicznym przekształcaniu: 80%)



Odzysk azotu



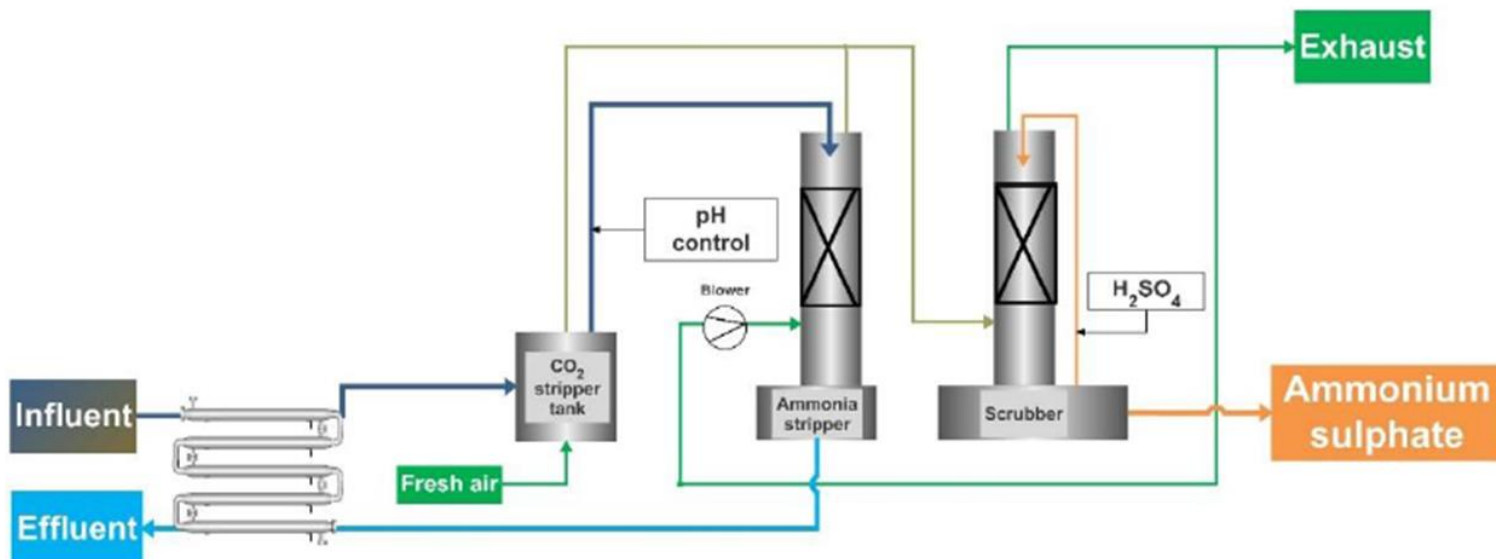
Źródło: Żubrowska-Sudoł M.: Oczyszczalnia ścieków jako element biogospodarki o obiegu zamkniętym, Seria Monografie, Circular Economy – Technologie, Oficyna Wydawnicza PW 2022



Odzysk azotu



Schemat instalacji demonstracyjnej



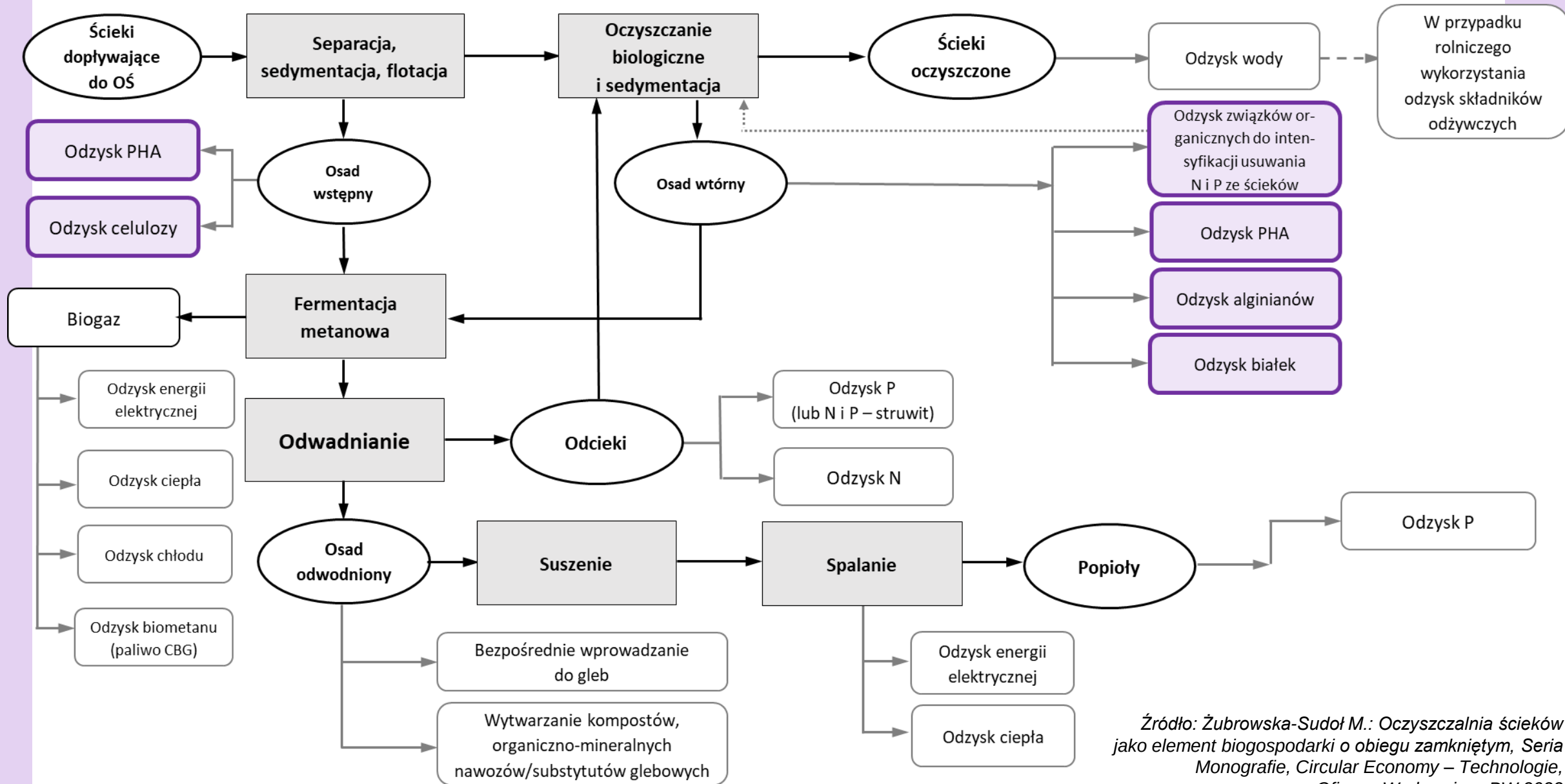
Pełnoskalowa instalacja demonstracyjna

Porównanie kosztów usuwania i odzysku azotu

Technologia	Efektywność	Koszt EUR/ kg N
Oczyszczanie biologiczne z wykorzystaniem zewnętrznego źródła C_{org}	>95 %	2,5 – 5,5
Innowacyjne technologie usuwania N (BABE, SHARON, Anammox)	75 – 90%	1,0 – 3,0
Nijhuis Ammonia Recovery	80 – 90 %	0,75 – 3,0



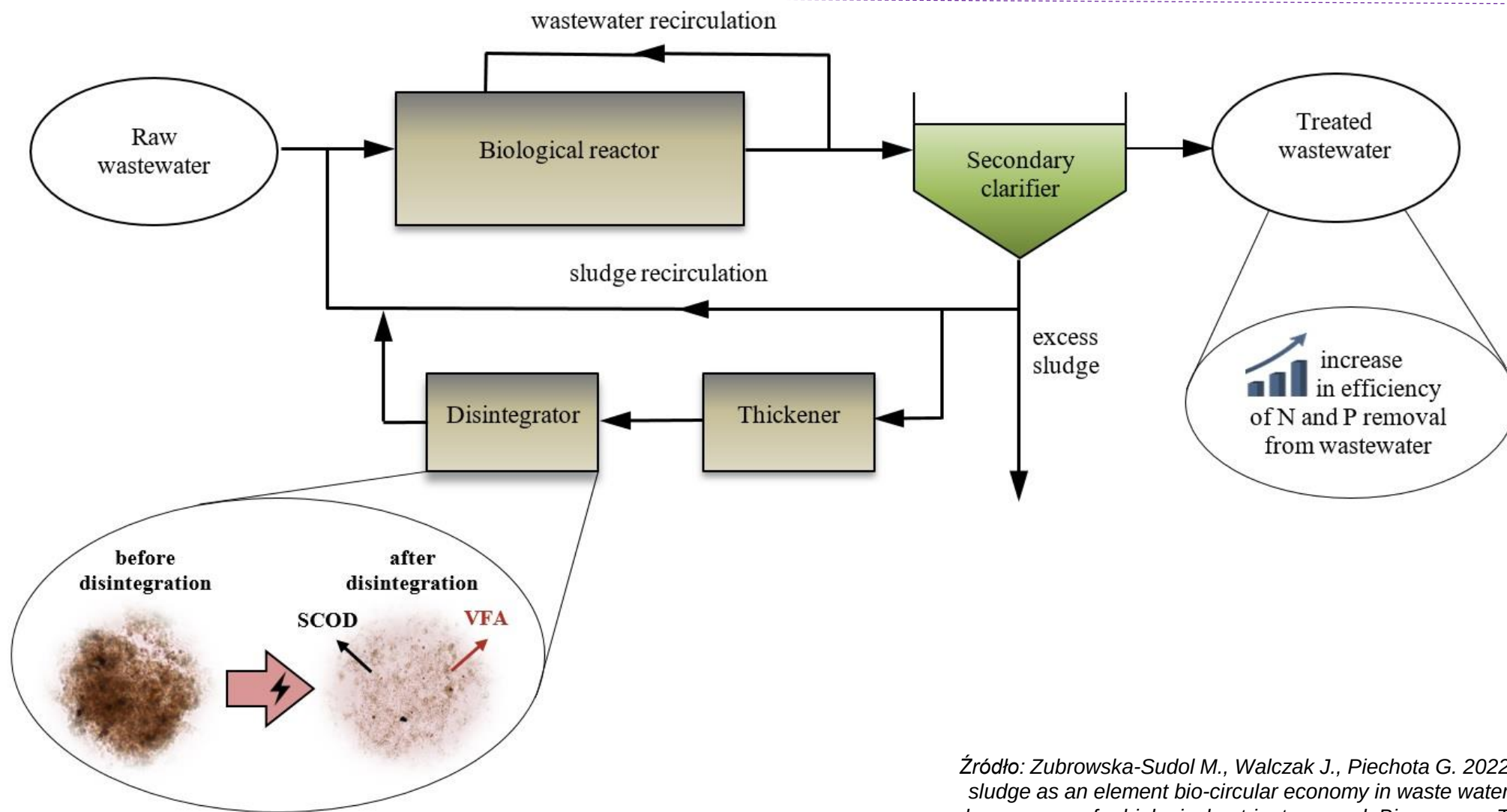
Odzysk związków organicznych



Źródło: Żubrowska-Sudoł M.: Oczyszczalnia ścieków jako element biogospodarki o obiegu zamkniętym, Seria Monografie, Circular Economy – Technologie, Oficyna Wydawnicza PW 2022

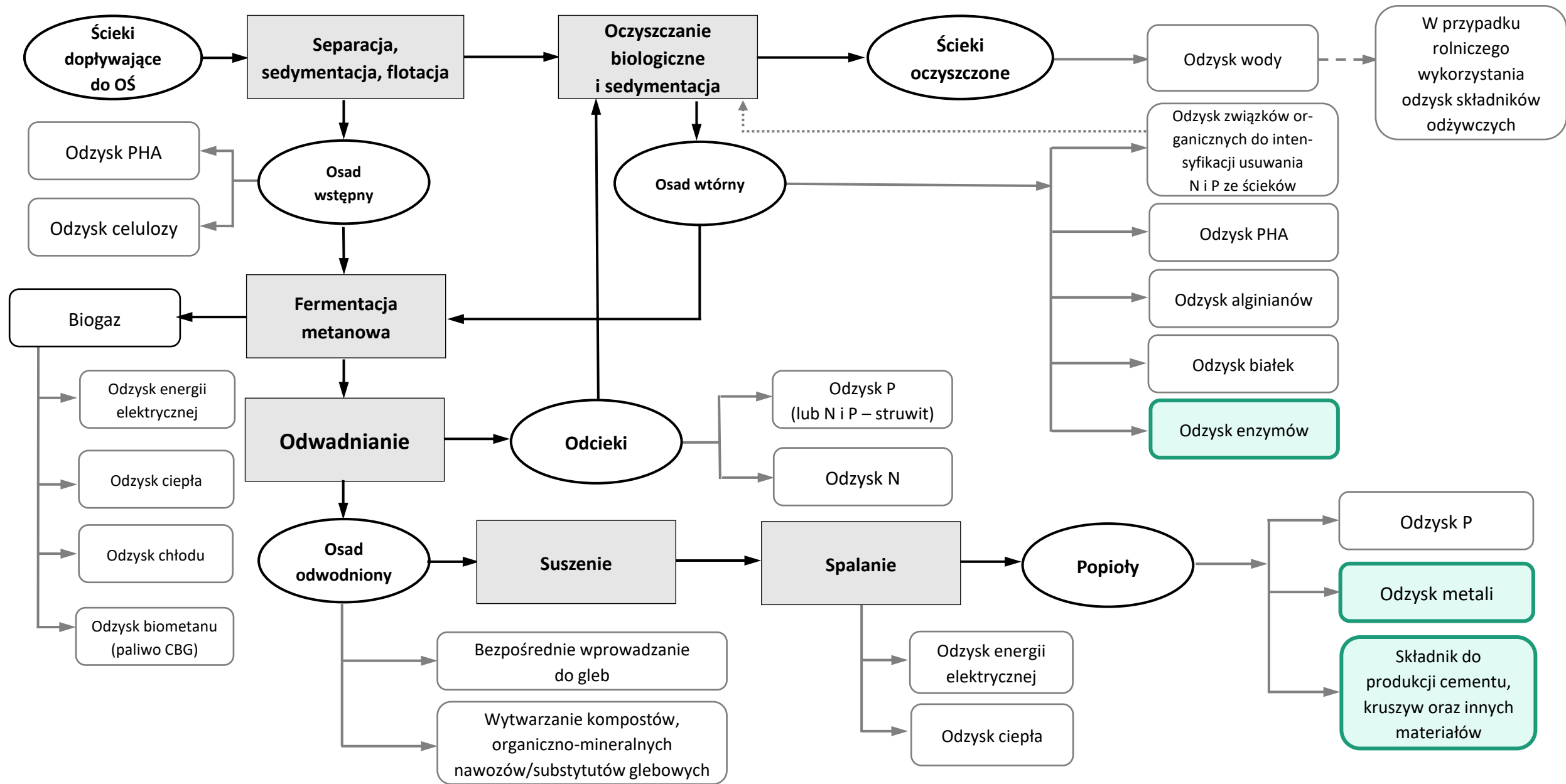


Odzyskane związki organiczne jako źródło węgla do intensyfikacji usuwania ze ścieków związków biogenych



Źródło: Zubrowska-Sudol M., Walczak J., Piechota G. 2022: Disintegration of waste sludge as an element bio-circular economy in waste water treatment plant towards carbon recovery for biological nutrient removal, *Bioresource Technology*, 360,127622.

Pozostałe możliwości



INNOWACYJNA
i
ODPOWIEDZIALNA
OCZYSZCZALNIA
WDRAŻA
GOSPODARKĘ
O OBIEGU
ZAMKNIĘTYM

**Technologie minimalizacji
i usuwania substancji
rosnącego ryzyka
(zanieczyszczenia z grupy CEC eng.
Contaminants of Emerging Concern)**

Substancje rosnącego ryzyka



- farmaceutyki, w tym substancje endokrynnie czynne
- środki narkotyczne
- środki higieny osobistej
- pestycydy
- substancje per- i polifluoroalkilowe (PFAS)
- mikroplastik
-



Substancje rosnącego ryzyka - przykład



Zanieczyszczenia
z grupy **CEC**
(eng. contaminants of
emerging concern)

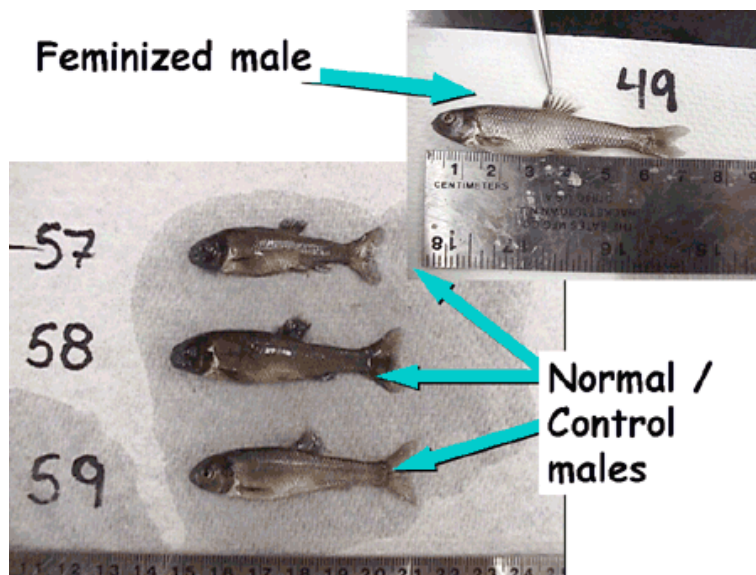
żeńskie hormony
antykonieczne

feminizacja męskiej
populacji ryb



Keteles (2014): Synthetic female hormones in sewage are toxic to male fish over generations, The EPA Blog

Feminized male



Kelly (2011): Pharmaceuticals in Water, Prairie Research Institute, University of Illinois



Gilbert (2011): Drug waste harms fish, Nature 476, 265



Monitorowanie całego cyklu życia



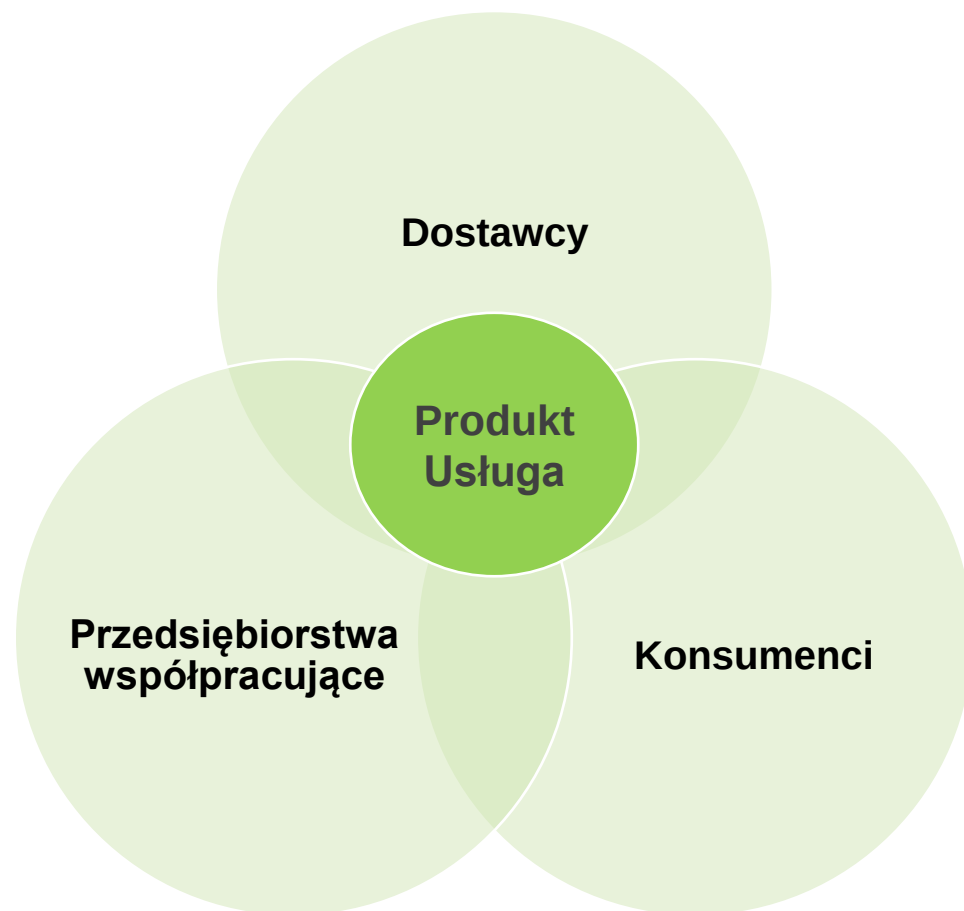
Monitorowanie całego cyklu życia



Produkt
Usługa

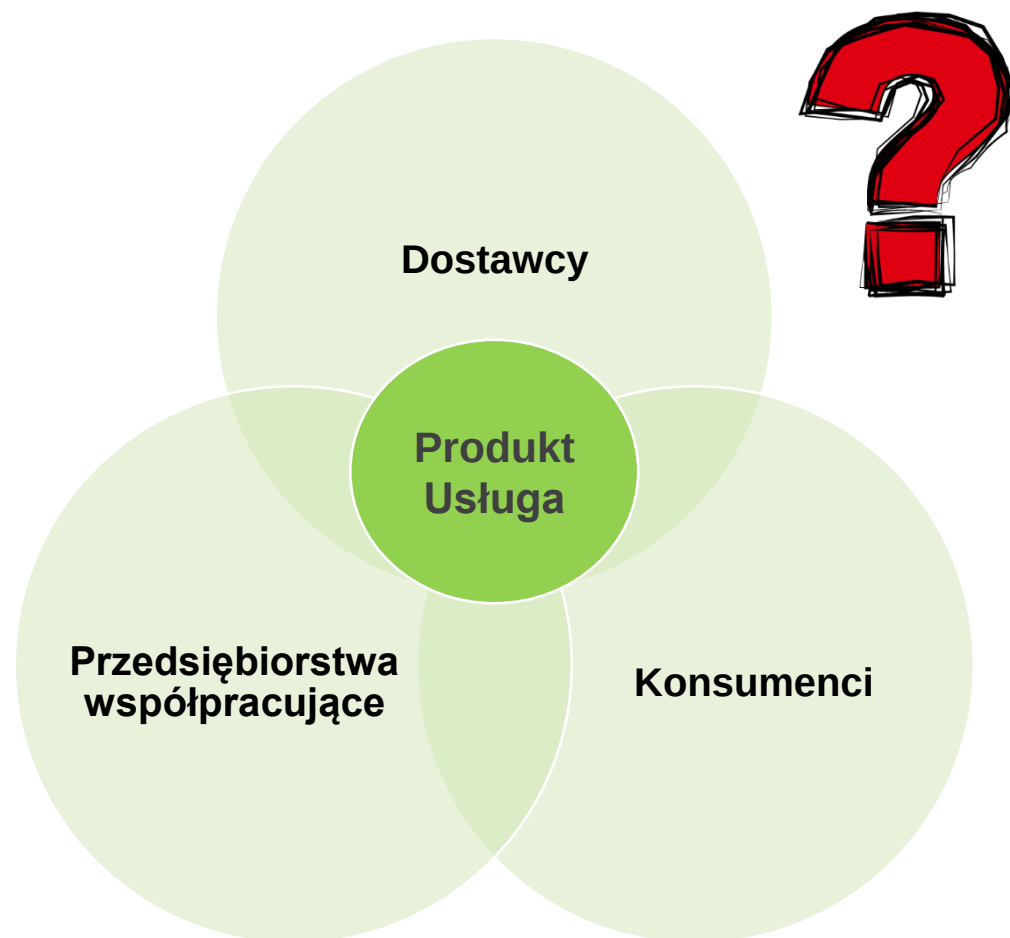


Monitorowanie całego cyklu życia



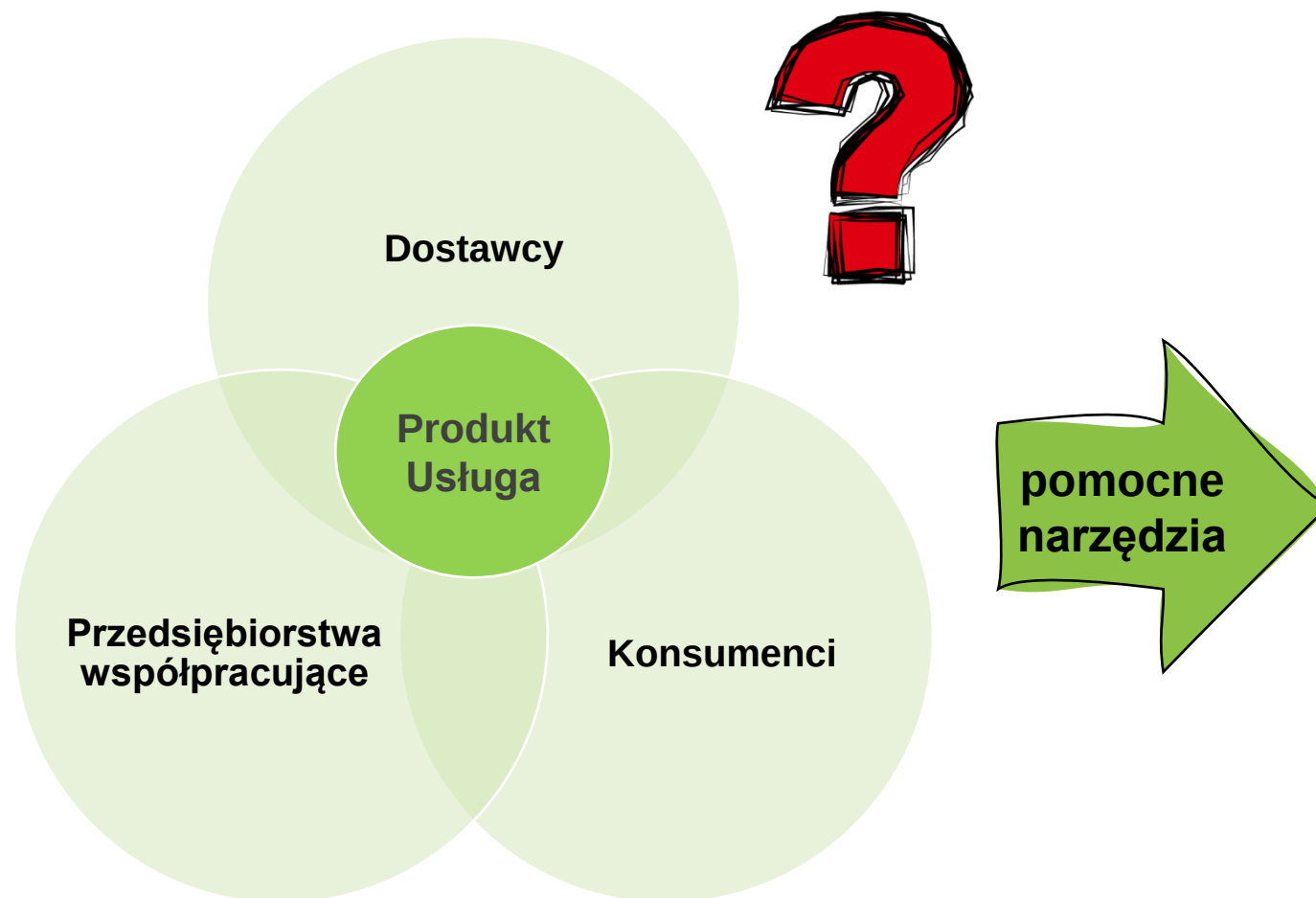


Monitorowanie całego cyklu życia



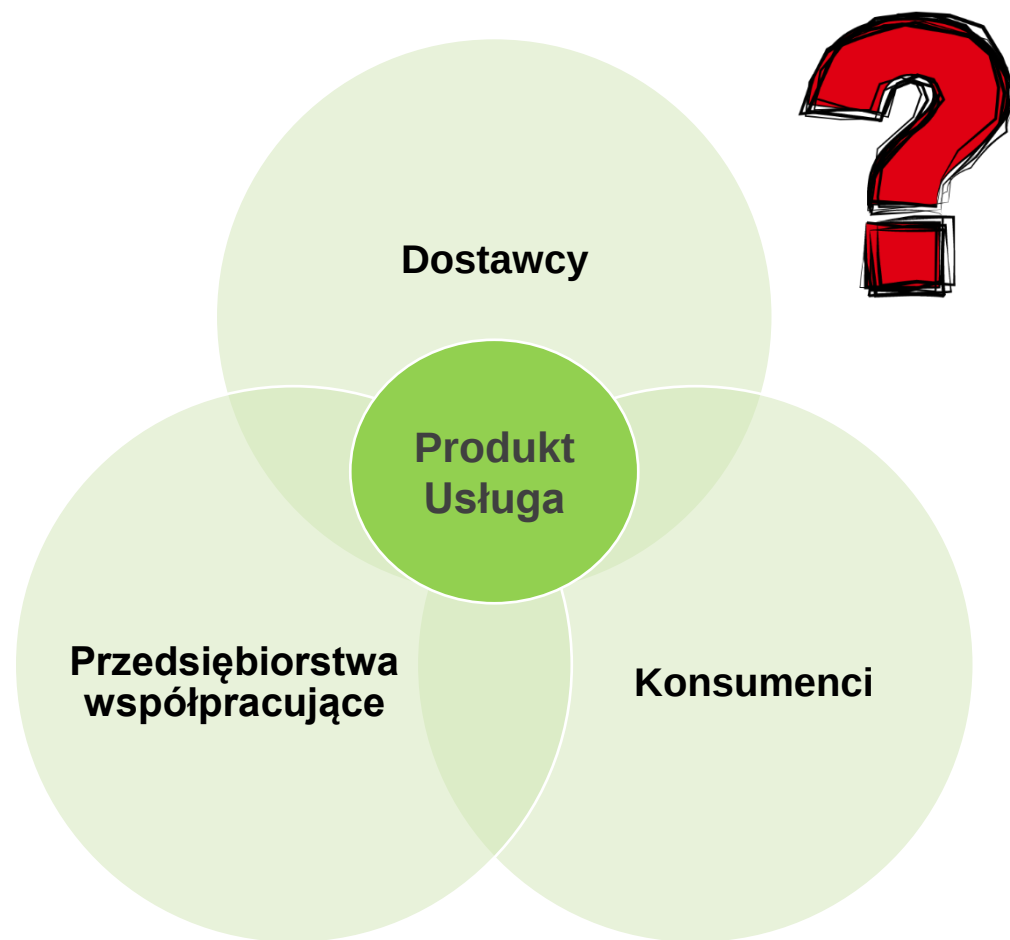


Monitorowanie całego cyklu życia





Monitorowanie całego cyklu życia



pomocne
narzędzia

Środowiskowa ocena cyklu życia
LCA
System Eko-zarządzania i Audytu
EMAS
System zarządzania środowiskiem
ISO 14001
Raporty CSR
Raporty ESG

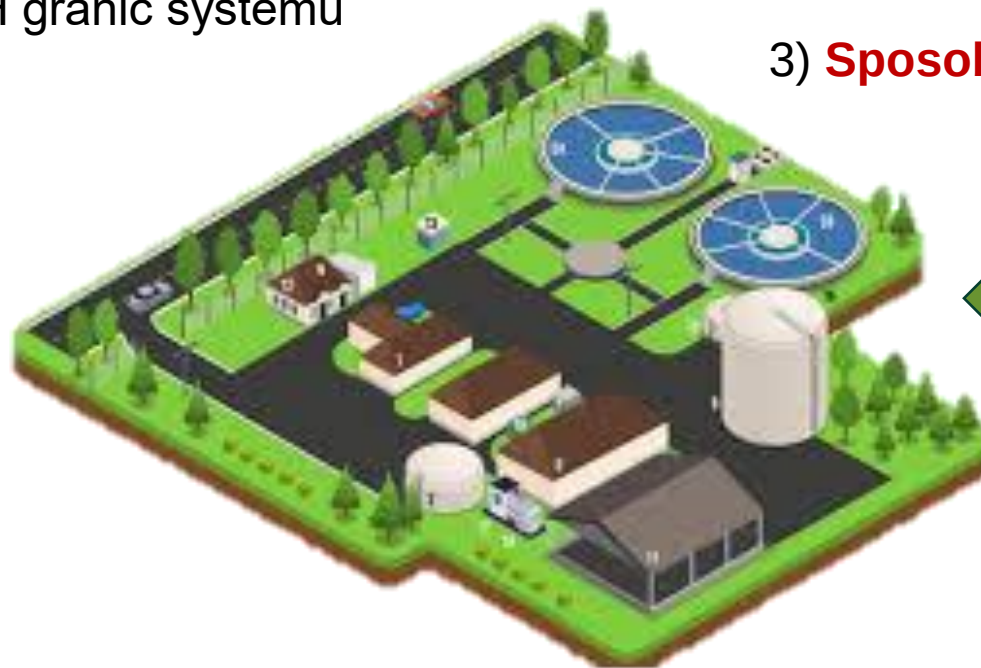


Środowiskowa ocena cyklu życia LCA



LCA pozwala na ocenę wpływu na środowisko w **całym cyklu życia**, ale jej przeprowadzenie **dla oczyszczalni ścieków** wymaga uwzględnienia:

1) WŁAŚCIWYCH granic systemu



3) **Sposobu pozyskania energii**



2) zależności pomiędzy poszczególnymi ETAPAMI PROCESU TECHNOLOGICZNEGO
ścieki / odcieki / odpady / emisje bezpośrednie

4) Metod finalnego zagospodarowania osadów





LCA oczyszczalni ścieków



LCA przeprowadzone przez **TECHNOLOGA**,
z wykorzystaniem połączonych możliwości **PAKIETÓW INŻYNIERSKICH**



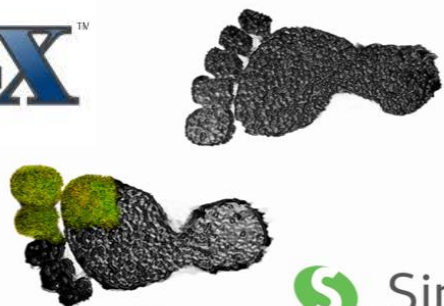
pozwała ocenić wpływ emisji **bezpośrednich** i **pośrednich** na:

ślad węglowy

wszystkie kategorie wpływu tj.

- zmiany klimatu,
- wyczerpywanie się zasobów,
- wpływ na zasoby wodne,
- zdrowie ludzkie,
- użytkowanie gruntów,
- zakwaszenie,
- eutrofizacja,
- i inne w zależności od przyjętej metodyki.

GPS-X™



 SimaPro





Emisja podtlenku azotu



Po dwutlenku węgla i metanie, podtlenek azotu jest trzecim największym czynnikiem antropogenicznego ocieplenia klimatu

Uznano go za najbardziej dominujący czynnik niszczący warstwę ozonową

Współczynnik globalnego ocieplenia (GWP) N₂O prawie **300 razy wyższy** niż CO₂ i 28 razy większy niż CH₄

Międzyrządowy Zespół ds. Zmian Klimatu (IPCC) z 2023 roku **globalna emisja N₂O wyniosła 2,7±1,6 GtCO₂-eq**

Oczyszczalnie ścieków **są czwartym co do wielkości źródłem emisji N₂O** (po rolnictwie, produkcji energii i innej działalności zw. z produkcją przemysłową) **odpowiadając za 5,6% całkowitych emisji N₂O.**

! Emisje N₂O pochodzące z przeróbki osadów ściekowych nie są uwzględniane w emisjach z sektora oczyszczania ścieków !



Emisja podtlenku azotu - minimalizacja



**Kontrola i regulacja
krytycznych warunków operacyjnych
kluczem do minimalizacji emisji N₂O
z oczyszczalni ścieków**

**strategia
naprzemiennego
napowietrzania**

**obciążenie
ładunkiem
NH₄⁺**

**dostępność
źródła C**

**Wiek
osadu**

**niskie
stężenia
tlenu**



Emisja podtlenku azotu - minimalizacja



Kontrola i regulacja krytycznych warunków operacyjnych kluczem do minimalizacji emisji N₂O z oczyszczalni ścieków

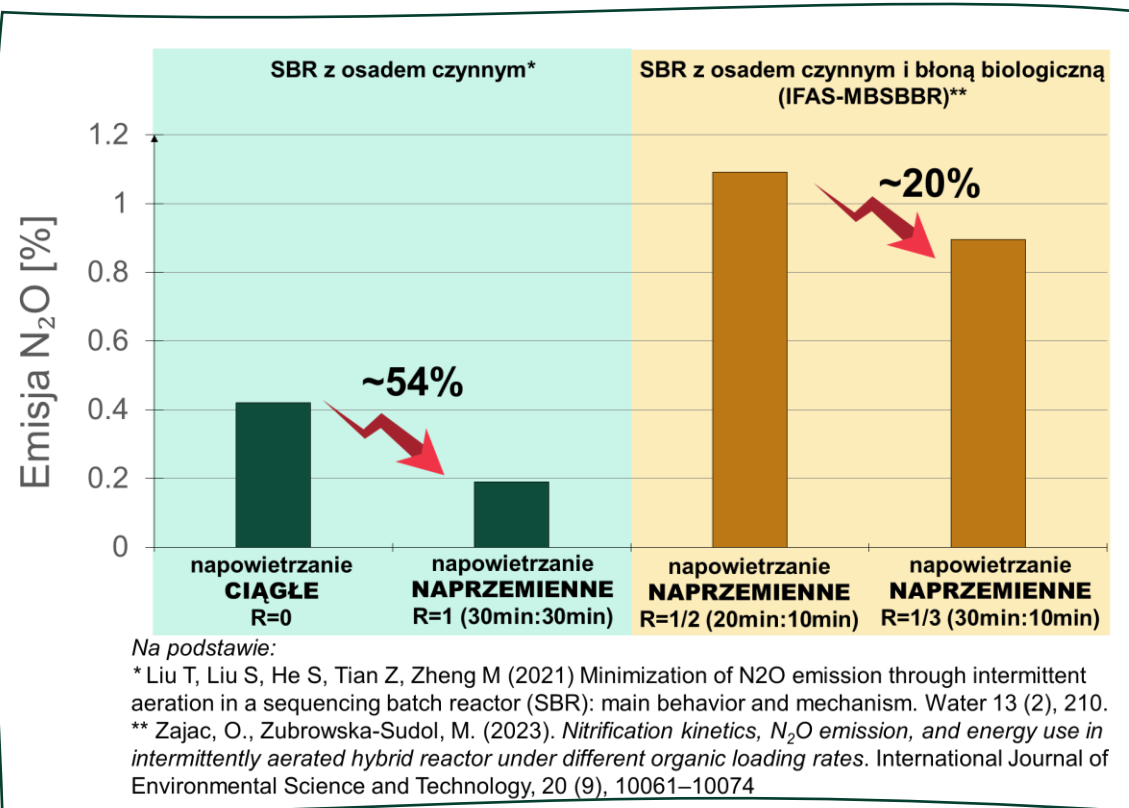
strategia naprzemiennego napowietrzania

obciążenie ładunkiem NH₄⁺

dostępność źródła C

Wiek osadu

niskie stężenia tlenu





Monitoring postępu transformacji w kierunku GOZ

Monitoring postępu transformacji w kierunku GOZ



WSKAŹNIKI

Wskaźniki
dla
Unii Europejskiej



Wskaźniki
dla
krajowej gospodarki



Wskaźniki
dla
branż





Wskaźniki dla branż



Branża wydobywcza



Branża energetyczna



Branża budowlana



Branża rolno-spożywcza



Branża chemiczna



Branża wodociągowo-kanalizacyjna



Budowanie świadomości społecznej

Budowanie świadomości społecznej



Edukacja dostosowana do docelowej grupy odbiorców

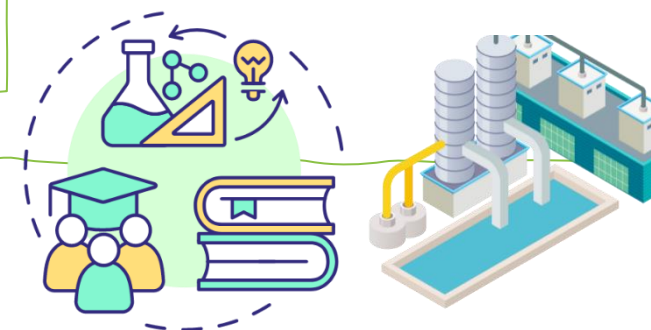


Budowanie świadomości społecznej od najmłodszych lat

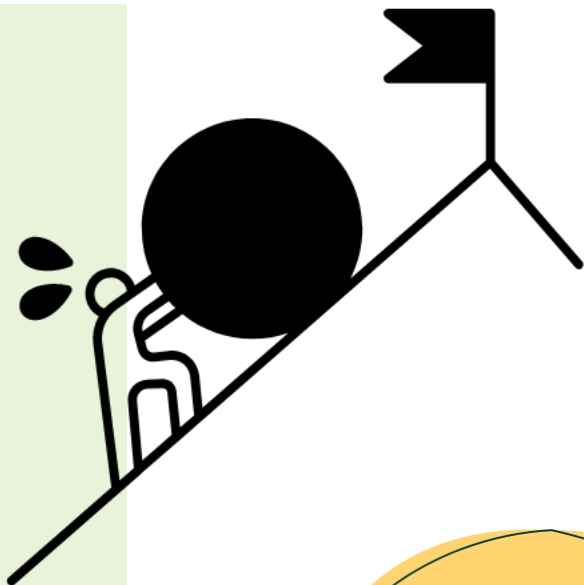


Edukacja oparta na rzetelnych wynikach badań naukowych a nie na domniemaniach

Współpraca uczelni wyższych z przedsiębiorstwami wodociągowo-kanalizacyjnymi



WYZWANIA



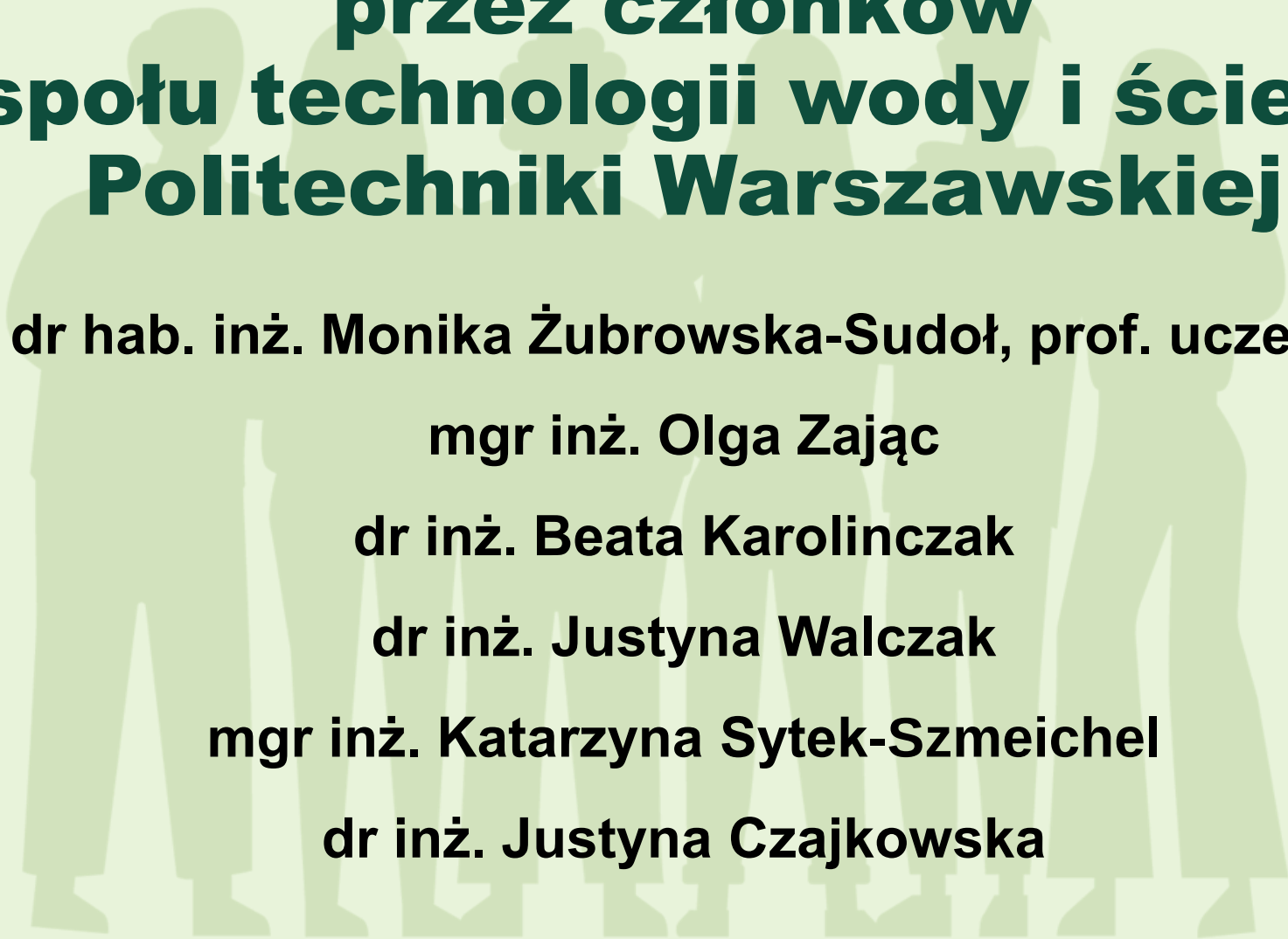
**Wdrażanie rozwiązań
technicznych
odpowiadających
wyzwaniom GOZ**

**Monitorowanie całego
cyku życia
produktu/usługi**

**Monitoring postępu
transformacji w
kierunku GOZ**

**Budowanie
świadomości
społecznej**
(edukacja, rzetelna informacja,
polityka prosumencka...)

GOZ



Prezentacja przygotowana przez członków zespołu technologii wody i ścieków Politechniki Warszawskiej

dr hab. inż. Monika Żubrowska-Sudoł, prof. uczelni

mgr inż. Olga Zając

dr inż. Beata Karolinczak

dr inż. Justyna Walczak

mgr inż. Katarzyna Sytek-Szmeichel

dr inż. Justyna Czajkowska

Zapraszamy do zapoznania się z działalnością Zespołu Technologii Wody i Ścieków



**Wydział Instalacji
Budowlanych, Hydrotechniki
i Inżynierii Środowiska**

POLITECHNIKA WARSZAWSKA



**Zakład Zaopatrzenia w Wodę
i Odprowadzania Ścieków**

**Zespół Technologii
Wody i Ścieków**

Kierownik zespołu

dr hab. inż. Monika Żubrowska-Sudoł, prof. uczelni

**Politechnika
Warszawska**



Kontakt



dr hab. inż. Monika Żubrowska-Sudoł, prof. uczelni



monika.sudol@pw.edu.pl



Zakład Zaopatrzenia w Wodę i Odprowadzania Ścieków

Wydział Instalacji Budowlanych Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska

Politechnika Warszawska