

Inwestor (Zamawiający) 	Wykonawca:  Grupa GeoFusion widzimy więcej		
Program:	Krajowy Plan Odbudowy i Zwiększania Odporności, Komponent B3.2.1 - „Inwestycje w neutralizację zagrożeń oraz odnowę wielkoobszarowych terenów zdegradowanych i Morza Bałtyckiego”		
Projekt:	„Działania pomiarowe oraz badawcze dotyczące rozpoznania i ewentualnej neutralizacji materiałów niebezpiecznych zalegających na dnie Morza Bałtyckiego dla lokalizacji w obszarze: Część 1 - wrak statku Stuttgart, Część 2 – wrak statku Stuttgart, Część 3 - Głębia Gdańska, Część 4 - Rynna Słupska” Część 2. Zamówienia, Wrak statku Stuttgart		
Wydawca dokumentu: Grupa GeoFusion Sp. z o.o. ul. Akacjowa 43, 32-065 Nowa Góra			
Plan neutralizacji określający planowane metody neutralizacji zalanych materiałów niebezpiecznych, z uwzględnieniem wpływu planowanej działalności m. in. na stan środowiska morskiego. Wrak S/S Stuttgart, Zatoka Gdańska Część II			
Data dokumentu 	Język dokumentu PL	Format dok. A4	Skala dok. nie dotyczy
Zastępuje dokument	Oznaczenie umowy	Podwykonawca dokumentu	
Nd.	PM.372.2.2025.JG	nie dotyczy	
Opracowali: Benedykt Hac, Adam Cygał, Damian Węgliński, Dominika Adaszek, Gabriel Ząbek, Marcin Świąszek, Maria Barmuta, Milena Ruszczyk.		Zatwierdził: Łukasz Porzuczek	

Historia zmian				
Data dokumentu	Opracował	Sprawdził	Zatwierdził	Zakres zmian
15.01.2026	Adam Cygał, Damian Węgliński, Dominika Adaszek	B.Hac	Łukasz Porzuczek	Wersja podstawowa
28.02.2026	Adam Cygał, Damian Węgliński, Dominika Adaszek	B.Hac	Łukasz Porzuczek	Uzupełnienie o dane z Raportu Końcowego. Raport końcowy_ REV02_16032026
28.03.2026	Adam Cygał,	B.Hac	Łukasz Porzuczek	Korekty wprowadzone w odniesieniu na pismo PM2_086_9_2026_MWG_GeoFusion z dnia 27.03.2026
22.04.2026	Benedykt Hac	B.Hac	Łukasz Porzuczek	20260417_UMG_PNZ_Raport_Końcowy_uwagi
08.06.2026	Benedykt Hac	B.Hac	Łukasz Porzuczek	Na żądanie UM wpisano dodatkowe dane str.27 i 31.

DOKUMENTACJA POWIĄZANA

Lp.	Tytuł	Numer referencyjny	Data wydania
1	Opis przedmiotu zamówienia	Załącznik nr 1 do Umowy nr PM.372.2.2025.JG	11.03.2025 r.
2.	Pełne dane o historii i budowie SS Stuttgart	ZAŁĄCZNIK NR 1	25.01.2026 r.
3	Miny i torpedy znalezione w trakcie trwania projektu	ZAŁĄCZNIK NR 2	25.01.2026 r.
4.	Analiza prawno-regulacyjna	ZAŁĄCZNIK NR 3	25.01.2026 r.
5.	Badanie wraków, Neutralizacja zagrożeń – techniki, sprzęt, ceny	ZAŁĄCZNIK NR 4	25.01.2026 r.
6.	Szacowanie kosztów oczyszczania	ZAŁĄCZNIK NR 5	25.01.2026 r.
7.	Szacowanie ryzyka	ZAŁĄCZNIK NR 6	25.01.2026 r.
8.	Interesariusze	ZAŁĄCZNIK NR 7	25.01.2026 r.

INFORMACJE O PROJEKCIE

Projekt:	Działania pomiarowe oraz badawcze dotyczące rozpoznania i ewentualnej neutralizacji materiałów niebezpiecznych zalegających na dnie Morza Bałtyckiego dla lokalizacji: „wrak statku Stuttgart”.
Cel projektu:	Ocena stanu skażenia w rejonie wraku, wskazanie metod i środków poprawy istniejącego stanu.
Obszar pomiarowy:	Zatoka Gdańska
Wykonawca:	Grupa Geofusion sp. z o.o.
Zamawiający:	Skarb Państwa -Urząd Morski w Gdyni
Zakres pomiaru:	Badania prądów morskich oraz pomiary hydrograficzne i geofizyczne, ocena stanu skażenia środowiska, ocena istniejących metod oczyszczania skażonych gruntów morskich, propozycja technologii oczyszczania.
Okres realizacji:	I etap do 14.05.2025 II etap do 31.01.2026
Jednostki pomiarowe:	R/V BADACZ 2, R/V BADACZ 3, IMOR,
Kierownik Projektu:	dr inż. Benedykt Hac

SPIS TREŚCI

INFORMACJE O PROJEKCIE	3
SŁOWNICZEK DLA DECYDENTÓW: PROJEKT STUTTGART (ZESTAWIENIE ALFABETYCZNE)	18
DEFINICJE SKRÓTÓW I POJĘĆ	20
1 STRESZCZENIE WYKONAWCZE (EXECUTIVE SUMMARY)	22
1.1 Kontekst projektu	22
1.2 Skala zagrożenia – kluczowe fakty	23
1.2.1 Strefowanie A/B/C	26
1.3 Analiza wariantów	27
1.4 Rekomendacja wariantu – Uzasadnienie	30
1.5 Harmonogram i Kamienie Milowe	31
1.6 Budżet i Zasoby	32
1.7 Kluczowe ryzyka (Top 5)	34
1.8 Glossary i Podsumowanie dla Decydenta	35
1.9 Wpływ planowanej działalności na stan środowiska morskiego	36
2 WPROWADZENIE I CEL DOKUMENTU	38
2.1 Geneza dokumentu	38
2.1.1 Podstawa prawna i kontraktowa	38
2.1.2 Etapy projektu	38
2.1.3 Kontekst regulacyjny	39
2.2 Cel i zakres PNZ	39
2.2.1 Cel główny	39
2.2.2 Zakres przedmiotowy	39
2.2.3 Czego PNZ nie obejmuje	40
2.3 Metodyka opracowania PNZ	40
2.3.1 Metody analizy ryzyka	40
2.3.2 Analiza wielokryterialna	40
2.3.3 Źródła danych	41
2.3.4 Powierzchnia robocza cappingu wraku S/S Stuttgart	41
2.3.5 Zasada doboru wariantów oparta na dowodach (evidence-based)	41
2.4 Autorzy i wkład specjalistów	42
3 WDROŻENIE I NADZÓR PLANU NEUTRALIZACJI ZAGROŻEŃ	43
3.1 Zagadnienia operacyjne i regulacyjne planu	43

3.2	Wyniki interpretacji danych SBP w wariancie podstawowym.....	43
3.3	Strefowanie obszaru skażonego.....	58
3.3.1	Cel i korzyści:	59
3.4	Obszary skażenia w strefie A – Zastoiska z paliwem	65
3.4.1	Wrak SS Stuttgart.....	65
3.4.2	Określenie „jeziorek” zastoiskowych	66
3.5	Obszary skażenia w strefach B i C	71
4	IDEA DZIAŁAŃ – OCZYSZCZANIE GRUNTU	72
4.1	Kontekst środowiskowy i cel nadrzędny	72
4.1.1	Horyzonty czasowe regeneracji Strefy A bez interwencji	73
4.1.2	Zastrzeżenie metodyczne – brak modelowania rozprzestrzeniania na skalę transgraniczną	73
4.2	Mechanizm usuwania zanieczyszczeń.....	75
4.3	Zabezpieczenie terenu przed dalszą migracją zanieczyszczeń	76
5	PEŁNY PRZEGLĄD WSZYSTKICH WARIANTÓW DZIAŁAŃ NAPRAWCZYCH	77
5.1	Warianty Z (Zastoiska) – Przegląd kompletny	77
5.1.1	Wariant Z1 – Pokrycie zastoisk piaskiem	77
5.1.2	Wariant Z2 – Geotekstyl + narzut kamienny.....	78
5.1.3	Wariant Z3 – Bariery reaktywne PRB	79
5.1.4	Wariant Z4 – Wariant hybrydowy (wielowarstwowy)	79
5.1.5	Wariant Z5 – Odsysanie paliwa z zastoisk.....	80
5.1.6	Wariant Z6 – Odsysanie + capping piaskiem	81
5.1.7	Wariant Z7 – Odsysanie + piasek + zeolity (aktywna remediacja) ★ REKOMENDOWANY	81
5.1.8	Wariant Z8 – Bezpieczne usuwanie UXO na miejscu operacji (na morzu).....	82
5.2	Warianty W (Wrak) – Przegląd kompletny	82
5.2.1	Wariant W1 – Pokrycie wraku piaskiem	82
5.2.2	Wariant W2 – Pokrycie betonem podwodnym	83
5.2.3	Wariant W3 – Pokrycie siarkobetonem	83
5.2.4	Wariant W4 – Cofferdam (grodzenie stalowe + beton)	84
5.2.5	Wariant W5 – Geotekstyl + narzut kamienny.....	84
5.2.6	Wariant W6 – Wielowarstwowa izolacja hybrydowa ★ REKOMENDOWANY	85
5.3	Warianty III (Osady denne) – Przegląd kompletny	86
5.3.1	Wariant III.0 – Tylko monitoring (bez działań remedacyjnych).....	86
5.3.2	Wariant III.C – Bioremediacja + Capping aktywny ★ WARIANT BAZOWY	87

5.3.3	Wariant III.C dla Obszaru A – specyfika	88
5.3.4	Wariant III.C dla Obszaru B – specyfika	88
5.3.5	Wariant III.D-A – Hybrydowy z aktywnymi minerałami (ALTERNATYWA).....	88
5.3.6	Wariant III.D-B – Hybrydowy pasywny (NIEZALECANY).....	89
5.3.7	Wariant 4 – Kapsuła/sarkofag fizyczny (odrzucony)	89
ROZWINIĘCIE WYBRANYCH WARIANTÓW – ANALIZA SZCZEGÓŁOWA		91
6	OPERACJA REMEDIACJI ZASTOISK PALIWA HFO NA DNIE MORSKIM – WARIANT REKOMENDOWANY DLA ZASTOISK PALIWA WARIANT Z7 – ODSYSANIE + PIASEK + ZEOLITY (AKTYWNA REMEDIACJA).....	91
6.1	Specyfikacja techniczna	91
6.2	Uzasadnienie merytoryczne i koszty	92
6.3	INTEGRACJA DANYCH ŹRÓDŁOWYCH.....	92
6.3.1	Badania przedoperacyjne	93
6.3.2	Luki informacyjne	93
6.4	ZAŁOŻENIA PROJEKTOWE I OGRANICZENIA.....	93
6.4.1	Założenia techniczne	93
6.4.2	Założenia logistyczne	94
6.4.3	Założenia kosztowe.....	94
6.4.4	Ograniczenia operacyjne	94
6.5	METODYKA TECHNICZNA WARIANTU Z7	94
6.5.1	ETAP 1 – Odsysanie paliwa z zastoisk	94
6.5.2	ETAP 2 – Warstwa izolacyjna z piasku (capping)	95
6.5.3	ETAP 3 – Warstwa zeolitowa (aktywna remediacja).....	95
6.6	PEŁNY PAKIET OBLICZEŃ	96
6.6.1	Obliczenia objętości i mas	96
6.7	Struktura podziału prac WBS I CBS	96
6.8	SZCZEGÓŁOWE ZESTAWIENIE KOSZTÓW.....	97
6.9	Wskaźniki kosztowe	98
6.10	HARMONOGRAM SZCZEGÓŁOWY.....	98
6.11	PLAN ZASOBÓW	99
6.11.1	Sprzęt kluczowy	99
6.12	Personel kluczowy	99
6.13	RYZYKA I ZARZĄDZANIE RYZYKIEM.....	99
6.14	OCENA SKUTECZNOŚCI I ODDZIAŁYWANIA	100

6.15	BEZPIECZEŃSTWO I HIGIENA PRACY (HSE) / KONTROLA JAKOŚCI (QA/QC) / PROCEDURY OPERACYJNE	100
6.15.1	Plan bezpieczeństwa, higieny pracy i ochrony środowiska (HSE)	100
6.15.2	Plan zapewnienia i kontroli jakości (QA/QC)	100
6.16	PLAN MONITORINGU 10-LETNIEGO	101
6.17	WYMAGANY PAKIET DOKUMENTÓW	101
6.18	LUKI, NIEPEWNOŚCI I DECYZJE WYMAGANE	102
6.19	REKOMENDOWANA KOLEJNOŚĆ PRAC DOKUMENTACYJNYCH	102
6.20	ANEKS: TABELA MASTER	102
7	ZABEZPIECZENIE WRAKU SS STUTTGART W ZATOCE GDAŃSKIEJ - WARIANT W6 REKOMENDOWANY DLA ZABEZPIECZENIA WRAKU – WIELOWARSTWOWA IZOLACJA HYBRYDOWA WRAKU OPRACOWANIE PROJEKTOWO-WYKONAWCZE W6	104
7.1	Specyfikacja techniczna	104
7.2	Parametry techniczne	104
7.3	Koszty i harmonogram	105
CZĘŚĆ 1 - ZABEZPIECZENIE WRAKU SS STUTTGART UWZGLĘDNIAJĄCA RZECZYWISTĄ TOPOGRAFIĘ WRAKU ORAZ PRYZMĘ PIASKOWĄ JAKO ELEMENT WYRÓWNAWCZY		106
7.4	Stan faktyczny	106
7.5	Konsekwencje dla projektu	106
7.6	Przyjęte rozwiązanie	106
7.7	Profil pionowy wraku	106
7.8	Rozwiązanie projektowe – pryzma piaskowa	107
7.8.1	Założenia projektowe pryzmy	107
7.8.2	Wariant 1 – Pryzma podstawowa (h=5 m)	108
7.8.3	Obliczenie objętości piasku	108
7.8.4	Wariant 2 – Pryzma z wycięciem elementów (h=4 m)	109
7.8.5	Obliczenie objętości piasku	109
7.8.6	Koszty prac nurkowych – cięcie elementów	109
7.8.7	Kosztorys pryzmy – Wariant 2	110
7.8.8	Wariant 3 – Pryzma o nieregularnym kształcie	110
7.8.9	Obliczenie objętości i kosztów piasku	110
7.8.10	Wariant 4 – Scenariusz awaryjny z paliwem ciężkim	111
7.8.11	Procedura usunięcia paliwa ciężkiego	111
7.9	Warstwy ochronne – przeliczenie dla topografii wzgórza	112
7.9.1	Obliczenie powierzchni warstw ochronnych	112

7.9.2	Specyfikacja materiałowa warstw ochronnych	112
7.9.3	Kosztorys warstw ochronnych	113
7.10	Prace dodatkowe.....	113
7.10.1	Prace nurkowe – cięcie elementów wystających (dotyczy Wariantu 2)	113
7.10.2	Scenariusz awaryjny – usunięcie paliwa ciężkiego (HFO)	114
7.11	Kosztorys zbiorczy – porównanie wariantów	115
7.12	Harmonogram realizacji	115
7.13	Analiza ryzyk.....	116
7.14	Rekomendacje	116
7.14.1	Rekomendowany wariant realizacji	116
7.14.2	Wariant alternatywny.....	117
7.14.3	Rekomendacje dodatkowe	117
7.15	Załączniki i podstawy obliczeniowe.....	117
7.15.1	Źródła danych kosztowych	117
7.15.2	Kluczowe stawki przyjęte do obliczeń (P50, EUR 2025).....	117
7.15.3	Założenia obliczeniowe.....	118
CZĘŚĆ 2 - ZABEZPIECZENIE WRAKU SS STUTTGART W ZATOCE GDAŃSKIEJ - WIELOWARSTWOWA IZOLACJA HYBRYDOWA		
		119
8	STRESZCZENIE WYKONAWCZE	119
8.1	Cel opracowania i zakres.....	120
8.2	Zakres przedmiotowy.....	120
8.3	Ograniczenia opracowania	120
8.4	Metodologia.....	120
8.5	Opis obiektu, stanu wyjściowego i kontekstu środowiskowego	121
8.5.1	Dane identyfikacyjne wraku	121
8.6	Stan wyjściowy i zagrożenia	121
8.7	Kontekst środowiskowy	121
8.8	Miejsce wariantu W6 w całej logice postępowania	122
8.9	Porównanie wariantów W1–W6 i uzasadnienie wyboru W6.....	122
8.10	Wykres porównawczy kosztów	123
8.11	Analiza wielokryterialna	123
8.12	Wykres radarowy	124
8.13	Uzasadnienie wyboru W6	124

8.14	Założenia projektowe do W6.....	125
8.15	Założenia środowiskowe i operacyjne.....	125
8.16	Obliczenia geometryczne i materiałowe W6.....	126
8.16.1	Powierzchnia robocza.....	126
8.16.2	Warstwa 1 – Geotekstyl separacyjny.....	126
8.16.3	Warstwa 2 – Piasek morski.....	126
8.16.4	Warstwa 3 – Geomembrana HDPE.....	126
8.16.5	Warstwa 4 – Narzut kamienny.....	126
8.17	Obliczenia inżynierskie – stateczność i obciążenia.....	127
8.17.1	Obciążenie dna masą cappingu.....	127
8.17.2	Stateczność narzutu kamiennego na prądy denne.....	127
8.17.3	Osiadanie warstwy piaskowej.....	128
8.17.4	Analiza przepływu przez warstwę izolacyjną.....	128
8.18	Technologia wykonania W6 – krok po kroku.....	129
8.18.1	Etap 1: Mobilizacja floty i sprzętu (7–10 dni).....	129
8.18.2	Etap 2: Badania wstępne i przygotowanie (5–7 dni).....	129
8.18.3	Etap 3: Układanie geotekstyli – warstwa 1 (7–10 dni).....	129
8.18.4	Etap 4: Zrzut piasku – warstwa 2 (12–18 dni).....	129
8.18.5	Etap 5: Niwelacja piasku (5–8 dni).....	129
8.18.6	Etap 6: Układanie i spawanie geomembrany HDPE – warstwa 3 (15–20 dni).....	130
8.18.7	Etap 7: Kontrola szczelności spawów (3–5 dni).....	130
8.18.8	Etap 8: Układanie narzutu kamiennego – warstwa 4 (10–15 dni).....	130
8.18.9	Etap 9: Badania końcowe i dokumentacja (5–7 dni).....	130
8.18.10	Etap 10: Demobilizacja (3–5 dni).....	130
8.19	Odsysanie paliwa jako etap warunkowy przed W6 (Decision Gate).....	131
8.19.1	Logika Decision Gate.....	131
8.19.2	Relacja kryterium progowego 50 t a pojęcie "dużych ilości paliwa".....	132
8.19.3	Warunki obligatoryjności odsysania.....	132
8.19.4	Analogia z zastoisk.....	133
8.20	Sprzęt, jednostki pływające, zasoby ludzkie i kompetencje.....	134
8.21	Szczegółowy kosztorys.....	135
8.22	Harmonogram bazowy i rozszerzony.....	137
8.22.1	Diagram Gantta.....	138

8.22.2	Harmonogram rozszerzony (z Decision Gate).....	138
8.23	Analiza ryzyk.....	138
8.23.1	Metodyka	138
8.23.2	Rejestr ryzyk	139
8.23.3	Macierz ryzyk – wykres graficzny	141
8.24	Plan monitoringu i kontroli jakości	141
8.25	Kryteria odbioru i potwierdzenia skuteczności	142
8.26	Analiza korzyści i zagrożeń.....	143
8.26.1	Korzyści.....	143
8.26.2	Zagrożenia i ograniczenia	143
8.27	Analiza trwałości i kosztu cyklu życia (LCC)	143
8.28	Koszt cyklu życia (LCC) – 50 lat	144
8.29	Decyzje krytyczne przed rozpoczęciem realizacji	144
8.30	Wnioski końcowe	145
8.31	PODSUMOWANIE KOSZTÓW ŁĄCZNYCH	146
9	REMEDIACJA OSADÓW DENNYCH W REJONIE WRaku S/S STUTTGART - OBSZAR A - WARIANT III.C.....	147
9.1	Streszczenie zarządcze	147
9.2	Cel działań.....	147
9.3	Charakter skażenia	147
9.4	Wybrany wariant.....	147
9.5	Rekomendacja dla Obszaru A.....	148
9.5.1	Koszty orientacyjne - Obszar A (Wariant III.C)	148
9.5.2	Horyzont czasowy.....	148
9.5.3	Główne ryzyka	148
9.6	Integracja danych wejściowych.....	149
9.6.1	Charakter zanieczyszczeń	149
9.6.2	Warunki hydrodynamiczne.....	149
9.6.3	Dane pewne / szacowane / brakujące.....	149
9.7	Weryfikacja i normalizacja danych.....	150
9.7.1	Spójność kosztowa	150
9.7.2	Normalizacja do kosztorysowania	150
9.8	Założenia projektowe	150
9.8.1	Założenia techniczne	150

9.8.2	Założenia logistyczne	151
9.8.3	Założenia środowiskowe	151
9.8.4	Założenia kosztowe	151
9.8.5	Założenia formalno-administracyjne	151
9.9	Scenariusze technologiczne dla Obszaru A	152
9.9.1	Wariant III.C - Bioremediacja + Capping aktywny (WYBRANY)	152
9.9.2	Etapy operacyjne	152
9.9.3	Decyzje wejściowe	152
9.9.4	Warunki uruchomienia	152
9.9.5	Ograniczenia	153
9.9.6	Spodziewany efekt	153
9.9.7	Warianty odrzucone (III.D-A, III.D-B)	153
9.10	Szczegółowa metodyka techniczna	153
9.10.1	Etap I Badania przedoperacyjne	153
9.10.2	Etap 2 - Przygotowanie obszaru	154
9.10.3	Etap 3 - Capping aktywny	154
9.10.4	Etap 4 - Odbiory i stabilizacja	154
9.10.5	Etap 5 - Monitoring długoterminowy	155
9.11	Obliczenia techniczne	155
9.11.1	Powierzchnie	155
9.11.2	Objętości - Capping aktywny (III.C)	155
9.11.3	Czas realizacji - podsumowanie (Wariant III.C)	156
9.12	WBS i CBS - Struktura podziału prac i kosztów	156
9.12.1	WBS - Struktura podziału prac (Wariant III.C)	156
9.12.2	CBS - Struktura kosztów dla Obszaru A (Wariant III.C)	157
9.13	Szczegółowe zestawienia kosztów	157
9.13.1	Podsumowanie CAPEX / OPEX / NPV (Wariant III.C)	157
9.13.2	Weryfikacja z danymi źródłowymi NPV	158
9.14	Harmonogram	158
9.14.1	Harmonogram ogólny (Wariant III.C)	158
9.14.2	Ścieżka krytyczna	158
9.14.3	Bufory czasowe i sezonowość	158
9.15	Zasoby	159

9.15.1	Sprzęt kluczowy (Wariant III.C)	159
9.15.2	Personel kluczowy	159
9.16	Ryzyka i zarządzanie ryzykiem	159
9.16.1	Pełny rejestr ryzyk (Wariant III.C)	159
9.16.2	Macierz ryzyka	160
9.17	Ocena skuteczności	161
9.17.1	Ocena skuteczności Wariantu III.C	161
9.17.2	Prognoza redukcji WWA - scenariusz z remediacją (III.C)	161
9.18	HSE / QA / QC / Procedury operacyjne	161
9.18.1	Bezpieczeństwo morskie (HSE)	161
9.18.2	Ochrona środowiska	162
9.18.3	QA/QC	162
9.18.4	Procedury operacyjne	162
9.18.5	Wymagany pakiet dokumentów	162
9.18.6	Rekomendowana kolejność prac dokumentacyjnych i wykonawczych	163
9.19	Rekomendacja końcowa	164
9.19.1	Rekomendacja dla Obszaru A	164
9.19.2	Uzasadnienie wyboru Wariantu III.C	164
9.19.3	Uzasadnienie środowiskowe	164
9.19.4	Uzasadnienie kosztowe	164
9.19.5	Uzasadnienie organizacyjne	164
9.19.6	Warianty odrzucone	165
9.19.7	Warunki przejścia na wariant III.D-A	165
9.19.8	Elementy wymagające pilnego doszacowania	165
9.20	Minimalny zestaw danych dodatkowych potrzebnych do finalizacji pełnej dokumentacji	165
9.20.1	Podsumowanie danych krytycznych przed startem	165
9.21	NOTA KOŃCOWA	166
10	REMEDIACJA OSADÓW DENNYCH W REJONIE WRaku S/S STUTTGART - OBSZAR B - WARIANT III.C	168
10.1	Streszczenie zarządcze	168
10.2	Cel działań	168
10.3	Charakter skażenia	168
10.4	Analizowane wariant	169
10.4.1	Rekomendowany wariant	169

10.4.2	Koszt orientacyjny – Obszar B.....	169
10.4.3	Horyzont czasowy.....	169
10.4.4	Integracja danych wejściowych	170
10.4.5	Specyfika Obszaru B jako strefy przejściowej	170
10.5	Weryfikacja i normalizacja danych	171
10.5.1	Spójność powierzchniowa	171
10.5.2	Spójność kosztowa	171
10.5.3	Normalizacja do dalszego kosztorysowania	172
10.6	Założenia projektowe	172
10.6.1	Założenia techniczne	172
10.6.2	Założenia logistyczne	173
10.6.3	Założenia środowiskowe.....	173
10.6.4	Założenia kosztowe.....	174
10.6.5	Założenia formalno-administracyjne	174
10.7	Scenariusze technologiczne dla Obszaru B.....	174
10.7.1	Wariant III.C – Bioremediacja + Capping aktywny (REKOMENDOWANY)	174
10.7.2	Decyzje wejściowe i warunki uruchomienia.....	175
10.7.3	Spodziewany efekt.....	175
10.8	Warianty odrzucone (III.D-A i III.D-B)	175
10.9	Szczegółowa metodyka techniczna	175
10.9.1	Etap badań przedoperacyjnych	175
10.9.2	Etap przygotowania obszaru	176
10.9.3	Etap cappingu aktywnego (III.C)	176
10.9.4	Etap stabilizacji warstw.....	176
10.9.5	Etap odbiorów	177
10.9.6	Etap monitoringu długoterminowego	177
10.10	Obliczenia techniczne.....	178
10.10.1	Powierzchnie i objętości	178
10.10.2	Czasy realizacji	178
10.11	Struktura podziału prac WBS i CBS.....	179
10.11.1	Struktura kosztów (CBS)	180
10.12	Szczegółowe zestawienia kosztów.....	180
10.12.1	Analiza NPV (30 lat, stopa 3%).....	181

10.13	Harmonogram	182
10.14	Ścieżka krytyczna.....	182
10.14.1	Bufory czasowe i sezonowość	182
10.15	Zasoby	183
10.16	Ryzyka i zarządzanie ryzykiem	183
10.16.1	Pełny rejestr ryzyk.....	183
10.16.2	Podsumowanie profilu ryzyka.....	184
10.17	Ocena skuteczności	185
10.17.1	Skuteczność krótkoterminowa (0–5 lat)	185
10.17.2	Skuteczność długoterminowa (5–30 lat)	185
10.17.3	Wpływ na biotę i ryzyko wtórne	185
10.18	HSE / QA / QC / Procedury operacyjne	186
10.18.1	Bezpieczeństwo morskie (HSE)	186
10.18.2	Ochrona środowiska	186
10.18.3	QA/QC.....	186
10.18.4	Procedury operacyjne.....	186
10.19	Wymagany pakiet dokumentów	187
10.20	Rekomendowana kolejność prac dokumentacyjnych i wykonawczych	187
10.21	Rekomendacja końcowa	188
10.21.1	Rekomendacja bazowa dla Obszaru B	188
10.21.2	Uzasadnienie środowiskowe.....	188
10.21.3	Uzasadnienie kosztowe.....	188
10.21.4	Uzasadnienie organizacyjne.....	188
10.21.5	Warunki przejścia na wariant III.D-A.....	188
10.21.6	Elementy wymagające pilnego doszacowania	189
10.22	Minimalny zestaw danych dodatkowych potrzebnych do finalizacji pełnej dokumentacji	189
10.22.1	Dane WYSOKIEGO priorytetu	189
10.22.2	Dane ŚREDNIEGO priorytetu	190
10.23	NOTA KOŃCOWA	190
11	REMEDIACJA OSADÓW DENNYCH W REJONIE WRaku S/S STUTTGART - OBSZAR C - WARIANT III.0.....	191
11.1	Streszczenie zarządcze	191
11.2	Cel działań	191
11.3	Charakter skażenia	191

11.4	Logika postępowania.....	191
11.5	Analizowane warianty	192
11.6	1.5. Rekomendowany wariant.....	192
11.7	Koszt orientacyjny - Obszar C	193
11.8	Horyzont czasowy	193
11.9	Główne ryzyka i korzyści.....	193
11.10	Integracja danych wejściowych	193
11.10.1	Specyfika Obszaru C jako strefy najniższego skażenia.....	194
11.11	Weryfikacja i normalizacja danych	194
11.11.1	Spójność powierzchniowa	194
11.11.2	Spójność kosztowa.....	195
11.11.3	Normalizacja do dalszego kosztorysowania.....	195
11.12	Założenia projektowe	195
11.12.1	Założenia techniczne.....	195
11.12.2	Założenia logistyczne	196
11.12.3	Założenia środowiskowe	196
11.12.4	Założenia kosztowe	196
11.12.5	Założenia formalno-administracyjne	196
11.12.6	Scenariusze technologiczne dla Obszaru C	197
11.13	5.1. Wariant III.0 - Tylko monitoring (bez działań remediacyjnych) - WYBRANY.....	197
11.13.1	5.1.1. Założenia i uzasadnienie	197
11.13.2	Harmonogram monitoringu.....	198
11.13.3	Zakres kampanii monitoringowej	198
11.13.4	Triggery uruchomienia działań remediacyjnych	198
11.13.5	Spodziewany efekt.....	199
11.13.6	Warianty odrzucone - podsumowanie	199
11.14	Szczegółowa metodyka techniczna	200
11.14.1	Triggery i procedury eskalacji	200
11.15	Obliczenia techniczne.....	201
11.15.1	Monitoring - obliczenia dla wariantu III.0 (Tylko monitoring)	201
11.15.2	Koszt pojedynczej kampanii monitoringowej (wariant III.0).....	201
11.15.3	WBS i CBS (Struktura Podziału Prac i Kosztów).....	203
11.16	Szczegółowe zestawienia kosztów.....	204

11.16.1	Wariant III.0 - Harmonogram ramowy	206
11.16.2	Wpływ pogody i sezonowości	206
11.17	Zasoby	207
11.18	Ryzyka i zarządzanie ryzykiem	207
11.18.1	Rejestr ryzyk - Wariant III.0 (Tylko monitoring)	207
11.18.2	Macierz ryzyka porównawcza	208
11.18.3	Ocena skuteczności	209
11.19	HSE / QA / QC / Procedury operacyjne	210
11.19.1	Bezpieczeństwo morskie (HSE)	210
11.19.2	Ochrona środowiska	210
11.19.3	Kontrola jakości (QA/QC)	210
11.19.4	Procedury odbiorowe	211
11.20	Wymagany pakiet dokumentów	211
11.21	Rekomendowana kolejność prac dokumentacyjnych i wykonawczych	212
11.22	Rekomendacja końcowa	212
11.22.1	Rekomendacja bazowa dla Obszaru C	212
11.22.2	Triggery do eskalacji	213
11.22.3	Strategia fazowa dla Obszaru C	214
11.23	Informacja o odrzuconych wariantach	214
11.23.1	Uzasadnienie kosztowe	215
11.24	Minimalny zestaw danych dodatkowych potrzebnych do finalizacji pełnej dokumentacji	215
11.24.1	Minimalna kampania badawcza przed startem - Obszar C	215
11.24.2	Decyzje kluczowe zależne od wyników badań	217
12	WPŁYW PLANOWANEJ DZIAŁALNOŚCI NA STAN ŚRODOWISKA MORSKIEGO	218
12.1	1. Syntetyczne zestawienie wariantów (Z, W, III)	218
12.2	Analiza oddziaływania – faza realizacji (krótkoterminowa)	222
12.2.1	Resuspensja osadów	222
12.2.2	Mętność wody	222
12.2.3	Hałas podwodny	222
12.2.4	Ryzyko uwolnienia HFO podczas prac	223
12.2.5	Mechanizmy mitygacji określone w PNZ	224
12.3	Analiza oddziaływania – faza eksploatacji (długoterminowa)	225
12.3.1	Redukcja bioekspozycji na WWA i TPH	225

12.3.2	Stabilizacja dna morskiego	225
12.3.3	Rekolonizacja bentosu	226
12.3.4	Eliminacja ryzyka katastrofalnego wycieku	226
12.3.5	Weryfikacja hipotezy ciągłej emisji paliwa	226
12.3.6	Odniesienie do celów środowiskowych i ram regulacyjnych	227
12.4	Studium przypadku: wariant „zero” (III.0) – analiza zaniechania vs. monitoring pasywny	228
12.4.1	Skutki zaniechania działań aktywnych w Strefach A i B	228
12.4.2	Adekwatność monitoringu pasywnego w Strefie C	229
12.5	Głęboka analiza wybranych wariantów	229
12.5.1	Wariant Z7 (Zastoiska paliwa HFO) – Wpływ usunięcia wolnej fazy paliwa i aktywnego cappingu na chemię wody i osadów	230
12.5.2	Wariant W6 (Zabezpieczenie wraku) – Skuteczność wielowarstwowej izolacji hybrydowej jako bariery ekologicznej	232
12.5.3	Wariant III.C (Obszary A i B) – Analiza korzyści z aktywnej remediacji i cappingu w strefach najwyższego skażenia	234
12.5.4	Wariant III.0 (Obszar C) – Uzasadnienie środowiskowe dla strategii monitoringu pasywnego	235
SPIS ILUSTRACJI		238
SPIS TABEL		239

Słowniczek dla decydentów: Projekt Stuttgart (Zestawienie alfabetyczne)

Poniższa tabela łączy definicje techniczne, praktyczne skutki oraz obrazowe analogie, ułożone w kolejności alfabetycznej, aby ułatwić szybkie odnalezienie kluczowych terminów.

Pojęcie	Co to jest? (Definicja)	Co to oznacza w praktyce?	Analogia / Krótka uwaga
ALARP	Redukcja ryzyka do poziomu „tak nisko, jak to rozsądnie osiągalne”.	Nie szukamy idealnej czystości za miliardy, ale optymalnego bezpieczeństwa przy rozsądnych kosztach.	Zasada zdrowego rozsądku – nie budujesz bunkra przeciw deszczowi, ale stawiasz solidny dach.
Bioremedia-cja	Wykorzystanie bakterii i mikroorganizmów do rozkładu zanieczyszczeń.	„Zatrudnienie naturalnych sprzątaczy”. Metoda ekologiczna i mało inwazyjna, ale czasami proces trwa dziesięciolecia.	Kompostowanie problemu – natura robi swoje, ale potrzebuje sporo czasu.
Capping (pasywny)	Przykrycie skażonego obszaru warstwą materiału (np. piasek, kruszywo).	„Przykrycie śmietnika pokrywką”. Zapobiega rozprzestrzenianiu się trucizn, ale nie usuwa ich spod spodu.	Koc ochronny – ostonia fizycznie, ale nie neutralizuje chemii.
Capping aktywny	Przykrycie osadów materiałem, który chemicznie wiąże trucizny.	„Inteligentny plaster”. Nie tylko załata „ranę” na dnie, ale aktywnie wyłapuje toksyny, by nie przesiąkały do wody.	Filtr + pokrywa – nie tylko załata, ale też „łapie” truciznę w pułapkę. Umożliwia bakteriom rozkład paliwa.
Dredging	Mechaniczne wydobywanie (wybranie) skażonego gruntu z dna.	„Generalne porządki łopata”. Najskuteczniej usuwa masę zanieczyszczeń, ale jest najdroższe i najbardziej ryzykowne.	Wykopaliska – skuteczne, ale podczas kopania najłatwiej o „zakurzenie” całej okolicy.
ETW	Okna czasowe uwarunkowane przyrodniczo (Environmental Time Windows).	„Kalendarz przyrody”. Prace można prowadzić tylko wtedy, gdy ryby nie mają tarta, a ptaki nie gniazdują.	Wąskie okno szansy – prześnięcie terminu oznacza rok płacenia za gotowość sprzętu.
HFO / Smoła pogazowa	Ciężkie, lepkie paliwo okrętowe (Heavy Fuel Oil).	„Czarna maź” zalegająca we wraku. W zimnej wodzie jest gęsta, ale stale i powoli zatruwa otoczenie.	Lepki problem – jak smoła, która nie rozpuszcza się łatwo i brudzi wszystko dookoła.
Hot-tapping/odsysanie paliwa	Wiercenie w kadłubie pod wodą i odsysanie paliwa ze zbiorników.	„Operacja na otwartym sercu”. Jedyny sposób, by usunąć źródło problemu, zanim kadłub całkiem przerdzewieje.	Odsysanie paliwa z baku – bez konieczności wyciągania całego wraku na powierzchnię.
Interwencja	Działania mające na celu zmniejszenie ryzyka związanego z wrakiem.	Może to być odsysanie paliw, zabezpieczanie dna lub wprowadzenie zakazów połowu i kotwiczenia.	Zabezpieczenie awarii – najpierw powstrzymujemy skutki, potem planujemy sprzątanie.

Pojęcie	Co to jest? (Definicja)	Co to oznacza w praktyce?	Analogia / Krótka uwaga
Monitoring	Regularne pomiary wody, osadów i organizmów morskich.	„Badania kontrolne”. Pokazują, czy sytuacja się poprawia i czy podjęte działania przynoszą skutek.	„Okresowe badanie krwi” – pozwala sprawdzić stan zdrowia ekosystemu.
Resuspensja	Wzbudzenie osadów z dna do toni wodnej.	„Efekt zakurzonego dywanu”. Jeśli zaczniemy gwałtownie pracować przy dnie, trucizny wzbiją się i prądy rozniosą je po zatoce.	Chmura pyłu – na chwilę wszędzie jest go więcej, mimo że chcieliśmy posprzątać.
Scenariusz „Nic nie robimy”	Zaniechanie działań i pozostawienie wraku własnemu losowi.	„Czekanie na katastrofę”. Prędzej czy później dojdzie do wycieku, który zamknie plażę i zniszczy turystykę na lata.	Tykająca bomba – zaniechanie to też decyzja, niosąca największe ryzyko wizerunkowe i finansowe.
Strefowanie A/B/C	Podział obszaru na strefy o różnym poziomie skażenia.	Pozwala oszczędzić pieniądze, skupiając najdroższe działania w „epicentrum” (Strefa A), a na obrzeżach tylko monitorując.	Mapa pożaru – wyznacza, gdzie trzeba gasić natychmiast, a gdzie tylko pilnować ognia.
UXO	Niewybuchy i niewypały (miny, torpedy, amunicja).	„Podwodne pułapki”. Każda próba prac bez ich usunięcia to ryzyko eksplozji, zniszczenia sprzętu i śmierci ludzi.	Mina w ogrodzie – bez saperów nie wolno wbijać łopaty w ziemię.
WWA	Toksyczne i rakotwórcze związki chemiczne (Węglowodory Aromatyczne).	„Trujący osad”, który nie znika. Wnika w dno i ryby, trafiając ostatecznie do łańcucha pokarmowego ludzi.	Niewidoczna trucizna – zostaje w środowisku na bardzo długo i realnie szkodzi zdrowiu.

Zaleca się podejście hybrydowe z gradacją interwencji proporcjonalną do poziomu zagrożenia potwierdzonego badaniami 2025–2026:

- 1) w Strefie A – usunięcie paliwa z zastoisk i wraku (Z7 + W6), gdzie bez eliminacji źródła emisji naturalne samooczyszczanie jest niemożliwe;
- 2) w Strefie B – capping aktywny („inteligentny plaster”) ograniczający bioekspozycję i wspomagający bioremediację (III.C);
- 3) w Strefie C – wyłącznie monitoring (III.0), gdyż wyniki badań potwierdzają skuteczne procesy samooczyszczania i zbliżenie do tła naturalnego. Podejście to łączy maksymalną skuteczność środowiskową z unikaniem ryzykownych operacji technicznych tam, gdzie nie są one uzasadnione skalą skażenia.

Priorytet wykorzystania procesów naturalnych: tam, gdzie wyniki badań 2025 potwierdzają skuteczne samooczyszczanie (atenuacja 2–5%/rok, stężenia zbliżone do tła), rezygnuje się z interwencji technicznych na rzecz monitoringu (wariant III.0). Interwencja techniczna jest podejmowana wyłącznie w przypadku stwierdzenia przekroczeń norm TEL/PEL uniemożliwiających osiągnięcie celów RDW w akceptowalnym horyzoncie czasowym.

DEFINICJE SKRÓTÓW I POJĘĆ

Skrót	Rozwinięcie (angielski)	Znaczenie (polski)
AHP	Analytic Hierarchy Process	Metoda hierarchicznej analizy wielokryterialnej do rankingu wariantów.
ALARP	As Low As Reasonably Practicable	Redukcja ryzyka do poziomu tak niskiego, jak to racjonalnie osiągalne.
AMW	Academy of Navy	Akademia Marynarki Wojennej.
CAPEX	Capital Expenditure	Nakłady inwestycyjne (koszty jednorazowe realizacji).
CBS	Cost Breakdown Structure	Struktura podziału kosztów projektu.
DP / DP2	Dynamic Positioning	System dynamicznego pozycjonowania statku (klasa 2 zapewnia wyższą niezawodność).
DSV	Diving Support Vessel	Specjalistyczny statek wsparcia prac nurkowych.
EOD	Explosive Ordnance Disposal	Neutralizacja niewybuchów i niewypatów (rozminowanie).
ETW	Environmental Time Windows	Okna czasowe uwarunkowane przyrodniczo (np. okresy ochronne ryb).
GES	Good Environmental Status	Dobry Stan Środowiska (cel wynikający z dyrektywy MSFD).
GIOŚ	Chief Inspectorate for Environmental Protection	Główny Inspektorat Ochrony Środowiska.
HDPE	High-Density Polyethylene	Polietylen o wysokiej gęstości (materiał na geomembrany izolacyjne).
HEL-COM	Helsinki Commission	Komisja Helsińska (ochrona środowiska morskiego Bałtyku).
HFO	Heavy Fuel Oil	Ciężki olej opałowy (paliwo zalegające we wraku).
HSE	Health, Safety and Environment	Bezpieczeństwo, higiena pracy i ochrona środowiska.
IMCA	International Marine Contractors Association	Międzynarodowe stowarzyszenie wykonawców prac morskich (standardy nurkowe).
KPO	National Recovery Plan	Krajowy Plan Odbudowy i Zwiększania Odporności.
LCC	Life Cycle Cost	Koszt cyklu życia (całkowity koszt utrzymania w długim terminie).
MBES	Multi-Beam Echo Sounder	Echosonda wielowiązkowa (do precyzyjnego mapowania dna).
MSFD	Marine Strategy Framework Directive	Dyrektywa Ramowa w sprawie Strategii Morskiej (2008/56/WE).
NPV	Net Present Value	Wartość bieżąca netto (wskaźnik opłacalności/kosztów zdyskontowanych).
NTU	Nephelometric Turbidity Unit	Jednostka mętności wody.
OOŚ	Environmental Impact Assessment (EIA)	Ocena Oddziaływania na Środowisko.
OPEX	Operational Expenditure	Koszty operacyjne (bieżące utrzymanie i monitoring).
OSCP	Oil Spill Contingency Plan	Plan zwalczania rozlewów olejowych.
PNZ	Hazard Neutralization Plan	Plan Neutralizacji Zagrożeń.

Skrót	Rozwinięcie (angielski)	Znaczenie (polski)
PRB	Permeable Reactive Barrier	Przepuszczalna bariera reaktywna.
QA/QC	Quality Assurance / Quality Control	Zapewnienie i kontrola jakości.
RACI	Responsible, Accountable, Consulted, Informed	Macierz odpowiedzialności w projekcie.
RDOŚ	Regional Directorate for Environmental Protection	Regionalna Dyrekcja Ochrony Środowiska.
RDW	Water Framework Directive	Ramowa Dyrektywa Wodna.
ROV	Remotely Operated Vehicle	Zdalnie sterowany pojazd podwodny.
RPN	Risk Priority Number	Liczba priorytetowa ryzyka (wskaźnik w analizie FMEA).
SBP	Sub-Bottom Profiler	Profilograf osadów dennych (do badania struktury pod dnem).
SES	Sediment Echo Sounder	Echosonda osadów (parametryczna).
SIMOPS	Simultaneous Operations	Operacje jednoczesne (prowadzenie wielu prac w jednym rejonie).
SOP	Standard Operating Procedure	Standardowa procedura operacyjna.
SSS	Side Scan Sonar	Sonar boczny (do obrazowania powierzchni dna).
TCO	Total Cost of Ownership	Całkowity koszt posiadania (suma CAPEX i OPEX).
TEL / PEL	Threshold / Probable Effect Level	Progi toksyczności osadów (normy jakości środowiska).
TPH	Total Petroleum Hydrocarbons	Suma węglowodorów ropopochodnych.
TSHD	Trailing Suction Hopper Dredger	Pogłębiarka ssąca nasiębierna.
UM	Maritime Office	Urząd Morski (np. w Gdyni).
UXO	Unexploded Ordnance	Niewypały i niewybuchy.
WBS	Work Breakdown Structure	Struktura podziału prac.
WWA	Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH)	Wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (toksyczne związki).

1 STRESZCZENIE WYKONAWCZE (EXECUTIVE SUMMARY)

Niniejszy rozdział stanowi syntetyczne zestawienie kluczowych ustaleń, rekomendacji i parametrów projektu neutralizacji zagrożeń środowiskowych związanych z wrakiem S/S Stuttgart w Zatoce Gdańskiej. Dokument adresowany jest do decydentów, inżynierów oraz organów regulacyjnych i zawiera kompletny przegląd skali problemu, analizowanych wariantów działań naprawczych, rekomendowanego podejścia hybrydowego, harmonogramu, budżetu oraz kluczowych ryzyk.

1.1 Kontekst projektu

Lokalizacja wraku. S/S Stuttgart – statek pasażerski (Reichspostdampfer) o długości 168 m i szerokości 20 m, zatopiony w 1943 roku w wyniku działań wojennych. Pozostałości wraku zalegają na dnie Zatoki Gdańskiej, Morze Bałtyckie, na głębokości 22–24 m p.p.m. Obszar skażony wokół wraku obejmuje łącznie ok. 41,8 ha -2016 (≈ 45 ha - 2025), podzielony na trzy strefy o zróżnicowanym stopniu skażenia (A/B/C).

Podstawa prawna. Projekt realizowany jest w ramach Krajowego Planu Odbudowy i Zwiększania Odporności (KPO), Komponent B3.2.1 – „Inwestycje w neutralizację zagrożeń ze strony obiektów zatopionych na dnie Morza Bałtyckiego”. Projekt wpisuje się w zobowiązania międzynarodowe Polski wynikające z: Dyrektywy Ramowej w sprawie Strategii Morskiej (MSFD 2008/56/WE), rekomendacji HELCOM, wymogów sieci Natura 2000 oraz Ramowej Dyrektywy Wodnej (RDW).

Etapy projektu. Plan Neutralizacji Zagrożeń (PNZ) przyjmuje trójstopniowe podejście realizowane w logicznej sekwencji działań:

- **GRUPA I** (Warianty Z1–Z7): Neutralizacja 16 zidentyfikowanych zastoisk paliwa HFO/smoły pogazowej w bezpośrednim otoczeniu wraku (łączna powierzchnia ~978 m², objętość paliwa 98–196 m³).
- **GRUPA II** (Warianty W1–W6): Izolacja samego wraku wielowarstwową strukturą cappinową (powierzchnia robocza 8 850 m²).
- **GRUPA III** (Warianty III.0–III.D-B): Remediacja skażonych osadów dennych na całym obszarze 41,8 ha (≈ 45 ha) w strefach A/B/C.

Analiza trendów i zagrożeń dla infrastruktury. Postępująca korozja pozostałości wraku generuje ryzyko dalszego uwolnienia paliwa resztkowego z zastoisk i potencjalnie ze zbiorników wraku (ilość paliwa w zbiornikach nieznana – wymaga weryfikacji inspekcją ROV zgodnie z Decision Gate). Wyniki badań 2025 r. potwierdzają lokalny charakter skażenia (~45 ha), bez mierzalnego wpływu na otoczenie. Uwolnione z osadów wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA) ulegają chronicznej emisji do kolumny wody i bioakumulacji w łańcuchu troficznym (bentos → ryby denne → ryby drapieżniki → ludzie). Horyzonty czasowe naturalnej regeneracji różnią się w zależności od strefy:

1) Strefa A (~8 ha, wysokie skażenie z obecnością źródła emisji) – bez eliminacji zastoisk i wraku naturalna regeneracja może wymagać >50 lat lub nie nastąpić w ogóle (zależnie od ciągłości emisji paliwa). Szczegółowa weryfikacja hipotezy ciągłej emisji paliwa z wraku jest warunkiem koniecznym dalszego precyzowania prognoz (patrz Raport porównawczy prognoz 2025–2100 vs. 2025–2200, dokument z 20.04.2026).

2) Strefa B (~18 ha, wysokie skażenie bez obecności źródła emisji) – bez ingerencji (bioremediacji) naturalna regeneracja może wymagać znacznie więcej niż 50 lat.

3) Strefa C (~19 ha, niskie skażenie) – osiągnięcie celu RDW (II klasa) prognozowane na ~2035–2040 (10–15 lat) wyłącznie dzięki naturalnej atenuacji;

Zasada proporcjonalności interwencji. Dobór rekomendowanych metod został w pełni uzależniony od wyników badań środowiskowych 2025–2026 oraz ich porównania z danymi bazowymi z 2016 r. Wyniki potwierdzają, że w strefie C trwają procesy naturalnej atenuacji (biodegradacja, sorpcja, fotodegradacja) z tempem ~2–5%/rok, co pozwala prognozować osiągnięcie II klasy RDW już ok. 2035–2040 r. bez interwencji technicznej. W konsekwencji dla Strefy C rekomendowany jest wariant III.0 (wyłącznie monitoring). Interwencja aktywna (Z7 + W6 + III.C) jest ograniczona do Strefy A i B, gdzie stężenia WWA przekraczają normy TEL/PEL 10–70-krotnie, a naturalna atenuacja bez usunięcia źródła (zastoisk i wraku) nie zapewnia osiągnięcia celów regulacyjnych w akceptowalnym horyzoncie czasowym.

Dlaczego teraz? Zbieżność trzech czynników wymusza podjęcie działań w obecnym oknie czasowym:

- dostępność finansowania z KPO,
- zaawansowany stan korozji wraku zwiększający ryzyko dalszego (prawdopodobnego) powolnego wycieku paliwa ciężkiego, co potwierdzone jest istnieniem „jeziorek zastoiskowych”.

Odkładanie działań zwiększa zarówno koszty remediacji (wzrost skali skażenia, degradacja wraku), jak i ryzyko wtórnego rozprzestrzeniania zanieczyszczeń na sąsiednie obszary morskie w obrębie polskiej strefy ekonomicznej (transport zanieczyszczeń prądami dennymi, migracja między strefami A→B→C). Wyniki badań 2025 r. potwierdzają lokalny charakter skażenia (~45 ha) i brak dowodów na oddziaływanie transgraniczne.

1.2 Skala zagrożenia – kluczowe fakty

Skażenie środowiska morskiego w rejonie wraku S/S Stuttgart ma charakter wieloaspektowy i obejmuje zarówno osady denne, jak i kolumnę wody oraz biotę. Poniżej przedstawiono kluczowe parametry ilościowe opisujące skalę problemu.

Tabela 1 Parametry skażenia – wartości średnie, maksymalne i normy referencyjne

Parametr	Wartość średnia	Wartość maksymalna	Norma / Próg referencyjny	Źródło normy
WWA w osadach (Strefa A)	~6 000 µg/kg s.m.	~35 000 µg/kg s.m.	TEL = 1 684 µg/kg PEL = 16 770 µg/kg	NOAA SQuiRT
WWA w osadach (Strefa B)	~1 500–3 000 µg/kg s.m.	~10 000 µg/kg s.m.	ERM = 44 792 µg/kg	NOAA SQuiRT
WWA w osadach (Strefa C)	0,1–1 mg/kg s.m.	~1 000 µg/kg s.m.	Zbliżone do tła naturalnego	—
TPH (Strefa A)	~270 mg/kg	-	-	—
TPH (Strefa B)	~100–180 mg/kg	-	-	—
Toksyczność ekologiczna	Stan ekologiczny IV (Słaby)	70× norma TEL (Strefa A)	II klasa stanu ekologicznego (cel)	RDW

Tabela 2 Lokalizacje hot-spotów z priorytetyzacją

Lokalizacja	Typ zagrożenia	Stężenie WWA	Powierzchnia	Priorytet
Zastoiska paliwowe (16 szt.)	Wolna faza HFO/smoła pogazowa	>10 mg/kg s.m.	978 m ² (rob. 2 500 m ²)	KRYTYCZNY
Wrak S/S Stuttgart	Resztkowe paliwo HFO	Źródło emisji ciągłej	6 300 m ² (pow. wraku)	KRYTYCZNY
Strefa A – otoczenie wraku	Skażone osady denne	~6 000 µg/kg s.m. (śr.)	~8 ha	WYSOKI
Strefa B – strefa przejściowa	Skażone osady denne	1–10 mg/kg s.m.	~18 ha	ŚREDNI
Strefa C – peryferyjna	Niskie skażenie	0,1–1 mg/kg s.m.	~19 ha	NISKI (monitoring)

Tabela 3 Analiza trendów – porównanie danych historycznych z obecnymi

Parametr	Dane historyczne (2016)	Dane aktualne (2025/2026)	Trend	Uwagi
Zasięg skażenia	Mapa 2016 (OE-364)	Obwiednia SBP 2025 szersza	↑ Wzrost	Interpretacja SBP obejmuje szerszą strefę oddziaływania
Liczba zastoisk	-	16 zidentyfikowanych	—	Metodyka: MBES + SSS + SBP + ROV
Obszar skażony łącznie	~41,5 ha	≈ 45 ha	→ Stabilny	Różnica 3,5 ha (~8,4%) – akceptowalna
Stan ekologiczny	Stan ekologiczny IV (Słaby) – Strefa A; III–IV – Strefa B; II–III – Strefa C	IV – Strefa A (hot-spoty); III – Strefa B; II – Strefa C (zbliżony do tła)	↘ Poprawa w strefach B i C; w A stabilny/słaby	W strefach B i C obserwowana naturalna atenuacja WWA ~2–5%/rok (biodegradacja psychrotolerantna, sorpcja, fotodegradacja). W Strefie A – stabilność z powodu ciągłej emisji z zastoisk i (potencjalnie) z wraku. Brak naturalnej regeneracji w horyzoncie 50 lat
Ryzyko nagłego wycieku	wysokie	10–20% w ciągu 10 lat	↘ Poprawa	Postępująca korozja wraku (>80 lat ekspozycji w środowisku Morza Bałtyckiego). Szacunek eks-

Parametr	Dane historyczne (2016)	Dane aktualne (2025/2026)	Trend	Uwagi
				percki 10-20% oparty na: (i) ocenie stanu korozji z badań 2025 r., (ii) analogiach z wrakami stalowymi z II wojny światowej na Morzu Bałtyckim, (iii) braku wyników inspekcji ROV pozostałych zbiorników (warunek weryfikacji: etap M1), (iv) braku dokumentacji stoczniowej po przebudowie jednostki - uniemożliwiającym określenie dokładnej liczby i pojemności zbiorników, które mogły zachować się w gruncie. Niepewność szacunku jest podwyższoną, że względu na fakt rozsądzenia znacznej części zbiorników dennych i brak wiedzy o zbiornikach przydennych burtowych i burtowych. Zakres niepewności: +-5-10 p.p. (może być szerszy). Patrz przypis¹ oraz rozdz. 12.2.4. Zastoiska paliwa zidentyfikowane w 2025 r. są efektem historycznych wycieków, w tym rozsądzenia zbiorników dennych w latach 50. XX w. Szacowane ryzyko (10-20%) dotyczy natomiast przyszłego, nagłego wycieku z potencjalnie zachowanych zbiorników tkwiących w gliniastym gruncie w perspektywie kolejnych 10 lat, wskutek postępującej korozji. Ocena ta obciążona jest znaczną niepewnością ze względu na brak doku-

¹ Metodyka szacunku ryzyka wycieku (10-20%/10 lat): szacunek ekspercki na podstawie: (i) oceny stanu korozji z badań terenowych 2025 r. (Raport Końcowy REV02_16032026); (ii) analogii z dokumentacją wraków stalowych z II wojny światowej w warunkach Morza Bałtyckiego; (iii) obserwowanych zastoisk wolnego paliwa (~98-196 m³) potwierdzających historyczną emisję; (iv) faktu, że wrak leżał na burcie, a znaczna część zbiorników dennych została rozsądzona i usunięta - szacunek dotyczy wyłącznie zbiorników mogących nadal tkwić w gliniastym gruncie (denne resztkowe, przydenne burtowe, burtowe). Brak dokumentacji stoczniowej po przebudowie uniemożliwia dokładne określenie liczby i pojemności pozostałych zbiorników. Wartość nie jest wynikiem formalnej analizy niezawodnościowej. Weryfikacja planowaną w etapie M1 (inspekcja ROV zbiorników tkwiących w gruncie, analiza grubości ścian, modelowanie korozji). Zakres niepewności: +-5-10 p.p. (może być szerszy, że względu na brak dokumentacji).

Parametr	Dane historyczne (2016)	Dane aktualne (2025/2026)	Trend	Uwagi
				mentacji stoczniowej i brak wiedzy o liczbie zachowanych zbiorników.
Stężenie WWA (Strefa C)	wartości zbliżone do tła	0,1–1 mg/kg s.m.	↘ Poprawa (atenuacja ~2–5%/rok)	Prognoza II klasy RDW: 2035–2040 bez interwencji.
Stężenie WWA (Strefa B)	wartości pośrednie	1,5 - 3 mg/kg (śr.)	↘ Stopniowa redukcja	Tempo zbyt wolne do celu RDW bez interwencji (>50 lat).
Stężenie WWA (Strefa A – hotspoty)	wartości bardzo wysokie	do 35 000 µg/kg (70× TEL)	→ Stabilne bardzo wysokie	Ciągła emisja z zastoisk/wraku – uzasadnienie interwencji Z7 + W6

Podsumowanie wniosków z analizy porównawczej 2016 vs. 2025. Zestawienie wyników badań chemicznych, biologicznych i ekotoksykologicznych wskazuje na utrzymującą się stabilność powierzchni skażonej (41,8–45 ha, zmiana <9%), przy jednoczesnej obserwacji postępującej naturalnej atenuacji w strefach peryferyjnych (B i C). W strefie C stężenia WWA zbliżają się do wartości tła naturalnego (0,1–1 mg/kg s.m.), a w strefie B obserwuje się stopniową, choć niewystarczającą z punktu widzenia celów RDW, redukcję stężeń. W strefie A oraz w rejonie zastoisk paliwa i wraku stężenia utrzymują się na poziomie ekstremalnym (do 35 000 µg/kg WWA), co potwierdza ciągły charakter emisji i uzasadnia konieczność eliminacji źródeł emisji (warianty Z7, W6). Te wnioski stanowią bezpośrednią podstawę dla gradacji interwencji A→B→C opisanej w rozdz. 5.

Uwaga metodyczna:

Interpretacja trendów czasowych (2016–2025) oraz prognozowanie rozwoju sytuacji w horyzoncie 2025–2100 jest uzależniona od weryfikacji hipotezy ciągłej emisji paliwa z wraku Stuttgart. Jak wykazał Raport porównawczy prognoz, horyzonty czasowe regeneracji różnią się fundamentalnie w zależności od przyjętego założenia:

1. Model bez ciągłej emisji – cel RDW osiągnięty w 2075 r.;
2. Model z ciągłą emisją paliwa – cel RDW po 2100 r. lub nigdy (w przewidywalnej przyszłości).

Szczegółowa analiza w sekcji „Weryfikacja hipotezy ciągłej emisji paliwa”.

1.2.1 Strefowanie A/B/C

Kluczowym elementem efektywnego wdrażania PNZ jest precyzyjne strefowanie obszaru skażonego, czyli podział terenu wokół wraku na sektory o zróżnicowanym priorytecie i reżimie technologicznym. Skażenie nie rozkłada się równomiernie – bezpośrednio przy wraku występują hotspoty o ekstremalnym stężeniu zanieczyszczeń, podczas gdy na obrzeżach stężenia są bliskie tłu naturalnemu.

Kryteria stref: Podział na strefy A/B/C oparto na następujących kryteriach:

- odległość od wraku,

- stężenie WWA w osadach dennych,
- obecność wolnej fazy paliwa (zastoiska),
- wyniki interpretacji danych SBP i SSS,
- analiza morfometryczna dna (MBES).

Tabela 4 Parametry stref – powierzchnia, objętość osadów, status ekosystemu

Strefa	Po- wierzchnia [ha]	Stężenie WWA	Grubość cappingu	Status ekosys- temu	Działania wymagane
A (hotspoty)	~8	>10 mg/kg s.m.	0,1 m	IV (Słaby) – kry- tyczny	Odsysanie paliwa (Z7) + za- bezpieczenie wraku (W6) + capping aktywny 0,1 m (III.C) – interwencja pełna, uzasad- niona 70× przekroczeniem normy TEL i obecnością wol- nej fazy HFO.
B (przejściowa)	~18	1–10 mg/kg s.m.	0,05–0,1 m	III–IV (Umiarko- wany–Słaby)	Capping aktywny 0,05–0,1 m (III.C) – uzasadniony 5–15× przekroczeniem TEL i tem- pem atenuacji niewystarcza- jącym dla celu RDW <50 lat.
C (peryferyjna)	~19	0,1–1 mg/kg s.m.	0,05 m (op- cjonalnie)	II–III (bliski tłu)	Monitoring pasywny (III.0) + zakaz trałowania – uzasad- niony stężeniami zbliżonymi do tła (0,1–1 mg/kg) i obser- wowaną atenuacją 2– 5%/rok; prognoza celu RDW ~2035–2040 bez interwencji.
ŁĄCZNIE	~45 (41,8)	—	—	—	Podjęcie hybrydowe

1.3 Analiza wariantów

W ramach PNZ przeanalizowano kompletny katalog wariantów działań naprawczych w trzech grupach: warianty Z (zastoiska, UXO Z1–Z8), warianty W (wrak, W1–W6) oraz warianty III (osady dennie, III.0–III.D-B). Poniższa tabela przedstawia porównanie kluczowych wariantów ze wszystkich grup. Wartości dla wariantów wybranych do realizacji przedstawiono w Tabeli 7

Tabela 5 Porównanie wariantów (Master Table)

ID wa- riantu	Opis	CAPEX [EUR]	TCO / NPV (30 lat)	Skutecz- ność [%]	Czas reali- zacji	Kluczowe ryzyka	Reko- menda- cja	Uzasadnienie środowiskowe
Z8	Usuwanie UXO bez de- tonacji	Jeszcze nie usta- lona	-	100%	1 dzień /1 UXO	Eksplzja UXO	Alternatywa	Zdolność neutra- lizacji obiektów pUXO (amunicja konwencjonalna i obiekty poten-
Wydawca dokumentu: Grupa GeoFusion Sp. z o.o., ul. Akacyjowa 43, 32-065 Nowa Góra							Data dokumentu 2026.03.18	Strona 27 / 243

ID wa- riantu	Opis	CAPEX [EUR]	TCO / NPV (30 lat)	Skutecz- ność [%]	Czas reali- zacji	Kluczowe ryzyka	Reko- menda- cja	Uzasadnienie środowiskowe
								cjalnie zawiera- jące BST/CWA) bezpośrednio na pokładzie jed- nostki pływającej – od detekcji po utylizację.
Z7 ★	Odsysanie + piasek + ze- olity (ak- tywna reme- diacja)	370 205 EUR (Real.)	Monito- ring 10 lat	95–98%	30–50 dni + monitoring 10 lat	Wyciek, pogoda, UXO	★ REKO- MENDO- WANY dla zastoisk	Stężenia WWA w zastoiskach 10 000–35 000 µg/kg; 16 zastoisk wolnej fazy HFO – interwencja ko- nieczna.
Z6	Odsysanie + capping pia- skiem	303 520 EUR	—	90–95%	3–4 tygo- dnie	Brak ak- tywnej re- mediacji	Alternatywa	—
Z4	Hybrydowy wielowar- stwowy (bez odsysania)	709 775 EUR	—	>95%	4-5 tygodni	Paliwo pozostaje	Alternatywa bez odsysania	—
W6 ★	Wielowar- stwowa izo- lacja hybry- dowa (4 warstwy)	~5,67 mln EUR (z przymą)	LCC 50 lat: ~3,89 mln EUR	>99%	72–105 dni (1 sezon)	Pogoda, UXO, spa- wanie	★ REKO- MENDO- WANY dla wraku	Ryzyko nagłego wycieku 10– 20%/10 lat – pre- wencja ko- nieczna.
W5	Geotekstyl + narzut ka- mienny	2,47 mln EUR	LCC ~4,5 mln EUR	75–85%	55-100 dni	Ograni- czona szczel- ność	Ekono- miczny	—
W2	Beton pod- wodny	6,26 mln EUR	LCC ~7,0 mln EUR	>95%	45-55 dni	Wysoki koszt	Nie reko- mendo- wany	—
III.C ★	Bioremedia- cja + Cap- ping ak- tywny (A+B+C)	~8,6 mln EUR (Real. A+B)	NPV 30 lat P50: 74 mln EUR (A+B+C)	>90% (10–20 lat)	3–5 lat prace + monitoring 30 lat	Skutecz- ność bio- remedia- cji w wa- runkach bałtyc- kich	★ WA- RIANT BA- ZOWY dla osadów	(A+B): WWA 1 500–35 000 µg/kg; atenuacja zbyt wolna (>50 lat) – interwencja uzasadniona.
III.D-A	Dredging A + Capping ak- tywny B+C	~79,4 mln EUR	NPV 30 lat P50:	Bardzo wysoka	180-250 dni	Resu- spensja (R=9),	Alternatywa wa- runkowa	ODRZUCONE – ryzyko resuspen- sji R=9 niepropor-

ID wariantu	Opis	CAPEX [EUR]	TCO / NPV (30 lat)	Skuteczność [%]	Czas realizacji	Kluczowe ryzyka	Rekomendacja	Uzasadnienie środowiskowe
			123 mln EUR			utylicacja osadów		cjonalne do korzyści środowiskowej.
III.0	Tylko monitoring (Strefa C)	~2–5 mln EUR (monitoring 30 lat)	NPV: ~2–5 mln EUR	Brak re-mediacji	Ciągły (30 lat)	Brak działań aktywnych	Dla Strefy C	(C): WWA 0,1–1 mg/kg; atenuacja 2–5%/rok – interwencja NIE uzasadniona, monitoring wystarczający.

Wnioski z analizy wariantów. Na podstawie przeprowadzonej analizy wielokryterialnej (uwzględniającej skuteczność, trwałość, koszt, wpływ środowiskowy i wykonalność techniczną) odrzucono następujące podejścia:

- Pełny dredging osadów (wariant III.D-A) – odrzucony jako operacja nieproporcjonalna do aktualnego stanu środowiska potwierdzonego badaniami 2025. Kluczowe powody odrzucenia:
 - 1) ryzyko krytyczne resuspensji zanieczyszczeń (RPN = 9) – bezpośrednie zagrożenie dla organizmów morskich i obszarów Natura 2000, sprzeczne z obserwowanymi pozytywnymi trendami samooczyszczania w strefach B/C;
 - 2) zniszczenie bentosu z rekolonizacją 2–5 lat – odwracalne pogorszenie stanu ekologicznego dla osiągnięcia marginalnej korzyści czasowej;
 - 3) koszt +66% vs. III.C (123 mln EUR vs. 74 mln EUR);
 - 4) problemy z utylizacją 40 000–108 000 m³ osadów niebezpiecznych (18–48 mln EUR). Odrzucenie III.D-A stanowi bezpośrednią odpowiedź na postulat unikania ryzykownych dla środowiska morskiego operacji technicznych
- Pełne usunięcie wraku – odrzucone jako nierealistyczne ze względu na: ekstremalny koszt (por. Cofferdam W4: 15,87 mln EUR), ryzyko destabilizacji i niekontrolowanego uwolnienia zanieczyszczeń, status wraku jako potencjalnego zabytku podwodnego, oraz brak uzasadnienia technicznego przy dostępności wariantu izolacji W6 o skuteczności >99%.
- Capping pasywny (III.D-B) – niezalecany: brak bioremediacji oznacza, że WWA pozostają w osadach >50 lat, ryzyko bioturbacji, monitoring intensywny przez 50+ lat generuje wyższe koszty cyklu życia.
- Kapsuła/sarkofag fizyczny – odrzucony ze względu na skrajnie wysokie koszty i złożoność techniczną.

- Zdefiniowano wariant Z8, obejmujący mobilną zdolność neutralizacji obiektów pUXO (amunicja konwencjonalna i obiekty potencjalnie zawierające BST/CWA) bezpośrednio na pokładzie jednostki pływającej – od detekcji po utylizację.

1.4 Rekomendacja wariantu – Uzasadnienie

Opis Wariantu Hybrydowego. Rekomendowane podejście łączy cztery komplementarne komponenty technologiczne, realizowane w logicznej sekwencji Z → W → III.C:

EOD (Explosive Ordnance Disposal) / Screening UXO: Przed rozpoczęciem jakichkolwiek prac wymagane jest pełne rozpoznanie i oczyszczenie terenu z niewypatów i niewybuchów (UXO) we współpracy z Marynarką Wojenną. W przypadku wykrycia obiektów pUXO potencjalnie zawierających BST/CWA (praktycznie niemożliwe w tym rejonie), zastosować procedury wariantu Z8 (Wariant Z8) – identyfikacja RTG, bezpieczne podniesienie w szczelnym zasobniku, utylizacja plazmowa na pokładzie, z koordynacją strefy bezpieczeństwa z MW RP.

Capping aktywny (warianty Z7 + W6 + III.C): Wielowarstwowa izolacja z zastosowaniem materiałów aktywnych (klinoptilolit, keramzyt, perlit) o pojemności sorpcyjnej ≥ 75 mg/g WWA. Warstwa zeolitowa stanowi „inteligentny plaster” – nie tylko izoluje fizycznie, ale aktywnie sorbuje toksyny przez 10–20 lat.

Bioremediacja in situ: Mineraty aktywne tworzą mikrośrodowisko sprzyjające rozwojowi bakterii degradujących węglowodory. Mechanizm naturalnej atenuacji wspomaganej – „zatrudnienie naturalnych sprzątaczy” w osadach dennych.

Monitoring długoterminowy (10–30 lat): Systematyczny program kontroli skuteczności działań: faza intensywna (2×/rok, lata 1–5), faza standardowa (co 2 lata, lata 6–20), faza rozrzedzona (co 5 lat, lata 21–30). Parametry: WWA, TPH, mętność, integralność cappingu, bentos, toksyczność.

5 kluczowych argumentów za wariantem hybrydowym:

1. Skuteczność: Potrójna bariera (usunięcie źródła + izolacja fizyczna + aktywna sorpcja) zapewnia skuteczność 95–99% redukcji bioekspozycji. Wariant Z7: 95–98%, W6: >99%, III.C: >90% w 10–20 lat.
2. Koszt/Efekt: NPV całkowity (A+B+C) = 74 mln EUR, z czego III.C (A+B) stanowi ok. 73 mln EUR, a III.0 (C) jedynie 0,94 mln EUR (1,3% całości). Przyjęcie III.0 dla Strefy C zamiast III.C przynosi oszczędność ~2,6 mln EUR przy braku strat w skuteczności środowiskowej – bezpośrednia konsekwencja wykorzystania obserwowanych procesów samooczyszczania. W6 o najniższym LCC 50 lat (~3,89 mln EUR) spośród wariantów wraku. Z7: ok. 478 tys. EUR (P50, po korekcie stawek utylizacji HFO do 700 EUR/t) przy 95–98 % skuteczności.
3. ALARP (As Low As Reasonably Practicable): Redukcja ryzyka do najniższego racjonalnie osiągalnego poziomu – zasada „nie budujemy bunkra przeciw deszczowi, ale stawiamy solidny dach”. Wariant hybrydowy optymalizuje stosunek nakładów do redukcji ryzyka.

4. Regulacje: Pełna zgodność z wymogami MSFD, HELCOM, Natura 2000, RDW. Podejście hybrydowe spełnia warunki uzyskania akceptacji RDOŚ, Urzędu Morskiego i organów międzynarodowych.
5. Akceptacja społeczna: Minimalna ingerencja w środowisko (brak dredgingu = brak resuspcji = brak wtórnego skażenia), zastosowanie materiałów naturalnych (piasek, kamień, zeolity), efekt „sztucznej rafy” pozytywny dla bioty.

Trade-offs (czego nie osiągniemy): Wariant hybrydowy nie zapewnia:

- pełnego usunięcia zanieczyszczeń z osadów – WWA pozostaną pod warstwą cappingu, ulegając powolnej degradacji przez bioremediację (okres półtrwania 15–20 lat);
- 100% gwarancji skuteczności bioremediacji w warunkach bałtyckich (mimo iż niska temperatura 4–8°C spowalnia procesy biologiczne);
- całkowitego wyeliminowania ryzyka – wymagany jest monitoring długoterminowy (30 lat) z triggerami eskalacji.

1.5 Harmonogram i Kamienie Milowe

Realizacja projektu PNZ Stuttgart przewiduje fazowe wdrożenie w horyzoncie 2026–2058, z kluczowymi punktami decyzyjnymi (Decision Gates) warunkującymi przejście do kolejnych etapów.

Tabela 6 Kamienie milowe M1–M7

Milestone	Opis	Termin	Warunki realizacji	Właściciel decyzji	Go/No-Go
M1	Ukończenie badań przedoperacyjnych (MBES, SSS, ROV, UXO, próbkowanie)	2026 Q2	Pozwolenia RDOŚ, UM Uzgodnienia MW (UXO)	Zamawiający / RDOŚ	Go: wyniki pozwalają na realizację Z7+W6
M2	Pilotaż bioremediacji (pole testowe 100–800 m ²)	2026 Q3 – 2027 Q2	Wyniki M1, dostępność materiałów aktywnych	Kierownik projektu	Go: okres półtrwania WWA < 40 lat
M3	Realizacja Grupy I – Zastoiska (Z7) Odsysanie + piasek + zeolity	2027 Q2–Q3	Sezon operacyjny IV–X Stan morza ≤ 3B	Kierownik operacji morskiej	Go: odsysanie ≥70% paliwa z zastoisisk
M4 ²	Realizacja Grupy II – Wrak	2027 Q3–Q4 lub 2028	Decision Gate: odsysanie	Zamawiający	Go: spawy HDPE

² Decision Gate: wyniki inspekcji ROV (Etap 0) -> odsysanie paliwa z wraku, jeżeli inspekcją potwierdzi obecność wolnego paliwa w zbiornikach tkwiących w gliniastym gruncie (patrz Etap 0, Scenariusze A/B/C). Próg 50 t warunkuje zakres i tryb operacji odsysania. Uwaga: że względu na brak dokumentacji stoczniowej po przebu-

Milestone	Opis	Termin	Warunki realizacji	Właściciel decyzji	Go/No-Go
	(W6) Wielowarstwowa izolacja		paliwa z wraku (jeśli >50 t)		szczerne, MBES OK
M5	Realizacja Grupy III – Osady (III.C) Capping aktywny A+B	2028–2030	Wyniki M2 (pilotaż), dostępność statku DP	Kierownik projektu	Go: pokrycie ≥95% powierzchni cappingiem
M6	Zakończenie fazy intensywnej monitoringu (5 lat)	2035	Monitoring 2×/rok 5 lat bez przekroczeń	Zamawiający / RDOŚ	Go: brak triggerów eskalacji
M7	Zakończenie monitoringu długoterminowego (30 lat)	2058	Osiągnięcie II klasy stanu ekologicznego	RDOŚ / GIOŚ	Go: cel GES osiągnięty

1.6 Budżet i Zasoby

Poniższe zestawienie kosztów opracowano metodą bottom-up w trzech scenariuszach probabilistycznych (P10/P50/P90) – odpowiednio optymistyczny, realistyczny i pesymistyczny. Wszystkie ceny podano w EUR na poziomie 2025, region Baltyk.

Tabela 7 Szczegółowe zestawienie kosztów projektu PNZ Stuttgart

Kategoria	Zakres	Opt. [EUR]	Real. [EUR]	Pes. [EUR]
A. PRZYGOTOWAWCZE				
A.1 Badania przedoperacyjne	MBES, SSS, ROV, UXO, próbki	100 000	150 000	250 000
A.2 Dokumentacja projektowa	Koncepcja, projekt techniczny	80 000	130 000	200 000
A.3 Pozwolenia i uzgodnienia	RDOŚ, UM, MW, konserwator	50 000	80 000	120 000
A.4 Pilotaż bioremediacji	Pole testowe, monitoring 12 mies.	50 000	100 000	150 000
RAZEM		~280 000	~460 000	~720 000
B. ROBOTY				
B.1 Grupa I – Zastoiska (Z7)	Odsysanie + piasek + zeolity	280 000	370 205	470 000

dowie, dokładna objętość paliwa może być trudna do oszacowania nawet po inspekcji ROV - w takim przypadku stosuje się Scenariusz C (ostrożniejszy)."

Wydawca dokumentu: Grupa GeoFusion Sp. z o.o., ul. Akacyjowa 43, 32-065 Nowa Góra	Data dokumentu 2026.03.18	Strona 32 / 243
--	-------------------------------------	---------------------------

Kategoria	Zakres	Opt. [EUR]	Real. [EUR]	Pes. [EUR]
B.2 Grupa II – Wrak (W6)	Pryzma + izolacja 4-warstwowa	~4 474 000	~5 670 868	~6 988 000
B.2a Scenariusz awaryjny HFO	Usunięcie paliwa z wraku (jeśli wymagane)	—	~1 132 000	—
B.3 Grupa III – Osady A+B (III.C)	Capping aktywny 80 000 m ²	~5 100 000	~8 570 000	~13 400 000
B.4 Mobilizacja / demobilizacja	Flota, sprzęt, personel	350 000	600 000	900 000
RAZEM		~10 204 000	~16 343 000	~21 758 000
C. MONITORING				
C.1 Monitoring za- stoisk (10 lat)	ROV, MBES, próbki	55 000	82 000	110 000
C.2 Monitoring wraku (50 lat)	Batymetria, ROV, próbki	1 075 000	1 575 000	2 075 000
C.3 Monitoring osadów (30 lat)	WWA, TPH, bentos, integralność	1 500 000	3 000 000	5 000 000
C.4 Monitoring Strefa C (III.0)	Tylko monitoring, 30 lat	2 000 000	3 500 000	5 000 000
RAZEM		~4 575 000	~8 075 000	~12 075 000
D. REZERWA				
D.1 Rezerwa techniczna (5%)		755 000	1 245 000	1 735 000
D.2 Rezerwa pogodowa (5%)		755 000	1 245 000	1 735 000
D.3 Rezerwa na wzrost cen (3%)		453 000	747 000	1 041 000
RAZEM (bez rezerw)		~15,1 mln	~24,9 mln	~34,7 mln
RAZEM (z rezerwami ~13%)		~17,1 mln	~28,1 mln	~39,2 mln
RAZEM		~15,1 do 17,1 mln	~24,9 do 28,1 mln	~34,7 do 39,2 mln

TCO (Total Cost of Ownership) – wartość centralna: NPV 30 lat dla całego projektu PNZ Stuttgart (wszystkie grupy Z+W+III, strefy A+B+C) szacowany jest na ok. 74–80 mln EUR (P50)³. Wartość ta obejmuje CAPEX robót, OPEX monitoringu oraz koszty utrzymania i napraw w horyzoncie 30–50 lat. Dla

³ Budżet w tabeli obejmuje jedynie wysokość nakładów na realizację samego projektu bez pokazania kosztów utrzymania projektu przy życiu. Kwota 74–80 mln EUR nie wynika bezpośrednio z kosztorysu inwestycyjnego 24,9–28,1 mln EUR. Jest to wartość całkowitego kosztu cyklu życia projektu (TCO/LCC), obejmująca: CAPEX robót remediacyjnych, monitoring przez dziesięciolecia, utrzymanie zabezpieczeń, przyszłe naprawy i rekonstrukcje, koszty administracyjne i środowiskowe rezerwy na zdarzenia awaryjne, zdyskontowane do wartości bieżącej netto (NPV) w horyzoncie około 30 lat. Dokładne wyliczenie wymaga dodatkowego modelu finansowego.

samemu wariantu W6 (wrak): LCC 50 lat = 3,89 mln EUR (zdyskontowany). Rezerwa budżetowa min. 15–20% zalecana ponad kwoty podane powyżej.

Kluczowy sprzęt:

- Jednostki DP (Dynamic Positioning): statek układający DP2 z systemem fall-pipe – do precyzyjnego formowania przymy i układania materiałów; statek nurkowy DSV (DP) – do prac nurkowych i obsługi ROV.
- ROV (Remotely Operated Vehicle): pojazd podwodny klasy lekkiej z manipulatorem (głębokość do 100 m) – do inspekcji, monitoringu, wsparcia operacji.
- MBES (Multi-Beam Echo Sounder): echosonda wielowiązkowa – do kontroli batymetrii, profilu przymy, integralności cappingu.
- Pogłębiarka TSHD (Trailing Suction Hopper Dredger) – do pozyskania i transportu piasku morskigo.
- System odsysający z pompą ssącą 5 m³/h, separator paliwo-woda 10 m³/h, zbiorniki magazynowe 50–100 m³.

Personel (RACI): Kierownik operacji morskiej (R), operatorzy ROV (2 os., R), operatorzy systemu pompowego (2 os., R), nurkowie z certyfikacją IMCA (2 os., R), załoga barki (kapitan + 3 marynarzy, R), specjalista remediacji (1 os., C/I), nadzór techniczny (1 os., A), inspektor HSE (1 os., C), hydrograf (1 os., R), geolog morski (1 os., C), specjalista UXO (1 os., R w fazie M1).

1.7 Kluczowe ryzyka (Top 5)

Ryzyka oceniono metodą macierzową 5×5 (prawdopodobieństwo × skutek). Skala: 1 = bardzo niskie/pomijalny, 5 = bardzo wysokie/katastrofalny. Wynik R = P × S. Klasyfikacja: Niskie (1–4), Średnie (5–9), Wysokie (10–16), Krytyczne (17–25).

Tabela 8 Macierz kluczowych ryzyk – Top 5

ID	Ryzyko	P	S	R	Klasa	Strategia mitygacji
R1	Obecność UXO (niewypałów/niewybuchów) w strefie pracy	2	5	10	WYSOKIE	Pełny screening magnetometryczny przed rozpoczęciem prac; procedury MW/AMW; specjalista UXO w zespole, Mitygacja z użyciem wariantu Z8
R2	Złe warunki pogodowe – przerwy w pracach morskich	4	2	8	ŚREDNIE	Bufor 20% czasu; elastyczny harmonogram; sezon IV–X; prognoza meteo
R3	Nieskuteczność bioremediacji w warunkach bałtyckich (T = 4–8°C)	3	3	9	ŚREDNIE	Pilotaż na polu testowym (M2); triggerzy przejścia na wariant III.D-A; monitoring 30 lat

R4	Wyciek paliwa z wraku podczas prac	2	4	8	ŚREDNIE	OSCP aktywny; boomy olejowe i sorbenty w gotowości; monitoring emisji w czasie rzeczywistym
R5	Opóźnienia w uzyskaniu pozwoleń (RDOŚ, Urząd Morski)	3	3	9	ŚREDNIE	Wczesne rozpoczęcie procesu administracyjnego; równoległe ścieżki pozwoleń; współpraca z regulatorami

1.8 Glossary i Podsumowanie dla Decydenta

Tabela 9 Lista kluczowych terminów:

Skrót	Rozwinięcie	Znaczenie praktyczne
WWA	Wielopierścieniowe Węglowodory Aromatyczne	Grupa toksycznych związków organicznych pochodzących z paliw kopalnych; główny wskaźnik skażenia w rejonie wraku Stuttgart.
TPH	Total Petroleum Hydrocarbons	Suma węglowodorów ropopochodnych – miernik ogólnego poziomu skażenia paliwem.
UXO	Unexploded Ordnance	Niewypały i niewybuchy – historyczne pozostałości wojenne na dnie morskim; wymagają oczyszczenia przed pracami.
TCO	Total Cost of Ownership	Całkowity koszt posiadania/utrzymania – obejmuje CAPEX, OPEX i koszty cyklu życia.
GES	Good Environmental Status	Dobry Stan Środowiska – cel wynikający z MSFD; II klasa stanu ekologicznego.
EOD	Explosive Ordnance Disposal	Rozminowywanie – procedury neutralizacji niewypałów/niewybuchów.
MBES	Multi-Beam Echo Sounder	Echosonda wielowiązkowa – narzędzie do precyzyjnego mapowania dna morskiego.
ROV	Remotely Operated Vehicle	Zdalnie sterowany pojazd podwodny – do inspekcji, monitoringu i wsparcia operacji.
RACI	Responsible, Accountable, Consulted, Informed	Macierz odpowiedzialności – określa role w projekcie.
ALARP	As Low As Reasonably Practicable	Redukcja ryzyka do najniższego racjonalnie osiągalnego poziomu. „Zasada zdrowego rozsądku.”
AHP	Analytic Hierarchy Process	Metoda analizy wielokryterialnej do porównania i rangowania wariantów decyzyjnych.
CAPEX	Capital Expenditure	Nakłady inwestycyjne – koszty jednorazowe realizacji projektu.
OPEX	Operational Expenditure	Koszty operacyjne – wydatki bieżące na monitoring, utrzymanie, naprawy.
HFO	Heavy Fuel Oil	Ciężki olej opałowy – główny rodzaj paliwa zalegającego we wraku Stuttgart.
SBP	Sub-Bottom Profiler	Profilograf poddenne dna – narzędzie do obrazowania struktury osadów pod dnem morskim.

Kluczowe tezy – Podsumowanie dla Decydenta:

Wydawca dokumentu: Grupa GeoFusion Sp. z o.o., ul. Akacjowa 43, 32-065 Nowa Góra	Data dokumentu 2026.03.18	Strona 35 / 243
---	-------------------------------------	---------------------------

Problem: Wrak S/S Stuttgart (168 m, zatopiony 1943) stanowi jedno z najpoważniejszych zagrożeń ekologicznych w polskiej strefie Morza Bałtyckiego. Skażenie obejmuje 45 ha dna morskiego z stężeniami WWA do 70× normy TEL. Bez interwencji – horyzonty czasowe naturalnej regeneracji zróżnicowane strefowo: Strefa C (~19 ha, niskie skażenie) osiągnie cel RDW (II klasa) w ~10–15 lat (2035–2040) dzięki naturalnej atenuacji; Strefa B (~18 ha, wysokie skażenie) wymaga >50 lat, Strefa A (~8 ha, wysokie skażenie ze źródłem emisji) wymaga >50 lat lub regeneracja może nie nastąpić w ogóle bez eliminacji źródła zanieczyszczeń (zastoiska, wrak). Precyzyjne prognozowanie uzależnione od weryfikacji hipotezy ciągłej emisji paliwa z wraku (Raport porównawczy prognoz 2025–2100 vs. 2025–2200).

Rekomendacja: Podejście hybrydowe w trzech fazach:

- odsysanie paliwa z zastoisk + capping aktywny z zeolitami (Z7),
- wielowarstwowa izolacja wraku (W6: geotekstyl → piasek → HDPE → narzut kamienny),
- bioremediacja + capping aktywny osadów dennych (III.C). Sekwencja Z → W → III zapobiega wtórnemu skażeniu.

Koszty: TCO (30 lat, P50): ~74–80 mln EUR (całość A+B+C). Zakres P10–P90: 47–94 mln EUR. Wariant rekomendowany ma najniższy NPV spośród wariantów aktywnych i najniższe ryzyko finansowe (spread 47 mln EUR). Koszty samej izolacji wraku (W6): ~5,67 mln EUR (Real.).

Czas: Faza realizacyjna: 2026–2030 (badania, pilotaż, roboty). Monitoring intensywny: do 2035. Monitoring długoterminowy: do 2058. Łączny horyzont: ~32 lata. Sezon operacyjny: kwiecień–październik.

Ryzyka: Top 3: (1) UXO na dnie morskim – wymaga screeningu magnetometrycznego; (2) Warunki pogodowe – ograniczone okno operacyjne na Bałtyku; (3) Niepewność bioremediacji w niskich temperaturach – wymagany pilotaż. Zarządzanie ryzykiem zgodne z ISO 31000 i zasadą ALARP.

Następne kroki:

- Uzyskanie pozwoleń RDOŚ i Urzędu Morskiego;
- Realizacja badań przedoperacyjnych (M1: 2026 Q2);
- Uruchomienie pilotażu bioremediacji (M2: 2026 Q3);
- Zapytania ofertowe na materiały aktywne (zeolity, keramzyt);
- Rezerwacja jednostek pływających (statek DP2, TSHD, DSV);
- Zabezpieczenie finansowania z KPO.

1.9 Wpływ planowanej działalności na stan środowiska morskiego

Opis wpływu na środowisko. Planowane działania remediacyjne w rejonie wraku S/S Stuttgart będą miały charakter zarówno krótkoterminowego zakłócenia, jak i długoterminowej poprawy stanu środowiska morskiego. W fazie realizacyjnej (2–5 lat) należy spodziewać się:

- Tymczasowe zwiększenie mętności wody w strefie prac (kontrolowane, próg NTU < 50).
- Lokalnego zakłócenia bentosu w miejscach układania cappingu (rekolonizacja w ciągu 1–3 lat).
- Emisji hałasu podwodnego związanego z pracami morskimi (ograniczone czasowo i przestrzennie).
- Ryzyka uwolnienia niewielkich ilości zanieczyszczeń podczas odsysania paliwa (mitygacja: OSCP, boomy, sorbenty).

W perspektywie długoterminowej (5–50 lat) oczekiwane są następujące korzyści środowiskowe:

- Redukcja bioekspozycji na WWA o >90% w horyzoncie 10–20 lat.
- Poprawa stanu ekologicznego z klasy IV (Słaby) do docelowej II klasy (Dobry – GES).
- Efekt „sztucznej rafy” – warstwa cappingu i narzutu kamiennego tworzy nowe siedlisko dla bentosu.
- Ograniczenie bioakumulacji zanieczyszczeń w łańcuchu troficznym Morza Bałtyckiego.

Zgodność z MSFD (Dyrektywa 2008/56/WE). Projekt bezpośrednio przyczynia się do osiągnięcia Dobrego Stanu Środowiska (GES) w rozumieniu Ramowej Dyrektywy w sprawie Strategii Morskiej. Działania realizują cele: Deskryptor 8 (zanieczyszczenia) – redukcja stężeń WWA i TPH w osadach i wodzie; Deskryptor 6 (integralność dna morskiego) – poprawa stanu siedlisk dennych; Deskryptor 1 (bioróżnorodność) – odtworzenie warunków dla rekolonizacji bentosu.

Zgodność z siecią Natura 2000. Rejon wraku Stuttgart znajduje się w pobliżu obszarów objętych ochroną w ramach sieci Natura 2000. Podejście hybrydowe (capping aktywny bez dredgingu) zostało wybrane m.in. ze względu na minimalną ingerencję w środowisko – brak resuspensji osadów eliminuje ryzyko wtórnego skażenia obszarów chronionych. Wymagana jest ocena oddziaływania na środowisko (OOS) i uzyskanie decyzji RDOŚ.

Zgodność z rekomendacjami HELCOM. Działania wpisują się w rekomendacje HELCOM dotyczące postępowania z wrakami stanowiącymi zagrożenie ekologiczne na Morzu Bałtyckim. Polska, jako strona Konwencji Helsińskiej, jest zobowiązana do podejmowania działań naprawczych wobec zidentyfikowanych źródeł zanieczyszczeń morskich. PNZ Stuttgart stanowi realizację tych zobowiązań.

2 WPROWADZENIE I CEL DOKUMENTU

2.1 Geneza dokumentu

Materiały niebezpieczne zatopione na dnie Morza Bałtyckiego stanowią poważne i narastające zagrożenie dla środowiska morskiego, działalności gospodarczej oraz bezpieczeństwa ludzi. Do materiałów tych należą substancje ropopochodne, paliwa, amunicja konwencjonalna oraz bojowe środki trujące⁴. Problem jest szczególnie istotny na polskich obszarach morskich, gdzie zidentyfikowano liczne miejsca zalegania takich materiałów, w tym wrak S/S „Stuttgart” w Zatoce Gdańskiej.

W odpowiedzi na to wyzwanie, we wrześniu 2020 roku, decyzją Prezesa Rady Ministrów, powołano Międzyresortowy Zespół do spraw Materiałów Niebezpiecznych Zalegających na Obszarach Morskich. Zadaniem Zespołu jest opracowanie kompleksowego planu działań administracji publicznej w zakresie neutralizacji zagrożeń związanych z obecnością bojowych środków trujących i innych niebezpiecznych materiałów zatopionych w Morzu Bałtyckim.

2.1.1 Podstawa prawna i kontraktowa

Niniejszy Plan Neutralizacji Zagrożeń (PNZ). Pełna nazwa: **Plan neutralizacji określający planowane metody neutralizacji zalanych materiałów niebezpiecznych, z uwzględnieniem wpływu planowanej działalności m. in. na stan środowiska morskiego** został opracowany na podstawie Umowy nr PM.372.2.2025.JG z dnia 11.03.2025 r., zawartej pomiędzy Skarbem Państwa – Dyrektorem Urzędu Morskiego w Gdyni (Zamawiający) a Grupą GeoFusion Sp. z o.o. (Wykonawca). Projekt nosi tytuł „Działania pomiarowe oraz badawcze dotyczące rozpoznania i ewentualnej neutralizacji materiałów niebezpiecznych zalegających na dnie Morza Bałtyckiego w wybranych lokalizacjach – lokalizacja: wrak S/S Stuttgart”.

2.1.2 Etapy projektu

- Etap I (do 14.05.2025): Badania pomiarowe – hydrografia, geofizyka (SBP, MBES), identyfikacja UXO, pomiary prądów morskich
- Etap II (do 31.12.2025): Badania środowiskowe – analiza chemiczna i biologiczna osadów, opracowanie Planu Neutralizacji Zagrożeń (PNZ)
- Etap III: Projekt wykonawczy i realizacja działań neutralizacyjnych

Szczegółowy opis zakresu poszczególnych etapów – patrz Część I PNZ, rozdział 1 „Wprowadzenie”.

⁴ W odniesieniu do amunicji konwencjonalnej i obiektów potencjalnie zawierających bojowe środki trujące, niniejszy PNZ uwzględnia wariant Z8 (Wariant Z8), definiujący mobilną zdolność neutralizacji end-to-end tych zagrożeń w warunkach morskich.

2.1.3 Kontekst regulacyjny

Projekt jest realizowany w ramach Krajowego Planu Odbudowy i Zwiększania Odporności (KPO), Komponent B3.2.1: „Inwestycje w neutralizację zagrożeń oraz odnowę wielkoobszarowych terenów zdegradowanych i Morza Bałtyckiego”. Kontekst regulacyjny obejmuje:

- Konwencja Helsińska (HELCOM) – ochrona środowiska morskiego Morza Bałtyckiego, w tym Bałtycki Plan Działań (BSAP)
- Dyrektywa ramowa w sprawie strategii morskiej (MSFD 2008/56/WE) – obowiązek osiągnięcia Dobrego Stanu Środowiska (GES)
- Dyrektywa siedliskowa (Natura 2000) – wrak S/S Stuttgart znajduje się na obszarze chronionym Natura 2000
- Ustawa Prawo ochrony środowiska – obowiązek przeprowadzenia OOŚ dla działań remedacyjnych
- Inne akty prawne, np. Prawo wodne, Ustawa o ochronie przyrody

2.2 Cel i zakres PNZ

2.2.1 Cel główny

Plan Neutralizacji Zagrożeń (PNZ) dla obszaru wraku S/S „Stuttgart” ma na celu określenie sposobu bezpiecznej i skutecznej neutralizacji zagrożeń związanych z obecnością wraku oraz skażonych osadów dennych w Zatoce Gdańskiej. Dokument definiuje cele, kierunki działań, strukturę odpowiedzialności instytucjonalnej oraz harmonogram działań mających na celu minimalizację i eliminację zagrożeń wynikających z obecności niebezpiecznych materiałów zatopionych na polskich obszarach morskich.

2.2.2 Zakres przedmiotowy

Niniejszy PNZ obejmuje następujące obszary tematyczne:

- **Ocena zagrożeń** – kompleksowa ocena stanu środowiska na podstawie badań przeprowadzonych w latach 2025–2026, z odniesieniem do danych bazowych z 2016 r. (analiza chemiczna, biologiczna, ekotoksykologiczna, geofizyczna)
- **Analiza wariantów** – wielokryterialna analiza porównawcza wariantów neutralizacji zagrożeń związanych z wrakiem (W1–W6), osadami skażonymi (warianty remediacji III.A–D) oraz obiektami UXO, w tym wariant Z8 (Wariant Z8) dla neutralizacji pUXO z potencjalną zawartością BST/CWA.
- **Rekomendacja optymalnego wariantu** – wskazanie preferowanego wariantu hybrydowego (capping aktywny + bioremediacja + capping wraku + EOD clearance UXO) wraz z uzasadnieniem wyboru

- **Procedury wdrożeniowe** – opracowanie procedur operacyjnych (SOP) dla realizacji prac neutralizacyjnych, w tym zarządzanie ryzykiem operacyjnym, procedury SIMOPS, stop-work i reagowania kryzysowego
- **Plan monitoringu** – długoterminowy program monitoringu środowiskowego (woda, osady, biota) z progami decyzyjnymi i ścieżkami eskalacji

2.2.3 Czego PNZ nie obejmuje

Dla uniknięcia wątpliwości, niniejszy PNZ jest dokumentem analityczno-strategicznym i nie zastępuje dokumentacji wykonawczej. PNZ nie zawiera:

- Szczegółowego projektu wykonawczego (DPR – Dokumentacja Projektowa Robocza) – który powinien zostać opracowany na etapie III projektu
- Dziennego harmonogramu prac – PNZ określa kamienie milowe i fazy, nieszczegółowy harmonogram operacyjny
- Kampanii komunikacji społecznej – PNZ identyfikuje interesariuszy i rekomenduje strategię komunikacji (patrz Część I PNZ, rozdz. 8), ale nie stanowi planu komunikacyjnego
- Pełnej dokumentacji OOŚ (Ocena Oddziaływania na Środowisko) – która wymaga odrębnego postępowania administracyjnego
- Gwarancji całkowitej eliminacji zanieczyszczeń – PNZ zakłada zarządzanie ryzykiem do poziomu ALARP, nie eliminację ryzyka (szczegóły w Części I PNZ, rozdz. 1.4)

2.3 Metodyka opracowania PNZ

Plan Neutralizacji Zagrożeń został opracowany z zastosowaniem następujących metod i podejść analitycznych:

2.3.1 Metody analizy ryzyka

- Analiza ryzyka zgodnie z ISO 31000:2018 – identyfikacja źródeł zagrożeń, ocena prawdopodobieństwa i skutków, macierz ryzyka (P: 1–3, S: 1–4), scenariusze A/B/C (szczegóły w Części I PNZ, rozdz. 7)
- Zasada ALARP (As Low As Reasonably Practicable) – zarządzanie ryzykiem do poziomu tak niskiego, jak to racjonalnie osiągalne, z uwzględnieniem kosztów i korzyści
- Analiza Bow-Tie – diagramy przyczynowo-skutkowe dla kluczowych scenariuszy: BT-1 (uwolnienie paliwa), BT-2 (resuspensja osadów), BT-3 (incydent UXO) – patrz Część I PNZ, rozdz. 7.3

2.3.2 Analiza wielokryterialna

- Metoda AHP (Analytic Hierarchy Process) – hierarchiczna analiza wielokryterialna do porównania i rankingu wariantów neutralizacji zagrożeń

- Kryteria oceny: skuteczność środowiskowa, koszt (TCO), czas realizacji, ryzyko operacyjne, akceptowalność społeczna, zgodność z wymogami Natura 2000

2.3.3 Źródła danych

- Badania 2016 r. – dane bazowe (chemiczne, biologiczne, geofizyczne)
- Badania 2025–2026 r. – aktualne pomiary: hydrografia, geofizyka (SBP, MBES), analiza chemiczna osadów (WWA, TPH, metale ciężkie), badania biologiczne (makrozoobentos), badania ekotoksykologiczne (Microtox®, *Sorghum saccharatum*, *Heterocypris incongruens*)
- Przegląd literatury światowej – studia przypadków operacji na wrakach (defueling, capping, remediacja)
- Konsultacje eksperckie – ocena technologiczna, prawna i środowiskowa

2.3.4 Powierzchnia robocza cappingu wraku S/S Stuttgart

W niniejszym dokumencie stosuje się trzy wartości powierzchni roboczej wraku, odpowiadające różnym zakresom projektowym:

- Powierzchnia nominalna kadłuba: 3 360 m² (168 m x 20 m) - wymiary geometryczne samego wraku; stosowana do obliczeń materiałowych warstw izolacyjnych W6 w wariancie bazowym.
- Powierzchnia robocza operacyjna: 7 520 m² - kadłub + margines techniczny ~2 m po obu długościach i szerokościach; stosowana jako podstawa harmonogramowania prac i kosztorysowania operacji układania cappingu.
- Powierzchnia robocza rozszerzona: 8 850 m² - j.w. + naddatek na pryzmy piaskowe wyrównujące profil wraku, zakłady (overlap) geomembrany HDPE (~15%) i szczeliny między warstwami. Stosowana wyłącznie do obliczeń materiałowych w rozdz. 8.16.

2.3.5 Zasada doboru wariantów oparta na dowodach (evidence-based).

Każdy rekomendowany wariant jest bezpośrednio uzasadniony konkretnymi wynikami badań 2025–2026 oraz ich porównaniem z danymi bazowymi z 2016 r. Schemat decyzyjny:

- Ocena stężeń WWA/TPH vs. normy TEL/PEL/ERM → klasyfikacja skażenia (klasa II–IV RDW);
- Analiza trendu 2016→2025 → tempo naturalnej atenuacji;
- Prognoza osiągnięcia celu RDW w scenariuszu atenuacji vs. interwencji;
- Analiza ryzyk wtórnych operacji technicznych (resuspensja, zniszczenie bentosu);
- Wybór wariantu minimalizującego sumę ryzyk i kosztów przy osiągnięciu celu regulacyjnego.

Procedura ta zapewnia, że każda decyzja o interwencji technicznej jest oparta na proporcjonalności do rzeczywistego zagrożenia

Szczegółowy opis metodyki, w tym przegląd regulacji krajowych i międzynarodowych, analiza porównawcza technologii oraz studia przypadków – patrz Część I PNZ, rozdz. 1.3–1.5.

2.4 Autorzy i wkład specjalistów

Niniejszy PNZ został opracowany przez zespół interdyscyplinarny pod kierownictwem Grupy GeoFusion Sp. z o.o. Poniższa tabela przedstawia zestawienie autorów i specjalistów wraz z ich wkładem.

Tabela 10 Wykaz osób biorących udział w opracowaniu PNZ

Specjalizacja	Imię i nazwisko	Wkład (rozdział/zakres)	Afiliacja
Kierownik projektu, hydrografia, geofizyka, UXO/EOD	dr inż. Benedykt Hac hydrograf kat.A	Hydrografia, geofizyka SBP/MBES), (warianty wrak), koordynacja całości PNZ	Grupa GeoFusion Sp. z o.o.
Zatwierdzenie dokumentu	Łukasz Porzuczek	Zatwierdzenie końcowe PNZ	Grupa GeoFusion Sp. z o.o.
Chemia środowiskowa	Prof. Dr hab. Jacek Bełdowski	Analiza chemiczna osadów, złączniki chemiczne – analiza i omówienie wyników badań	Profesea Sp. z o.o.
Biologia morska	Dr hab. Lech Kotwicki Patrycja Nowakowska	Makrozoobentos, biota, złącznik biologiczny	Profesea Sp. z o.o.
Ekotoksykologia	Dr Michał Czub	badania ekotoksykologiczne, raport ekotoksykologiczny	Profesea Sp. z o.o.
Geofizyka i geologia	Dr inż. Adam Cygał Dr inż. Maria Barmuta Mgr inż. Dominika Adaszek	Synteza wyników badań geofizycznych, chemicznych, identyfikacja hotspotów; analiza trendów 2016–2025	Grupa GeoFusion Sp. z o.o.
Pomiary hydrograficzne	Maciej Zięba hydrograf kat.A	Pomiary w terenie, dokumentacja pomiarowa	Grupa GeoFusion Sp. z o.o.
Inżynieria hydrotechniczna	dr inż. Benedykt Hac hydrograf kat.A, Dr inż. Adam Cygał	warianty techniczne, capping, remediacja	Grupa GeoFusion Sp. z o.o.
Zarządzanie ryzykiem	dr inż. Benedykt Hac hydrograf kat.A,	procedury SOP, analiza ryzyka projektu, Bow-Tie	Grupa GeoFusion Sp. z o.o.
UXO / EOD	dr inż. Benedykt Hac hydrograf kat.A,	Inwentaryzacja UXO), strategię EOD	Grupa GeoFusion Sp. z o.o.
Aspekty prawne i regulacyjne	Julia Skatecka	Analiza prawna, Natura 2000, MSFD	Grupa GeoFusion Sp. z o.o.

Źródła danych: PNZ Część I (v. 24.11.2025), Raport końcowy 2502, Kompleksowa analiza osadów dennych 2016–2025, Ekstrapolacja 2016–2025, Raport ekotoksykologia 2016–2025, Złączniki 12–14 (badania chemiczne, biologiczne, ekotoksykologiczne).

3 Wdrożenie i nadzór Planu Neutralizacji Zagrożeń

Strefowanie skażenia: Podział obszaru na strefy A/B/C z przypisaniem działań (dredging, capping, monitoring).

Technologie neutralizacji: Przegląd metod in-situ: odsysanie paliwa, capping (pasywny/aktywny), bioremediacja oraz ryzyko dredgingu.

HSE i ryzyko: Procedury bezpieczeństwa (JSA, Stop Work Authority) oraz zasady monitoringu (progi, ETW).

Prawo i jurysdykcja: Status wraku w świetle UNCLOS/Nairobi/HELCOM i prawa polskiego, z naciskiem na Natura 2000.

Luki danych: Lista kluczowych braków (paliwo resztkowe, UXO, dostępność sprzętu/wykonawców).

Niniejsza część dokumentu stanowi kontynuację Części I, w której przedstawiono charakterystykę zagrożeń, analizę ryzyka oraz strategię neutralizacji. Część II koncentruje się na praktycznych aspektach wdrożenia Planu, w tym na procedurach operacyjnych, monitoringu środowiskowym oraz zarządzaniu interesariuszami.

3.1 Zagadnienia operacyjne i regulacyjne planu

Niniejszy rozdział stanowi fundament merytoryczny dla procesu wdrażania Planu Neutralizacji Zagrożeń (PNZ) wraku S/S Stuttgart, integrując aspekty techniczne, środowiskowe oraz prawne w spójną strategię operacyjną. Kluczowym wyzwaniem opisanym w dokumentacji jest przejście od fazy teoretycznych analiz do praktycznej interwencji w skomplikowanym ekosystemie Zatoki Gdańskiej.

Główna oś zagadnień koncentruje się na precyzyjnej segmentacji obszaru skażonego, co pozwala na optymalizację nakładów finansowych i minimalizację ryzyk wtórnych. Dokument kładzie szczególny nacisk na bezpieczeństwo operacji podwodnych, wprowadzając rygorystyczne protokoły kontroli jakości (QA/QC) oraz systemy wczesnego ostrzegania oparte na progach alarmowych dla parametrów takich jak mętność wody czy stężenie węglowodorów aromatycznych (WWA).

W warstwie technologicznej rozdział analizuje wykonalność operacji odsysania paliwa i cappingu aktywnego, wskazując je jako metody preferowane nad inwazyjnym wydobywaniem osadów. Jednocześnie autorzy dokumentu nie unikają trudnych pytań o status prawny wraku i odpowiedzialność finansową, co w kontekście lokalizacji w obszarze Natura 2000 determinuje ramy czasowe uzyskiwania decyzji środowiskowych. Całość zagadnień domyka analiza czynników zewnętrznych, takich jak sezonowość tarła ryb oraz specyfika hydrometeorologiczna Bałtyku, które narzucają sztywne „okna pogodowe” dla planowanych prac. Tak zarysowane tło stanowi niezbędny punkt wyjścia do szczegółowego harmonogramowania działań w Etapie I (Diagnostyka) i Etapie II (Interwencja).

3.2 Wyniki interpretacji danych SBP w wariancie podstawowym

Poniżej przedstawiono wyniki badań geofizycznych (SSS, MBES, SBP, SES, wraz z analizą, która stanowi źródło informacji do formułowania wniosków i zaleceń.

Fizyczny mechanizm powstawania anomalii amplitudowej w zapisie SBP/SES wiąże się z obecnością ciekłych węglowodorów (w tym ciężkiego paliwa okrętowego wytworzonego w oparciu o smołę poga-

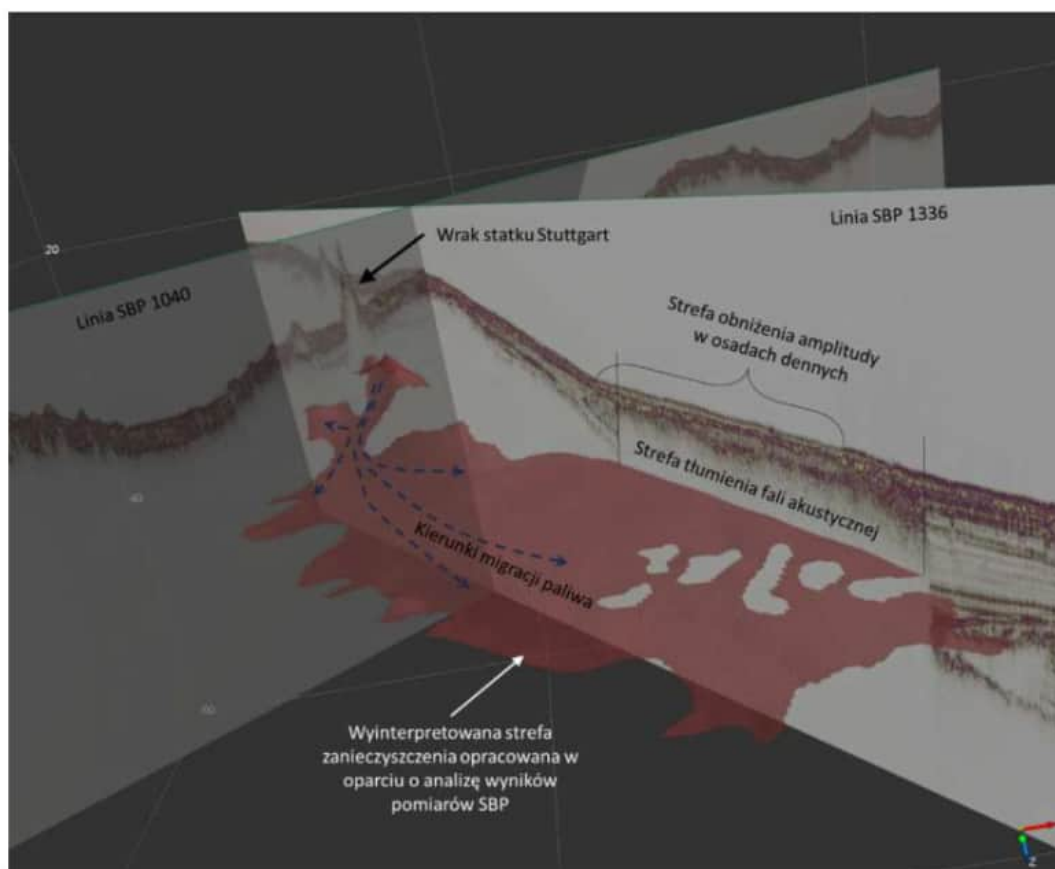
zową, Heavy Fuel Oil), które wnikając w osady i wypełniając ich przestrzeń porową, zmieniają właściwości sprężyste i tłumiące ośrodka, a w konsekwencji modyfikują sposób propagacji i odbicia fali akustycznej. W warunkach naturalnych osady denne wykazują zwykle wyraźną stratyfikację sejsmoakustyczną wynikającą z naprzemiennego występowania warstw o różnym uziarnieniu, składzie mineralogicznym, stopniu zagęszczenia czy zawartości materii organicznej. Granice pomiędzy takimi warstwami tworzą kontrasty impedancji akustycznej, które generują reflektory widoczne na echogramach SBP jako ciągłe lub półciągłe horyzonty. W przypadku nasycenia porów olejem zamiast wodą morską kontrasty impedancyjne na granicach warstw ulegają osłabieniu, a dodatkowo rośnie udział strat energii związanych z dyssypacją i rozproszeniem. W rezultacie reflektory stają się słabsze, mniej ciągłe lub lokalnie zanikają, a na profilach SBP powstaje strefa o obniżonej amplitudzie i gorszej czytelności zapisu w porównaniu do otaczających, niezanieczyszczonych osadów o „normalnej” stratyfikacji.

Wyniki interpretacji danych SBP przedstawiono w wariancie podstawowym jako zestaw map i wizualizacji umożliwiający całościowe zrozumienie schematu rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w osadach dennych w rejonie wraku Stuttgart. Rysunki 1-3 integrują dane z wybranych linii SBP z przestrzenną rekonstrukcją zasięgu anomalii, prezentując równocześnie dwa zasadnicze przejawy oddziaływania zanieczyszczeń w zapisie sejsmoakustycznym: strefę obniżonej amplitudy w osadach przypowierzchniowych oraz strefę tłumienia sygnału (*ang. acoustic blanking*) w partiach głębszych. Model przestrzenny opracowano w oparciu o systematyczną analizę pełnej siatki profili SBP, obejmującą identyfikację anomalii na każdym profilu, ich korelację pomiędzy liniami oraz interpolację w układzie mapowym. W procesie interpretacji stosowano powtarzalne kryteria rozpoznania anomalii, odnosząc obserwacje do odcinków referencyjnych profili o niezmienionym charakterze echogramu oraz uwzględniając wpływ parametrów rejestracji (w szczególności ustawień wzmocnienia i filtracji) na postać sygnału.

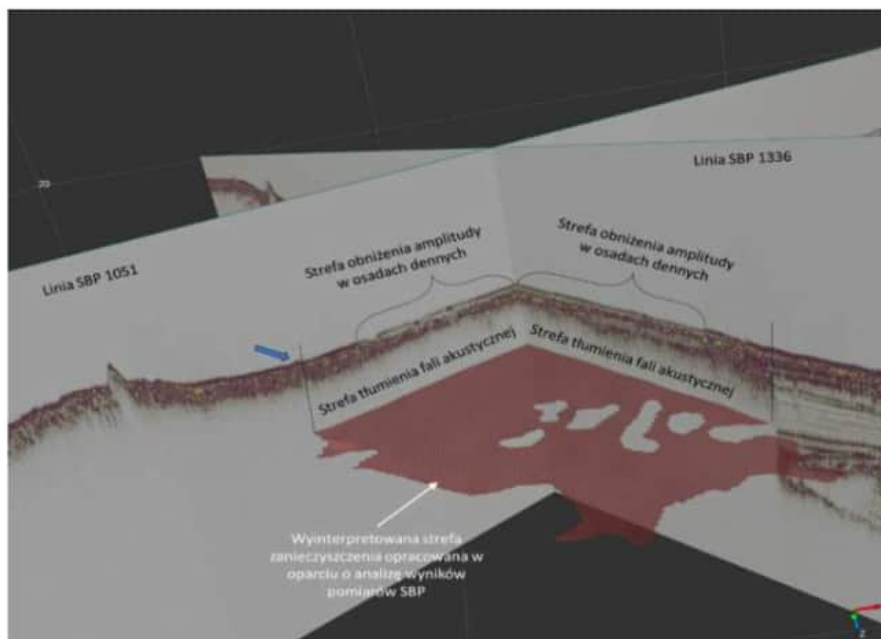
Przyjęta metodyka interpretacji danych SBP była realizowana dwuetapowo. W pierwszym etapie wyznaczano zasięg prawdopodobnej strefy zanieczyszczenia osadów dennych na podstawie systematycznie obniżonych amplitud zapisu akustycznego (anomalii amplitudowa). Etap ten stanowił podstawę do wstępnego wyznaczenia granic strefy oddziaływania w warstwie przydennej. Następnie, w oparciu o wyniki badań powierzchniowych osadów (w tym obserwacje makroskopowe oraz wyniki analiz laboratoryjnych), dokonano reinterpretacji pierwotnie wyznaczonych granic przedstawionych w raporcie częściowym z prac geofizycznych, doprecyzowując obwiednię zasięgu i jej przebieg w obszarach przejściowych. Dodatkowo, w proces delimitacji włączono uwarunkowania morfologiczne dna morskiego opracowane na podstawie danych MBES, traktując lokalne progi, wyniesienia i zagłębienia jako naturalne bariery sedimentacyjne, które mogą ograniczać migrację osadów i sprzyjać ich retencji, a tym samym wpływać na geometrię i stabilność granic skażenia w czasie (redepozycja i wtórne „rozmywanie” granic).

W ujęciu syntetycznym opracowanie obejmuje sześć powiązanych produktów kartograficznych wykonanych na podstawie interpretacji danych SBP. Dla warstwy skażonych osadów przydennych opra-

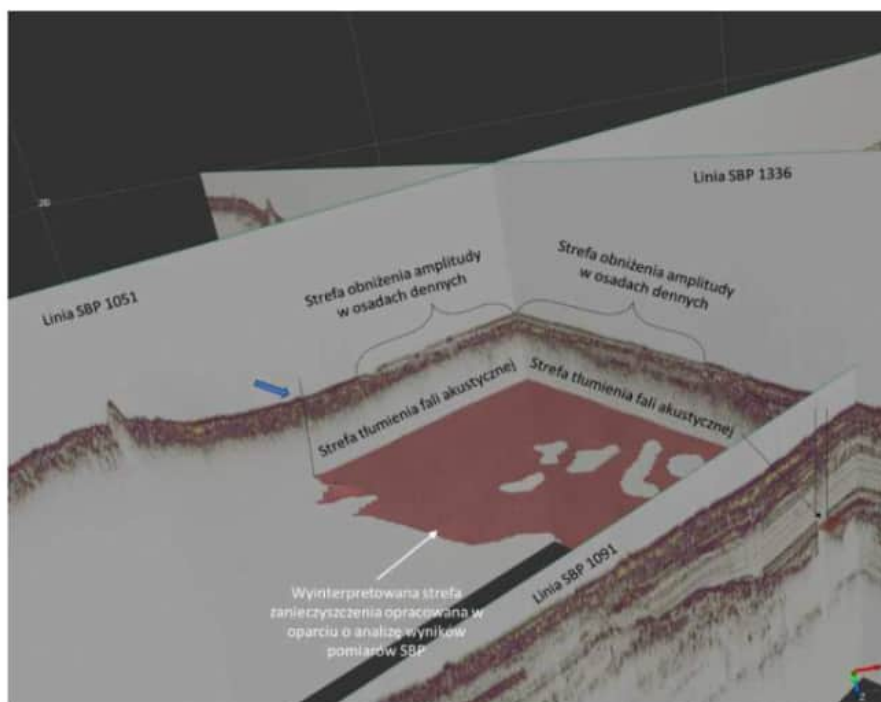
cowano: mapę delimitacji skażonych osadów dennych mapę spągu warstwy skażonych osadów dennych oraz mapę miąższości warstwy skażonych osadów dennych. Równolegle, w odniesieniu do głębszych partii osadów – interpretowanych jako potencjalnie związane z akumulacją płynnej formy paliwa, przy zwiększonej niepewności wynikającej z osłabionej jakości i penetracji zapisu – opracowano: mapę delimitacji głębszych osadów prawdopodobnie skażonych płynną formą paliwa, mapę spągu głębszych osadów prawdopodobnie skażonych płynną formą paliwa oraz mapę miąższości głębszych osadów prawdopodobnie skażonych płynną formą paliwa. Wyniki skorelowano z przeprowadzonymi badaniami dna.



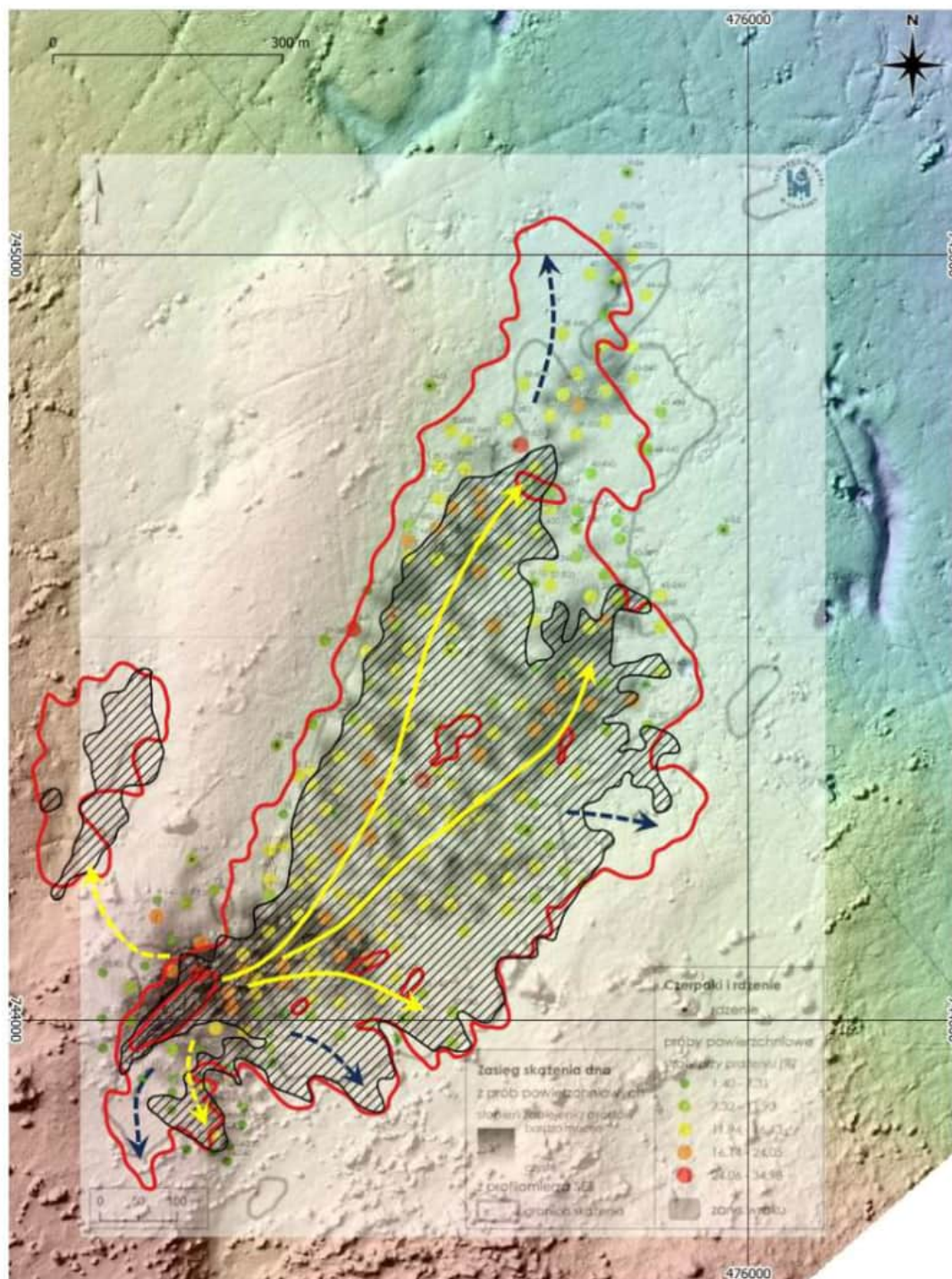
Rysunek 1 Wizualizacja dwóch prostopadłych SBP (linie 1040 i 1336) wraz z przestrzenną rekonstrukcją przestrzennego rozkładu strefy zanieczyszczenia (kolor czerwono-różowy) w wariantie wstępnej interpretacji.



Rysunek 2 Wizualizacja dwóch prostopadłych SBP (linie 1051 i 1336) wraz z przestrzenną rekonstrukcją przestrzennego rozkładu strefy zanieczyszczenia (kolor czerwono-różowy) w wariacie wstępnej interpretacji.

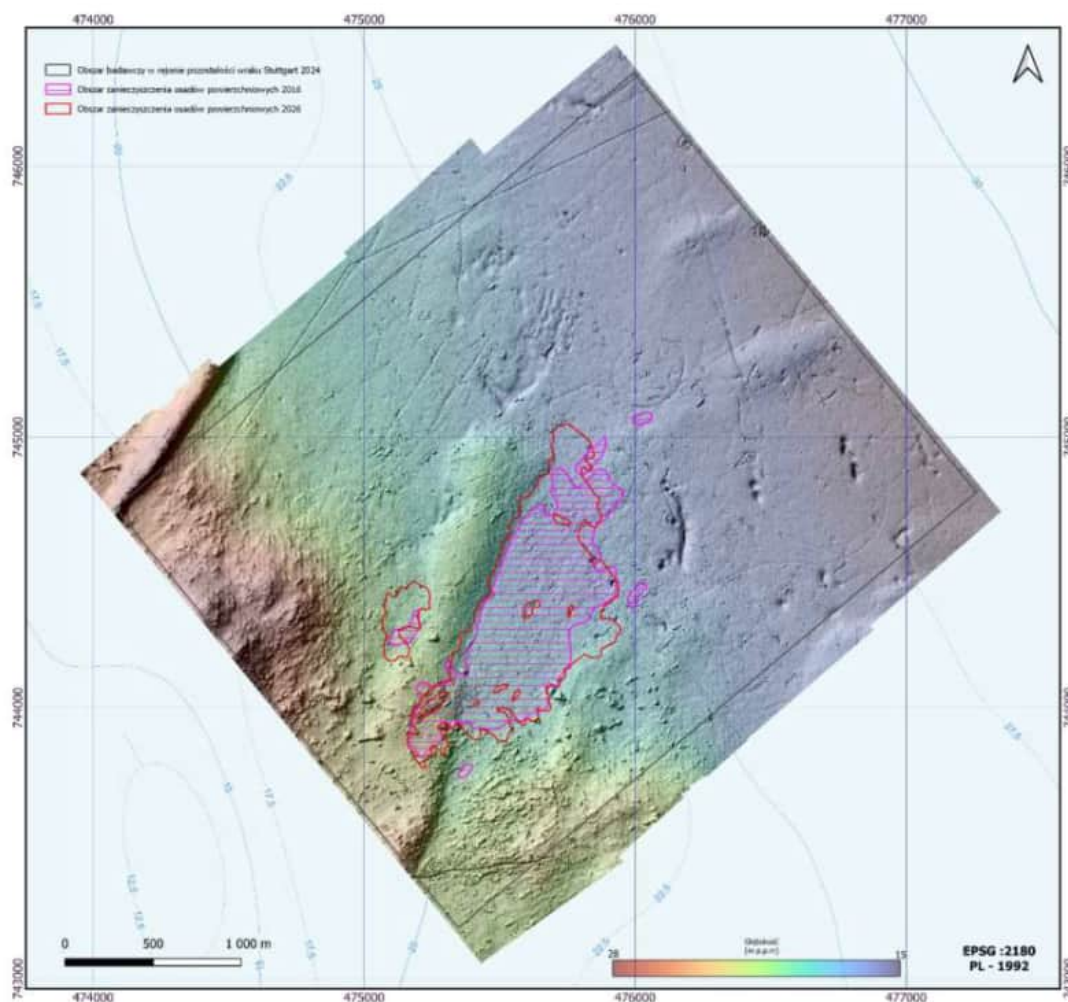


Rysunek 3 Wizualizacja linii 1051, 1091 i 1336) wraz z przestrzenną rekonstrukcją przestrzennego rozkładu strefy zanieczyszczenia (kolor czerwono-różowy) w wariacie wstępnej interpretacji.



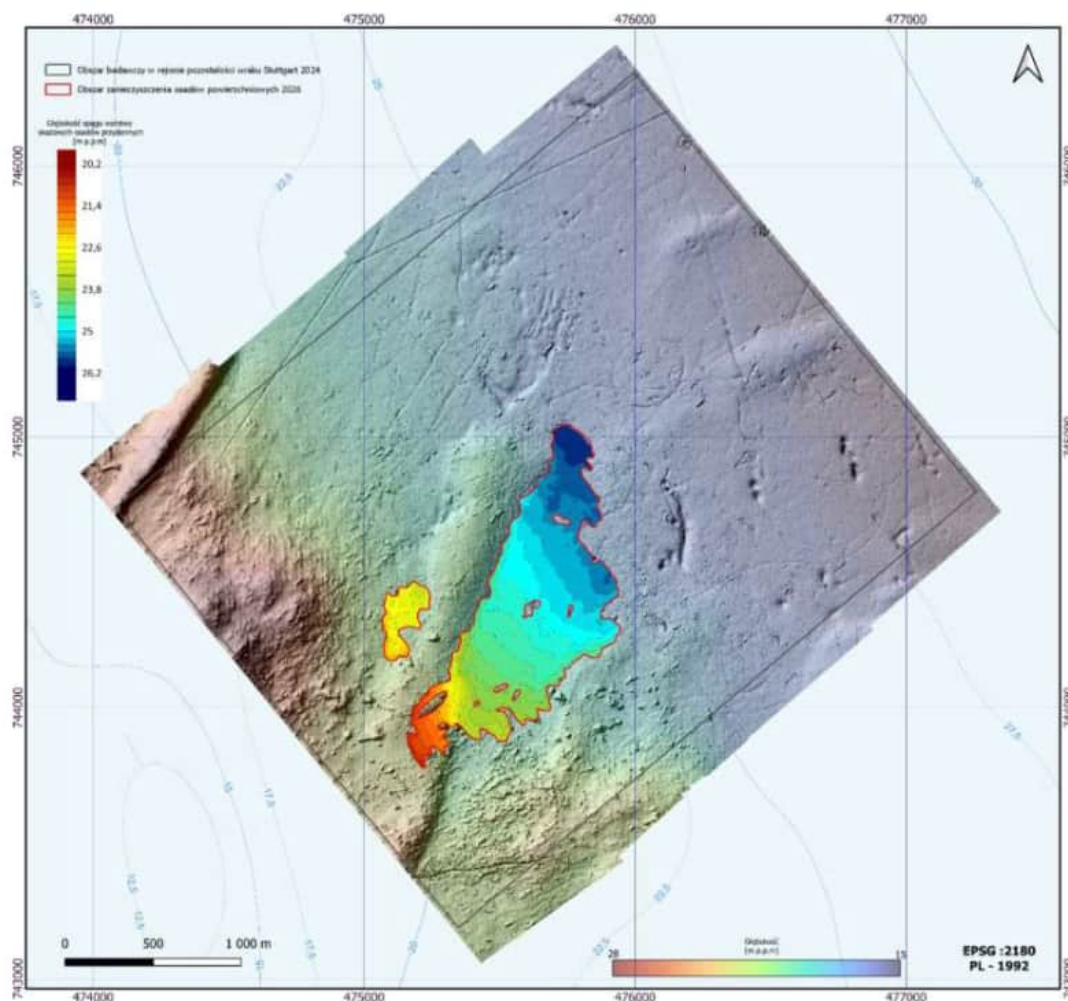
Rysunek 4 Korelacja mapy obrazującej zasięg skażenia dna z granicami stref zanieczyszczenia opracowanymi na podstawie pomiarów SBP. Żółtymi strzałkami oznaczono potencjalne kierunki migracji potwierdzające trafność wykonanej interpretacji.

Na podstawie interpretacji anomalii amplitudowej opracowano mapę zasięgu skażenia osadów przydennych (Rysunek 5), delimitując obszary, w których amplitudy reflektorów przydennych były zaniżone względem tła. W procesie wyznaczania granic uwzględniono elementy morfologiczne mogące ograniczać migrację osadów, takie jak progi, wyniesienia i zagłębienia. W lokalizacji wskazanej na Rysunek 2 widoczne są cechy sugerujące istnienie progu topograficznego, który może stanowić barierę dla lateralnej migracji węglowodorów przemieszczających się grawitacyjnie wzdłuż pochytych, bardziej przepuszczalnych poziomów osadów.

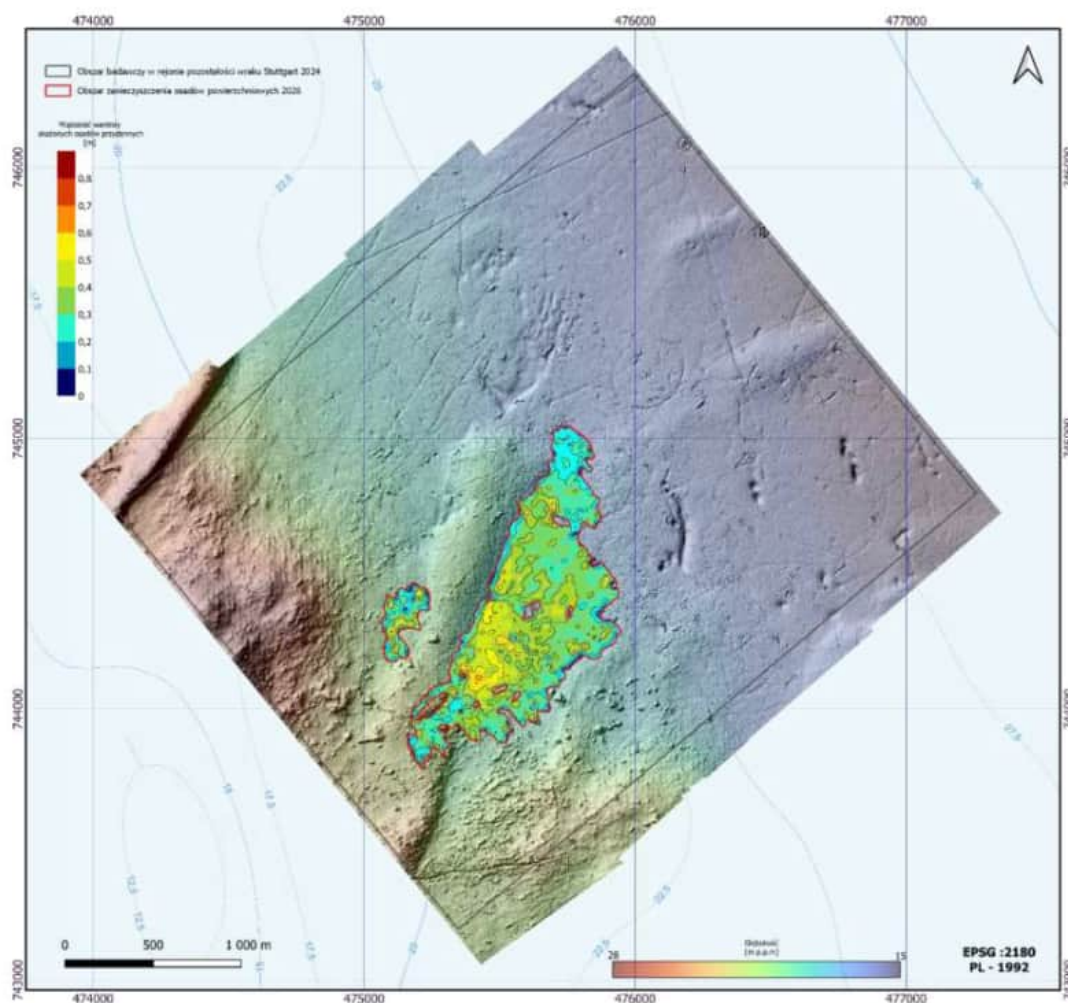


Rysunek 5 Mapa delimitacji skażonych osadów dennych na podstawie pomiarów SBP

Drugą mapę (Rysunek 6) opracowano jako ujęcie miąższości skażonych osadów przydennych oraz jako produkt strukturalny opisujący geometrię spągu strefy skażenia. W pierwszym kroku na profilach SBP interpretowano pionowy zasięg strefy anomalii amplitudowej, tj. od powierzchni dna do poziomu, poniżej którego zapis reflektorów powracał do charakterystyki tła. Następnie opracowano mapę strukturalną spągu strefy skażenia (Rysunek 7) poprzez korelację interpretacji na pełnej siatce profili. Finalną miąższość warstwy skażonej obliczono jako różnicę pomiędzy morfologią dna a wartościami z mapy spągu, co zapewnia spójne, geometryczne ujęcie miąższości w planie i ogranicza wpływ lokalnych zmian nachylenia dna na wynik. Jednocześnie wskazano, że w obszarach obniżonej penetracji, rozproszenia sygnału lub zaburzeń zapisu określenie spągu może być obarczone zwiększoną niepewnością interpretacyjną.



Rysunek 6 Mapa spągu warstwy skażonych osadów dennych na podstawie pomiarów SBP

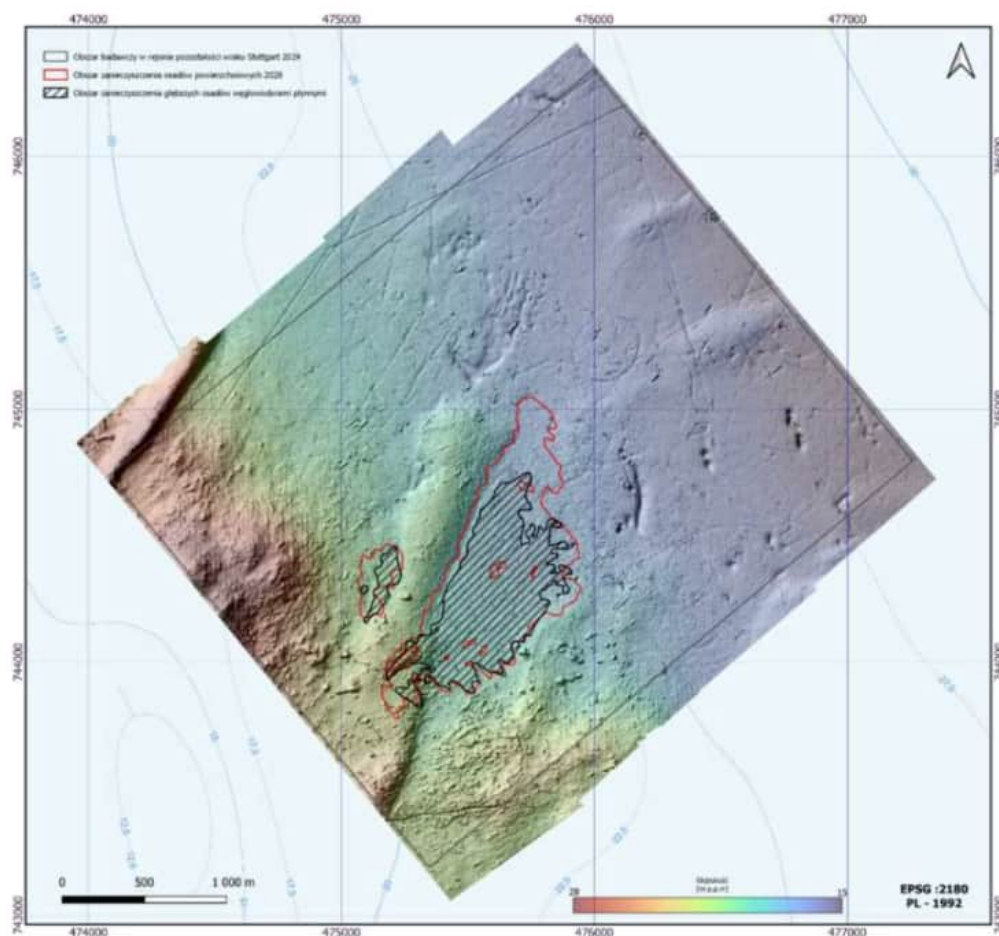


Rysunek 7 Mapa miąższości warstwy skażonych osadów dennych na podstawie pomiarów SBP

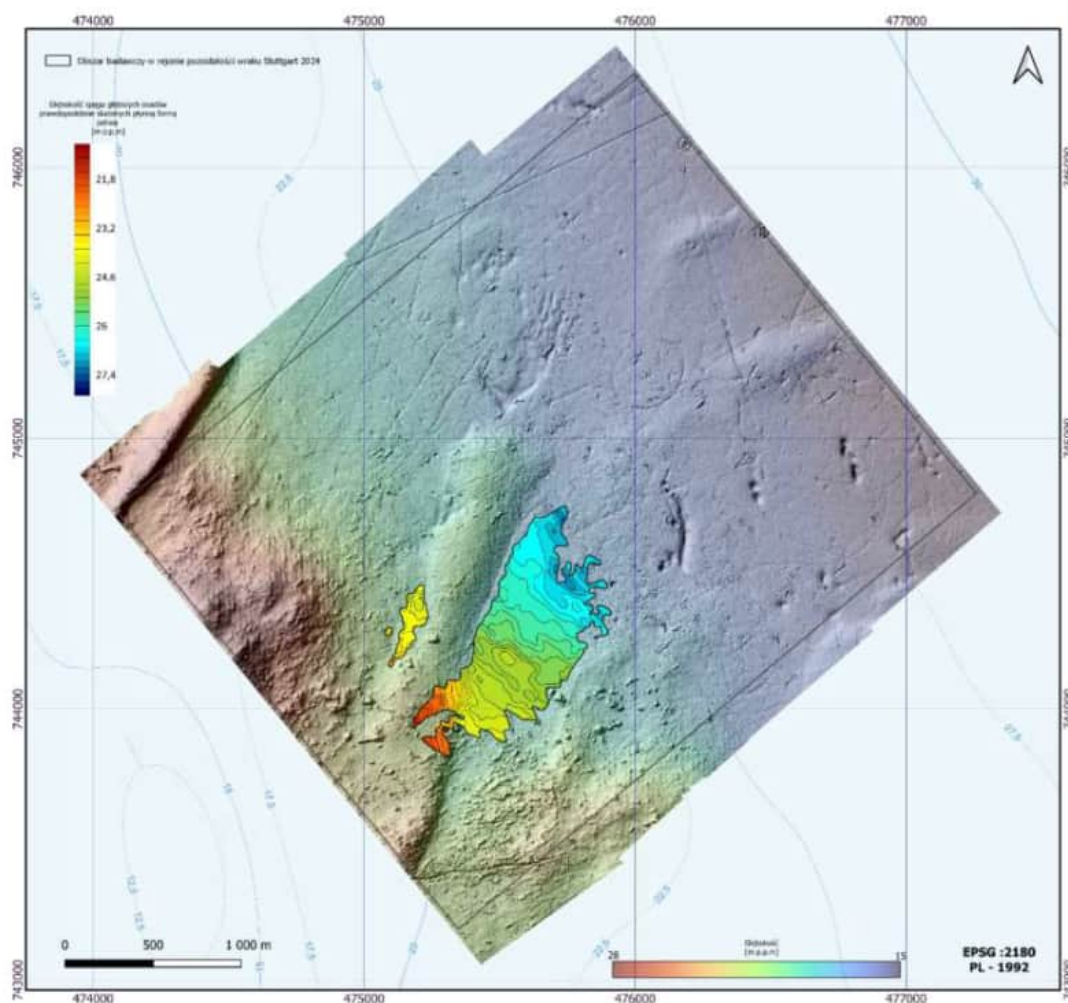
Drugą kluczową anomalią sejsmoakustyczną widoczną na profilach SBP jest strefa tłumienia fali akustycznej (*ang. acoustic blanking*), stanowiąca najbardziej charakterystyczny i diagnostyczny wskaźnik obecności wysokich koncentracji węglowodorów lub gazu w osadach. Strefa ta jest rozpoznawana jako obszar całkowitego lub prawie całkowitego wygaszenia sygnału, w którym brak jest reflektorów i struktur wewnętrznych (Rysunek 1, Rysunek 2 oraz Rysunek 3). W analizowanym rejonie blanking widoczny jest poniżej strefy obniżonej amplitudy, rozpoczynając się na głębokości około 2–5 m poniżej dna morskiego (zależnie od lokalnych warunków litologicznych i stopnia nasycenia). Mechanizm blankingu wiąże się z bardzo wysokim tłumieniem energii fali w ośrodku zawierającym znaczne ilości prawdopodobnie węglowodorów płynnych oraz prawdopodobnie gazu biogenicznego, a także z intensywnym rozproszeniem energii na granicach międzyfazowych pomiędzy szkieletem osadu, wodą porową, węglowodorami i fazą gazową. Na tej podstawie opracowano mapę zasięgu osadów zanie-

czyszczonych węglowodorami płynnymi (Rysunek 8), delimitując obszary występowania stref tłumienia oraz oceniając ich spójność przestrzenną w skali całego obszaru badań. Na Rysunek 9 oraz Rysunek 6 analogicznie jak wyżej wyznaczono mapę strukturalną spągu tej warstwy oraz jej miąższość.

Miąższość głębszej warstwy wyliczono jako różnicę pomiędzy spągiem warstwy zanieczyszczonej a głębszą granicą (Rysunek 6). Niejednoznaczność wynika właśnie z rozproszenia i wytłumienia, jednak kształt oraz spójność przestrzenna tej powierzchni wskazują, że wykonana interpretacja jest prawdopodobna. Jednocześnie należy jednoznacznie stwierdzić, że w tej części opracowania analiza ma w większym stopniu charakter jakościowy niż ilościowy: wskazuje możliwe miąższości głębszych partii osadów oraz potencjalne strefy akumulacji zanieczyszczeń ropopochodnych, ale wymaga weryfikacji na podstawie danych niezależnych.



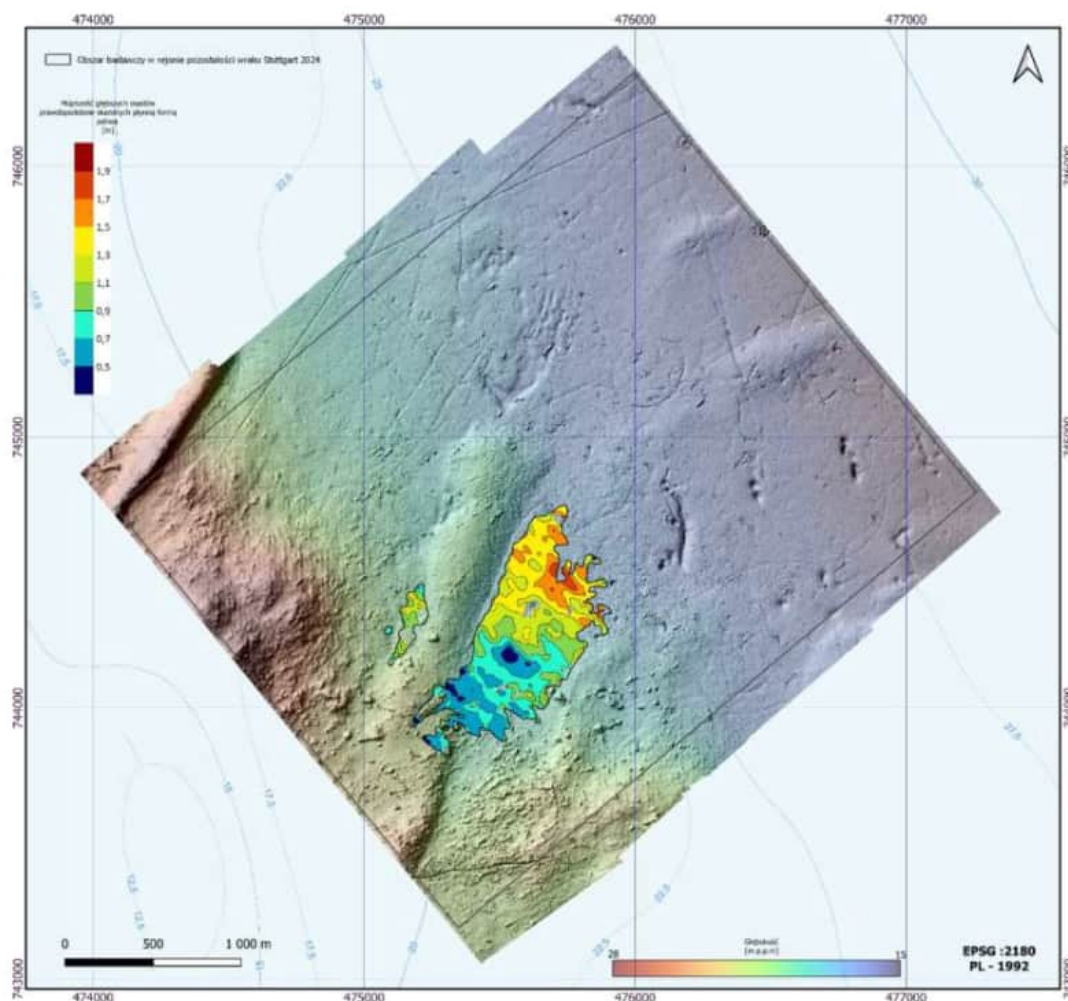
Rysunek 8 Mapa delimitacji głębszych osadów prawdopodobnie skażonych płynną formą paliwa na podstawie pomiarów SBP



Rysunek 9 Mapa spągu głębszych osadów prawdopodobnie skażonych płynną formą paliwa na podstawie pomiarów SBP

Dla porównania, na poniższym rysunku (Rysunek 10), przedstawiono zasięg skażenia dna paliwem ciężkim wypływającym z wraku Stuttgart w latach 1999–2016, opracowany w ramach dokumentu „Analiza dotycząca zanieczyszczeń Morza Bałtyckiego...” (OE-364, Warszawa 2021). Mapy prezentowane w niniejszym opracowaniu wykazują pełną korelację z wynikami odniesienia w zakresie głównych granic i kierunków rozprzestrzeniania się kontaminacji. Zestawienie granic stref oddziaływania obejmuje zasięg skażenia osadów przydennych opracowany na podstawie interpretacji SBP (obwiednia w kolorze brązowym) oraz granice skażenia z opracowań odniesienia dla lat 2016 i 2026 (linia różowa i pomarańczowa). Układ ten umożliwia ocenę zgodności przestrzennej oraz identyfikację obszarów, w których interpretacja SBP wskazuje na potencjalne rozszerzenie strefy oddziaływania. Obwiednia SBP obejmuje obszary systematycznego obniżenia amplitudy reflektorów przydennych i tworzy główny, wydłużony zasięg wokół wraku oraz strefy peryferyjne, w tym odrębny płat po stronie zachod-

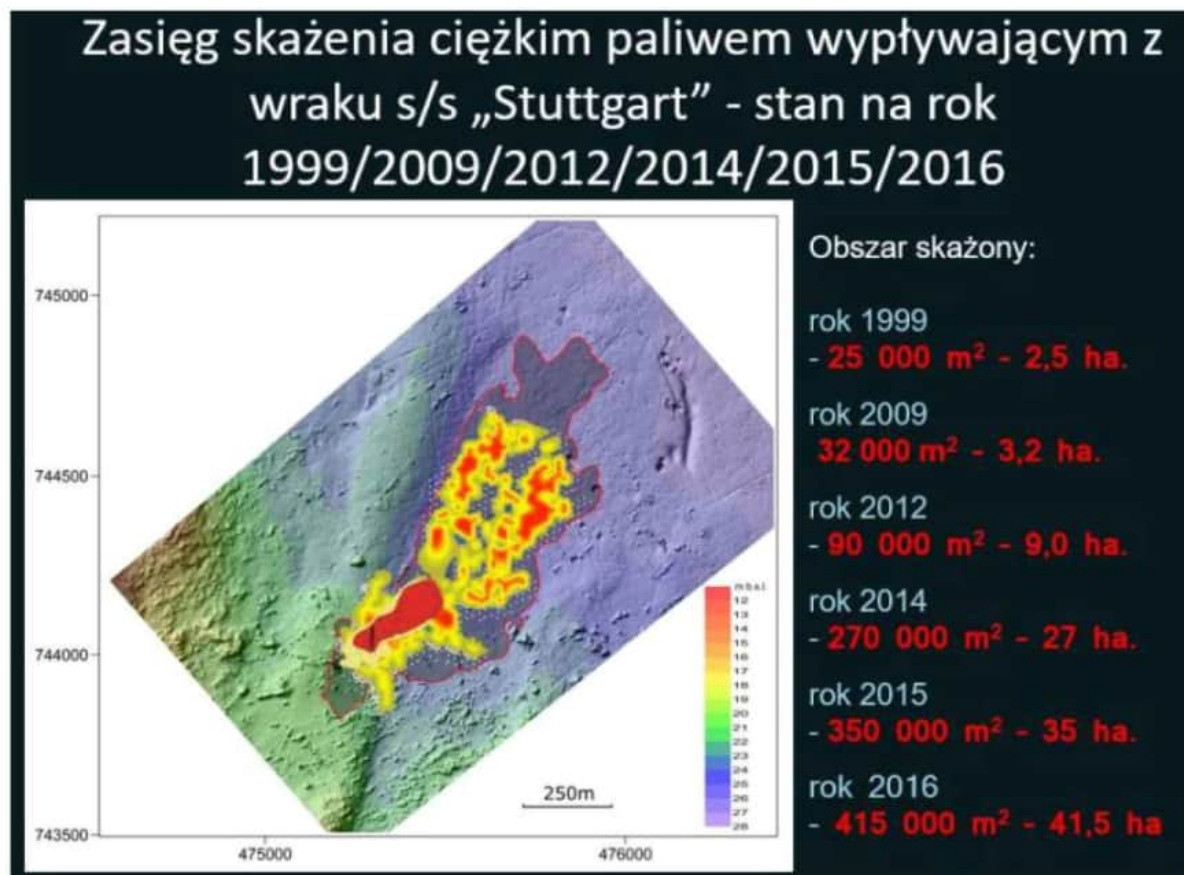
niej i mniejsze, izolowane anomalie po stronie wschodniej i północno-wschodniej. Charakter granicy (nieregularny, z lokalnymi „językami” i wydzielieniami) jest spójny z założeniem, że rozkład skażenia pozostaje pod wpływem lokalnych uwarunkowań morfologicznych i sedymentacyjnych, sprzyjających retencji osadów w obniżeniach oraz ograniczających lateralną migrację i wtórną redepozycję



Rysunek 10 Mapa miąższości głębszych osadów prawdopodobnie skażonych płynną formą paliwa na podstawie pomiarów SBP

Granice z lat 2016 i 2026 wykazują wysoką zgodność z częścią centralną zasięgu SBP, jednak na wielu odcinkach przebiegają wewnątrz obwiedni SBP, co sugeruje, że interpretacja SBP obejmuje szerszą strefę oddziaływania przydenne, uwzględniając także obszary przejściowe o słabszym lub bardziej rozproszonym sygnale skażenia. W konsekwencji delimitacje 2016 i 2026 należy traktować jako strefę rdzeniową o wyższym stopniu jednoznaczności, natomiast obwiednię SBP jako rozszerzoną strefę od-

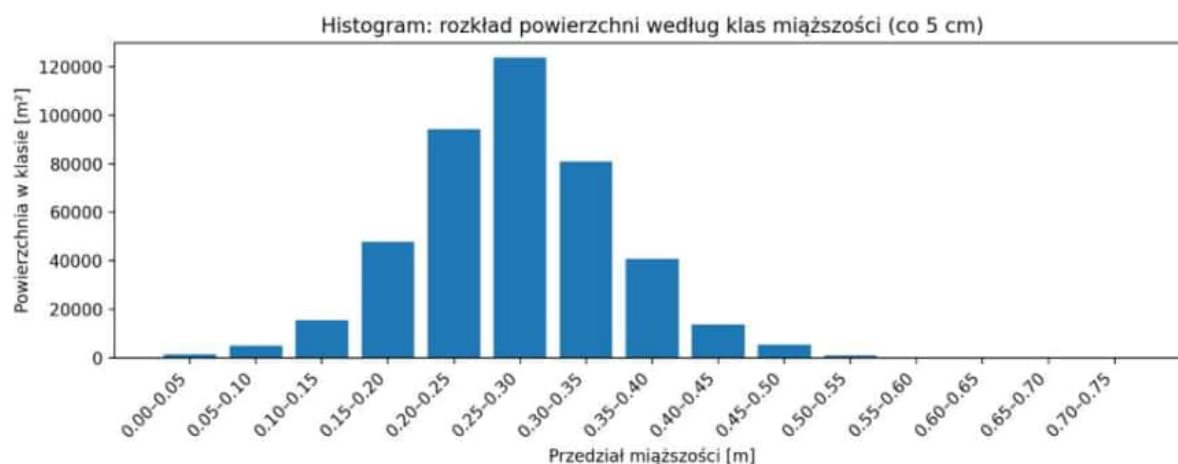
działywania, potencjalnie obejmującą również obszary podwyższonej niepewności interpretacyjnej wymagające weryfikacji w oparciu o dane geochemiczne z opróbowania osadów oraz korelację z danymi MBES i sonarowymi.



Rysunek 11 Zasięg skażenia dna paliwem ciężkim wypływającym z wraku Stuttgart w latach 1999 – 2016), Źródło: Opinie i ekspertyzy OE-364, Warszawa 2021. Opracowanie pt.: Analiza dotycząca zanieczyszczeń Morza Bałtyckiego, ze szczególnym uwzględnieniem statków zatopionych podczas I i II wojny światowej. Informacja na temat działań podjętych w związku z zanieczyszczeniami przez Parlament Europejski, Komisję Helsińską oraz rządy innych państw

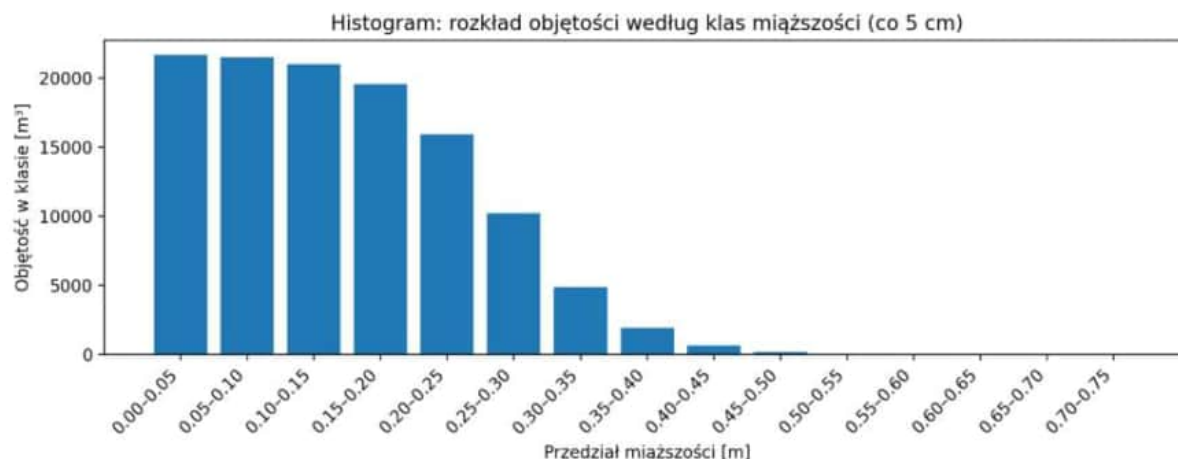
Opracowanie uzupełniono o analizę opisującą miąższość warstwy osadów dennych (Rysunek 7) zaklasyfikowanej jako zanieczyszczona substancjami ropopochodnymi (w tym potencjalnie mazutem). Zestawienie wykonano dla zakresu konturów 0,00–0,75 m, z interwałem 0,05 m (5 cm). Bilans powierzchniowy oparto o wartości powierzchni w rzucie poziomym (XY) (ang. Planar Area), ponieważ różnice pomiędzy nią i powierzchnią rzeczywistą są niewielkie, co wskazuje, że nachylenia i pofałdowanie powierzchni grida mają marginalny wpływ na bilanse w skali analizowanego obszaru. Powierzchnia całkowita analizowanego obszaru wynosi 430 699 m², co odpowiada 43,0699 ha. Obszar o dodatniej miąższości (warstwa zidentyfikowana jako zanieczyszczona) obejmuje 429 756 m²

(42,9756 ha), tj. 99,781% całości. Łączna dodatnia objętość warstwy wynosi 117 417,6 m³, a średnia miąższość na obszarze dodatnim wynosi około 0,273 m (27,3 cm). Rozkład miąższości w klasach 5-centymetrowych wskazuje dominację przedziałów 0,20–0,35 m, przy czym największy udział powierzchni ma klasa 0,25–0,30 m. Strefy o większej miąższości występują lokalnie. Obszar z miąższością przekraczającą 0,40 m stanowi 20 740,7 m² (2,0741 ha), a obszar przekraczający 0,50 m – 1 380,1 m² (0,1380 ha). Dla wizualizacji struktury warstwy przygotowano histogramy rozkładu powierzchni oraz rozkładu objętości w klasach co 0,05 m.



Rysunek 12 Histogram rozkładu powierzchni (ang. Planar Area) w klasach miąższości co 0,05 m dla interpretowanej warstwy głębszych osadów dennych (izopacha oparta na założeniach interpretacyjnych ze względu na słabą jakość danych akustycznych).

Wyniki rozkładu miąższości przedstawiono w Tabeli 11. Tabela ta porządkuje miąższość zanieczyszczonych osadów w kolejnych przedziałach co 0,05 m i pokazuje jednocześnie informację o zasięgu przestrzennym oraz o kubaturze w każdej klasie. W kolumnie „Przedział miąższości [m]” podano zakres grubości przypisany do danej klasy (np. 0,25–0,30 oznacza obszary, gdzie miąższość mieści się w tym przedziale). Kolumna „Powierzchnia w klasie [m²]” określa, jak duży obszar w planie ma miąższość z danego przedziału, natomiast „Udział pow. w całości [%]” jest przeliczeniem tej powierzchni na procent całej analizowanej powierzchni, co ułatwia porównywanie klas niezależnie od jednostek. Kolumna „Objętość w klasie [m³]” przedstawia część bilansu objętości przypisaną do danego przedziału 5-centymetrowego (tj. rozbitcie całkowitej kubatury na „plastry” grubości 0,05 m), a „Udział objętości [%]” pokazuje, jaki procent całkowitej objętości przypada na daną klasę. Interpretacyjnie oznacza to, że kolumny powierzchniowe wskazują, które miąższości dominują przestrzennie (jak wygląda „typowa” grubość warstwy w planie), a kolumny objętościowe – w jakich przedziałach skupia się największa część kubatury materiału. Histogramy stanowią graficzną reprezentację tego samego rozkładu: histogram powierzchni pokazuje koncentrację zasięgu w wybranych przedziałach miąższości, natomiast histogram objętości wskazuje, gdzie koncentruje się dominująca część kubatury.



Rysunek 13 Histogram rozkładu objętości w klasach miąższości co 0,05 m dla interpretowanej warstwy głębszych osadów dennych (izopacha oparta na założeniach interpretacyjnych ze względu na słabą jakość danych akustycznych).

Tabela 11 Rozkład miąższości warstwy zanieczyszczonych osadów (klasy co 5 cm) – bilans powierzchni i objętości

Przedział miąższości [m]	Powierzchnia w klasie [m²]	Udział pow. w całości [%]	Objętość w klasie [m³]	Udział objętości [%]
0,00-0,05	1 402,5	0,326	21 629,6	18,421
0,05-0,10	4 964,6	1,153	21 479,6	18,293
0,10-0,15	15 445,1	3,586	20 978,8	17,867
0,15-0,20	47 743,7	11,085	19 537,6	16,637
0,20-0,25	94 175,8	21,866	15 917,9	13,557
0,25-0,30	123 682,1	28,717	10 192,0	8,680
0,30-0,35	80 830,6	18,769	4 856,7	4,136
0,35-0,40	40 771,3	9,465	1 933,7	1,647
0,40-0,45	13 841,2	3,214	648,5	0,552
0,45-0,50	5 519,4	1,281	184,9	0,157
0,50-0,55	983,1	0,228	41,0	0,035
0,55-0,60	237,6	0,055	14,5	0,012
0,60-0,65	157,5	0,037	2,8	0,002
0,65-0,70	1,8	0,0004	0,145	0,0001
0,70-0,75	0,118	0,00003	0,0066	0,00001

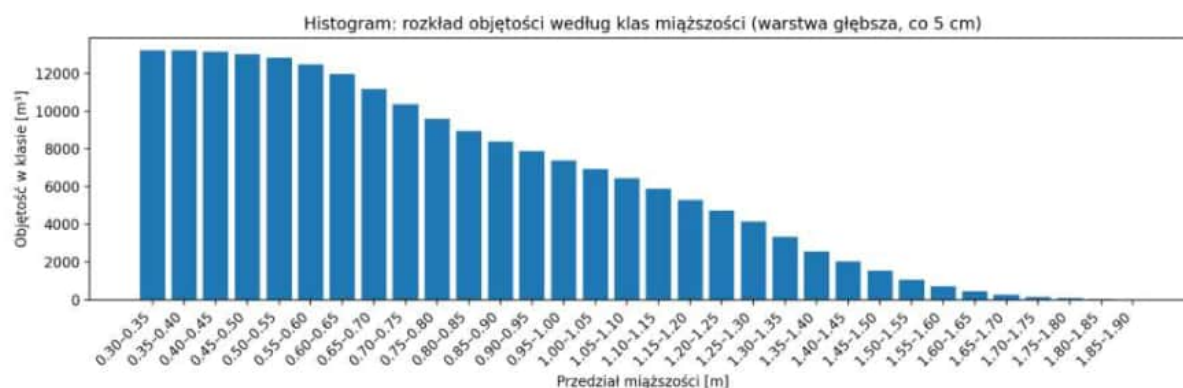
Analogicznie do, rozkład miąższości interpretowanej warstwy głębszej przedstawiono w

Tabela 12 Rozkład miąższości interpretowanej warstwy głębszej (klasy co 5 cm) – bilans powierzchni i objętości

Tabela 12. Tabela ta ma taką samą logikę odczytu: prezentuje przedziały miąższości co 0,05 m, powierzchnię obszaru przypisaną do każdego przedziału, procentowy udział tej powierzchni w całym analizowanym obszarze, a następnie objętość przypisaną do danej klasy oraz jej udział procentowy w całkowitej objętości. Różnica polega na tym, że izopacha warstwy głębszej powstała w oparciu o granicę wyinterpretowaną przy bardzo słabej jakości danych akustycznych poniżej strefy głębszych osadów, przez co tabela ta pełni przede wszystkim funkcję jakościowego zobrazowania możliwego rozkładu miąższości, a nie podstawy do rozliczeń ilościowych. W tym sensie kolumny powierzchniowe wskazują, gdzie interpretacja sugeruje relatywnie częstsze występowanie określonych miąższości, a kolumny objętościowe, w których przedziałach miąższości koncentruje się na bilansie kubatury wynikający z przyjętego modelu interpretacyjnego. Histogramy przypisane do tej warstwy stanowią wizualizację rozkładów z Tabeli 48 i powinny być interpretowane jako wskaźnikowe.



Rysunek 14 Histogram rozkładu powierzchni (ang. Planar Area) w klasach miąższości co 0,05 m dla interpretowanej warstwy głębszych osadów dennych (izopacha oparta na założeniach interpretacyjnych ze względu na słabą jakość danych akustycznych).



Rysunek 15 Histogram rozkładu objętości w klasach miąższości co 0,05 m dla interpretowanej warstwy głębszych osadów dennych (izopacha oparta na założeniach interpretacyjnych ze względu na słabą jakość danych akustycznych).

Tabela 12 Rozkład miąższości interpretowanej warstwy głębszej (klasy co 5 cm) – bilans powierzchni i objętości

Przedział miąższości [m]	Powierzchnia w klasie [m ²]	Udział pow. w całości [%]	Objętość w klasie [m ³]	Udział objętości [%]
0,30–0,35	0,0	0,000	13 227,6	6,637
0,35–0,40	257,2	0,099	13 225,1	6,635
0,40–0,45	2 647,3	1,014	13 152,6	6,599
0,45–0,50	2 635,8	1,010	13 012,5	6,528
0,50–0,55	5 025,5	1,926	12 831,8	6,437
0,55–0,60	8 004,4	3,068	12 497,0	6,269
0,60–0,65	12 888,3	4,939	11 982,0	6,011
0,65–0,70	17 612,2	6,749	11 165,4	5,602
0,70–0,75	15 283,7	5,857	10 355,5	5,196
0,75–0,80	14 664,8	5,620	9 578,2	4,806
0,80–0,85	11 136,1	4,268	8 941,1	4,486
0,85–0,90	10 959,6	4,201	8 382,1	4,205
0,90–0,95	9 181,3	3,519	7 861,9	3,944
0,95–1,00	9 117,7	3,495	7 402,6	3,714
1,00–1,05	9 584,0	3,672	6 931,6	3,478
1,05–1,10	10 297,1	3,946	6 438,5	3,231
1,10–1,15	11 763,1	4,509	5 880,5	2,950
1,15–1,20	11 057,5	4,239	5 290,0	2,654
1,20–1,25	10 997,8	4,216	4 739,3	2,378
1,25–1,30	13 637,1	5,228	4 133,0	2,074
1,30–1,35	16 522,5	6,331	3 347,8	1,680
1,35–1,40	12 857,3	4,928	2 572,0	1,290
1,40–1,45	9 301,1	3,564	2 037,9	1,023
1,45–1,50	10 273,5	3,937	1 540,4	0,773
1,50–1,55	8 392,6	3,216	1 056,2	0,530
1,55–1,60	5 736,7	2,198	703,4	0,353
1,60–1,65	4 651,1	1,782	442,5	0,222
1,65–1,70	2 707,9	1,038	255,9	0,128
1,70–1,75	1 325,9	0,508	154,8	0,078
1,75–1,80	1 146,7	0,439	95,7	0,048
1,80–1,85	1 200,3	0,460	30,3	0,015
1,85–1,90	68,7	0,026	0,745	0,000

3.3 Strefowanie obszaru skażonego

Kluczowym elementem efektywnego wdrażania Planu Neutralizacji Zagrożeń jest precyzyjne strefowanie obszaru skażonego, czyli podział terenu wokół wraku S/S Stuttgart na sektory o zróżnicowanym priorytecie i reżimie technologicznym (Wrak SS Stuttgart, Obszary Zastoiskowe, Obszary skażone: Strefy A, B i C). Proces ten opiera się na korelacji danych z pomiarów geofizycznych (SBP, MBES) oraz analiz chemicznych osadów dennych pod kątem stężeń węglowodorów aromatycznych (WWA).

Dlaczego stosujemy strefowanie?

Głównym powodem jest fakt, że skażenie nie rozkłada się równomiernie. Wrak SS Stuttgart jest bardzo zniszczony i ciągle może zawierać spore ilości paliwa ciężkiego (założenie robocze poparte istnieniem jeziorzek zastoiskowych). Bezpośrednio przy wraku występują tzw. „hotspoty” o ekstremalnym stężeniu zanieczyszczeń, podczas gdy obszary peryferyjne wykazują od bardzo dużego do jedynie śladowej wartości zanieczyszczeń. Stąd potrzeba dokonania podziału obszarów. Zastosowanie jednej, inwazyjnej metody na całym obszarze 41,5 (45 ha) ha byłoby nieuzasadnione ekonomicznie i szkodliwe dla ekosystemu.

3.3.1 Cel i korzyści:

Nadrzędnym celem strefowania jest optymalizacja nakładów inwestycyjnych oraz minimalizacja ryzyk wtórnych. Dzięki segmentacji możliwe jest:

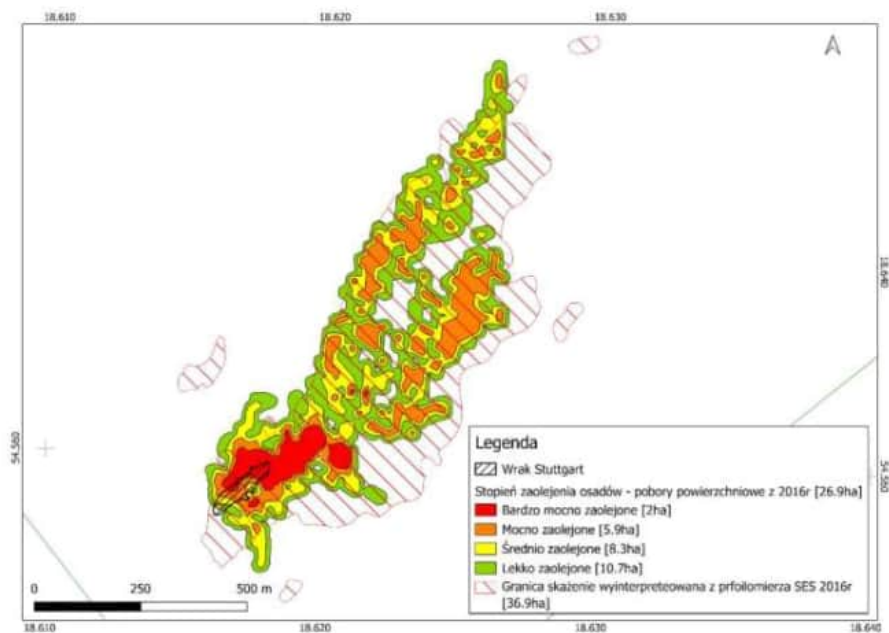
- Dopasowanie technologii do aktualnego, zbadanego stanu środowiska: stosowanie cappingu aktywnego wyłącznie tam, gdzie stężenia zanieczyszczeń wielokrotnie przekraczają normy TEL/PEL i gdzie naturalna atenuacja jest niewystarczająca do osiągnięcia celów RDW w horyzoncie do 50 lat (Strefa A i B), oraz poprzestanie na monitoringu pasywnym w Strefie C, w której wyniki badań 2025 potwierdzają zbliżenie stężeń do tła naturalnego i obserwowane tempo samooczyszczania 2–5%/rok.
- Precyzyjne zarządzanie bezpieczeństwem: określenie rygorystycznych procedur HSE i wymogów dotyczących środków ochrony indywidualnej (ŚOI) dla personelu pracującego w najbardziej skażonych sektorach.
- Ochrona ekosystemu: ograniczenie ingerencji w dno morskie do absolutnego minimum, co pozwala na szybszą rekolonizację bentosu w obszarach mniej dotkniętych skażeniem.

Strefowanie umożliwia zatem przejście od ogólnych założeń teoretycznych do chirurgicznej precyzji działań naprawczych, co jest warunkiem koniecznym dla uzyskania akceptacji organów regulacyjnych (RDOŚ) oraz zapewnienia trwałości efektu ekologicznego.

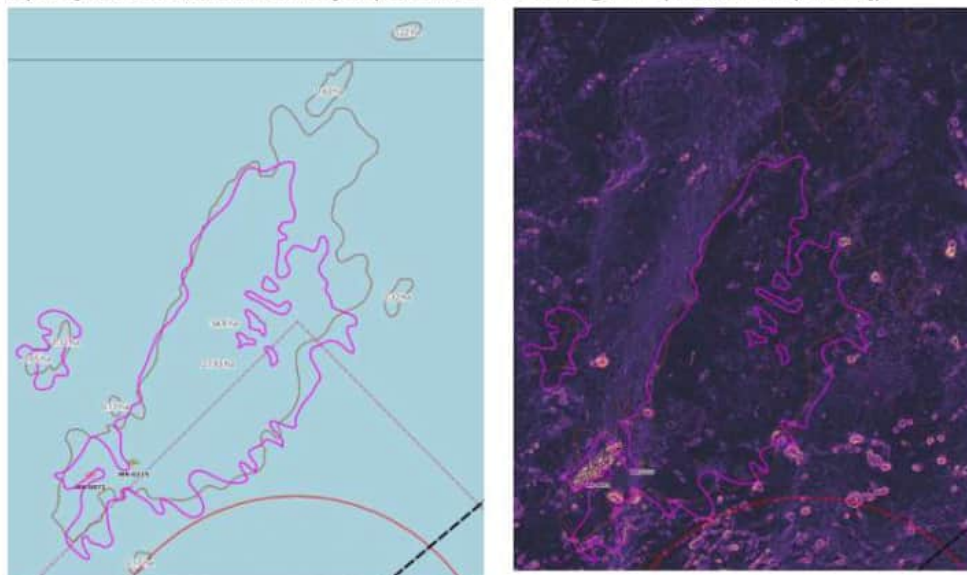
Tabela 13 Strefowanie obszaru skażonego

Termin	Definicja	Uwagi praktyczne
WRAK	Wrak morski to pozostałość statku lub innej jednostki pływającej, która uległa zniszczeniu, zatонуła lub osiadła na mieliźnie i została porzucona. W ujęciu prawnym i archeologicznym za wrak uznaje się nie tylko sam kadłub, ale także wszelkie przedmioty znajdujące się na jego pokładzie oraz wyposażenie rozproszone na dnie morza w wyniku katastrofy. Wraki stanowią cenne źródło informacji historycznych, a z czasem stają się	Interwencja jest niezbędna, gdy postępująca korozja kadłuba grozi rozszczelnieniem zbiorników z paliwem ciężkim (HFO), olejami napędowymi czy toksycznymi ładunkami. W takich przypadkach służby muszą działać prewencyjnie, odsysając substancje niebezpieczne, zanim dojdzie do niekontrolowanego wycieku, który mógłby skażyć plażę, zniszczyć lokalne ekosystemy i narazić państwo na ogromne koszty sprzątania.

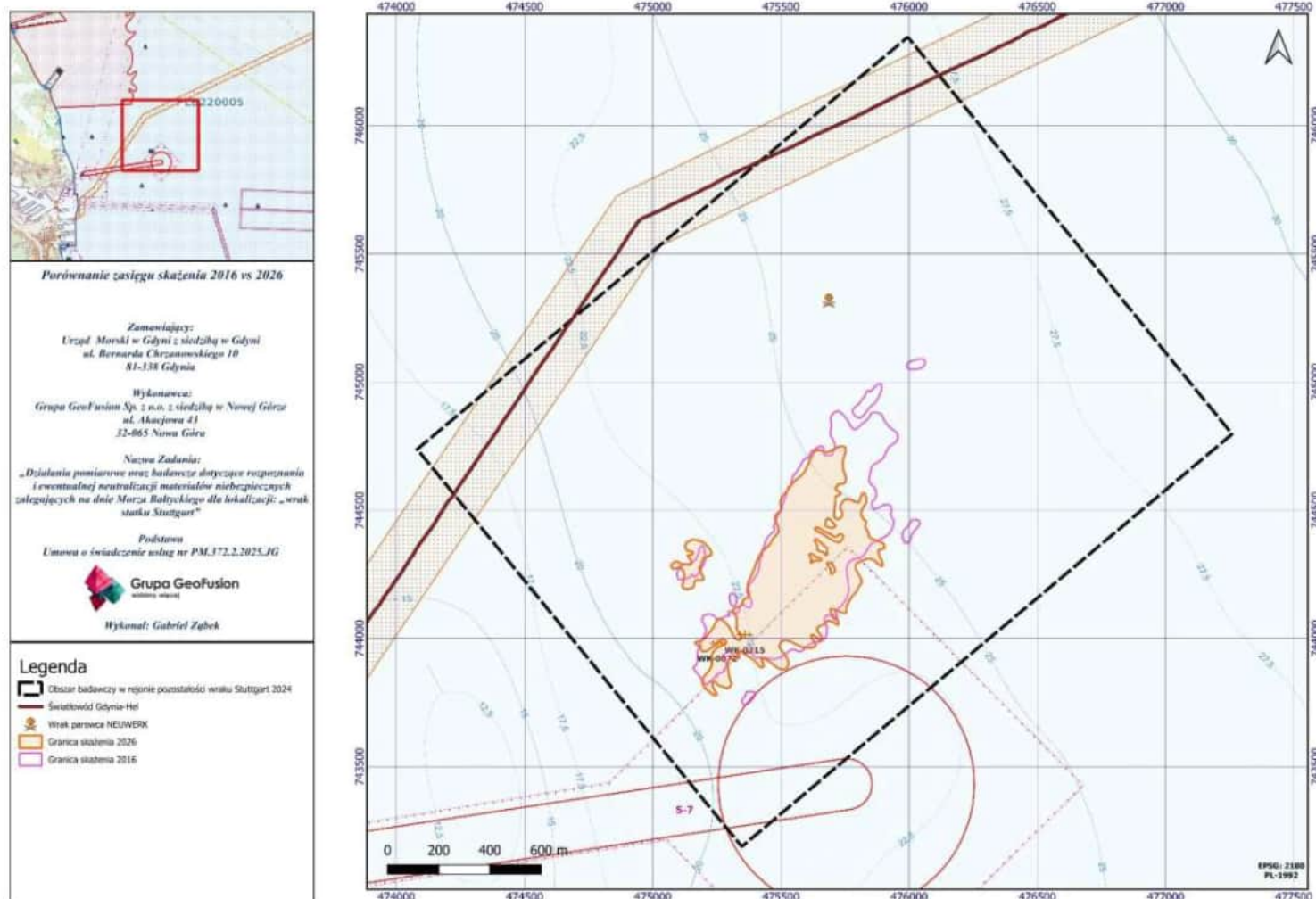
Termin	Definicja	Uwagi praktyczne
	również sztucznymi rafami, tworząc unikalne ekosystemy dla morskiej fauny i flory.	
Strefa A (hotspoty i obszary ekstremalnie zanieczyszczone)	Obszar o najwyższym stężeniu zanieczyszczeń (WWA > 10 mg/kg s.m., obecność „jeziorek” cieczy węglowej), położony bezpośrednio przy wraku i wzdłuż dominującego gradientu zwiększania się głębokości (NE). Zawiera w sobie dwie strefy Bardzo mocno zaolejona o powierzchni 5,9 ha oraz mocno zaolejona o powierzchni 3,2 ha. Ze względu na dokładność szacunków do dalszych działań przyjęto, że łączna powierzchnia szacunkowa wynosi: ~8 ha .	Wymaga intensywnej interwencji: precyzyjny dredging/zasysanie osadów lub capping/ zasypywanie aktywnymi minerałami 0,1 m. Priorytet I.
Strefa B (skażenie pośrednie)	Obszar o stężeniach WWA poniżej Strefy A, ale powyżej norm tła/akceptowalnych. Zawiera w sobie dwie strefy Średnio zaolejona o powierzchni 8,3 ha oraz lekko zaolejona o powierzchni 10,7 ha. Ze względu na dokładność szacunków do dalszych działań przyjęto, że łączna powierzchnia szacunkowa wynosi: ~18 ha .	Capping aktywną warstwą izolacyjną 0,05 m lub monitoring wzmocniony z limitami resuspensji. Priorytet II.
Strefa C (peryferyjna)	Obszar o niższych stężeniach, graniczących z tłem naturalnym lub wpływem rozproszonym.	Monitoring pasywny + ograniczenia użytkowania (zakaz trałowania na 19 ha). Możliwe rozszerzenie na ~50 ha w zależności od wyników monitoringu.
Obszar skażenia z pomiarów Innomar SES-2000 2016	Obszar o zmienionej charakterystyce powiązanej z lokalnie zmienionymi właściwościami gruntu przez wsączone paliwo ciężkie. Powierzchnia szacunkowa: ~37 ha a łącznie z obszarami o niskim skażeniu 45 ha . W tym obszary częściowo wspólne ze strefą A i B - powierzchnia szacunkowa - obszarów wspólnych: ~1ha .	Możliwa konieczność rozszerzenia strefy B i C o te obszary w zależności od wyników badań chemicznych
Obszar skażenia z pomiarów SES 2025	Obszar o zmienionej charakterystyce powiązanej z lokalnie zmienionymi właściwościami gruntu przez wsączone paliwo ciężkie. Powierzchnia szacunkowa: ~29,15 ha a z obszarami o niskim skażeniu nawet 43,8 (45,0) ha . W tym obszary częściowo wspólne ze strefą A i B - powierzchnia szacunkowa - obszarów wspólnych: ~18 ha .	Badania z użyciem SES w 2025 roku wskazały wysoką korelację z badaniami z roku 2016. W wyniku zastosowania lepszego sprzętu i innej filtracji uzyskano dokładne zmapowanie obszarów o radykalnie zmienionej echogeniczności skażonego gruntu. Korelacja granic bliska jest 0,9 co wskazuje na dużą przydatność tego typu badania do określania granic skażenia.



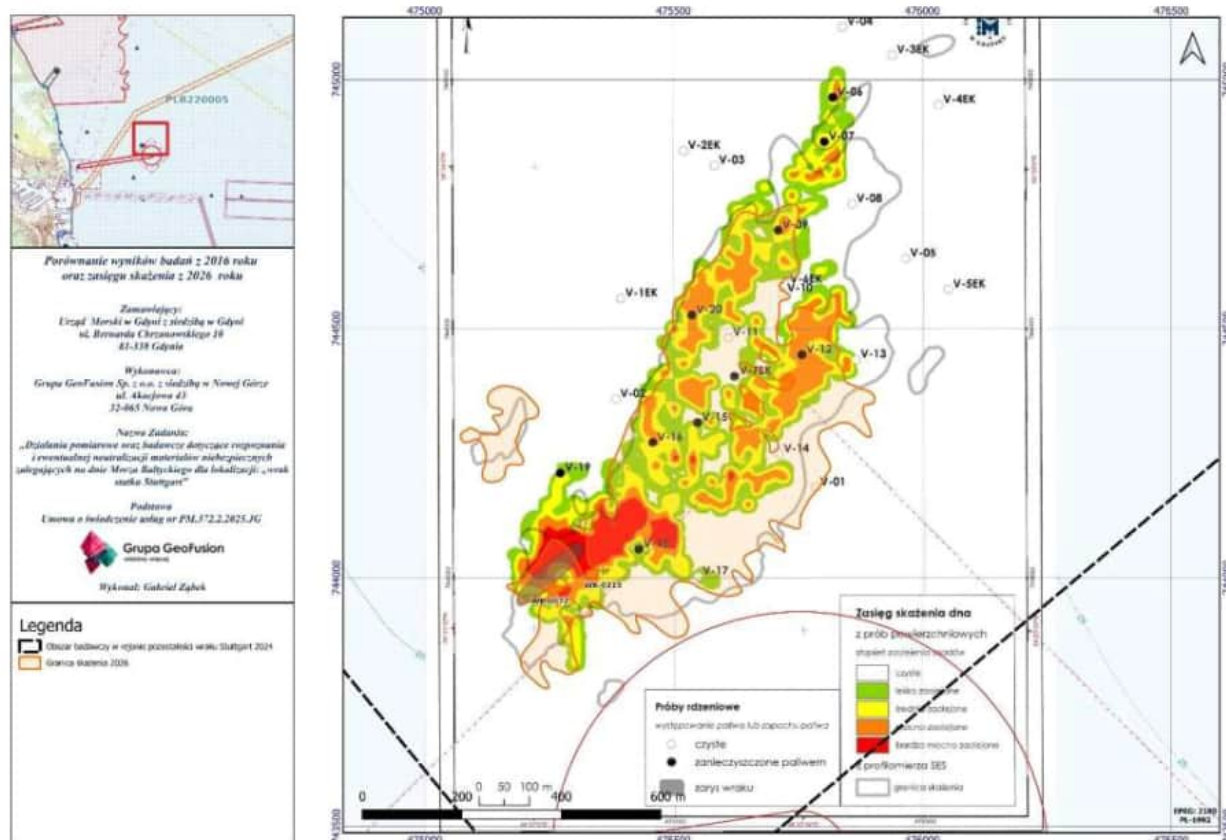
Rysunek 16 Mapa wydzielen obszarów o różnych poziomach skażenia gruntu (w skali 5 stopniowej).



Rysunek 17 Obszar wydzielen obszaru o zmiennej echogeniczności wykonana w oparciu o badania w 2025

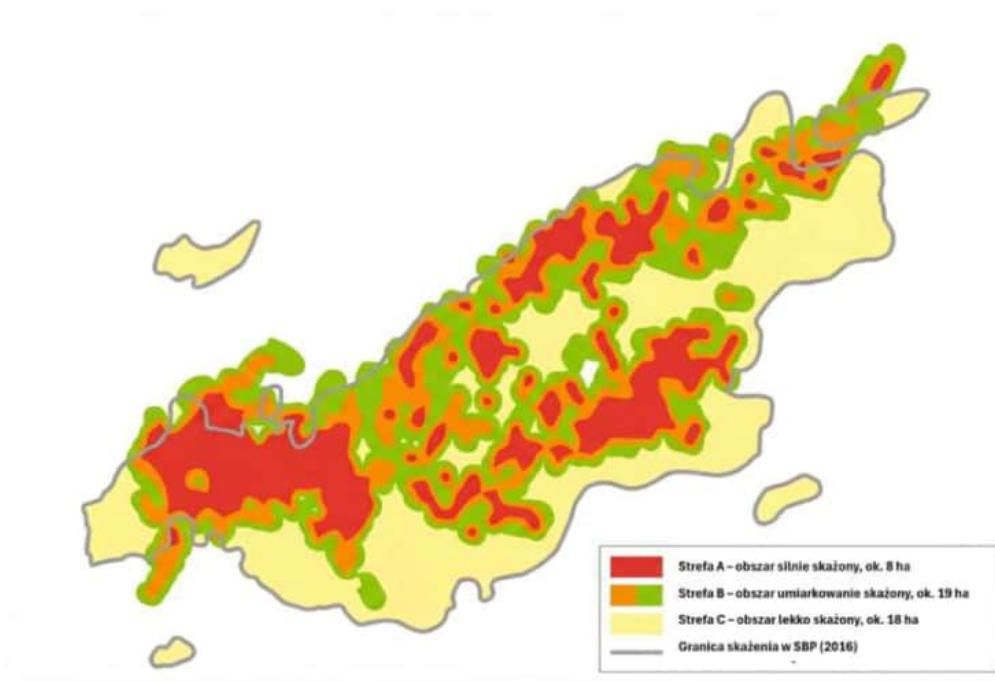


Rysunek 18 Zbiorcza mapa obszarów skażeń określona w 2016 i 2025/6 roku.

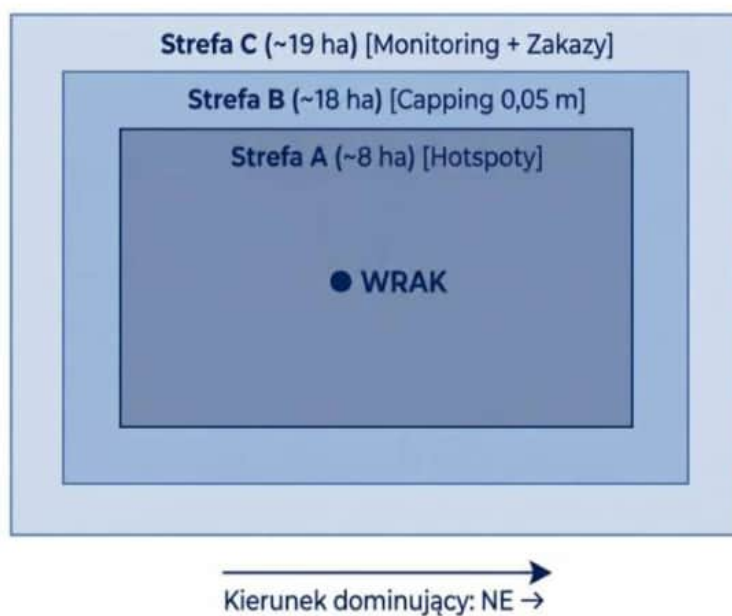


Rysunek 19 Zbiorcza mapa z kompletem badań w latach 2016-2025:

- zasięg skażenia dna określony w oparciu o pobory 1045 prób dna pobranych do badań w 2015-2016 (obszary skażone opisane paletą kolorów zgodnie z legendą);
- obszar skażony (zakreślony szarą linią) w oparciu o dane z jedno przetwornikowego SES (profile co 50 m) w 2016;
- obszar skażony (zakreślony fioletową linią) w oparciu o dane z 4 przetwornikowego SES (profile co 17,5 m) w 2025 z zastosowaną filtracją



Rysunek 20 Mapa wydzieleni obszarów o różnych poziomach skażeń według skali przyjętej do dalszego przetwarzania w ramach zakładanego działania w PNZ.



Rysunek 21. Schemat strefowania A/B/C wokół wraku Stuttgart (na podstawie Rysunek 6, Analiza ryzyka)

Uwaga metodologiczna:

Wszystkie definicje i wartości referencyjne podane w Słowniku są zgodne z dokumentami źródłowymi. W przypadku danych liczbowych (stężenia, koszty, powierzchnie) podano przedziały lub wartości szacunkowe z jawnym oznaczeniem źródła i poziomu niepewności. Tam, gdzie brak danych w dokumentach, zastosowano **ZAŁOŻENIA ROBOCZE** (oznaczone jako „szacunkowe”, „do weryfikacji”) z listą danych do pozyskania w sekcji Decyzje/Wymagane dane/Ryzyka kluczowe.

3.4 Obszary skażenia w strefie A – Zastoiska z paliwem

Uwaga terminologiczna:

Opisane w niniejszym rozdziale zastoiska wolnego paliwa HFO/smoły pogazowej są wynikiem wycieków historycznych - paliwo było uwalniane z kadłuba wraku na przestrzeni lat, m.in. wskutek rozsądzania znacznej części dennych zbiorników paliwowych w latach 50. XX w. oraz postępującej korozji. Zastoiska te stanowią udokumentowaną emisję przeszłą. Odrębnym zagadnieniem, omówionym w rozdziale 4.1 i 12.2.4, jest ryzyko przyszłej emisji paliwa z zbiorników potencjalnie zachowanych w gliniastym gruncie (denne resztkowe, przydenne burtowe, burtowe) - scenariusz wymagający weryfikacji inspekcją ROV w celu ustalenia, które zbiorniki nadal tkwią w gruncie, jaki jest ich stan i czy zawierają paliwo (Decision Gate, etap M1).

3.4.1 Wrak SS Stuttgart



Rysunek 22 Mozaika sonarowa wraku wysokiej rozdzielczości wraku Stuttgart (2025)

3.4.2 Określenie „jeziorek” zastoiskowych

Strefa	Powierzchnia	Stężenie WWA	Charakterystyka	Działania wymagane
A (hotspoty)	8 ha	>10 mg/kg s.m.	Najwyższe stężenie, obecność jeziorek cieczy węglowodorowych	Odpompowywanie paliwa (Wrak + Zastoiska) Capping aktywny 0,1 m lub precyzyjny dredging

W ramach prowadzonych badań na i w okolicy wraku Stuttgart w roku 2025 skupiono się na poszukiwaniu miejsc, które stanowią zastoiskowe „jeziorka” zawierające płynne paliwo ciężkie, które wcześniej wyciekło ze zbiorników wraku.

Badania wycieków ciężkiego paliwa (HFO) z wraku S/S Stuttgart były konieczne, bo bez nich nie da się rozstrzygnąć, czy wrak jest nadal aktywnym źródłem zanieczyszczeń, czy tylko „pozostałością” po dawnych uwolnieniach. Kluczowe było też wskazanie miejsc, w których paliwo nie tylko się rozlało, ale zebrano i zalega – tzw. „zastoiska” (baseny zastoiskowe). Takie zastoiska działają jak magazyn zanieczyszczeń: nawet jeśli na powierzchni chwilowo nic nie widać, w środku wciąż może być znaczna ilość płynnego paliwa. Ich identyfikacja pokazuje, gdzie skażenie jest najgłębsze i najbardziej trwałe, a więc gdzie standardowe „sprzątanie po skutkach” będzie nieskuteczne albo krótkotrwałe. To bezpośrednio wpływa na logikę projektu: zamiast działać szeroko i reaktywnie, można skupić się na punktach krytycznych, które realnie „dokarmiają” środowisko kolejnymi porcjami HFO. W praktyce oznacza to lepszy dobór technologii (np. odcięcie źródła, zabezpieczenie osadów, selektywne usunięcie), a nie działania „w ciemno”. Rozpoznanie zastoisk pozwala też wiarygodnie oszacować skalę prac, koszty i harmonogram, bo wiemy, gdzie problem jest największy i jak głęboko sięga. Ma to znaczenie dla bezpieczeństwa operacji, bo prace w pobliżu miejsc z płynnym paliwem zwiększają ryzyko nagłego uwolnienia i wtórnego skażenia (np. przez wzruszenie osadów). Jednocześnie takie dane są podstawą do sensownego monitoringu: można mierzyć efekty tam, gdzie interwencja ma największy wpływ. Z perspektywy decyzyjnej najważniejsze jest to, że wykrycie zastoisk zmienia priorytety – pierwszeństwo mają miejsca o najwyższym potencjale dalszej emisji, a nie tylko te, gdzie skutki są dziś najbardziej widoczne. W efekcie projekt staje się bardziej przewidywalny, skuteczniejszy i łatwiejszy do obrony formalnie, bo opiera się na wskazaniu konkretnych „ognisk” zanieczyszczeń, a nie na założeniach.

3.4.2.1 *Metodyka identyfikacji basenów zastoiskowych (cieczy HFO) zastosowana w projekcie*

Identyfikacja basenów zastoiskowych (tzw. „jeziorek” węglowodorów) opiera się na **synergii danych wieloźródłowych**. Kryterium „obecności cieczy”, zawarte w PNZ, interpretuje się poprzez korelację anomalii morfologicznych, teksturalnych i strukturalnych.

1. Analiza morfometryczna (MBES)

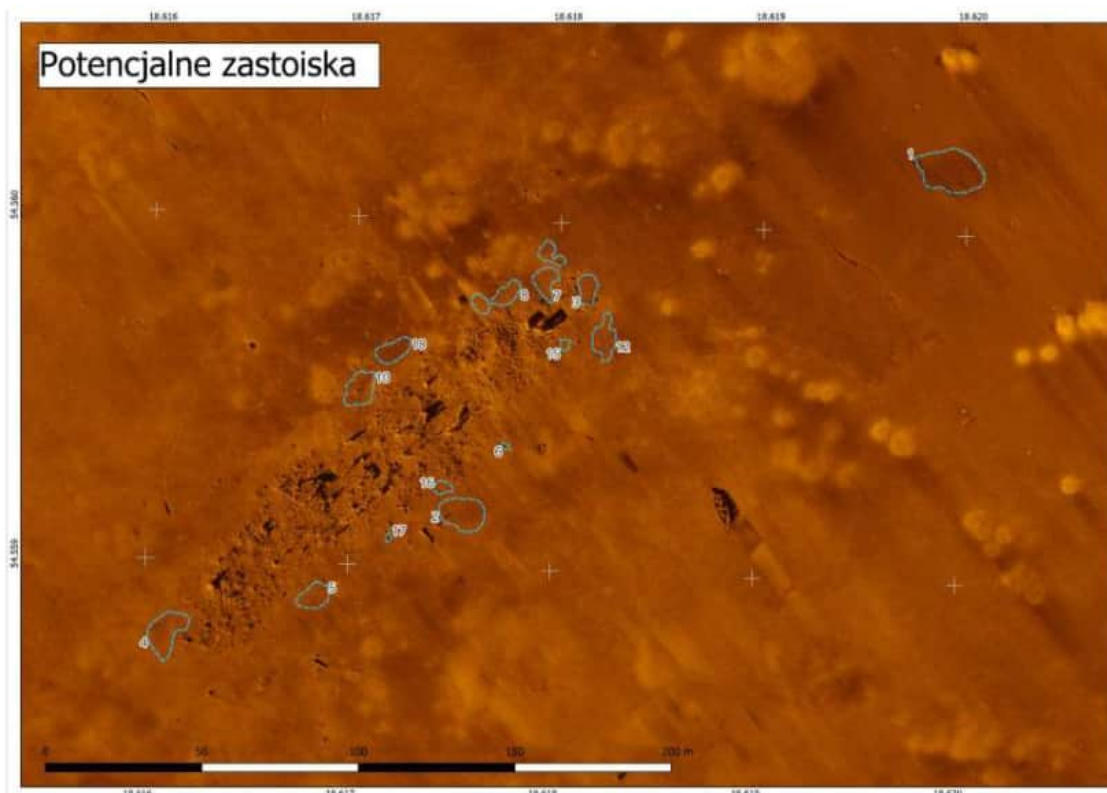
Głównym indykátorem jest rzeźba dna sprzyjająca stagnacji substancji o gęstości większej od wody.

- **Charakterystyka:** Poszukiwane są lokalne minima topograficzne – płaskie „kieszenie” lub niecki o zerowym gradiencie spadku, często zlokalizowane w cieniu hydrodynamicznym wraku.
- **Kluczowe parametry:** Analiza numerycznego modelu terenu (DTM) pod kątem nachylenia (*slope*), krzywizny (*curvature*) oraz relatywnych różnic wysokości. Basen zastoiskowy objawia się jako geometrycznie zamknięta forma akumulacyjna, a nie erozyjna.

2. Detekcja anomalii powierzchniowych (SSS)

Sonar boczny pozwala na identyfikację zmian litologicznych i fizykochemicznych wierzchniej warstwy dna.

- **Charakterystyka:** Baseny HFO manifestują się jako anomalie intensywności odbicia (*backscatter*). Mogą one przyjmować formę ciemnych plam (wygłuszenie sygnału przez gładką ciecz) lub jasnych obszarów (zaskorupiałe maty smotowe).
- **Weryfikacja:** Kryterium wiarygodności jest zanik naturalnych mikroform dennych (np. ripli) wewnątrz anomalii oraz powtarzalność obrazu na różnych kursach pomiarowych, co pozwala wykluczyć artefakty techniczne.



Rysunek 23 Mozaika sonarowa wraku Stuttgart z wydzielonymi obszarami, w których może znajdować się „zastoisko”.

3. Rozpoznanie struktury poddennej (SBP/SES)

Metody sejsmoakustyczne służą do określenia miąższości skażenia i jego penetracji w głąb osadu.

- **Charakterystyka:** Typowym sygnałem jest silny reflektor powierzchniowy z towarzyszącym zjawiskiem *blankingu* (wygaszenia sygnału poniżej), co sugeruje obecność warstwy o skokowo odmiennym impedancji akustycznej (nasycenie cieczą).
- **Interpretacja:** Soczewkowate, chaotyczne struktury akustyczne w miejscach pokrywających się z nieckami MBES stanowią niemal pewne wskazanie do wykonania odwiertu.

4. Weryfikacja i domknięcie modelu (Ground Truthing)

Dla ostatecznej kwalifikacji obszaru jako hotspot, dane zdalne uzupełnia się o:

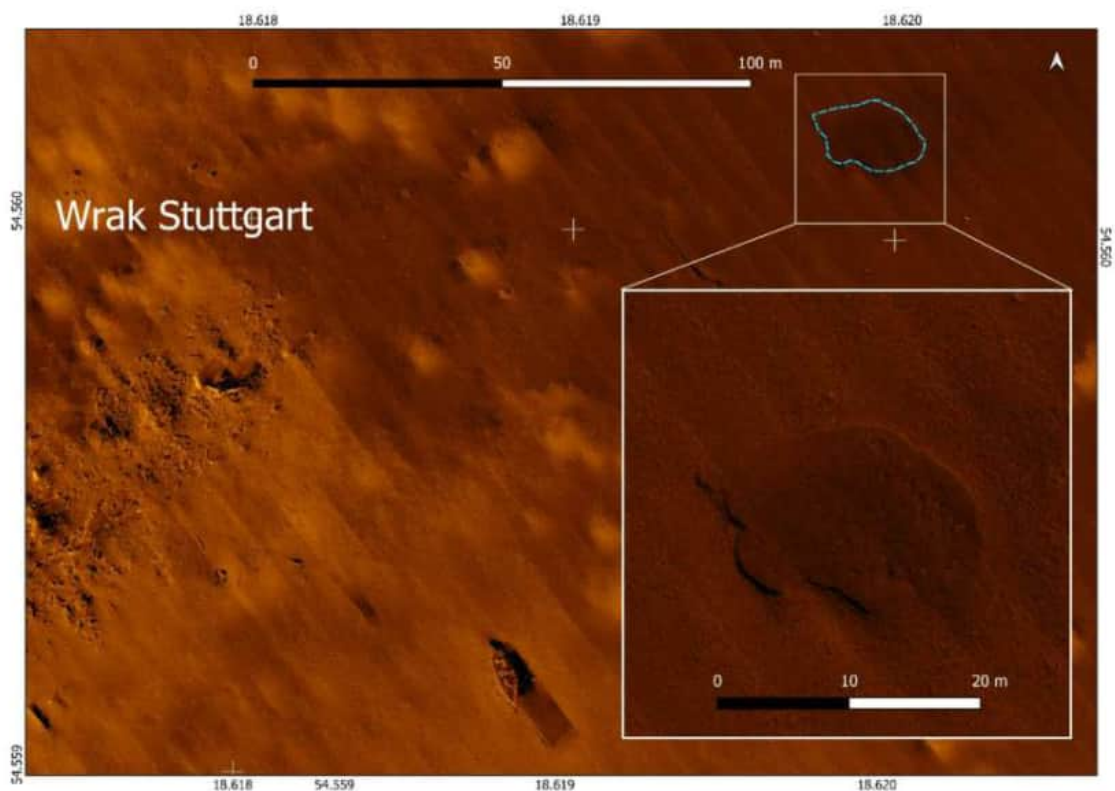
- **Inspekcję ROV:** Wizualne potwierdzenie obecności ciemnych mat, wycieków lub zmian lepkości osadu.
- **Próbkowanie celowane:** Pobór rdzeni (vibrocore) w celu potwierdzenia obecności wolnej fazy węglowodorów i kalibracji danych akustycznych.
- **Analizę chemiczną:** Oznaczenie wskaźników TPH/WWA jako ostateczny dowód skażenia.

Wniosek decyzyjny: Basen zastoiskowy uznaje się za zidentyfikowany, gdy **geometria niecki (MBES)** jest spójna z **anomaliami tekstury (SSS)** oraz **zaburzeniem laminacji osadów (SBP)**. Takie podejście pozwala na precyzyjne wyznaczenie granic strefy A (Capping aktywny).

Na kolejnym obrazie wydzielono duże pole znajdujące się na naturalnym stoku wzdłuż którego stwierdzono największą ilość wsączonego w dno paliwa. Nie jest znane pochodzenie zagłębienia uznanego za obszar zastoiskowy. W okolicy tego zastoiska w 2016 roku pobrano wiele prób dna (czerpacz Van Veen) które opisano jako – „czyste paliwo” lub „bardzo mocno zaolejone”.

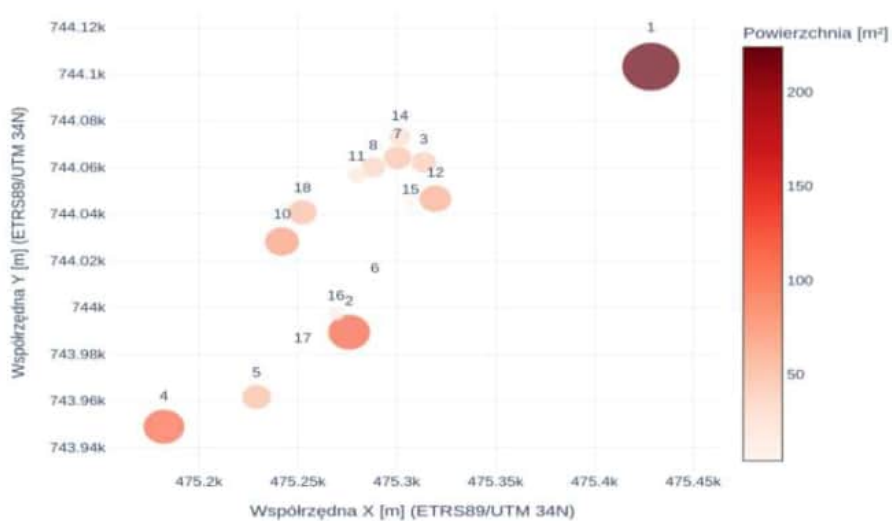
Tabela 14 Współrzędne i obszary zastoisk paliwa w pobliżu wraku SS Stuttgart

No	Area_m2	X	Y	Szerokość GEO2	Długość GEO2
1	224	475428,6273	744103,1172	54°33'36.67"N	18°37'11.69"E
2	121	475275,9451	743989,401	54°33'32.96"N	18°37'3.22"E
3	47	475313,703	744062,1742	54°33'35.33"N	18°37'5.30"E
4	117	475182,2364	743948,8974	54°33'31.64"N	18°36'58.01"E
5	60	475229,0931	743961,6588	54°33'32.06"N	18°37'0.62"E
6	4	475289,0293	744011,2663	54°33'33.67"N	18°37'3.94"E
7	55	475300,3701	744064,1363	54°33'35.39"N	18°37'4.56"E
8	43	475288,1113	744060,0173	54°33'35.25"N	18°37'3.88"E
10	82	475241,9454	744028,2186	54°33'34.21"N	18°37'1.32"E
11	26	475279,687	744056,4546	54°33'35.14"N	18°37'3.41"E
12	72	475319,5343	744046,5583	54°33'34.82"N	18°37'5.63"E
14	35	475301,5841	744073,09	54°33'35.68"N	18°37'4.62"E
15	9	475306,9254	744044,1914	54°33'34.74"N	18°37'4.93"E
16	18	475269,217	743997,5791	54°33'33.23"N	18°37'2.84"E
17	5	475252,4268	743981,1283	54°33'32.69"N	18°37'1.91"E
18	60	475252,2882	744040,7681	54°33'34.62"N	18°37'1.89"E
SUMA	978				



Rysunek 24 Wydzielenie dużego obszaru stanowiącego obszar zastoiskowy dla paliwa ciężkiego.

Lokalizacja i wielkość zastoisk paliwowych (Potencjalne zastoiska)



Rysunek 25 Mapa lokalizacji wraku S/S Stuttgart i zastoisk paliwowych

3.5 Obszary skażenia w strefach B i C

Tabela 15 Charakterystyka pozostałych obszarów uznanych za skażone.

Strefa	Powierzchnia	Stężenie WWA	Charakterystyka	Działania wymagane
B (skażenie pośrednie)	18–19 ha	1–10 mg/kg s.m.	Strefa przejściowa, podstrefy B1 (4–10 mg/kg) i B2 (1–4 mg/kg)	Capping aktywny 0,05–0,1 m
C (peryferyjna)	19 ha	0,1–1 mg/kg s.m.	Niższe stężenia, graniczące z tłem naturalnym	Monitoring pasywny + zakaz trawienia

W zależności od rodzaju terenu (wrak, zastoiska, dno morskie), wielkości skażenia (Strefa A, B, C) przygotowano trzy warianty działania:

WARIANT I – Działania dotyczące tylko usunięcia paliwa i remediacji (zabezpieczenie przed szkodliwą emisją z gruntu) w układzie 7 rodzajów działań (Z1 – Z7).

WARIANT II – Działania dotyczące wraku – czyszczenia wraku (usuwania) ewentualnego paliwa ciężkiego jakie może zalegać we wraku – usuwanie z pozostałości wraku + sposoby zabezpieczenia wraku przed dalszą emisją. Opisano 5 sposobów działania (W1 – W5).

WARIANT III – Działania dotyczące tylko gruntu skażonego paliwem ciężkim w strefach A, B, C. W zależności od stopnia zanieczyszczenia, strefy, zakresu działań przygotowano 5 rodzajów działań (A – E) oraz warianty łączone np. D-E.

Głównym założeniem PNZ było przyjęcie logicznego następstwa działań:

- rozpoczynamy działania od miejsc gromadzenia się paliwa ciężkiego (zastoisk) – działania - WARIANT I,
- następnie próbujemy usunąć paliwo z resztek wraku w celu uniknięcia wtórnego skażenia w trakcie zabezpieczania wraku przed wyciekami i zapewnieniem jego szczelności w przyszłości - działania - WARIANT II.
- następnie przystępujemy do oczyszczania skażonego gruntu wokół wraku mając pewność, że nie nastąpi wtórne skażenie niweczące efekty wcześniejszej pracy (gdyby kolejność działań była inna i paliwo z zastoisk i wraku mogło skażyć oczyszczone obszary).

4 IDEA DZIAŁAŃ – OCZYSZCZANIE GRUNTU

4.1 Kontekst środowiskowy i cel nadrzędny

Wrak S/S Stuttgart – statek pasażerski o długości 168 m i szerokości 20 m, zatopiony w 1943 roku w Zatoce Gdańskiej na głębokości 22–24 m p.p.m. – stanowi jedno z najpoważniejszych zagrożeń ekologicznych w polskiej strefie Morza Bałtyckiego. Wieloletnia degradacja pozostałości konstrukcji wraku, szczególnie po demolicji w latach pięćdziesiątych ubiegłego wieku, doprowadziła do chronicznego uwalniania substancji niebezpiecznych do środowiska morskiego, w szczególności ciężkiego paliwa okrętowego (HFO/IFO 380) opartej na frakcjach smoły pogazowej. Mimo prac wyburzeniowych z lat 50. XX w., część paliwa mogła przetrwać w kadłubie, ponieważ wrak spoczywa na burcie, a nie na równej stepce. Taka pozycja sprawiła, że niektóre zbiorniki denne i burtowe zostały wtłoczone w gliniasty grunt, co uchroniło je przed rozsądzeniem.

Ciężkie paliwo (HFO) charakteryzuje się dużą lepkością w niskich temperaturach, co w połączeniu z barierą, jaką stanowi glina, zapobiega jego migracji. Szacowanie pozostałej ilości paliwa jest jednak utrudnione przez brak dokumentacji stoczniowej po przebudowie jednostki.

Obecność zastoisk paliwa w otoczeniu wraku ($98\text{--}196\text{ m}^3$) potwierdza historyczne wycieki, ale nie wyklucza istnienia dalszych rezerw w zagrzebanych zbiornikach. Weryfikacja tego stanu wymaga bezpośredniej inspekcji ROV (etap Decision Gate M1). Obszar skażony wokół wraku obejmuje łącznie ok. 41,8 ha (określono w 2016 r.) i $\approx 43\text{--}45$ ha – do dalszych rozważań przyjęto 45 ha (określono 2025 r.), podzielony na trzy strefy o zróżnicowanym poziomie kontaminacji: strefę A (~ 8 ha, bezpośrednie otoczenie wraku – najwyższe stężenia), strefę B (~ 18 ha, strefa przejściowa) oraz strefę C (~ 19 ha, strefa najniższego skażenia).

Celem nadrzędnym działań naprawczych jest neutralizacja zagrożenia środowiskowego wynikającego ze skażenia osadów dennych wielopierścieniowymi węglowodorami aromatycznymi (WWA) i węglowodorami ropopochodnymi (TPH), z osiągnięciem II klasy stanu ekologicznego wg Ramowej Dyrektywy Wodnej (RDW) w horyzoncie do 2045–2055 roku. Działania te są konieczne ze względu na:

- chroniczne uwalnianie WWA z osadów, którego okres półtrwania naturalnego jest zróżnicowany strefowo: Strefa C (~ 19 ha) osiągnie cel RDW w $\sim 10\text{--}15$ lat dzięki naturalnej atenuacji; Strefa A (~ 8 ha) wymaga >50 lat lub regeneracja może nie nastąpić bez eliminacji źródła emisji (zależnie od ciągłości emisji paliwa z wraku – wymaga weryfikacji);
- bioakumulację zanieczyszczeń w łańcuchu troficznym (bentos $\rightarrow$ ryby denne $\rightarrow$ drapieżniki $\rightarrow$ ludzie);

- ryzyko nagłego wycieku paliwa z wraku wskutek postępującej korozji (prawdopodobieństwo 10–20% w ciągu 10 lat)⁵;
- zobowiązania międzynarodowe Polski (HELCOM, MSFD).

4.1.1 Horyzonty czasowe regeneracji Strefy A bez interwencji

Strefa A (~8 ha) charakteryzuje się obecnością aktywnych źródeł emisji zanieczyszczeń:

1. 16 zastoisk wolnego paliwa (98–196 m³ HFO/IFO);
2. potencjalne źródło w zbiornikach wraku (ilość nieznana, wymaga weryfikacji inspekcją ROV).

W scenariuszu bez interwencji (brak realizacji Z7 + W6) naturalna regeneracja Strefy A może wymagać >50 lat lub w ogóle nie nastąpić, w zależności od hipotezy ciągłej emisji paliwa:

- Jeśli ciągła emisja trwa (paliwo nadal wycieka z wraku) – naturalna regeneracja niemożliwa bez eliminacji źródła (Model 2025–2200: cel RDW po 2100 r. lub nigdy).
- Jeśli emisja ustała (wyciek zakończył się w przeszłości) – naturalna degradacja WWA z osadów zajmie ~50–65 lat (Model 2025–2100: cel RDW w 2075 r.).

Kluczowy wniosek: Bez eliminacji zastoisk (Z7) i zabezpieczenia wraku (W6) osiągnięcie celów RDW w Strefie A jest wysoce niepewne i może nie nastąpić w akceptowalnym horyzoncie czasowym. Weryfikacja hipotezy ciągłej emisji paliwa (inspekcja ROV, pułapki osadowe) jest warunkiem koniecznym precyzyjnego oszacowania ryzyka.

4.1.2 Zastrzeżenie metodyczne – brak modelowania rozprzestrzeniania na skalę transgraniczną

Niniejsza wersja PNZ nie zawiera modelowania hydrodynamicznego rozprzestrzeniania zanieczyszczeń na skalę transgraniczną (transport WWA/TPH prądami morskimi, dyspersja w stupie wody, zasięg geograficzny). Potencjalne zagrożenie transgraniczne mogłoby powstać wyłącznie w ekstremalnym scenariuszu katastrofalnego, jednorazowego uwolnienia całej szacowanej zawartości pozostałych zbiorników wraku. Należy podkreślić, że wrak S/S Stuttgart leżał na burcie (nie stał na równej stępce), a znaczna część dennych zbiorników paliwowych została rozsądzona podczas prac wyburzeniowych w latach 50. XX w., po czym ich konstrukcje stalowe zostały usunięte. W związku z tym potencjalne źródło przyszłego wycieku ogranicza się do zbiorników, które mogą nadal tkwić w gliniastym gruncie dna morskiego - tj. części zbiorników dennych, zbiorników przy-

⁵ Orientacyjne prawdopodobieństwo samoistnego wycieku paliwa z wraku wskutek postępującej korozji w horyzoncie 10-letnim szacuje się na 10-20% (szacunek ekspercki; patrz metodyka w rozdz. 12.2.4). Ryzyko to dotyczy samoistnej utraty szczelności zbiorników paliwowych potencjalnie zachowanych w gliniastym gruncie (denne resztkowe, przydenne burtowe, burtowe) i jest niezależne od ryzyka wycieku indukowanego pracami re-mediacyjnymi. Szacunek jest obciążony podwyższoną niepewnością z uwagi na brak dokumentacji stoczniowej po przebudowie i rozsądzanie znacznej części zbiorników dennych

dennych burtowych oraz zbiorników burtowych (o ile statek takie posiadał). Dokładna liczba i pojemność ewentualnie zachowanych zbiorników nie jest znana z uwagi na brak dokumentacji stoczniowej po okresie przebudowy jednostki. Na podstawie dostępnych danych prawdopodobieństwo scenariusza katastrofalnego uwolnienia ocenia się jako bardzo niskie, przy czym - zgodnie z szacunkiem probabilistycznym przyjętym w niniejszym dokumencie (Tabela 3, str. 24; rozdz. 12.2.4, str. 221) - prawdopodobieństwo jakiegokolwiek formy wycieku paliwa z pozostałych zbiorników wraku w horyzoncie 10-letnim wynosi orientacyjnie 10-20%⁶. Scenariusz katastrofalnego uwolnienia całej zawartości zachowanych zbiorników stanowi frakcję tego ryzyka i może być traktowany jako marginalnie prawdopodobny, przy czym sam wolumen potencjalnie uwalnianego paliwa jest ograniczony do resztkowej zawartości zbiorników nienaruszonych podczas demolicji. Ostateczna kwantyfikacja wymaga: (a) inspekcji ROV ze szczegółową identyfikacją zbiorników tkwiących w gruncie i ocena ich stanu, (b) modelowania hydrodynamicznego transportu zanieczyszczeń w skali transgranicznej, (c) analizy porównawczej z danymi literaturowymi dla wraków stalowych z okresu II wojny światowej w warunkach Morza Bałtyckiego. Do czasu przeprowadzenia tych badań niniejszy PNZ przyjmuje zasadę ostrożności i kwalifikuje scenariusz jako ekstremalny lecz niezerowy, niepodlegający pełnemu modelowaniu w obecnej wersji dokumentu.

Wyniki badań 2025 r. potwierdzają lokalny charakter skażenia (~45 ha wokół wraku Stuttgart), bez mierzalnego wpływu na otoczenie, poza tym obszarem. Czynniki ograniczające potencjał rozprzestrzeniania:

- WWA związane z ciężkim paliwem okrętowym (HFO) mają niską rozpuszczalność w wodzie i tendencję do wiązania się z osadami dennymi, co ogranicza transport na duże odległości.
- Prądy denne w Zatoce Gdańskiej (~25 cm/s) są umiarkowane.
- Odległość do najbliższych wód terytorialnych innych państw (Szwecja) wynosi >100 km.

Wniosek:

Na podstawie dostępnych danych ryzyko oddziaływania transgranicznego w scenariuszu bazowym jest znikome. Potencjalne zagrożenie transgraniczne mogłoby powstać wyłącznie w ekstremalnym

⁶ Szacunek orientacyjny 10-20% prawdopodobieństwa wycieku paliwa z wraku w horyzoncie 10 lat oparty jest na eksperckim osądzie inżynierskim, uwzględniającym: wiek konstrukcji stalowej (>80 lat), zaawansowany stan korozji obserwowany w badaniach 2025 r., analogie z dokumentacją innych wraków stalowych na Morzu Bałtyckim o porównywalnym wieku i warunkach zalegania, fakt leżenia wraku na burcie oraz rozsądzenia znacznej części zbiorników dennych, a także brak dokumentacji stoczniowej po przebudowie jednostki i brak wyników szczegółowej inspekcji ROV pozostałych zbiorników paliwowych. Niepewność szacunku jest zwiększona z uwagi na niemożność określenia, ile zbiorników (dennych, przydennych burtowych, burtowych) pozostało w gliniastym gruncie i jaka jest ich aktualna pojemność. Wartość ta nie jest wynikiem formalnej analizy niezawodnościowej (Reliability/Failure Mode Analysis). Zaleca się jej weryfikację na podstawie wyników inspekcji ROV (etap M1) - w szczególności identyfikacji zbiorników tkwiących w gruncie, oceny ich stanu i zawartości. Zakres niepewności tej oceny szacuje się na +/-5-10 punktów procentowych, przy czym faktyczny zakres może być szerszy ze względu na brak dokumentacji technicznej.

scenariuszu katastrofalnego uwolnienia całej zawartości zbiorników wraku (scenariusz o zerowym prawdopodobieństwie, wymagający weryfikacji inspekcją ROV oraz modelowania hydrodynamicznego). Jeśli przyszłe wersje PNZ będą operować też o zagrożeniu transgranicznym, konieczne jest przedstawienie wyników modelowania transportu zanieczyszczeń.

4.2 Mechanizm usuwania zanieczyszczeń

Plan Neutralizacji Zagrożeń (PNZ) przyjmuje trójstopniowe podejście do eliminacji źródeł skażenia, realizowane w logicznej sekwencji działań:

GRUPA I – Zastoiska paliwa (warianty Z1–Z7).

Pierwszym krokiem jest neutralizacja 16 zidentyfikowanych zastoisk paliwa HFO/smoły pogazowej w bezpośrednim otoczeniu wraku (łączna powierzchnia ~978 m², szacowana objętość paliwa 98–196 m³). Warianty obejmują spectrum rozwiązań od prostej izolacji piaskiem (Z1) po kompleksowe odsysanie paliwa z następczym cappingiem aktywnym z użyciem zeolitów (Z7). Rekomendowany wariant Z7 zakłada trzyetapowy proces:

1. odsysanie 70–85% wolnego paliwa pompami ssącymi,
2. pokrycie zastoisk warstwą piasku morskiego o grubości 0,5 m,
3. aplikację warstwy klinoptilolitu (zeolit naturalny) o grubości 5 cm jako aktywnej biologicznie i chemicznie bariery sorpcyjnej.

Mechanizm ten łączy fizyczne usunięcie źródła z długoterminową remediacją in situ – zeolity sorbują resztkowe WWA i fenole, immobilizują metale ciężkie (wymiana jonowa) oraz katalizują degradację związków organicznych przez okres 10–20 lat.

Niezależnie od powyższych wariantów Z1–Z7 dotyczących remediacji zastoisk paliwowych, Wariant Z8 definiuje – mobilną operację end-to-end neutralizacji obiektów pUXO (w tym potencjalnie zawierających BST/CWA) wykrytych w trakcie screeningu, obejmującą detekcję, identyfikację RTG i utylizację plazmową na pokładzie jednostki pływającej.

GRUPA II – Wrak (warianty W1–W6).

Następnie realizowana jest izolacja samego wraku wielowarstwową strukturą cappingową. Rekomendowany wariant W6 (hybrydowy) zakłada czterowarstwową strukturę izolacyjną: geotekstyl separacyjny 300 g/m² → piasek morski 1,0 m → geomembrana HDPE 2 mm → narzut kamienny frakcji 100–300 mm grubości 0,5 m. Przed ułożeniem warstw ochronnych wymagane jest usypanie pryzmy piaskowej wyrównującej nierówny profil wraku (elementy wystające do 5 m ponad dno). Skuteczność izolacji W6 przekracza 99%, a trwałość projektowa wynosi >50 lat.

GRUPA III – Osady dennie w strefach A/B/C (warianty III.C, III.D-A, III.D-B, III.0).

Końcowym etapem jest remediacja skażonych osadów dennych na całym obszarze 43,9 ha (≈ 45 ha). Rekomendowany wariant bazowy III.C (bioremediacja + capping aktywny) zakłada pokrycie osadów warstwą aktywnych minerałów (zeolity, keramzyt, perlit) o zmiennej grubości zależnej od strefy, wspomaganej bioremediacją z wykorzystaniem bakterii psychrotolerantnych (*Pseudomonas*, *Rhodococcus*, *Shewanella*). Dla strefy C, o najniższym skażeniu, rekomendowany jest wariant III.0 – wyłącznie monitoring z opcją eskalacji.

4.3 Zabezpieczenie terenu przed dalszą migracją zanieczyszczeń

Logika sekwencji działań ($Z \rightarrow W \rightarrow III$) jest kluczowa dla zapobieżenia dalszej migracji zanieczyszczeń. Rozpoczęcie od zastoisk (Grupa I) eliminuje najbardziej skoncentrowane źródła emisji, zabezpieczenie wraku (Grupa II) odcina potencjalne przyszłe wycieki, a dopiero wówczas remediacja osadów (Grupa III) ma sens – ponieważ wyeliminowano ryzyko ponownego skażenia oczyszczonych obszarów. System strefowania A/B/C zapewnia ścisłą proporcjonalność działań do aktualnego, potwierdzonego badaniami 2025–2026 stanu środowiska. W Strefie A (WWA do 35 000 $\mu\text{g/kg}$, $70\times$ norma TEL, obecność 16 zastoisk wolnego paliwa HFO o obj. 98–196 m^3) – interwencja pełna ($Z7 + W6 + III.C$) ze względu na brak szans na samooczyszczanie bez usunięcia źródła emisji. W Strefie B (WWA 1 500–3 000 $\mu\text{g/kg}$, $5\text{--}15\times$ TEL) – capping aktywny jako kompromis między skutecznością a minimalizacją ingerencji (brak dredgingu $\rightarrow$ brak resuspensji). W Strefie C (WWA 0,1–1 mg/kg , zbliżone do tła, obserwowana naturalna atenuacja 2–5%/rok) – wyłącznie monitoring (III.0), zgodnie z zasadą ALARP i w pełni uwzględniając stwierdzone procesy samooczyszczania. Podejście to realizuje zasadę proporcjonalności: minimalnej ingerencji niezbędnej do osiągnięcia celów RDW. Capping aktywny w strefie B pełni dodatkowo rolę bariery geochemicznej zapobiegającej migracji zanieczyszczeń z A do C, co jest kluczowe dla skuteczności całego systemu remediacji.

5 PEŁNY PRZEGLĄD WSZYSTKICH WARIANTÓW DZIAŁAŃ NAPRAWCZYCH

Niniejszy rozdział zawiera kompletny przegląd wszystkich rozważanych wariantów działań naprawczych zdefiniowanych w dokumentach źródłowych. Warianty podzielono na trzy główne grupy: warianty Z (zastoiska paliwowe), warianty W (izolacja wraku) oraz warianty grupy III (remediacja osadów dennych w strefach A, B i C). Dla każdej grupy przedstawiono szczegółowe opisy techniczne, parametry, koszty oraz tabele porównawcze.

5.1 Warianty Z (Zastoiska) – Przegląd kompletny

Warianty Z dotyczą działań naprawczych w obszarach zastoisk paliwowych (16 zidentyfikowanych „jeziorek” HFO o łącznej powierzchni 978 m², powierzchnia robocza z nadadkami ~2 500 m²). Zdefiniowano 7 wariantów: Z1–Z4 (izolacja bez usuwania paliwa) oraz Z5–Z7 (z aktywnym odsysaniem paliwa). Wariantem rekomendowanym jest Z7 (Odsysanie + Piasek + Zeolity).

Tabela 16 Tabela porównawcza wariantów Z1–Z7

Wariant	Metoda	Koszt Real. [EUR]	Skuteczność	Trwałość [lat]	Rekomenda- cja
Z1	Pokrycie piaskiem (h=1,5 m)	392 150	70–75%	10–15	Ekonomiczny
Z2	Geotekstyl + narzut kamienny	556 740	75–80%	15–25	Prosty
Z3	Barierę reaktywne PRB	893 200	85–90%	20–30	Innowacyjny
Z4	Hybrydowy (wielowarstwowy)	709 775	>95%	>40	Najlepszy bez odsysania
Z5	Odsysanie paliwa	221 087	70–85%	Jednorazowe	Najniższy koszt
Z6	Odsysanie + piasek	303 520	90–95%	15–25	Dobry stosunek koszt/efekt
Z7	Odsysanie + piasek + zeolity	370 205	95–98%	20–30	★ REKOMENDOWANY
Z8	Bezpieczne usuwanie UXO	-	100%	Jednorazowe	Neutralizacja pUXO end-to-end

5.1.1 Wariant Z1 – Pokrycie zastoisk piaskiem

Pokrycie 16 zastoisk paliwowych warstwą piasku morskiego o grubości 1,5 m. Piasek tworzy barierę fizyczną ograniczającą kontakt paliwa z wodą morską. Metoda nie obejmuje usuwania paliwa – jedynie jego izolację in situ. Założenia techniczne:

Powierzchnia robocza: ~2 500 m² (z naddatkami 5 m) | Grubość warstwy: 1,5 m | Objętość piasku: 3 750 m³ | Masa piasku: ~6 000 t | Materiał: czysty piasek morski, gęstość 1,6 t/m³. Parametry techniczne:

Tabela 17 Materiały i koszty dla Z1

Kategoria	Opt. [EUR]	Real. [EUR]	Pes. [EUR]
Piasek morski	45 000	56 250	67 500
Transport morski	30 000	41 250	56 250
Aplikacja podwodna	56 250	75 000	93 750
Sprzęt (15 dni)	90 000	120 000	150 000
Robocizna	36 000	48 000	60 000
Nadzór + rezerwa	38 925	51 650	64 750
RAZEM Z1	296 175	392 150	492 250

Niski koszt, prosty w wykonaniu, materiał naturalny, minimalny wpływ na środowisko.

Wady: Niska skuteczność (70–75%), erozja warstwy w 10–15 lat, paliwo pozostaje pod piaskiem – tworzy dodatkowy obszar skażenia, wymaga uzupełniania.

Zalety: Niski koszt ale 70–75% redukcji bioekspozycji.

Skuteczność: Warstwa piasku przepuszczalna – ograniczona izolacja długoterminowa.

5.1.2 Wariant Z2 – Geotekstyl + narzut kamienny

Pokrycie zastoisk warstwą geotekstylu separacyjnego, a następnie narzutem kamiennym. Geotekstyl zapobiega mieszaniu się paliwa z kamieniem, narzut stabilizuje i chroni przed erozją.

Założenia techniczne:

Powierzchnia robocza: ~2 500 m² | Warstwa 1: geotekstyl 300 g/m² | Warstwa 2: narzut kamienny frakcji 100–300 mm | Czas prac: 18 dni.

Tabela 18 Materiały i koszty dla Z2

Kategoria	Opt. [EUR]	Real. [EUR]	Pes. [EUR]
Geotekstyl	8 250	11 000	13 750
Narzut kamienny	82 500	105 000	127 500
Transport	60 000	82 500	105 000
Aplikacja + sprzęt	183 000	244 000	305 000
Robocizna + nadzór + rezerwa	85 020	114 240	143 460
RAZEM Z2	418 770	556 740	694 710

Wyższa trwałość niż Z1 (15–25 lat), narzut odporny na erozję, prosty w wykonaniu.

Zalety: Paliwo pozostaje pod izolacją, ale brak aktywnej remediacji, koszt wyższy niż Z1.

Wady: 75–80% redukcji bioekspozycji.

5.1.3 Wariant Z3 – Bariery reaktywne PRB

Bariery reaktywne przepuszczalne (Permeable Reactive Barriers) instalowane wokół zastoisk. Zawierają materiały reaktywne (żelazo zerowe Fe^0 , węgiel aktywny), które chemicznie rozkładają lub sorbuje zanieczyszczenia.

Założenia techniczne:

Materiały: Fe^0 , węgiel aktywowany | Obudowa: geotekstyl | Mechanizm: redukcja chemiczna + sorpcja WWA | Monitoring: 5 lat | Czas instalacji: 22 dni.

Tabela 19 Materiały i koszty dla Z3

Kategoria	Opt. [EUR]	Real. [EUR]	Pes. [EUR]
Materiały reaktywne	180 000	225 000	270 000
Geotekstyl obudowy	12 000	16 000	20 000
Instalacja barier	150 000	200 000	250 000
Sprzęt (22 dni)	132 000	176 000	220 000
Robocizna + nadzór	70 000	95 000	120 000
Monitoring (5 lat) + rezerwa	136 900	181 200	225 500
RAZEM Z3	680 900	893 200	1 105 500

Zalety: Wysoka skuteczność (85–90%), aktywna degradacja zanieczyszczeń, trwałość 20–30 lat, innowacyjna technologia.

Wady: Wysoki koszt (~893 tys. EUR), skomplikowana instalacja podwodna, wymaga specjalistycznego długotrwałego i kosztownego monitoringu.

5.1.4 Wariant Z4 – Wariant hybrydowy (wielowarstwowy)

Wielowarstwowa struktura izolacyjna: geotekstyl + piasek + geomembrana HDPE + narzut kamienny. Najwyższa skuteczność spośród wariantów bez odsysania.

Tabela 20 Materiały i koszty dla Z4

Warstwa	Materiał	Grubość	Funkcja
1 (dolna)	Geotekstyl 300 g/m ²	5 mm	Separacja
2	Piasek morski	0,5 m	Warstwa buforowa
3	Geomembrana HDPE 1,5 mm	1,5 mm	Bariera główna (nieprzepuszczalna)
4 (górną)	Narzut kamienny 50–150 mm	0,4 m	Ochrona mechaniczna

Kategoria	Opt. [EUR]	Real. [EUR]	Pes. [EUR]
Materiały	102 000	127 250	152 500
Aplikacja wielowarstwowa	140 000	180 000	220 000
Spawanie geomembrany	55 000	72 000	89 000

Sprzęt (20 dni)	120 000	160 000	200 000
Robocizna + nadzór + KJ + rezerwa	128 600	170 525	212 450
RAZEM Z4	545 600	709 775	873 950

Zalety: Bardzo wysoka skuteczność (>95%), trwałość >40 lat, geomembrana HDPE pełna bariera, wielowarstwowa ochrona.

Wady: Wyższy koszt niż Z1/Z2, skomplikowana instalacja (spawanie podwodne), paliwo pozostaje pod izolacją.

Skuteczność: >95%. Potencjalnie do wykorzystania jako alternatywa Z7 przy małych ilościach paliwa (<50 t).

5.1.5 Wariant Z5 – Odsysanie paliwa z zastoisk

Mechaniczne odsysanie wolnego paliwa z powierzchni dna morskiego przy użyciu pomp ssących i systemu rurociągów podwodnych. Po odsysaniu nie stosuje się izolacji.

Założenia techniczne:

1. Lokalizacja zastoisk (SSS, ROV) → 2. Pozycjonowanie barki (DGPS) → 3. Odsysanie paliwa (2,625 m³/h efektywnie) → 4. Separacja paliwo-woda → 5. Magazynowanie → 6. Weryfikacja ROV.

Ciąg technologiczny:

Objętość paliwa: 146,7 m³ (zakres 98–196 m³) | Masa: 146,7 t | Czas odsysania: 55,9 h (7 dni roboczych) | Dni operacyjne: 15–25 | Sprawność: 70–85%.

Tabela 21 Materiały i koszty dla Z5

Kategoria	Opt. [EUR]	Real. [EUR]	Pes. [EUR]
Sprzęt	66 000	82 500	99 000
Materiały	11 600	14 500	17 400
Robocizna	33 200	41 500	49 800
Utylizacja paliwa	110 250	117 600	128 625
Nadzór + monitoring	13 600	17 000	20 400
Rezerwa (15%)	23 070	28 837	34 605
RAZEM Z5	278 482	326 876	342 670

Zalety: **Najniższy** koszt, usunięcie źródła (70–85% paliwa), efekt trwały.

Wady: Ryzyko wycieku, brak trwałej izolacji, pozostałości 15–30%, efekt jednorazowy.

Skuteczność: 70–85%. Czas: 3–4 tygodnie.

5.1.6 Wariant Z6 – Odsysanie + capping piaskiem

Łączy odsysanie paliwa (Etap 1, jak Z5) z pokryciem piaskiem 0,5 m (Etap 2). Podwójna bariera: usunięcie źródła + izolacja fizyczna. Założenia techniczne:

Powierzchnia: 2 500 m² | Grubość piasku: 0,5 m | Objętość: 1 250 m³ | Masa: 2 000 t.

Tabela 22 Materiały i koszty dla Z6

Kategoria	Opt. [EUR]	Real. [EUR]	Pes. [EUR]
ETAP 1: Odsysanie	241 600	291 250	296 700
ETAP 2: Capping piaskiem	63 000	78 750	94 500
Rezerwa (12%)	26 016	32 520	39 024
RAZEM Z6	340 928	410 320	434 224

Zalety: Wysoka skuteczność (90–95%), optymalny koszt/efekt wśród wariantów z odsysaniem.

Wady: Brak aktywnej remediacji, piasek przepuszczalny, trwałość 15–25 lat.

5.1.7 Wariant Z7 – Odsysanie + piasek + zeolity (aktywna remediacja) ★ REKOMENDOWANY

Trzyetapowa operacja: Etap 1 – odsysanie paliwa (70–85%), Etap 2 – capping piaskiem 0,5 m, Etap 3 – warstwa zeolitu (klinoptilolit) 5 cm. Potrójna bariera: usunięcie + izolacja + sorpcja aktywna.

WARIANT REKOMENDOWANY.

Tabela 23 Materiały i koszty dla Z7

Parametr zeolitu	Wartość	Jednostka
Typ	Klinoptilolit (naturalny)	-
Granulacja	2–5	mm
Gęstość nasypowa	0,8	t/m ³
Grubość warstwy	5 (0,05 m)	cm
Objętość / Masa	125 m ³ / 100 t	-
Pojemność sorpcyjna WWA	50–100 (śr. 75)	mg/g
Całkowita poj. sorpcyjna	7 500	kg

Kategoria	Opt. [EUR]	Real. [EUR]	Pes. [EUR]
ETAP 1: Odsysanie	241 600	291 250	296 700
ETAP 2: Capping piaskiem	63 000	78 750	94 500
ETAP 3: Warstwa zeolitowa	26 440	33 050	39 660
Monitoring (10 lat)	26 000	32 500	39 000
Rezerwa (10%)	26 924	33 655	40 386
RAZEM Z7	393 778	477 555	517 746

Harmonogram: Etap 1: 15–25 dni | Etap 2: 8–12 dni | Etap 3: 3–9 dni | Łącznie: 30–50 dni | Monitoring: 10 lat.

Zalety: Najwyższa skuteczność (95–98%), potrójna bariera, aktywna remediacja 10–20 lat, możliwość regeneracji zeolitu, trwałość 20–30 lat.

Wady: Najwyższy koszt wśród wariantów z odsysaniem (370 tys. EUR), najdłuższy czas realizacji (6–8 tygodni), monitoring 10 lat, ryzyko rozmycia zeolitu

5.1.8 Wariant Z8 – Bezpieczne usuwanie UXO na miejscu operacji (na morzu)

W przypadku obiektów pUXO potencjalnie zawierających bojowe środki trujące (BST/CWA) przewidziano wariant Z8 (Wariant Z8), umożliwiający nieniszczącą klasyfikację RTG i kontrolowaną utylizację na pokładzie jednostki pływającej z zachowaniem pięciu barier bezpieczeństwa i zgodności z reżimem CWC/OPCW.

5.2 Warianty W (Wrak) – Przegląd kompletny

Warianty W dotyczą zabezpieczenia wraku S/S Stuttgart przed dalszą emisją zanieczyszczeń. Parametry wraku: długość 168 m, szerokość 20 m, pow. podstawy 3 360 m², głębokość 22–24 m, pow. robocza z nadładkiem 10 m = 7 520 m². Zdefiniowano 6 wariantów W1–W6. Rekomendowany: W6 (hybrydowy, ~2,7 mln EUR).

Tabela 24 Tabela porównawcza wariantów W1–W6

Wariant	Metoda	Koszt Real. [mln EUR]	Skuteczność	Trwałość [lat]	Ocena
W1	Piasek (h=2,0 m)	1,86	70–80%	15–20	3,5/5
W2	Beton podwodny (h=1,5 m)	6,26	>95%	>50	3,5/5
W3	Siarkobeton (h=1,5 m)	8,72	>98%	>50	–
W4	Cofferdam (gro-dze+beton)	15,87	100%	>100	–
W5	Geotekstyl + kamień	2,47	75–85%	20–30	–
W6	Hybrydowy 4-warstwowy	2,74	>99%	>50	4,3/5 ★

5.2.1 Wariant W1 – Pokrycie wraku piaskiem

Opis: Pokrycie wraku warstwą piasku morskiego o grubości 2,0 m. Bariera fizyczna ograniczająca uwalnianie zanieczyszczeń.

Parametry: Pow. robocza: 7 520 m² | Grubość: 2,0 m | Objętość: 15 040 m³ | Masa: 24 064 t | Transporty barką (2000 t): 13.

Tabela 25 Materiały i koszty dla W1

Kategoria	Opt. [EUR]	Real. [EUR]	Pes. [EUR]
Materiały	180 480	225 600	270 720

Kategoria	Opt. [EUR]	Real. [EUR]	Pes. [EUR]
Transport	170 320	240 440	325 600
Aplikacja	263 200	360 960	466 240
Sprzęt	335 000	495 000	655 000
Robocizna	170 500	218 500	283 500
Nadzór + rezerwa	232 000	318 000	419 000
RAZEM W1	1 351 500	1 858 500	2 420 060

Zalety: najtańszy, prosty, materiał naturalny.

Wady: piasek przepuszczalny, erozja, wymaga uzupełniania co 10–15 lat.

Harmonogram: 56–90 dni.

5.2.2 Wariant W2 – Pokrycie betonem podwodnym

Opis: Pokrycie wraku betonem podwodnym C25/30 (1,5 m) metodą tremie pipe. Trwała, nieprzepuszczalna bariera.

Parametry: Objętość: 11 280 m³ | Masa: 27 072 t | Składniki: cement 4 286 t, kruszywa ~19 740 t, plastyfikatory, środki kohezyjne.

Tabela 26 Materiały i koszty dla W2

Kategoria	Opt. [EUR]	Real. [EUR]	Pes. [EUR]
Materiały	1 605 000	2 007 840	2 410 000
Aplikacja	1 233 000	1 541 600	1 850 000
Sprzęt	1 232 000	1 540 000	1 848 000
Robocizna + nadzór	475 000	600 000	725 000
Rezerwa (10%)	454 500	568 944	683 300
RAZEM W2	4 999 500	6 258 384	7 516 300

Zalety: nieprzepuszczalny, minimalna konserwacja.

Wady: wysoki koszt, zmiana siedliska, emisja CO₂.

Skuteczność: >95%, trwałość >50 lat.

5.2.3 Wariant W3 – Pokrycie siarkobetonem

Opis: Siarkobeton (sulfur concrete) – spoiwem jest siarka. Wyjątkowa odporność chemiczna i wodoszczelność.

Parametry: Grubość: 1,5 m | Objętość: 11 280 m³ | Gęstość: 2,3 t/m³ | Masa: 25 944 t | Siarka: ~4 540 t | Wytrzymałość: 40–50 MPa | Wiązanie: 24–48 h.

Tabela 27 Materiały i koszty dla W3

Kategoria	Opt. [EUR]	Real. [EUR]	Pes. [EUR]
Materiały	2 300 000	2 875 000	3 450 000
Aplikacja	1 800 000	2 250 000	2 700 000

Kategoria	Opt. [EUR]	Real. [EUR]	Pes. [EUR]
Sprzęt	1 500 000	1 875 000	2 250 000
Robocizna + nadzór	630 000	787 500	945 000
Rezerwa (12%)	747 600	934 500	1 121 400
RAZEM W3	6 977 600	8 722 000	10 466 400

Zalety: maks. odporność chemiczna, wodoszczelność.

Wady: bardzo wysoki koszt, technologia eksperymentalna morska, ryzyko H₂S.

Skuteczność: >98%, trwałość >50 lat.

5.2.4 Wariant W4 – Cofferdam (grodzienie stalowe + beton)

Opis: Budowa stalowej grodzy wokół wraku i wypełnienie betonem. Pełna izolacja wraku od środowiska.

Parametry: Wymiary: 200×55 m | Obwód: 510 m | Grodzice Larssen, wbicie 5–8 m | Pow. wewn.: 11 000 m² | Beton: 33 000 m³ | Masa grodzic: ~153 t.

Tabela 28 Materiały i koszty dla W4

Kategoria	Opt. [EUR]	Real. [EUR]	Pes. [EUR]
Grodzice stalowe	450 000	562 000	675 000
Wbijanie grodzic	2 800 000	3 500 000	4 200 000
Beton wypełniający	3 960 000	4 950 000	5 940 000
Sprzęt	2 200 000	2 750 000	3 300 000
Robocizna + nadzór	1 100 000	1 375 000	1 650 000
Rezerwa (15%)	2 184 000	2 730 000	3 276 000
RAZEM W4	12 694 000	15 867 000	19 041 000

Zalety: pełna izolacja, brak konserwacji.

Wady: ekstremalny koszt (15,87 mln EUR), ryzyko uszkodzenia wraku, bardzo skomplikowana realizacja.

Skuteczność: 100%, trwałość >100 lat.

5.2.5 Wariant W5 – Geotekstyl + narzut kamienny

Opis: Dwuwarstwowa metoda: geotekstyl separacyjny (300 g/m²) + narzut kamienny 100–300 mm (0,8 m).

Parametry: Geotekstyl: 8 272 m², ~2,5 t | Narzut: 6 016 m³, 10 829 t.

Tabela 29 Materiały i koszty dla W5

Kategoria	Opt. [EUR]	Real. [EUR]	Pes. [EUR]
Geotekstyl + narzut kamienny	530 000	665 000	800 000
Transport + aplikacja	680 000	900 000	1 120 000

Sprzęt + robocizna	500 000	645 000	790 000
Nadzór + rezerwa	198 000	263 200	325 000
RAZEM W5	1 908 000	2 473 200	3 035 000

Zalety: prosty, ekonomiczny (2,47 mln EUR), kamień odporny na erozję.

Wady: ograniczona szczelność, geotekstyl narażony na uszkodzenia.

Skuteczność: 75–85%, trwałość 20–30 lat.

5.2.6 Wariant W6 – Wielowarstwowa izolacja hybrydowa ★ REKOMENDOWANY

Opis: Wariant hybrydowy łączący 4 warstwy: geotekstyl + piasek + geomembrana HDPE + narzut kamienny. Optymalna relacja koszt/skuteczność/trwałość.

Tabela 30 Materiały i koszty dla W6

Warstwa	Materiał	Grubość	Funkcja
1 (dolna)	Geotekstyl 300 g/m ²	5 mm	Separacja, filtracja
2	Piasek morski	1,0 m	Warstwa wyrównawcza
3	Geomembrana HDPE	2 mm	Bariera wodoszczelna
4 (górną)	Narzut kamienny 100–300 mm	0,5 m	Ochrona mechaniczna

Materiały: Geotekstyl: 8 272 m² (~2,5 t) | Piasek: 7 520 m³ (12 032 t) | HDPE: 8 648 m² (~16,3 t) | Narzut: 3 760 m³ (6 768 t).

Tabela 31 Szacunek kosztów dla W6

Kategoria	Opt. [EUR]	Real. [EUR]	Pes. [EUR]
Materiały	421 040	552 864	667 392
Aplikacja	399 312	540 312	675 296
Sprzęt	667 500	876 250	1 085 000
Robocizna	239 750	300 750	361 750
Nadzór + monitoring	113 000	158 000	203 000
Rezerwa	239 200	314 600	390 000
RAZEM W6	2 079 802	2 742 776	3 382 438

Harmonogram: Realizacja w 10 etapach: mobilizacja → badania → geotekstyl → piasek → niwelacja → geomembrana (spawanie) → kontrola szczelności → narzut kamienny → badania końcowe → demobilizacja. 72–105 dni.

Skuteczność >99%, trwałość >50 lat,

Zalety: najwyższa ocena ważona (4,3/5), optymalna relacja koszt/skuteczność, minimalna konserwacja.

Wady: Średnia trudność wykonania (spawanie podwodne geomembrany wymaga specjalistów), koszt wyższy niż W1/W5.

5.3 Warianty III (Osady denne) – Przegląd kompletny

Warianty III dotyczą remediacji skażonych osadów dennych w strefach A (8 ha, hotspoty, WWA >10 mg/kg), B (19 ha, skażenie pośrednie, WWA 1–10 mg/kg) i C (19 ha, peryferyjna, WWA 0,1–1 mg/kg). Łączna powierzchnia: ≈ 45 ha. Zdefiniowano warianty: III.0 (tylko monitoring), III.C (bioremediacja + capping aktywny – REKOMENDOWANY), III.D-A (hybrydowy z dredgingiem i aktywnymi minerałami) oraz III.D-B (hybrydowy pasywny – niezalecany). Dodatkowo opisano wariant 4 (sarkofag fizyczny – odrzucony).

Tabela 32 Tabela porównawcza wariantów III

Wariant	Zakres	NPV 30 lat P50 [mln EUR]	Skuteczność	Ryzyko wtórne	Rekomendacja
III.0	Tylko monitoring (Strefa C)	~2–5 (monitoring)	Brak remediacji	Brak	Dla Strefy C
III.C	Capping aktywny ≈ 45 ha	74	Bardzo wysoka (90%+ w 10–20 lat)	NISKIE	★ BAZOWY (A+B)
III.D-A	Dredging A + capping B+C	123 (+66%)	Bardzo wysoka	Średnie–Wysokie	Alternatywa
III.D-B	Dredging A + capping pasywny	92 (+24%)	Niska (WWA >50 lat)	Średnie	NIEZALECANY

5.3.1 Wariant III.0 – Tylko monitoring (bez działań remediacyjnych)

Założenia: Wariant III.0 zakłada prowadzenie wyłącznie systematycznego monitoringu środowiskowego bez jakichkolwiek działań remediacyjnych. Jest to wariant rekomendowany dla Obszaru C (strefa peryferyjna, 19 ha, najniższe skażenie 0,1–1 mg/kg WWA).

Uzasadnienie dla Strefy C: Stężenia WWA w Strefie C są niskie (0,1–1 mg/kg), zbliżone do tła naturalnego. Koszt cappingu Strefy C byłby nieproporcjonalnie wysoki w stosunku do korzyści. Monitoring pozwala na wczesne wykrycie pogorszenia i eskalację do III.C w razie potrzeby.

Zakres monitoringu: Program obejmuje 5 komponentów: osady denne, kolumna wody, biota, parametry fizykochemiczne, integralność cappingu (w strefach A+B). Zakaz trawienia na 48 ha. Częstotliwość: faza intensywna (pierwsze 5 lat) 2×/rok, faza rutynowa 1×/rok.

Triggery eskalacji: Triggery eskalacji (oparte na wynikach badań 2025 jako baseline):

- Stężenie WWA w osadach >1 mg/kg s.m. (wzrost >50% vs. baseline 2025)
- Wzrost WWA w kolumnie wody >0,1 µg/l
- Spadek bioróżnorodności bentosu >30% vs. baseline 2025
- Wykrycie nowych plam paliwa na dnie
- Zmiana trendu atenuacji poniżej 1%/rok w 2 kolejnych kampaniach → przejście na wariant III.C.

- Triggery zapewniają proporcjonalną reakcję na ewentualne pogorszenie stanu, przy jednoczesnym unikaniu zbędnej interwencji w scenariuszu stabilnym lub poprawiającym się.

Koszty: Monitoring roczny: ~100–200 tys. EUR/rok. NPV 30 lat: ~2–5 mln EUR (zależnie od częstotliwości).

Zalety: Minimalne koszty, brak ingerencji w środowisko, zachowanie opcji eskalacji, proporcjonalność działań do poziomu zagrożenia.

Wady: Brak aktywnej remediacji, ryzyko pogorszenia sytuacji przy braku działania, wymaga dyscypliny w prowadzeniu monitoringu, zależność od finansowania długoterminowego.

5.3.2 Wariant III.C – Bioremediacja + Capping aktywny ★ WARIANT BAZOWY

Założenia: Przykrycie całej powierzchni ≈ 45 ha (strefy A+B+C) warstwą aktywnych minerałów (zeolity, keramzyt, perlit) o różnej grubości zależnie od strefy. Wariant rekomendowany jako bazowy.

Mechanizm działania: 1. Izolacja fizyczna – odcięcie osadów od kolumny wody i biosfery | 2. Sorpcja WWA – minerały aktywne wiążą WWA na powierzchni | 3. Bioremediacja – minerały tworzą mikrośrodowisko dla bakterii degradujących węglowodory.

Tabela 33 Materiały i koszty dla III.C

Parametr	Strefa A	Strefa B	Strefa C
Powierzchnia	8 ha	18 ha	19 ha
Grubość cappingu	0,1 m	0,05–0,1 m	0,05 m (lub III.0)
Materiał	Zeolity/keramzyt/perlit	Zeolity/keramzyt/perlit	Zeolity (opcjonalnie)
Stężenie WWA	>10 mg/kg	1–10 mg/kg	0,1–1 mg/kg

Koszty: NPV (30 lat, P50): 74 mln EUR – najniższy spośród wariantów aktywnych. Zakres P10–P90: 47–94 mln EUR (spread 47 mln EUR – najniższe ryzyko finansowe). Wrażliwość: cena materiałów $\pm 50\%$ = $\pm 10\%$ kosztów.

Skuteczność: Krótkoterminowa (0–5 lat): redukcja bioekspozycji >95%. Długoterminowa (5–30 lat): redukcja WWA w osadach >90%. Okres półtrwania WWA z bioremediacją: 10–20 lat.

Zalety: Minimalna ingerencja w środowisko (brak resuspensji), długoterminowo stabilny, tworzy „sztuczną rafę” (pozytywny efekt dla bioty), koszty optymalne, elastyczność – możliwe dodatkowe działania po 5–10 latach.

Wady: Wymaga monitoringu długoterminowego (30 lat), skuteczność bioremediacji niepewna w warunkach bałtyckich (niska temperatura), ryzyko erozji cappingu (wymaga geotekstyliów jeśli prądy >0,3 m/s).

Czas realizacji: 3–5 lat (prace cappingowe) + monitoring 30 lat.

5.3.3 Wariant III.C dla Obszaru A – specyfika

Charakterystyka Obszaru A: Strefa najwyższego skażenia, 8 ha, stężenia WWA >10 mg/kg, obecność jeziorzek cieczy węglowodorowych (zastoiska). Bezpośrednie sąsiedztwo wraku.

Zakres prac: Badania przedoperacyjne → przygotowanie obszaru → capping aktywny (0,1 m zeolity/keramzyt) → odbiory i stabilizacja → monitoring długoterminowy.

Obszar A: CAPEX: ~15–25 mln EUR | OPEX (monitoring 30 lat): ~5–10 mln EUR | Łącznie NPV: proporcjonalny udział w 74 mln EUR. Koszty orientacyjne

5.3.4 Wariant III.C dla Obszaru B – specyfika

Charakterystyka Obszaru B: Strefa przejściowa, 18–19 ha, stężenia WWA 1–10 mg/kg, podstrefy B1 (4–10 mg/kg) i B2 (1–4 mg/kg). Wymaga cappingu aktywnego 0,05–0,1 m.

Różnice vs. Obszar A: Cieńsza warstwa cappingu (0,05–0,1 m vs. 0,1 m) | Niższe stężenia WWA – bioremediacja potencjalnie szybsza | Mniejsze ryzyko resuspensji | Większa powierzchnia do pokrycia.

5.3.5 Wariant III.D-A – Hybrydowy z aktywnymi minerałami (ALTERNATYWA)

Założenia: Alternatywa dla III.C w określonych warunkach. Łączy precyzyjny dredging osadów w Strefie A z cappingiem aktywnym w Strefach B i C.

Zakres działań: Strefa A (8 ha): precyzyjny dredging/zasysanie osadów (głębokość 0,3–0,5 m, objętość 25 000–60 000 m³) + następnie capping aktywny 0,1 m | Strefa B (18 ha): capping aktywny 0,05–0,1 m (bez dredgingu) | Strefa C (19 ha): monitoring + ograniczenia użytkowania.

Warunki uzasadniające: Wymóg szybkiej redukcji WWA (<5 lat, presja społeczna/regulacyjna) | Pilot bioremediacji wykaże niską skuteczność (okres półtrwania >40 lat) | Wykrycie „superzanieczyszczeń” w Strefie A (WWA >100 mg/kg).

Koszty: NPV (30 lat, P50): 123 mln EUR (+66% vs. III.C, różnica ~50 mln EUR). Zakres P10–P90: spread 73 mln EUR. Najwrażliwszy parametr: objętość osadów do dredgingu (±50% objętości = ±30% kosztów).

Zalety: Szybka redukcja WWA (jeśli presja regulacyjna), eliminacja źródła (hotspoty usunięte = brak ryzyka długoterminowego).

Wady: Wysokie ryzyko wtórne (resuspensja podczas dredgingu, B1 = KRYTYCZNE), koszty +66% vs. III.C, wymagania logistyczne (pogłębiarki, barki, utylizacja 200–400 mln PLN), wpływ na biotę (zniszczenie bentosu, rekolonizacja 2–5 lat).

5.3.6 Wariant III.D-B – Hybrydowy pasywny (NIEZALECANY)

Założenia: Jak III.D-A, ale z cappingiem pasywnym (piasek/grunt z dna, bez aktywnych minerałów). NIEZALECANY jako wariant długoterminowy.

Koszty: NPV (30 lat, P50): 92 mln EUR (+24% vs. III.C). Piasek tańszy niż minerały aktywne.

Zalety: Koszty niższe niż III.D-A.

Wady: Brak bioremediacji = WWA pozostają w osadach >50 lat | Ryzyko bioturbacji (organizmy przekopują piasek → uwalnianie WWA) | „Nie rozwiązuje problemu długoterminowo” | Monitoring intensywny przez 50+ lat = wyższe koszty cyklu życia.

Możliwe zastosowanie: Tylko jako rozwiązanie tymczasowe (brak finansowania na III.C/III.D-A, wymóg działania natychmiastowego) – III.D-B = etap 1, a III.C/III.D-A = etap 2 (5–10 lat później).

5.3.7 Wariant 4 – Kapsuła/sarkofag fizyczny (odrzucony)

Opis: Pełne fizyczne zamknięcie skażonych osadów w szczelnej kapsule (sarkofag). Wariant analizowany w dokumentach źródłowych jako alternatywa, jednak odrzucony ze względu na skrajnie wysokie koszty i złożoność techniczną.

Status: ODRZUCONY. Koszty wielokrotnie wyższe niż III.C/III.D-A. Szczegółowa analiza porównawcza w dokumentach źródłowych wskazuje na brak uzasadnienia ekonomicznego i technicznego.

Tabela 34 Tabela porównawcza szczegółowa wariantów III

Kryterium	III.0	III.C (Bazowy)	III.D-A (Alternatywa)	III.D-B (Niezalecany)
Zakres	Monitoring	Capping ≈ 45 ha	Dredging A + capping B+C	Dredging A + capping pasywny
NPV P50 [mln EUR]	2–5	74	123 (+66%)	92 (+24%)
Skuteczność długoterm.	Brak	Bardzo wysoka (90%)	Bardzo wysoka	Niska (WWA >50 lat)
Czas realizacji	-	3–5 lat	4–6 lat	3–5 lat
Ryzyko wtórne	Brak	NISKIE	Średnie–Wysokie	Średnie
Resuspensja	Brak	Minimalna	Wysoka	Wysoka
Wpływ na biotę	Brak	Minimalny (12–24 mies.)	Wysoki (2–5 lat)	Wysoki
Akceptowalność społ.	Niska	Wysoka („sztuczna rafa”)	Średnia	Niska
Monitoring intensywność	Wysoki	Wysoki (1×/rok LT)	Średni	Średni
Zastosowanie	Strefa C	Strefy A+B (bazowy)	Alternatywa dla III.C	Tymczasowe/awaryjne
REKOMENDACJA	Dla Strefy C	★ ZALECANY	Warunkowa alt.	NIEZALECANY

Tabela 35 Dane zestawione w przejrzystej formie tabelarycznej:

Strefa	Scenariusz naturalnej atenuacji (bez interwencji)	Scenariusz z interwencją (rekomendowany wariant)	Różnica czasowa	Decyzja
A (~8 ha, WWA do 35 000 µg/kg)	II klasa RDW: >2075 (ciągła emisja ze źródeł)	II klasa RDW: ~2040–2050 (Z7 + W6 + III.C)	–25 do –35 lat	Interwencja pełna
B (~18 ha, WWA 1 500–3 000 µg/kg)	II klasa RDW: ~2055–2065	II klasa RDW: ~2040–2045 (III.C)	–15 do –20 lat	Capping aktywny
C (~19 ha, WWA 0,1–1 mg/kg)	II klasa RDW: ~2035–2040	II klasa RDW: ~2035–2040 (III.0)	0 lat	Monitoring (III.0)

Powyższa analiza pokazuje, że korzyść czasowa z interwencji technicznej (wyrażona jako skrócenie horyzontu osiągnięcia celów RDW) jest istotna jedynie dla stref A i B. W strefie C różnica jest zerowa, co stanowi kluczowy argument za rezygnacją z interwencji na rzecz monitoringu (III.0). Jednocześnie dla strefy A interwencja jest nie tylko korzystna czasowo, ale wręcz niezbędna – bez usunięcia paliwa z zastoisk i zabezpieczenia wraku naturalna atenuacja nie doprowadzi do osiągnięcia celu w sensownym horyzoncie czasowym (100 lat), gdyż prawdopodobna emisja z wraku odnawia skażenie.

Uwzględnienie wniosków z raportów prognostycznych. W dokumentach analitycznych (Raport Prognostyczny 2025–2100 vs. 2025–2200) przedstawiono dwa scenariusze różniące się założeniem o ciągłej emisji paliwa z wraku. W scenariuszu bez ciągłej emisji (2025–2100, $k = 0,028 \text{ rok}^{-1}$) cel RDW jest osiągalny w ok. 2075 r., a pełna regeneracja (I klasa) do 2090 r. W scenariuszu z ciągłą emisją (2025–2200) horyzont wydłuża się dwukrotnie. Różnica wynika wyłącznie z założeń modelowych, nie z błędów obliczeniowych. W praktyce oznacza to, że rzeczywisty horyzont zależy od skuteczności eliminacji źródeł (wariant Z7 + W6). Rekomenduje się weryfikację hipotezy ciągłej emisji przed podjęciem ostatecznej decyzji o pełnym zakresie interwencji (Decision Gate po pilotażu Z7/odsysaniu).

ROZWINIĘCIE WYBRANYCH WARIANTÓW – ANALIZA SZCZEGÓŁOWA

6 Operacja remediacji zastoisk paliwa HFO na dnie morskim - Wariant rekomendowany dla zastoisk paliwa Wariant Z7 – Odsysanie + Piasek + Zeolity (aktywna remediacja)

6.1 Specyfikacja techniczna

Wariant Z7 stanowi najbardziej kompleksowe rozwiązanie dla zastoisk paliwa, łącznie trzy komplementarne technologie w logicznej sekwencji operacyjnej. Jest to trzyetapowa operacja zgodna z koncepcją „cappingu aktywnego” opisaną w PNZ Stuttgart.

ETAP 1 – Odsysanie paliwa z zastoisk. Cel: usunięcie 70–85% wolnego paliwa HFO/smoły pogazowej z 16 zastoisk na dnie morskim. Głębokość operacji: 22–24 m. Ciąg technologiczny obejmuje: badanie przedoperacyjne z lokalizacją zastoisk (SSS, MBES, ROV z kamerami, sondowanie grubości paliwa), pozycjonowanie barki nad zastoiskiem (system kotwiczny, DGPS), opuszczenie systemu odsysającego przez ROV (rurociąg ~36 m), odsysanie paliwa pompami ssącymi (wydajność 2–5 m³/h, efektywnie 2,625 m³/h przy sprawności 75%), separację paliwo-woda na barce (separator 10 m³/h) oraz magazynowanie w zbiornikach (50–100 m³). Paliwo jest płynne w temperaturze dna (~4°C), co eliminuje konieczność podgrzewania.

ETAP 2 – Warstwa izolacyjna z piasku (capping). Cel: pokrycie 2 500 m² warstwą piasku o grubości 0,5 m jako izolacja mechaniczna. Objętość piasku: 1 250 m³, masa: 2 000 t.

ETAP 3 – Warstwa zeolitowa (aktywna remediacja). Cel: aplikacja warstwy klinoptilolitu o grubości 5 cm jako aktywna bariera sorpcyjna. Objętość zeolitu: 125 m³, masa: 100 t. Pojemność sorpcyjna: 100 000 kg × 75 mg/g = 7 500 kg zanieczyszczeń.

Tabela 36 Parametry techniczne

Parametr	Wartość	Uwagi
Powierzchnia robocza	2 500 m ²	16 zastoisk + margines
Objętość paliwa	146,7 m ³	Zakres: 98–196 m ³
Masa paliwa	161,4 t	Zakres: 108–216 t
Czas odsysania	55,9 h	≈ 7 dni roboczych
Dni operacyjne	12–18 dni	Z mob./demob./badaniami

Objętość piasku	1 250 m ³ / 2 000 t	Grubość 0,5 m
Objętość zeolitu	125 m ³ / 100 t	Grubość 0,05 m
Pojemność sorpcyjna	7 500 kg WWA	Klinoptilolit 75 mg/g
Głębokość operacji	22–24 m	Nurkowanie powietrzne
Wydajność odsysania	2,625 m ³ /h efektywnie	3,5 m ³ /h × 75%
Długość rurociągów	36 m	24 m × 1,5 (zapas)

6.2 Uzasadnienie merytoryczne i koszty

Wariant Z7 uzyskał najwyższą ocenę skuteczności (95–98%) spośród wszystkich wariantów Z.

Uzasadnienie wyboru:

- najwyższa skuteczność całkowita dzięki potrójnej barierze (usunięcie źródła + izolacja + aktywna sorpcja);
- aktywna remediacja długoterminowa (10–20 lat aktywności zeolitów);
- najniższy wpływ środowiskowy;
- możliwość regeneracji (wymiana warstwy zeolitu);
- zgodność z podejściem „cappingu aktywnego” wg PNZ Stuttgart;
- trwałość 20–30 lat.
- Szacowany koszt Z7: ok. 478 000 EUR (P50) w zakresie 394 000–518 000 EUR (P10–P90), po aktualizacji stawek utylizacji HFO.
- Sezon operacyjny: kwiecień–październik, operacje przy stanie morza ≤ 3 B (Hs ≤ 1,25 m).
- Monitoring 10-letni zaplanowany po zakończeniu prac.

6.3 INTEGRACJA DANYCH ŹRÓDŁOWYCH

Tabela 37 Dane wejściowe – tabela zbiorcza

Parametr	Wartość	Źródło	Status
Liczba zastoisk	16 szt.	PNZ II	PEWNY
Łączna powierzchnia zastoisk	978 m ²	PNZ II	PEWNY
Powierzchnia robocza (z naddatkami)	~2 500 m ²	Obliczenia (współczynnik 2,5)	SZACOWANY
Głębokość operacji	22–24 m	Dane operacyjne	PEWNY
Temperatura wody przy dnie	~4°C (przy głębokości 22–24 m)	PNZ / dane środowiskowe	PEWNY
Typ paliwa	HFO / smoła pogazowa	PNZ II	PEWNY
Gęstość paliwa	1,1 t/m ³	PNZ II	PEWNY
Grubość warstwy paliwa	0,10–0,20 m	Założenie	PEWNY
Objętość paliwa	98–196 m ³ (śr. 146,7 m ³)	Obliczenia	SZACOWANY
Masa paliwa	108–216 t (śr. 161,4 t)	Obliczenia	SZACOWANY
Wydajność pompy ssącej	2–5 m ³ /h (śr. 3,5 m ³ /h)	Specyfikacje sprzętu	PEWNY

Parametr	Wartość	Źródło	Status
Sprawność odsysania	70–85% (śr. 75%)	Doświadczenie	SZACOWANY
Czas pracy ROV dziennie	8 h/dzień	Standard operacyjny	PEWNY
Grubość warstwy piasku	0,5 m	PNZ Stuttgart	PEWNY
Grubość warstwy zeolitu	0,05 m (5 cm)	Projekt Z7	PEWNY

6.3.1 Badania przedoperacyjne

Badania już wykonane:

- Wykrywanie niewybuchów (niewypały/niewybuchy (UXO)) – WYKONANE;
- Sonar boczny (SSS) – WYKONANY;
- Echosonda wielowiązkowa (MBES) – WYKONANA;
- Inspekcja wideo – WYKONANA.

Badania uszczegółowiające do wykonania:

- Dodatkowe przejścia sonarem bocznym (SSS) z wyższą rozdzielczością w obszarach zastoisk (akustyczna kamera cyfrowa na ROV);
- Szczegółowe skanowanie echosondą wielowiązkową (MBES) dla precyzyjnego określenia mikrotopografii dna (MBES na ROV);
- Inspekcja wideo pojazdem podwodnym (ROV) z poborem próbek osadów w punktach kontrolnych;
- Pomiar grubości warstwy paliwa metodą sondowania;
- Badania geotechniczne podłoża (nośność dla warstwy izolacyjnej).

6.3.2 Luki informacyjne

- Dokładna batymetria poszczególnych zastoisk (wymagany badanie przedoperacyjne)
- Rzeczywista grubość warstwy paliwa w każdym zastoisku (wymagane próbkowanie)
- Aktualna temperatura wody przy dnie w lokalizacji zastoisk (dane sezonowe)
- Warunki prądowe i falowe w lokalizacji (dane meteocean)
- Odległość od najbliższego portu bazowego (wpływa na koszty mob/demob)
- Wymagania konkretnego Urzędu Morskiego dotyczące pozwoleń

6.4 ZAŁOŻENIA PROJEKTOWE I OGRANICZENIA

6.4.1 Założenia techniczne

- Głębokość operacji: 22–24 m (średnio 23 m)

- Paliwo w zastoiskach jest w postaci wolnej lub zmieszanej z piaskiem (półpłynne), płynne w temperaturze $\sim 4^{\circ}\text{C}$, dostępne do odsysania z powierzchni dna bez konieczności podgrzewania
- Wydajność odsysania $3,5 \text{ m}^3/\text{h}$ przy sprawności 75% (efektywnie $2,625 \text{ m}^3/\text{h}$)
- Pojazd podwodny zdalnie sterowany (ROV) klasy lekkiej lub obserwacyjny jest wystarczający (głębokość do 30 m)
- Nurkowie mogą wspomagać operację (głębokość do 30 m – nurkowanie powietrzne)
- Piasek morski o gęstości $1,6 \text{ t/m}^3$ jest dostępny w akceptowalnej odległości
- Klinoptilolit o granulacji 2–5 mm i pojemności sorpcyjnej 75 mg/g jest dostępny na rynku UE (polskim)
- Długość rurociągów: $24 \text{ m} \times 1,5 \text{ (zapas)} = 36 \text{ m}$

6.4.2 Założenia logistyczne

- Dostępność portu bazowego w odległości $\leq 50 \text{ km}$ od miejsca operacji – (Gdynia 2 km)
- Mobilizacja jednostki pływającej: 3–5 dni
- Okno pogodowe: operacje przy stanie morza $\leq 3 \text{ B}$ ($H_s \leq 1,25 \text{ m}$)
- Sezon operacyjny: kwiecień–październik (najlepsze warunki na Bałtyku)
- Transport piasku i zeolitu możliwy drogą morską bezpośrednio na barkę roboczą

6.4.3 Założenia kosztowe

- Stawki sprzętowe dostosowane do rynku bałtyckiego dla operacji płytkowodnych
- Barka kotwiczna (bez systemu dynamicznego pozycjonowania): 4 000–6 000 EUR/dzień
- pojazd podwodny klasy lekkiej (ROV): 2 500–4 000 EUR/dzień z operatorem
- Uwzględniono koszty pośrednie: mob/demob, pozwolenia, ubezpieczenie, HSE, nadzór
- Rezerwa 15% ze względu na etap koncepcyjny projektu
- Koszty monitoringu obejmują pełne kampanie morskie (jednostka + ROV + laboratorium)

6.4.4 Ograniczenia operacyjne

- Ograniczone okno pogodowe na Bałtyku (sezonowość, sztormy)
- Paliwo płynne w temperaturze dna ($\sim 4^{\circ}\text{C}$) – standardowa wydajność pomp
- Wymagane pozwolenia RDOŚ, Urzędu Morskiego, potencjalnie konserwatora zabytków
- Ograniczony czas pracy nurków przy powtarzalnych zanurzeniach na 22–24 m

6.5 METODYKA TECHNICZNA WARIANTU Z7

6.5.1 ETAP 1 – Odsysanie paliwa z zastoisk

Cel: Usunięcie 70–85% wolnego paliwa HFO/smoły pogazowej z 16 zastoisk na dnie morskim.

Głębokość operacji: 22–24 m.

6.5.1.1 Ciąg technologiczny:

1. Badanie przedoperacyjne – lokalizacja zastoisk (sonar boczny (SSS), echosonda wielowiązkowa (MBES), pojazd podwodny (ROV) z kamerami, sondowanie grubości paliwa);
2. Pozycjonowanie barki nad zastoiskiem (system kotwiczny, DGPS);
3. Opuszczenie systemu odsysającego przez pojazd podwodny (ROV) (rurociąg ~36 m);
4. Weryfikacja stanu paliwa w zastoisku (paliwo płynne w ~4°C, podgrzewanie zbędne);
5. Odsysanie paliwa pompami ssącymi (2–5 m³/h, efektywnie 2,625 m³/h);
6. Transport rurociągiem do jednostki powierzchniowej (36 m);
7. Separacja paliwo-woda na barce (separator 10 m³/h);
8. Magazynowanie paliwa w zbiornikach (50–100 m³);
9. Pomiar kontrolny po odsysaniu każdego zastoiska (pojazd podwodny (ROV) + kamery);
10. Przejsięcie do kolejnego zastoiska lub zakończenie etapu'

Tabela 38 Wymagany sprzęt :

Sprzęt	Specyfikacja	Uwagi dot. głębokości
Barka robocza	~30 × 10 m, system kotwiczny (system dynamicznego pozycjonowania (DP) nie jest wymagany)	system dynamicznego pozycjonowania (DP) nie wymagany przy 22–24 m – wystarczy kotwica
System odsysający	Pompa ssąca 5 m ³ /h, DIFIS lub podobny	
ROV	Klasy lekkiej lub obserwacyjnej z manipulatorem	Klasa lekka wystarczająca przy głębokości 22–24 m
Nurkowie (wsparcie)	2 nurków z kwalifikacjami do 30 m	Nurkowanie powietrzne przy głębokości 22–24 m
Rurociągi podwodne	HDPE Ø100mm, elastyczne, ~36 m	Długość dopasowana do głębokości 22–24 m
Separator + zbiorniki	Separator 10 m ³ /h, zbiorniki 50–100 m ³	

6.5.2 ETAP 2 – Warstwa izolacyjna z piasku (capping)

Cel: Pokrycie 2 500 m² warstwą piasku o grubości 0,5 m jako izolacja mechaniczna.

Tabela 39 Parametry warstwy piasku

Powierzchnia pokrycia	2 500 m ²
Grubość warstwy	0,5 m
Objętość piasku	1 250 m ³
Masa piasku	2 000 t

6.5.3 ETAP 3 – Warstwa zeolitowa (aktywna remediacja)

Cel: Aplikacja warstwy klinoptilolitu o grubości 5 cm jako aktywna bariera sorpcyjna.

Tabela 40 Warstwa zeolitowa

Typ zeolitu	Klinoptilolit naturalny
Granulacja	2–5 mm
Powierzchnia warstwy	2 500 m ²
Grubość warstwy	0,05 m (5 cm)
Objętość	125 m ³
Masa	100 t
Pojemność sorpcyjna	7 500 kg (75 mg/g × 100 t)

6.6 PEŁNY PAKIET OBLICZEŃ

6.6.1 Obliczenia objętości i mas

- Objętość paliwa: $V = 978 \text{ m}^2 \times 0,15 \text{ m} = 146,7 \text{ m}^3$ (zakres: 98–196 m³)
- Masa paliwa: $m = 146,7 \text{ m}^3 \times 1,1 \text{ t/m}^3 = 161,4 \text{ t}$ (zakres: 108–216 t)
- Czas odsysania: $t = 146,7 / (3,5 \times 0,75) = 55,9 \text{ h}$
- Dni robocze: $55,9 / 8 = 7,0 \text{ dni}$
- Dni operacyjne: $7 + 3 \text{ (mobilizacja)} + 2 \text{ (badanie)} + 2 \text{ (demob)} = 12\text{--}18 \text{ dni}$
- Długość rurociągów: $24 \text{ m} \times 1,5 = 36 \text{ m}$
- Objętość piasku: $2 500 \times 0,5 = 1 250 \text{ m}^3 \rightarrow \text{masa: } 1 250 \times 1,6 = 2 000 \text{ t}$
- Objętość zeolitu: $2 500 \times 0,05 = 125 \text{ m}^3 \rightarrow \text{masa: } 125 \times 0,8 = 100 \text{ t}$
- Pojemność sorpcyjna: $100 000 \text{ kg} \times 75 \text{ mg/g} = 7 500 \text{ kg zanieczyszczeń}$

6.7 Struktura podziału prac WBS I CBS

Tabela 41 Struktura podziału prac (WBS)

WBS	Opis	Koszt Real. [EUR]
1.0	PRZYGOTOWANIE PROJEKTU	
1.1	Dokumentacja projektowa	30 000 EUR
1.2	Pozwolenia i uzgodnienia	22 000 EUR
1.3	Badanie przedoperacyjne	18 000 EUR
1.4	Ubezpieczenie	22 000 EUR
1.5	Bezpieczeństwo i higiena pracy (HSE) + plan awaryjny	20 000 EUR
2.0	MOBILIZACJA	
2.1	Mobilizacja jednostki i sprzętu	55 000 EUR
3.0	ETAP 1: ODSYSANIE	
3.1	Lokalizacja zastoisk (inspekcja pojazdem podwodnym (ROV))	
3.2	Instalacja systemu odsysającego	
3.3	Odsysanie paliwa z 16 zastoisk	
3.4	Separacja i magazynowanie	

WBS	Opis	Koszt Real. [EUR]
3.5	Transport i utylizacja paliwa	
3.6	Pomiar kontrolny	
	SUMA ETAP 1	235 000 EUR
4.0	ETAP 2: WARSTWA IZOLACYJNA Z PIASKU	
4.1	Transport piasku	
4.2	Układanie warstwy piaskowej	
4.3	Weryfikacja batymetryczna	
	SUMA ETAP 2	90 000 EUR
5.0	ETAP 3: WARSTWA ZEOLITOWA	
5.1	Transport zeolitu	
5.2	Aplikacja warstwy zeolitowej	
5.3	Weryfikacja pokrycia	
	SUMA ETAP 3	42 000 EUR
6.0	ODBIORY I DEMOBILIZACJA	
6.1	Odbiory końcowe	
6.2	Demobilizacja	
6.3	Raport końcowy	15 000 EUR
7.0	NADZÓR I ZARZĄDZANIE PROJEKTEM	28 000 EUR
8.0	MONITORING 10-LETNI	82 000 EUR
	REZERWA 15%	98 850 EUR
	RAZEM Z7	~758 000 EUR

6.8 SZCZEGÓŁOWE ZESTAWIENIE KOSZTÓW

Poniższy kosztorys obejmuje koszty dla głębokości operacyjnej 22–24 m, stawki rynkowe oraz pełne pozycje kosztowe – w oparciu o pozyskane (ale ograniczone dostępem) dane rynkowe.

Tabela 42 Koszty bezpośrednie operacyjne

Kategoria	Opt. [EUR]	Real. [EUR]	Pes. [EUR]
ETAP 1: Odsysanie	153 800	192 250	230 700
ETAP 2: Warstwa izolacyjna z piasku	63 000	78 750	94 500
ETAP 3: Warstwa zeolitowa	26 440	33 050	39 660
Monitoring (10 lat)	26 000	32 500	39 000
Rezerwa 15%	26 924	33 655	40 386
RAZEM (koszty bezpośrednie)	296 164	370 205	444 246

Tabela 43 Koszty pełne

Kategoria kosztów	Opt. [EUR]	Real. [EUR]	Pes. [EUR]
ETAP 1: Odsysanie	175 000	235 000	295 000
ETAP 2: Warstwa izolacyjna z piasku	68 000	90 000	112 000
ETAP 3: Warstwa zeolitowa	30 000	42 000	52 000
Monitoring 10-letni	55 000	82 000	110 000
Mobilizacja / demobilizacja	30 000	55 000	80 000
Badanie przedoperacyjne	8 000	18 000	25 000
Pozwolenia i administracja	10 000	22 000	35 000
Dokumentacja projektowa	15 000	30 000	50 000

Kategoria kosztów	Opt. [EUR]	Real. [EUR]	Pes. [EUR]
Ubezpieczenie operacji	12 000	22 000	35 000
Bezpieczeństwo i higiena pracy (HSE) + plan awaryjny (OSCP)	10 000	20 000	30 000
Nadzór i zarządzanie projektem	15 000	28 000	40 000
Raport końcowy + powykonawcza	8 000	15 000	22 000
SUMA PRZED REZERWĄ	436 000	659 000	886 000
Rezerwa 15%	65 400	98 850	132 900
RAZEM Z7 (PEŁNE KOSZTY)	501 400	757 850	1 018 900

6.9 Wskaźniki kosztowe

Tabela 44 Wyliczone wskaźniki kosztowe

Wskaźnik	Wartość
Koszt na tonę paliwa (161,4 t)	4 696 EUR/t
Koszt na m ² powierzchni (2 500 m ²)	303 EUR/m ²
Benchmark płytkowodny	~5 200 EUR/m ³ – w zakresie benchmarku

6.10 HARMONOGRAM SZCZEGÓŁOWY

Tabela 45 Wykaz czynności

Etap	Opis	Dni	Uwagi
PRZYGOTOWANIE			
P1	Dokumentacja projektowa	30–60	PRZED operacją morską
P2	Pozwolenia i uzgodnienia	60–120	RDOŚ, UM, inne
P3	Zamówienie materiałów	30–45	Piasek, zeolit, sprzęt
REALIZACJA			
1	Mobilizacja i transport sprzętu	3–5	(bez systemu dynamicznego pozycjonowania (DP))
2	Badanie przedoperacyjne (ROV)	2–3	Lokalizacja zastoisk
3	Instalacja systemu odsysającego	1–2	pojazd podwodny (ROV) + nurkowie (22–24 m)
4	Odsysanie paliwa	7–10	
5	Separacja i magazynowanie	równol.	Równolegle z etapem 4
6	Weryfikacja (inspekcja pojazdem podwodnym (ROV))	1–2	
7	Przygotowanie do warstwy izolacyjnej (cappingu)	2–3	Zmiana konfiguracji barki
8	Układanie piasku	3–5	Metoda tremie
9	Aplikacja zeolitu	2–4	System dozowania precyzyjnego
10	Weryfikacja pokrycia (echo-sonda wielowiązkowa (MBES) / pojazd podwodny (ROV))	2–3	Kontrola grubości warstw
11	Demobilizacja	2–3	Transport sprzętu do portu

Tabela 46 Czas trwania procesu

Etap procesu	Czas trwania procesu
Faza przygotowawcza	3–6 miesięcy
Realizacja operacji morskiej	25–42 dni
Monitoring	10 lat

6.11 PLAN ZASOBÓW

6.11.1 Sprzęt kluczowy

- Barka robocza ~30×10 m z systemem kotwiczenia (kotwiczenie wystarczające przy 22–24 m)
- Pojazd podwodny klasy lekkiej (ROV) z manipulatorem (głębokość do 100 m)
- System odsysający z pompą ssącą 5 m³/h
- Separator paliwo-woda (10 m³/h)
- Zbiorniki magazynowe (50–100 m³)
- Rurociągi HDPE Ø100mm (~36 m)
- Barka refulacyjna (warstwa izolacyjna z piasku (capping))
- System dozowania zeolitu
- Sprzęt nurkowy (dla wsparcia operacji na 22–24 m)

6.12 Personel kluczowy

- Kierownik operacji morskiej (1 os.)
- Operatorzy pojazdu podwodnego (ROV) (2 os.)
- Operatorzy systemu pompowego (2 os.)
- Nurkowie (2 os.) , możliwe przy 22–24 m
- Załoga barki (kapitan + 3 marynarzy)
- Specjalista remediacji (1 os., Etap 3)
- Nadzór techniczny (1 os.)
- Inspektor bezpieczeństwa i higieny pracy (HSE) (1 os.)

6.13 RYZYKA I ZARZĄDZANIE RYZYKIEM

Tabela 47 Zestawienie ryzyk

Ryzyko	P	W	Ocena	Mitygacja
Wyciek paliwa podczas odsysania	Śr.	Wys.	WYSOKIE	Boom olejowe, sorbenty, OSCP, monitoring
Awaria pompy	Śr.	Śr.	ŚREDNIE	Pompa zapasowa na pokładzie
Złe warunki pogodowe	Wys.	Śr.	ŚREDNIE	Planowanie okna pogodowego, prognoza
Niska sprawność odsysania	Śr.	Śr.	ŚREDNIE	Testy na 1 zastoisku, paliwo płynne w ~4°C

Ryzyko	P	W	Ocena	Mitygacja
Opóźnienia w pozwoleniach	Śr.	Śr.	ŚRED-NIE	Wczesne złożenie wniosków
Obecność niewybuchów (niewypały/niewybuchy (UXO))	Niski	Wys.	ŚRED-NIE	Pomiar magnetometryczny, procedury MW
Rozmycie zeolitu przez prądy	Śr.	Śr.	ŚRED-NIE	Granulacja 2–5mm, monitoring
Szybsze nasycenie zeolitu	Niski	Śr.	NISKIE	Monitoring, wymiana warstwy
Przekroczenie budżetu	Śr.	Śr.	ŚRED-NIE	Rezerwa 15%, dokładne planowanie
Opóźnienie sezonowe	Śr.	Śr.	ŚRED-NIE	Start w maju-czerwcu, bufor czasu

6.14 OCENA SKUTECZNOŚCI I ODDZIAŁYWANIA

Tabela 48 Zestawienie skuteczności oddziaływania

Skuteczność początkowa	90–95% (odsysanie + capping)
Skuteczność długoterminowa	95–98% (+ aktywna remediacja zeolitem)
Wpływ środowiskowy operacji	Niski (potrójna bariera)
Trwałość izolacji	20–30 lat
Aktywna remediacja	10–20 lat (pojemność zeolitu)
Możliwość regeneracji	Tak (wymiana warstwy zeolitu)
Porównanie z Z5 (samo odsysanie)	Z7 droższa ale skuteczność 95-98% vs 70-85%
Porównanie z Z4 (hybrydowy, bez odsysania)	Z7 tańsza (758k vs 710k EUR) i skuteczniejsza

6.15 BEZPIECZEŃSTWO I HIGIENA PRACY (HSE) / KONTROLA JAKOŚCI (QA/QC) / PROCEDURY OPERACYJNE

6.15.1 Plan bezpieczeństwa, higieny pracy i ochrony środowiska (HSE)

- Plan bezpieczeństwa operacji morskiej (zgodny z IMCA/IOGP)
- Plan ochrony środowiska (plan reagowania na wycieki olejowe (OSCP))
- Procedury nurkowe (zgodne z normami PN-EN dla nurkowań do 30 m)
- Procedury pojazdu podwodnego (ROV) (zgodne z IMCA R 004)
- Szkolenia załogi: pożarowe, pierwsza pomoc, MOB, OSCP
- Sprzęt ratunkowy: tratwy, koła ratunkowe, środki łączności
- Monitoring emisji i wycieków w czasie rzeczywistym

6.15.2 Plan zapewnienia i kontroli jakości (QA/QC)

- Weryfikacja grubości warstwy piasku (batymetria echosondą wielowiązkową (MBES), ROV)
- Weryfikacja grubości warstwy zeolitu (sondy, pojazd podwodny (ROV))
- Pobór próbek wody w trakcie odsysania (monitoring zanieczyszczeń)
- Badanie jakości odzyskanego paliwa (laboratorium)
- Dokumentacja fotograficzna i wideo pojazdem podwodnym (ROV) z każdego zastoiska

- Raport z każdego dnia operacyjnego

6.16 PLAN MONITORINGU 10-LETNIEGO

Tabela 49 Monitoring zastoisk

Parametr	Rok 1–5	Rok 6–10	Uwagi
Częstotliwość	2×/rok	1×/rok	Wiosna/jesień (lata 1-5)
Metody	ROV + MBES + próbki	pojazd podwodny (ROV) + próbki	Uproszczony zakres po 5 lat
Parametry monitorowane	WWA, metale ciężkie, TPH stan warstwy zeolitu batymetria	WWA, TPH stan zeolitu	
Koszt kampanii	8 000–12 000 EUR	6 000–10 000 EUR	
Progi alarmowe	WWA > 50 µg/L ubytki zeolitu > 20%	j.w.	Interwencja jeśli przekroczone
Raportowanie	Raport po każdej kampanii + raport roczny	Raport roczny	

6.17 WYMAGANY PAKIET DOKUMENTÓW

Tabela 50 Niezbędne dokumenty

Nr	Dokument	Odpowiedzialny	Termin
D01	Koncepcja techniczna wariantu Z7	Zamawiający	Przed pozwoleniami
D02	Projekt techniczny (wykonawczy)	Projektant	Przed mobilizacją
D03	Kosztorys szczegółowy	Kosztorysant	Przed przetargiem
D04	Harmonogram szczegółowy (Gantt)	Kierownik projektu	Przed mobilizacją
D05	Specyfikacja techniczna sprzętu	Inżynier morski	Do przetargu
D06	Plan bezpieczeństwa i higieny pracy (HSE)	Specjalista BHP	Przed mobilizacją
D07	Plan ochrony środowiska (OSCP)	Specjalista środow.	Do pozwoleń
D08	Plan zapewnienia i kontroli jakości (QA/QC)	Inżynier jakości	Przed operacją
D09	Procedury operacyjne	Kierownik operacji	Przed operacją
D10	Plan monitoringu 10-letniego	Specjalista środow.	Do pozwoleń
D11	Plan awaryjny	Kierownik bezpieczeństwa i higieny pracy (HSE)	Przed operacją
D12	Dokumentacja pozwoleńowa (OOŚ)	Konsultant środow.	Jako pierwsza
D13	Raport z badań przedoperacyjnych	Hydrograf / operator pojazdu podwodnego (ROV)	Po badanie
D14	Raporty dzienne operacyjne	Kierownik operacji	W trakcie
D15	Raport końcowy z realizacji	Kierownik projektu	Po zakończeniu
D16	Dokumentacja powykonawcza	Projektant	Po zakończeniu
D17	Raporty monitoringowe (roczne)	Specjalista środow.	Przez 10 lat

6.18 LUKI, NIEPEWNOŚCI I DECYZJE WYMAGANE

Tabela 51 Rzeczy do zrobienia

Luka/Niepewność	Wpływ	Sposób zamknięcia
Dokładna głębokość każdego zastoiska	Wpływa na czas i sprzęt	Pomiar batymetryczny
Rzeczywista grubość paliwa	Wpływa na objętość $\pm 100\%$	Próbkowanie in situ
Warunki prądowe i metocean	Wpływa na bezpieczeństwo i czas	Dane metocean z IMGW/pomiary
Status niewybuchów (niewypały/niewybuchy (UXO)) w obszarze	Może zablokować operację	Pomiar magnetometryczny, MW
Wymagania pozwoleniowe (RDOŚ)	Wpływa na harmonogram (60–120 dni)	Konsultacje z RDOŚ
Odległość portu bazowego	Wpływa na koszt mob/demob	Analiza logistyczna
Dostępność sprzętu na rynku	Wpływa na koszty i termin	Wstępne rozeznanie rynku

6.19 REKOMENDOWANA KOLEJNOŚĆ PRAC DOKUMENTACYJNYCH

1. Dokumentacja pozwoleniowa (OOS, karty informacyjne) → D12
2. Koncepcja techniczna (do uzgodnień) → D01
3. Badanie przedoperacyjne (batymetria, ROV, niewypały/niewybuchy (UXO)) → D13
4. Projekt techniczny (na bazie danych z badania) → D02
5. Kosztorys szczegółowy i harmonogram → D03, D04
6. Specyfikacja techniczna (do przetargu) → D05
7. Plany bezpieczeństwa i higieny pracy (HSE), OSCP, QA/QC → D06, D07, D08 (równoległe z 4–6)
8. Procedury operacyjne i plan awaryjny → D09, D11
9. Plan monitoringu → D10
10. REALIZACJA OPERACJI → D14 (raporty dzienne)
11. Raport końcowy i dokumentacja powykonawcza → D15, D16
12. Monitoring 10-letni → D17

6.20 ANEKS: TABELA MASTER

Tabela 52 Główne parametry działania

Parametr	Wartość (SKORYGOWANA)	Status
Wariant	Z7: Odsysanie + Piasek + Zeolity	Rekomendowany
Głębokość operacji	22–24 m	
Liczba zastoisk	16 szt.	
Powierzchnia zastoisk	978 m ² (robocza: 2 500 m ²)	
Masa paliwa (średnia)	161,4 t	Zakres: 108–216 t
Skuteczność	95–98% (długoterminowa)	
Trwałość	20–30 lat	
Czas realizacji (morski)	25–42 dni	

Parametr	Wartość (SKORYGOWANA)	Status
Czas przygotowania	3–6 miesięcy	
Koszt Opt. (pełne)	501 400 EUR	
Koszt Real. (pełne)	757 850 EUR	
Koszt Pes. (pełne)	1 018 900 EUR	
Koszt Real. (bezpośrednie)	370 205 EUR	
Koszt/tonę paliwa	4 696 EUR/t	
Koszt/m ² powierzchni	303 EUR/m ²	
Monitoring	10 lat	
Rezerwa	15%	

7 Zabezpieczenie Wraku SS Stuttgart W Zatoce Gdańskiej - Wariant W6 rekomendowany dla zabezpieczenia wraku – Wielowarstwowa izolacja hybrydowa wraku

Opracowanie Projektowo-Wykonawcze W6

7.1 Specyfikacja techniczna

Wariant W6 łączy najlepsze cechy wariantów W1, W2 i W5, tworząc wielowarstwową strukturę izolacyjną o optymalnej relacji koszt/skuteczność. Wariant zakłada usypanie pryzmy piaskowej wyrównującej nierówny profil wraku (elementy wystające do 5 m ponad dno), a następnie ułożenie czterowarstwowej struktury izolacyjnej.

Tabela 53 Struktura wielowarstwowa (od dołu do góry)

Warstwa	Materiał	Grubość	Funkcja
Pryzma	Piasek morski	$h = 5 \text{ m}$	Wyrównanie profilu wraku
1	Geotekstyl 300 g/m^2	–	Separacja
2	Piasek morski	$1,0 \text{ m}$	Bufor ochronny
3	Geomembrana HDPE	$2,0 \text{ mm}$	Bariera hydroizolacyjna (>99%)
4	Narzut kamienny 100–300 mm	$0,5 \text{ m}$	Ochrona mechaniczna / balast

7.2 Parametry techniczne

Tabela 54 Parametry techniczne

Parametr	Wartość
Powierzchnia robocza	$8\,850 \text{ m}^2$ (z naddatkiem, profil wypukły pryzmy)
Objętość pryzmy piaskowej	$\sim 14\,804 \text{ m}^3$ / $\sim 26\,647 \text{ t}$
Objętość piasku (warstwa 2)	$8\,850 \text{ m}^3$ / $14\,160 \text{ t}$
Masa geomembrany HDPE	$\sim 19,1 \text{ t}$ ($10\,178 \text{ m}^2$ z zakładkami)
Objętość narzutu kamiennego	$4\,425 \text{ m}^3$ / $7\,965 \text{ t}$
Masa geotekstyli	$\sim 2,9 \text{ t}$ ($9\,735 \text{ m}^2$ z zakładkami)
Skuteczność izolacji	>99%
Trwałość projektowa	>50 lat
Obciążenie dna	$\sim 24,5 \text{ kPa}$ (49% nośności)
Czas realizacji	75–85 dni (10 etapów)
Ocena wielokryterialna	4,3/5,0 – najwyższa

7.3 Koszty i harmonogram

Koszt W6 obejmuje dwa składniki: pryzmę piaskową (~2,39 mln EUR, Wariant 1 pryzmy $h=5$ m) oraz warstwy ochronne W6 (~2,7 mln EUR realistycznie dla samego W6, zakres 2,1–3,4 mln EUR). Łączny koszt realistyczny W6 z pryzmą: ok. 5,67 mln EUR. W6 uzyskał najwyższą ocenę wielokryterialną (4,3/5,0) dzięki: najwyższej skuteczności izolacji (>99%) przy umiarkowanym koszcie, redundancji warstw (awaria jednej warstwy nie eliminuje funkcji izolacyjnej), trwałości >50 lat, niskiemu wpływowi środowiskowemu oraz sprawdzonym technologiom morskim. LCC zdyskontowany (50 lat): ~3,89 mln EUR, ekwiwalent roczny ~78 000 EUR/rok.

Realizacja przebiega w 10 etapach:

1. mobilizacja floty 7–10 dni,
2. badania wstępne 5–7 dni,
3. układanie geotekstylu 7–10 dni,
4. zrzut piasku 12–18 dni,
5. niwelacja piasku 5–8 dni,
6. układanie i spawanie geomembrany HDPE 15–20 dni,
7. kontrola szczelności spawów 3–5 dni,
8. układanie narzutu kamiennego 10–15 dni,
9. badania końcowe 5–7 dni,
10. demobilizacja 3–5 dni. Łączny czas: 72–105 dni (1 sezon operacyjny).

W przypadku Decision Gate obligującego odsysanie paliwa z wraku, harmonogram rozszerza się do 123–230 dni (4–8 miesięcy).

CZĘŚĆ 1 - Zabezpieczenie wraku SS Stuttgart uwzględniająca rzeczywistą topografię wraku oraz pryzmę piaskową jako element wyrównawczy

7.4 Stan faktyczny

Weryfikacja batymetryczna wykazała, że elementy konstrukcyjne wraku wystają ponad dno morskie w sposób nierównomierny:

- Głębokość zalegania wraku na dnie: 22–24 m p.p.m.
- Maksymalna wysokość wystających elementów: do 5 m ponad dno
- Średnia wysokość wystających elementów: 3–4 m ponad dno
- Rozkład wysokości jest nierównomierny – ok. 60% elementów wystaje do 3 m, 30% do 4 m, 10% do 5 m
- Orientacyjna liczba istotnych elementów wystających ponad 4 m: ok. 10 sztuk

7.5 Konsekwencje dla projektu

Nierównomierny profil wraku uniemożliwia:

- Bezpośrednie ułożenie geowłóknin na nierównej powierzchni – ryzyko perforacji i nieskuteczności izolacji
- Równomierny rozkład warstw ochronnych – kruszywo zsuwałoby się z wystających elementów
- Zapewnienie ciągłości warstwy ochronnej – luki przy elementach wystających

7.6 Przyjęte rozwiązanie

Przed ułożeniem warstw ochronnych należy usypać pryzmę z czystego piasku morskiego, która wyrówna profil terenu i stworzy stabilną, łagodną powierzchnię do ułożenia warstw cappingu. Piasek morski zostanie pobrany z zatwierdzonego źródła poza obszarem wraku.

7.7 Profil pionowy wraku

Na podstawie danych MBES i inspekcji ROV ustalono następujący rozkład wysokości elementów wystających:

Tabela 55 Charakterystyka głębokościowa na obszarze wraku

Strefa wysokości	% powierzchni	Powierzchnia [m ²]	Opis elementów
0–3 m	60%	3 780	Pozostałości kadłuba, pokładów, drobne elementy

Strefa wysokości	% powierzchni	Powierzchnia [m ²]	Opis elementów
3–4 m	30%	1 890	Szczątki nadbudówki, wycięte fragmenty pokładów
4–5 m	10%	630	Pozostałości silników (turbin), – ok. 10 szt.
RAZEM	100%	6 300	Powierzchnia podstawy wraku: 180 × 35 m

7.8 Rozwiązanie projektowe – pryzma piaskowa

7.8.1 Założenia projektowe pryzmy

Parametry wspólne dla wszystkich wariantów:

- Wymiary podstawy pryzmy: 180 m × 35 m = 6 300 m²
- Margines bezpieczeństwa wokół pryzmy: 5 m z każdej strony
- Wymiary obszaru warstw ochronnych: (180+2×5) × (35+2×5) = 190 m × 45 m = 8 550 m²
- Materiał: czysty piasek morski pobrany z zatwierdzonego źródła na dnie Zatoki Gdańskiej
- Frakcja piasku: 0,1–2,0 mm (piasek średnioziarnisty morski)
- Gęstość piasku in situ (wilgotnego): ~1,8 t/m³
- Współczynnik narostu (luźnienie przy usypywaniu podwodnym): 1,15
- Nachylenie skarp bocznych pryzmy: 1:3 (naturalny kąt zsyłu pod wodą)

Źródło piasku:

Piasek morski pozyskany z zatwierdzonej lokalizacji czerpania (depozyt piaskowy) w Zatoce Gdańskiej, w odległości 10–20 km od wraku. Wymagane pozwolenie na wydobywanie kruszywa morskiego zgodnie z ustawą Prawo geologiczne i górnicze oraz uzgodnienia z Urzędem Morskim w Gdyni. Przed pobraniem materiału wymagane badanie laboratoryjne próbek piasku pod kątem zanieczyszczeń (metale ciężkie, TBT, WWA).

Sprzęt do formowania pryzmy:

- Pogłębiarka ssąca z zasobnikiem (TSHD – Trailing Suction Hopper Dredger) – do pobrania i transportu piasku
- System zrzuca/sypania (fall-pipe lub rainbowning) do formowania pryzmy na dnie
- Statek układający (DP2) z systemem fall-pipe – do precyzyjnego formowania pryzmy
- Echosonda wielowiązkowa (MBES) do bieżącej kontroli profilu pryzmy
- ROV do inspekcji wizualnej postępu prac

7.8.2 Wariant 1 – Pryzma podstawowa (h=5 m)

Wariant zakłada usypanie pryzmy o jednolitej wysokości 5 m, pokrywającej w całości wszystkie wystające elementy wraku. Jest to wariant najprostszy technicznie, ale wymagający największej ilości materiału.

7.8.3 Obliczenie objętości piasku

Obliczenie objętości pryzmy trapezoidalnej:

- Wymiary podstawy: $180 \text{ m} \times 35 \text{ m} = 6300 \text{ m}^2$
- Nachylenie skarp: 1:3 (offset poziomy = $h \times 3 = 15 \text{ m}$)
- Wymiary korony: $(180 - 2 \times 15) \times (35 - 2 \times 15) = 150 \text{ m} \times 5 \text{ m} = 750 \text{ m}^2$
- Wysokość pryzmy: 5 m

$$V = h/3 \times (A_{\text{podstawy}} + A_{\text{korony}} + \sqrt{(A_{\text{podstawy}} \times A_{\text{korony}})})$$

$$V = 5/3 \times (6300 + 750 + \sqrt{(6300 \times 750)})$$

$$V = 15,373 \text{ m}^3 \text{ (objętość geometryczna brutto)}$$

Korekty:

- Objętość elementów wraku wypełniających przestrzeń: $-2,500 \text{ m}^3$ (szacunkowo)
- Objętość netto piasku: $12,873 \text{ m}^3$
- Współczynnik narostu (luźnienie): $\times 1,15$
- Objętość piasku do pobrania: $14,804 \text{ m}^3$

Masa piasku: $14,804 \text{ m}^3 \times 1,8 \text{ t/m}^3 = 26,647 \text{ ton}$

Tabela 56 Kosztorys pryzmy – Wariant 1

Lp.	Pozycja kosztowa	Ilość/Czas	Cena jedn. [EUR]	Koszt [EUR]
1	Piasek morski z dostawą	$14,804 \text{ m}^3$	18 EUR/ m^3	266,468
2	Pogłębiarka TSHD (pozyskanie i transport)	15 dni	35,000 EUR/dzień	525,000
3	Statek układający DP z fall-pipe	20 dni	50,000 EUR/dzień	1,000,000
4	ROV (inspekcja i kontrola)	10 dni	20 000 EUR/dzień	200,000
5	Survey MBES (kontrola profilu)	5 dni	15 000 EUR/dzień	75,000
6	Monitoring środowiskowy	30 dni	4,000 EUR/dzień	120,000
7	Projekt, pozwolenia, nadzór	ryczałt	—	200,000
	RAZEM – Pryzma piaskowa Wariant 1			2,386,468 EUR

7.8.4 Wariant 2 – Pryzma z wycięciem elementów (h=4 m)

Wariant zakłada wycięcie 10 elementów wystających powyżej 4 m (każdy na długości 3 m) przez nurków z użyciem sprzętu do cięcia podwodnego, a następnie usypanie pryzmy o wysokości 4 m. Zmniejsza to objętość piasku o ok. 20%, ale generuje dodatkowe koszty prac nurkowych.

7.8.5 Obliczenie objętości piasku

Wymiary korony: $(180 - 2 \times 12) \times (35 - 2 \times 12) = 156 \text{ m} \times 11 \text{ m} = 1716 \text{ m}^2$

$$V = 4/3 \times (6300 + 1716 + \sqrt{(6300 \times 1716)})$$

$$V = 15,072 \text{ m}^3 \text{ (brutto)}$$

$$V \text{ netto (po odliczeniu wraku): } 12,947 \text{ m}^3$$

$$V \text{ z narostem } (\times 1,15): 14,889 \text{ m}^3$$

Masa piasku: $14,889 \text{ m}^3 \times 1,8 \text{ t/m}^3 = 26,800 \text{ ton}$

7.8.6 Koszty prac nurkowych – cięcie elementów

Parametry prac nurkowych:

- Liczba elementów do wycięcia: 10 sztuk
- Długość cięcia na element: 3 m
- Łączna długość cięcia: $10 \times 3 \text{ m} = 30 \text{ m}$
- Głębokość pracy: 17–20 m (korona wraku)
- Metoda cięcia: cięcie tlenowe lub plazmowe podwodne
- Szacowana wydajność cięcia stali pod wodą: 1,5–3,0 m/godz.

Czas cięcia: $30 \text{ m} \div 2.0 \text{ m/h} = 15 \text{ godzin efektywnych}$

Przy 4 h efektywnej pracy nurkowej/dzień: 4 dni nurkowych + 3 dni rezerwa = 7 dni

Tabela 57 zestawienie sprzętu

Pozycja	Czas/Ilość	Cena jedn.	Koszt [EUR]
Statek nurkowy DSV (DP)	7 dni	40,000 EUR/dzień	280,000
Zespół nurków + palacze	7 dni	27,000 EUR/dzień	189,000
Sprzęt do cięcia podwodnego	komplet	—	40,000
Podniesienie i usunięcie elementów	10 szt.	6 000 EUR/szt.	60,000
Bezpieczeństwo i logistyka	ryczałt	—	50,000
RAZEM – prace nurkowe			619,000 EUR

7.8.7 Kosztorys przyzmy – Wariant 2

Tabela 58 Sity i środki

Pozycja	Ilość	Cena jedn.	Koszt [EUR]
Piasek morski z dostawą	14,889 m ³	18 EUR/m ³	268,002
Pogłębiarka TSHD	12 dni	35,000 EUR/dzień	420,000
Statek układający DP	16 dni	50,000 EUR/dzień	800,000
ROV + Survey + Monitoring	jak W1	—	395,000
Projekt, pozwolenia, nadzór	ryczałt	—	200,000
Prace nurkowe (cięcie)	patrz powyżej	—	619,000
RAZEM – Wariant 2 (pryzma + cięcie)			2,702,002 EUR

7.8.8 Wariant 3 – Pryzma o nieregularnym kształcie

Wariant zakłada dopasowanie wysokości przyzmy do rzeczywistego profilu wraku, minimalizując zużycie piasku. Pryzma ma zmienną wysokość odpowiadającą poszczególnym strefom:

- 60% powierzchni (3 780 m²): wysokość 3 m – pokrycie strefy niskich elementów
- 30% powierzchni (1 890 m²): wysokość 4 m – pokrycie strefy średnich elementów
- 10% powierzchni (630 m²): wysokość 5 m – pokrycie strefy najwyższych elementów

7.8.9 Obliczenie objętości i kosztów piasku

Tabela 59 Obliczenie objętości dla poszczególnych stref:

Strefa	Powierzchnia [m ²]	Wysokość [m]	Objętość [m ³]	Uwagi
Obszar A (60%)	3 780	3	11,340	Obszar niskich elementów
Obszar B (30%)	1 890	4	7,560	Obszar średnich elementów
Obszar C (10%)	630	5	3,150	Obszar najwyższych elementów
Skarpy przejściowe	—	—	1,500	Przejścia między strefami
BRUTTO	6 300	—	23,550	
Odliczenie wraku	—	—	-1,875	Szacunek
NETTO	—	—	21,675	
Z narostem ×1,15	—	—	24,926	Objętość do pobrania

Masa piasku: 24,926 m³ × 1,8 t/m³ = 44,867 ton

Tabela 60 Kosztorys przyzmy – Wariant 3

Pozycja	Ilość	Cena jedn.	Koszt [EUR]
Piasek morski z dostawą	24,926 m ³	18 EUR/m ³	448,672

Pogłębiarka TSHD	11 dni	35,000 EUR/dzień	385,000
Statek układający DP	18 dni	50,000 EUR/dzień	900,000
ROV + Survey + Monitoring	jak W1 + dodatkowy survey	—	432,500
Dodatkowe koszty precyzyjnego formowania	ryczałt	—	80,000
Projekt, pozwolenia, nadzór	ryczałt	—	200,000
RAZEM – Wariant 3 (pryzma nieregularna)			2,446,172 EUR

7.8.10 Wariant 4 – Scenariusz awaryjny z paliwem ciężkim

Wariant bazuje na Wariancie 1 (pryzma $h=5$ m), ale uwzględnia scenariusz, w którym podczas prac odkryto i konieczne jest usunięcie 3–5 ton paliwa ciężkiego (HFO – Heavy Fuel Oil) z wraku.

7.8.11 Procedura usunięcia paliwa ciężkiego

Zgodnie z procedurami opisanymi w Załączniku nr 4 oraz Załączniku nr 5 (koszty operacji defueling), przyjęto następujący scenariusz:

1. Wstrzymanie prac sypania pryzmy
2. Mobilizacja sprzętu do usuwania paliwa (hot-tapping, pompy, ogrzewanie)
3. Rozwinięcie zabezpieczeń środowiskowych (boomy, sorbenty, monitoring)
4. Operacja usunięcia 3–5 ton HFO metodą odsysania z pomocą nurka lub ROV
5. Utylizacja wydobytego paliwa
6. Weryfikacja szczelności i wznowienie prac pryzmy

Tabela 61 Kosztorys prac awaryjnych – usunięcie paliwa

Pozycja	Czas/Ilość	Cena jedn. P50	Koszt [EUR]
Statek nurkowy DSV (DP2)	10 dni	40 000 EUR/dzień	400 000
Work-class ROV z obsługą	10 dni	20 000 EUR/dzień	200 000
Zestaw do odsysania	10 dni	8 000 EUR/dzień	80 000
Pompy	10 dni	4 000 EUR/dzień	40 000
Boomy olejowe + sorbenty	komplet	—	80 000
Monitoring środowiskowy (wzmocniony)	10 dni	8 000 EUR/dzień	80 000
Utylizacja paliwa HFO	5 ton	1 000 EUR/t	5 000
Mobilizacja sprzętu awaryjnego	ryczałt	—	150 000
Plan bezpieczeństwa OSCP + zabezpieczenia	ryczałt	—	100 000
RAZEM – usunięcie paliwa (scenariusz awaryjny)			1 132 500 EUR

Wariant 4 = Wariant 1 + koszty awaryjne = 2,386,468 + 1,132,000 = 3,518,468 EUR (same pryzma + paliwo, bez warstw ochronnych)

7.9 Warstwy ochronne – przeliczenie dla topografii wzgórza

7.9.1 Obliczenie powierzchni warstw ochronnych

Kluczowa zmiana: warstwy ochronne muszą pokryć nie płaską powierzchnię, lecz wypukły profil pryzmy piaskowej (wzgórze) wraz z marginesem bezpieczeństwa 5 m dookoła.

Wymiary obszaru do pokrycia warstwami ochronnymi:

- Wymiar podłoża: $(180 + 2 \times 5) \times (35 + 2 \times 5) = 190 \text{ m} \times 45 \text{ m} = 8\,550 \text{ m}^2$ (powierzchnia rzutu)

Obliczenie rzeczywistej powierzchni do pokrycia (Wariant 1, $h=5 \text{ m}$):

- Korona pryzmy: $150 \times 5 = 750 \text{ m}^2$
- Długość skarpy: $\sqrt{5^2 + 15^2} = 15.81 \text{ m}$
- Skarpy długie (2 szt.): $2 \times (150+180)/2 \times 15.81 = 5218 \text{ m}^2$
- Skarpy krótkie (2 szt.): $2 \times (5+35)/2 \times 15.81 = 632 \text{ m}^2$
- Margines płaski (5 m dookoła): 2250 m^2
- POWIERZCHNIA CAŁKOWITA: 8850 m^2**

Porównanie z pierwotnym założeniem płaskiego terenu:

- Powierzchnia płaska (oryginalne założenie): $8,550 \text{ m}^2$
- Powierzchnia rzeczywista (wzgórze + margines): $8,850 \text{ m}^2$
- Współczynnik wzrostu: $1.04 \times$ (wzrost o 4%)

Tabela 62 Zestawienie powierzchni warstw ochronnych dla poszczególnych wariantów:

Wariant	Wysokość pryzmy	Pow. warstw [m^2]	Wzrost vs płaska
Oryginalne założenie	płaski teren	8,550	—
Wariant 1	$h = 5 \text{ m}$	8,850	+4%
Wariant 2	$h = 4 \text{ m}$	8,798	+3%
Wariant 3	$h = 3\text{--}5 \text{ m}$ (śr. 3,5)	8,770	+3%

7.9.2 Specyfikacja materiałowa warstw ochronnych

Struktura warstw ochronnych (od dołu do góry):

- Warstwa 1: Geowłóknina separacyjna (gramatura min. 300 g/m^2) – izolacja pryzmy od warstwy kruszywa

7. Warstwa 2: Kruszywo kamienne frakcji 16–32 mm, grubość 0,3 m – warstwa drenażowa/ochronna
8. Warstwa 3: Geomembrana HDPE grubość 1,5 mm – bariera hydroizolacyjna
9. Warstwa 4: Geowłóknina ochronna (gramatura min. 500 g/m²) – ochrona mechaniczna membrany
10. Warstwa 5: Narzut kamienny frakcji 60–200 mm, grubość 0,5 m – warstwa balastowa/ochronna

7.9.3 Kosztorys warstw ochronnych

Tabela 63 Obliczenia dla Wariantu 1 (pow. = 8,850 m²):

Lp.	Materiał/Pozycja	Ilość	Cena jedn.	Koszt [EUR]
1	Geowłóknina separacyjna 300 g/m ²	9,735 m ²	3.5 EUR/m ²	34,073
2	Kruszywo kamienne 16–32 mm	2,655 m ³	25 EUR/m ³	66,377
3	Geomembrana HDPE 1,5 mm	9,735 m ²	8.0 EUR/m ²	77,882
4	Geowłóknina ochronna 500 g/m ²	9,735 m ²	5.0 EUR/m ²	48,676
5	Narzut kamienny 60–200 mm	4,425 m ³	35 EUR/m ³	154,879
6	Statek układający (robocizna)	25 dni	50,000 EUR/dzień	1,250,000
7	ROV (kontrola ułożenia)	25 dni	20 000 EUR/dzień	500,000
	RAZEM – warstwy ochronne (War. 1)			2,131,887 EUR

Szacowane koszty warstw ochronnych dla pozostałych wariantów (proporcjonalnie do powierzchni):

- Wariant 2 (pow. 8,798 m²): 2,119,300 EUR
- Wariant 3 (pow. 8,770 m²): 2,112,654 EUR

7.10 Prace dodatkowe

7.10.1 Prace nurkowe – cięcie elementów wystających (dotyczy Wariantu 2)

Szczegółowy kosztorys prac nurkowych przedstawiono w rozdziale 4.3.2. Poniżej podsumowanie kluczowych parametrów:

Tabela 64 Parametry prac nurkowych

Parametr	Wartość
Liczba elementów do wycięcia	10 szt.
Łączna długość cięcia	30 m (10 × 3 m)
Głębokość robocza	17–20 m
Metoda cięcia	Cięcie tlenowe/plazmowe podwodne
Czas realizacji	7 dni (łącznie z rezerwą pogodową)
Sprzęt	DSV (DP), zespół nurkowy + palacze, ROV
Koszt łączny	619,000 EUR

Wymogi bezpieczeństwa prac nurkowych (wg Zał. 5):

- Nurkowie z certyfikacją IMCA do prac podwodnych
- System nurkowy z nurkiem asekuracyjnym (standby diver)
- Komora dekompresyjna na statku
- Monitoring ROV w trakcie prac cięcia
- Procedury bezpieczeństwa UXO – weryfikacja przed rozpoczęciem cięcia
- Plan ratowniczy i ewakuacyjny

7.10.2 Scenariusz awaryjny – usunięcie paliwa ciężkiego (HFO)

Szczegółowy kosztorys usunięcia paliwa przedstawiono w rozdziale 4.5.2. Procedura zgodna z metodyką hot-tapping opisaną w Załączniku nr 4.

Kluczowe elementy procedury awaryjnej:

1. Natychmiastowe wstrzymanie prac sypania pryzmy
2. Aktywacja Planu Operacyjnego Reagowania na Rozlew (OSCP)
3. Rozwinięcie boomów olejowych wokół strefy pracy
4. Mobilizacja sprzętu hot-tapping z podgrzewaniem (wg Zał. 4: metoda Moskito lub równoważna)
5. Podgrzanie i wypompowanie HFO do zbiorników na statku
6. Ciągły monitoring środowiskowy (jakość wody, obecność olejów)
7. Transport i utylizacja paliwa w licencjonowanym zakładzie
8. Raport powykonawczy i weryfikacja szczelności

Szacowany koszt scenariusza awaryjnego: 1,132,000 EUR

7.11 Kosztorys zbiorczy – porównanie wariantów

Tabela 65 Zestawienie kosztów wariantów

Wariant	Pryzma [EUR]	Warstwy ochr. [EUR]	Prace dodat. [EUR]	RAZEM [EUR]	Piasek [m ³]
W1: Pryzma h=5 m	2,386,468	2,131,887	—	4,518,355	14,804
W2: Pryzma h=4 m + cięcie	2,083,002	2,119,300	619,000	4,821,302	14,889
W3: Pryzma nieregularna	2,446,172	2,112,654	—	4,558,827	24,926
W4: W1 + paliwo awaryjne	2,386,468	2,131,887	1,132,000	5,650,355	14,804

Tabela 66 Analiza porównawcza

Kryterium	W1	W2	W3	W4
Koszt łączny	4,518,355 €	4,821,302 €	4,558,827 €	5,650,355 €
Objętość piasku	14,804 m ³	14,889 m ³	24,926 m ³	14,804 m ³
Złożoność techniczna	Niska	Średnia	Wysoka	Wysoka
Ryzyko realizacji	Niskie	Średnie	Średnie	Wysokie
Czas realizacji (pryzma)	~35 dni	~28+7 dni	~29 dni	~45 dni
Wymagane prace nurkowe	Nie	Tak (cięcie)	Nie	Tak (HFO)
Precyzja formowania	Standardowa	Standardowa	Wysoka	Standardowa

7.12 Harmonogram realizacji

Tabela 67 Orientacyjny harmonogram dla Wariantu 1 (rekomendowanego)

Lp.	Etap	Czas trwania	Uwagi
1	Przygotowanie projektu i pozwolenia	3–6 miesięcy	RDOŚ, Urząd Morski, pozw. na wydobywanie kruszywa
2	Screening UXO pola pracy	5–7 dni	Przed rozpoczęciem prac podwodnych
3	Mobilizacja floty	3–5 dni	TSHD, statek DP, ROV
4	Pozyskanie i transport piasku	15 dni	Pogłębiarka TSHD
5	Formowanie pryzmy piaskowej	20 dni	Statek z fall-pipe
6	Kontrola profilu pryzmy (MBES)	3 dni	Weryfikacja geometrii
7	Ułożenie warstw ochronnych	25 dni	Statek układający
8	Survey powykonawczy	3 dni	MBES + ROV
9	Demobilizacja	3 dni	
10	Raport powykonawczy	30 dni	Dokumentacja, monitoring

Łączny czas prac morskich (etapy 2–9): ok. 75–85 dni roboczych

Okno pogodowe: prace należy zaplanować na okres maj–październik (najkorzystniejsze warunki meteorologiczne na Bałtyku)

7.13 Analiza ryzyk

Tabela 68 Analiza ryzyk

Lp.	Ryzyko	Prawdop.	Wpływ	Środki zaradcze
1	Warunki pogodowe – przerwy w pracach	Wysokie	Średni	Bufor 20% czasu; elastyczny harmonogram
2	Obecność UXO w strefie pracy	Średnie	Wysoki	Screening magnetometryczny; procedury MW/AMW
3	Wyciek paliwa z wraku podczas prac	Niskie	Wysoki	OSCP aktywny; boomy i sorbenty w gotowości
4	Niestabilność przymy piaskowej	Niskie	Średni	Skarpy 1:3; monitoring MBES; korekty profilu
5	Erozja przymy (prądy morskie)	Średnie	Średni	Nadmiar materiału +15%; monitoring po-realizacyjny
6	Uszkodzenie geomembrany przy układaniu	Niskie	Średni	Geowłóknina ochronna; kontrola ROV
7	Opóźnienia w uzyskaniu pozwoleń	Średnie	Średni	Wczesne rozpoczęcie procesu administracyjnego
8	Przekroczenie budżetu (>20%)	Średnie	Średni	Rezerwa budżetowa; kontrakty z ceną max.
9	Znalezienie większej ilości paliwa	Niskie	Wysoki	Procedura awaryjna (Wariant 4)
10	Konflikty z żeglugą w Zatoce	Niskie	Niski	Komunikaty nawigacyjne; koordynacja z VTS

7.14 Rekomendacje

7.14.1 Rekomendowany wariant realizacji

Na podstawie przeprowadzonej analizy techniczno-ekonomicznej rekomenduje się Wariant 1 (pryzma podstawowa h=5 m) jako optymalny wybór z następujących powodów:

1. Najniższa złożoność techniczna – brak potrzeby precyzyjnego profilowania ani prac nurkowych
2. Najniższe ryzyko realizacyjne – jednolita pryzma o prostej geometrii
3. Pełne pokrycie wszystkich elementów wraku bez konieczności ich wycinania
4. Akceptowalny koszt – choć objętość piasku jest największa, brak dodatkowych prac nurkowych kompensuje różnicę
5. Największy margines bezpieczeństwa – pryzma pokrywa wszystkie elementy z zapasem

Szacowany koszt całkowity Wariantu 1: 4,518,355 EUR

7.14.2 Wariant alternatywny

Jeśli budżet jest ograniczony, Wariant 3 (pryzma nieregularna) oferuje oszczędność na materiale piaskowym, ale wymaga bardziej zaawansowanego sprzętu do precyzyjnego formowania i kontroli. Szacowany koszt: 4,558,827 EUR.

7.14.3 Rekomendacje dodatkowe

- Przeprowadzić pełny screening UXO przed rozpoczęciem jakichkolwiek prac na dnie
- Przygotować Plan Reagowania na Rozlew (OSCP) i utrzymywać go aktywnym przez cały czas trwania prac
- Zaplanować monitoring porealizacyjny – survey MBES po 6, 12 i 24 miesiącach
- Uzyskać wszystkie pozwolenia administracyjne (RDOŚ, Urząd Morski, PAA) z wyprzedzeniem min. 6 miesięcy
- Zapewnić rezerwę budżetową min. 15–20% na nieprzewidziane okoliczności
- Uwzględnić okno pogodowe Bałtyku – prace morskie planować na maj–październik
- Przygotować procedurę na wypadek znalezienia paliwa ciężkiego (Wariant 4) – sprzęt hot-tapping w gotowości logistycznej

7.15 Załączniki i podstawy obliczeniowe

7.15.1 Źródła danych kosztowych

- Załącznik nr 4 – Technologie badania i neutralizacji wraków (koszty pogłębiarek, capping, hot-tapping)
- Załącznik nr 5 – Biblioteka stawek EUR 2025, Bałtyk (Tabela 3: DSV, ROV, hot-tapping, capping materiał)
- Studium przypadku U-864 (Norwegia) – capping wraku warstwami ochronnymi, ~208,7 mln EUR
- Koszty pogłębiarek (Załącznik 4, Tabela 17): ssąca 5–30 EUR/m³, chwytakowa 10–50 EUR/m³
- Koszty nakrywania skażonego gruntu (Załącznik 4, Tabela 18): materiał 10–50 EUR/m², transport 5–20 EUR/m²
- Koszt usuwania UXO wg. Wariant Z8: Mobilna neutralizacja obiektów pUXO end-to-end (detekcja sonarowo-magnetometryczna, identyfikacja RTG, utylizacja plazmowa na pokładzie jednostki pływającej; demonstracja na 8 obiektach pUXO w rejonie SS Stuttgart). Biblioteka stawek jeszcze nie ustalona

7.15.2 Kluczowe stawki przyjęte do obliczeń (P50, EUR 2025)

Kluczowe stawki przyjęte do obliczeń (P50, EUR 2025). Stawki utylizacji paliwa HFO zaktualizowano w oparciu o oferty rynkowe licencjonowanych zakładów utylizacji odpadów niebezpiecznych w Pol-

sce (rok 2025): zakres 3 000–4 000 PLN/t, przeliczone po kursie 4,3 PLN/EUR (400/700/1 000 EUR/t dla P10/P50/P90).

Tabela 69 Koszty

Pozycja	P10	P50 (przyjęte)	P90
DSV (jednostka nurkowa DP)	25 000 €/dzień	40 000 €/dzień	60 000 €/dzień
Work-class ROV z obsługą	12 000 €/dzień	20 000 €/dzień	35 000 €/dzień
Statek układający (capping)	35 000 €/dzień	50 000 €/dzień	70 000 €/dzień
Zespół nurków (ekipa)	6 000 €/dzień	12 000 €/dzień	20 000 €/dzień
Zespół spawaczy podwodnych	8 000 €/dzień	15 000 €/dzień	25 000 €/dzień
Capping – materiał z dostawą	12 €/m ³	18 €/m ³	25 €/m ³
Zestaw hot-tapping	4 000 €/dzień	8 000 €/dzień	12 000 €/dzień
Pompy + grzanie HFO	2 000 €/dzień	4 000 €/dzień	6 000 €/dzień
Monitoring środowiskowy	2 000 €/dzień	4 000 €/dzień	8 000 €/dzień
Utylizacja paliwa HFO	400 €/t	700 €/t	1 000 €/t

Stawki utylizacji płynnego paliwa HFO odsysanego z zastoisk i wraku zostały podwyższone z 100/200/400 EUR/t do 400/700/1 000 EUR/t dla scenariuszy P10/P50/P90. Korekta wynika z analizy aktualnych ofert rynkowych licencjonowanych zakładów utylizacji odpadów ropopochodnych w Polsce (2025), które wskazują zakres 3 000–4 000 PLN/t ($\approx$ 700–930 EUR/t). Zmiana stawek nie wpływa na ranking wariantów ani na rekomendację hybrydową (Z7 + W6 + III.C) – wzrost kosztu wariantu Z7 wynosi $\sim$ 29 % (z 370 do 478 tys. EUR P50), a wpływ na koszt scenariusza awaryjnego W6 jest marginalny ($< 0,3$ %). W wariantach III.D-A/B korekta dodatkowo wzmacnia uzasadnienie ich odrzucenia.”

7.15.3 Założenia obliczeniowe

- Gęstość piasku morskiego in situ: 1,8 t/m³
- Współczynnik narostu (luźnienie): 1,15
- Nachylenie skarp przyzmy: 1:3
- Margines bezpieczeństwa: 5 m wokół przyzmy
- Szacowana objętość wraku w strefie przyzmy: $\sim$ 2 500 m³
- Zakładki geowłóknin i geomembran: +10%
- Ceny w EUR na poziomie 2025, region Bałtyk
- Poziom cen: P50 (mediana), z korektami lokalnymi wg Zał. 5

CZĘŚĆ 2 - Zabezpieczenie Wraku SS Stuttgart W Zatoce Gdańskiej - Wielowarstwowa Izolacja Hybrydowa

8 Streszczenie wykonawcze

Niniejsze opracowanie projektowo-wykonawcze stanowi wstępną dokumentację techniczną, kosztową, harmonogramową i środowiskową dla realizacji wariantu W6 – wielowarstwowej izolacji hybrydowej wraku S/S Stuttgart, zatopionego w Zatoce Gdańskiej na głębokości 22–24 m.

S/S Stuttgart to statek pasażerski o długości 168 m i szerokości 20 m, zatopiony w 1943 r. Wrak stanowi źródło zagrożenia środowiskowego ze względu na obecność resztkowego paliwa ciężkiego (HFO) oraz potencjalnych materiałów niebezpiecznych. Obszar skażony wokół wraku obejmuje łącznie ok. 41,8 ha (≈ 45 ha), podzielony na strefy A (~ 8 ha), B (~ 18 ha) i C (~ 19 ha).

Kluczowe parametry wariantu W6:

- Struktura: 4 warstwy – geotekstyl 300 g/m² → piasek morski 1,0 m → geomembrana HDPE 2 mm → narzut kamienny 0,5 m;
- Powierzchnia robocza: 8 850 m² (z naddatkiem 10 m wokół wraku);
- Skuteczność izolacji: >99%;
- Trwałość projektowa: >50 lat;
- Koszt realistyczny: $\sim 5\,670\,868$ EUR (W6 + pryzma) (zakres: 2,18–3,56 mln EUR);
- Czas realizacji: 75–85 dni (10 etapów);
- Ocena wielokryterialna: 4,3/5,0 – najwyższa spośród wszystkich wariantów.

Wariant W6 został wybrany jako rekomendowany spośród sześciu analizowanych wariantów (W1–W6) na podstawie analizy wielokryterialnej uwzględniającej skuteczność, trwałość, koszt, wpływ środowiskowy i wykonalność techniczną. W6 oferuje optymalną relację koszt/skuteczność – przy koszcie zbliżonym do najtańszych wariantów (W1, W5) zapewnia skuteczność porównywalną z najdroższymi rozwiązaniami (W2, W3, W4).

Dokument uwzględnia również etap warunkowy (Decision Gate) dotyczący odsysania paliwa resztkowego jako operacji poprzedzającej izolację W6, ze wskazaniem warunków, w których etap ten staje się obligatoryjny.

8.1 Cel opracowania i zakres

Celem niniejszego opracowania jest przygotowanie pełnowartościowej dokumentacji projektowo-wykonawczej dla wariantu W6 izolacji wraku S/S Stuttgart, stanowiącej bazę do dalszego rozwijania w kierunku kompletnej dokumentacji realizacyjnej.

8.2 Zakres przedmiotowy

- Analiza porównawcza wariantów W1–W6 z uzasadnieniem wyboru W6
- Pełne obliczenia geometryczne, materiałowe i inżynierskie dla W6
- Szczegółowy kosztorys w trzech scenariuszach (optymistyczny/realistyczny/pesymistyczny)
- Harmonogram realizacji z diagramem Gantta
- Analiza ryzyk z macierzą graficzną (7 kategorii)
- Plan monitoringu i kontroli jakości
- Kryteria odbioru i potwierdzenia skuteczności
- Analiza trwałości i kosztu cyklu życia (LCC)
- Identyfikacja decyzji krytycznych i luk informacyjnych
- Wariantowa część dotycząca odsysania paliwa (Decision Gate)

8.3 Ograniczenia opracowania

Opracowanie bazuje na danych dostępnych w dokumentach źródłowych wymienionych w sekcji 4. Nie przeprowadzono niezależnych badań terenowych. Wszystkie obliczenia opierają się na danych projektowych i założeniach roboczych, które wymagają weryfikacji w fazie szczegółowego projektowania.

8.4 Metodologia

Opracowanie wykonano w następującej sekwencji metodycznej:

1. Ekstrakcja danych z dokumentów źródłowych z identyfikacją sekcji i stron
2. Sanity check wszystkich wartości liczbowych (weryfikacja krzyżowa, kontrola jednostek, spójność sum)
3. Identyfikacja niespójności, artefaktów OCR i błędów redakcyjnych → Rejestr niespójności (sekcja 5)
4. Obliczenia inżynierskie z pełnym pokazaniem wzorów, podstawień i wyników
5. Analiza porównawcza wariantów metodą wielokryterialną (scoring 1–5, wagi)
6. Szacowanie kosztów metodą bottom-up w trzech scenariuszach probabilistycznych (P10/P50/P90)
7. Analiza ryzyk metodą macierzową (prawdopodobieństwo × skutek, 5×5)
8. Synteza i rekomendacje z jawnym wskazaniem niepewności i założeń roboczych

8.5 Opis obiektu, stanu wyjściowego i kontekstu środowiskowego

8.5.1 Dane identyfikacyjne wraku

Tabela 70 Dane wraku

Parametr	Wartość
Nazwa	S/S Stuttgart
Typ	Statek pasażerski (Reichspostdampfer)
Bandera	Niemcy (III Rzesza)
Rok budowy	1923 (założenie robocze – do potwierdzenia)
Rok zatonięcia	1943
Przyczyna zatonięcia	Zatopiony w wyniku działań wojennych
Lokalizacja	Zatoka Gdańska, Morze Bałtyckie
Głębokość	22–24 m
Orientacja	Na dnie (do potwierdzenia: na stępce / przechylony)
Długość (L)	168 m
Szerokość (B)	20 m
Powierzchnia rzutu	3 360 m ²

8.6 Stan wyjściowy i zagrożenia

Wrak S/S Stuttgart stanowi źródło wieloaspektowego zagrożenia środowiskowego:

- Paliwo resztkowe (HFO/IFO) – obecność potwierdzona w zastoiskach wokół wraku; szacowana objętość w zastoiskach: 98–196 m³ (98–235 t);
- Paliwo w zbiornikach wraku – ilość nieznana, wymaga badań NBS/inwazyjnych,
- Zanieczyszczenie osadów dennych – WWA, metale ciężkie, substancje ropopochodne,
- Degradacja konstrukcji – postępująca korozja, ryzyko niekontrolowanego uwolnienia,

8.7 Kontekst środowiskowy

Tabela 71 Rejon wraku charakteryzuje się następującymi warunkami środowiskowymi:

Parametr	Wartość / Zakres
Głębokość wody	22–24 m
Temperatura wody przy dnie	~4°C (zima) do ~8°C (lato)
Zasolenie	~7–8 PSU (typowe dla Zatoki Gdańskiej)
Prądy denne	0,1–0,5 m/s (założenie robocze)
Typ dna	Piasek drobnoziarnisty z domieszką mułu
Obszar skażony ogółem	41,8 ha (≈ 45 ha)
Strefa A (bezpośrednie otoczenie wraku)	~8 ha
Strefa B (strefa przejściowa)	~18 ha
Strefa C (strefa zewnętrzna)	~19 ha
Obszary chronione	Potencjalne sąsiedztwo Natura 2000 (do potwierdzenia z RDOŚ)

[ZAŁOŻENIE ROBOCZE] Temperatura wody przy dnie i prądy denne przyjęto na podstawie ogólnych danych dla Zatoki Gdańskiej. Wymagana weryfikacja na podstawie pomiarów in-situ.

8.8 Miejsce wariantu W6 w całej logice postępowania

Projekt neutralizacji zagrożeń związanych z wrakiem S/S Stuttgart obejmuje trzy główne grupy działań, realizowane sekwencyjnie:

GRUPA I – Działania dotyczące zastoisk paliwa

Izolacja lub usunięcie paliwa z 16 zastoisk w bezpośrednim otoczeniu wraku. Warianty Z1–Z7 (rekomendowany: Z7 – odsysanie + piasek + zeolity). Powierzchnia robocza: ~2 500 m².

GRUPA II – Działania dotyczące wraku (W6 = niniejsze opracowanie)

Izolacja wraku wielowarstwową strukturą cappingową. Warianty W1–W6 (rekomendowany: W6 – hybrydowy). Powierzchnia robocza: 8 850 m². Wariant W6 stanowi rdzeń niniejszego opracowania.

GRUPA III – Działania dotyczące skażonych osadów w strefach A/B/C

Remediacja osadów dennych w strefach A (~8 ha), B (~18 ha) i C (~19 ha). Warianty III.C (bioremediacja + capping aktywny – bazowy), III.D-A (hybrydowy z aktywnymi minerałami), III.D-B (hybrydowy pasywny – niezalecany).

Sekwencja realizacji:

1. Etap 0 (Decision Gate): Ocena konieczności odsysania paliwa z wraku – patrz sekcja 12;
2. Etap I: Izolacja zastoisk (Grupa I) – wariant Z7;
3. Etap II: Izolacja wraku (Grupa II) – wariant W6 (niniejsze opracowanie);
4. Etap III: Remediacja osadów (Grupa III) – wariant III.C lub III.D-A;
5. Etap IV: Monitoring długoterminowy (wszystkie grupy).

⚠ UWAGA: Wariant W6 może być realizowany niezależnie od Grupy I (zastoiska) i Grupy III (osady), ale optymalnie powinien być poprzedzony rozstrzygnięciem Decision Gate dotyczącego odsysania paliwa z wraku.

8.9 Porównanie wariantów W1–W6 i uzasadnienie wyboru W6

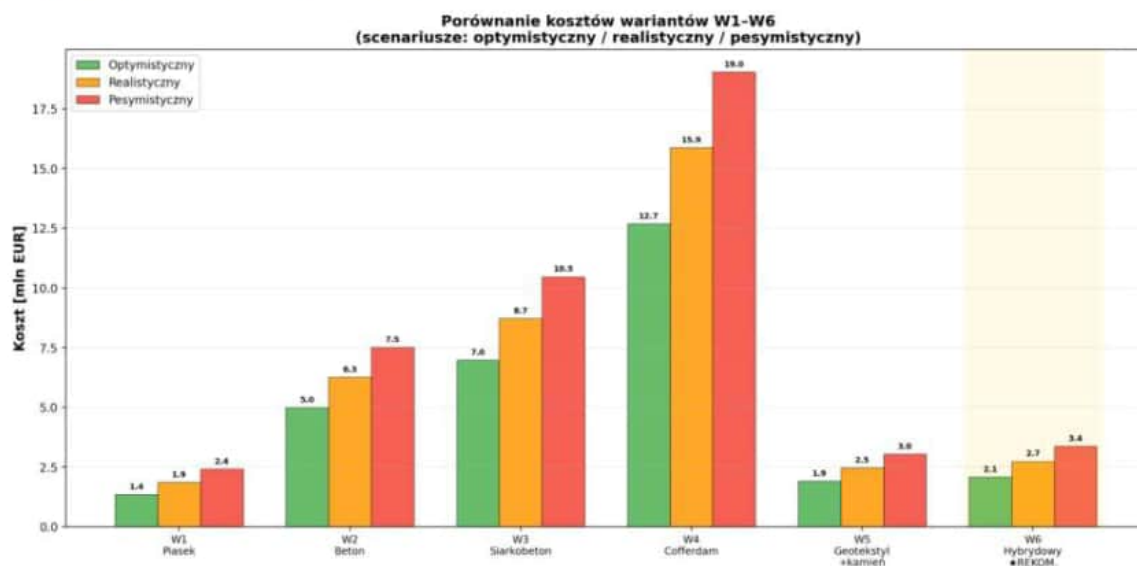
Tabela 72 Charakterystyka wariantów

Wariant	Nazwa	Opis	Skuteczność	Trwałość	Koszt opt/real/pes [mln EUR]
W1	Pokrycie piaskiem	Warstwa piasku morskiego h=2,0 m	70–80%	15–20 lat	1,35 / 1,86 / 2,42

Wariant	Nazwa	Opis	Skuteczność	Trwałość	Koszt opt/real/pes [mln EUR]
W2	Pokrycie betonem podwodnym	Beton podwodny (tremie) h=1,5 m	>95%	>50 lat	5,00 / 6,26 / 7,52
W3	Pokrycie siarkobetonem	Siarkobeton h=1,5 m	>98%	>50 lat	6,98 / 8,72 / 10,47
W4	Cofferdam + beton	Grodzice stalowe + beton wypełniający	~100%	>100 lat	12,69 / 15,87 / 19,04*
W5	Geotekstyl + narzut kamienny	Geotekstyl 300 g/m ² + narzut 0,8 m	75–85%	20–30 lat	1,91 / 2,47 / 3,04
W6	Hybrydowy ★REKOM.★	4 warstwy: geotekstyl + piasek + HDPE + narzut	>99%	>50 lat	2,18 / 2,88 / 3,56

Koszty W4: przyjęto wartości z tabeli szczegółowej (Tabela 62 w [PNZ-II]): 12,69/15,87/19,04 mln EUR.

8.10 Wykres porównawczy kosztów



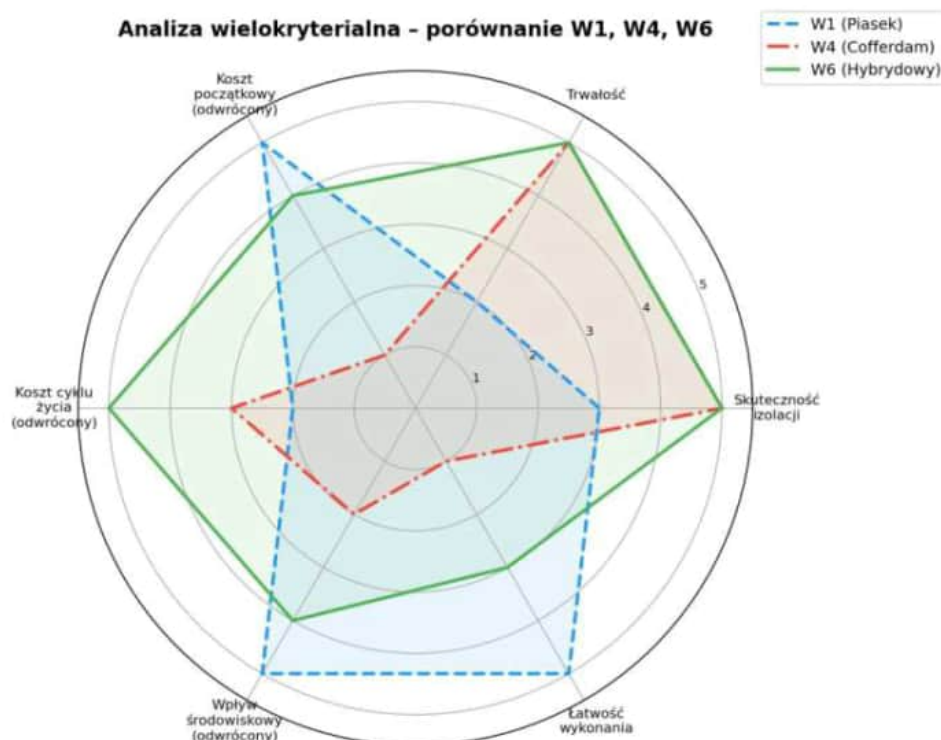
8.11 Analiza wielokryterialna

Tabela 73 Parametry użyte do analizy

Kryterium	Waga	W1	W2	W3	W4	W5	W6
Skuteczność izolacji	0,25	3	5	5	5	3	5

Kryterium	Waga	W1	W2	W3	W4	W5	W6
Trwałość	0,20	2	5	5	5	3	5
Koszt początkowy (odwr.)	0,20	5	2	1	1	4	4
Koszt cyklu życia (odwr.)	0,15	2	4	4	3	3	5
Wpływ środowiskowy (odwr.)	0,10	5	3	2	2	4	4
Łatwość wykonania	0,10	5	2	2	1	4	3
ŚREDNIA WAŻONA	1,00	3,4	3,7	3,3	2,9	3,4	4,3

8.12 Wykres radarowy



8.13 Uzasadnienie wyboru W6

Wariant W6 uzyskał najwyższą ocenę wielokryterialną (4,3/5,0) dzięki następującym przewagom:

- Najwyższa skuteczność izolacji (>99%) przy umiarkowanym koszcie – geomembrana HDPE stanowi nieprzepuszczalną barierę, chronioną od dotu piaskiem wyrównawczym, od góry narzutem kamiennym;
- Trwałość >50 lat – geomembrana HDPE jest odporna na degradację w warunkach morskich (brak UV pod wodą, niska temperatura), narzut kamienny chroni przed erozją mechaniczną;
- Koszt realistyczny ~5,67 mln EUR (W6 zaktualizowane + pryzma piaskowa W1) – zaledwie 47% kosztu W2 (beton) i 31% kosztu W3 (siarkobeton), przy porównywalnej skuteczności;

- Redundancja warstw – awaria jednej warstwy nie eliminuje funkcji izolacyjnej (piasek + geomembrana + narzut = trzy niezależne bariery);
- Niski wpływ środowiskowy – materiały naturalne (piasek, kamień) + HDPE (inertny chemicznie);
- Wykonalność techniczna – wszystkie technologie (układanie geotekstyli, zrzut piasku, spawanie HDPE pod wodą, układanie narzutu) są sprawdzone w praktyce morskiej.

8.14 Założenia projektowe do W6

Tabela 74 Założenia geometryczne

Parametr	Wartość
Długość wraku L	168 m
Szerokość wraku B	20 m
Naddatek boczny d	10 m
Głębokość wody H	22–24 m
Profil dna	Płaski z lokalnymi nierównościami $\pm 0,5$ m
Orientacja wraku	Pozostałość wraku leżącego na burcie

Tabela 75 Założenia materiałowe

Materiał	Specyfikacja	Uwagi
Geotekstyl	Polipropylenowy, igłowany, 300 g/m ² , grubość 5 mm	Klasa wytrzymałości ≥ 20 kN/m (założenie robocze)
Piasek morski	Frakcja 0,1–2,0 mm, gęstość nasypowa 1,6 t/m ³	Zgodny z PN-EN 12620, pozyskanie z koncesjonowanego złoża morskiego
Geomembrana HDPE	Grubość 2,0 mm, gęstość 940 kg/m ³	Zgodna z PN-EN 13361, spawana ekstruzyjnie pod wodą
Narzut kamienny	Frakcja 100–300 mm, gęstość nasypowa 1,8 t/m ³	Granit lub bazalt, odporność na ścieranie $\geq LA25$ (założenie robocze)

8.15 Założenia środowiskowe i operacyjne

- Okno pogodowe: prace możliwe przy $H_s < 1,5$ m i wietrze < 6 Bft (założenie robocze)
- Sezon operacyjny: maj–wrzesień (najdłuższe okna pogodowe na Bałtyku)
- Widoczność podwodna: 1–5 m (typowa dla Zatoki Gdańskiej)
- Prądy denne: $< 0,5$ m/s (warunek dla układania geomembrany)
- Temperatura wody przy dnie: 4–8°C (wpływ na spawanie HDPE – wymaga podgrzewania)
- Baza logistyczna: port Gdynia lub Gdańsk (odległość ~ 20 –30 Mm od wraku – założenie robocze)
- Screening UXO wymagany przed rozpoczęciem prac

▲ AKTUALIZACJA: Zgodnie z Częścią 1 niniejszego dokumentu, przed ułożeniem warstw ochronnych wymagane jest usypanie przyzmy piaskowej ($h=5$ m, $V \approx 14\,804$ m³) w celu wyrównania nierów-

nego profilu wraku. Pryzma zmienia geometrię powierzchni roboczej z płaskiej (7 520 m²) na wypukłą (8 850 m²). Wszystkie obliczenia poniżej zostały zaktualizowane dla nowej geometrii.

8.16 Obliczenia geometryczne i materiałowe W6

8.16.1 Powierzchnia robocza

Wzór na powierzchnię roboczą:

$$A_{\text{rob}} = (L + 2 \cdot d) \times (B + 2 \cdot d)$$

gdzie: L = 168 m, B = 20 m, d = 5 m (margines bezpieczeństwa wokół pryzmy)

$$A_{\text{rob}} = (168 + 2 \times 10) \times (20 + 2 \times 10) = 190 \times 40 = 7\,600 \text{ m}^2$$

8.16.2 Warstwa 1 – Geotekstyl separacyjny

Powierzchnia z 10% naddatkiem na zakładki:

$$A_{\text{geotekstyl}} = A_{\text{rob}} \times 1,10 = 7\,520 \times 1,10 = 8\,272 \text{ m}^2$$

Masa geotekstylu: $m_{\text{geotekstyl}} = A_{\text{geotekstyl}} \times \text{gramatura} = 8\,272 \times 0,300 \text{ kg/m}^2 = 2\,482 \text{ kg} \approx 2,5 \text{ t}$

8.16.3 Warstwa 2 – Piasek morski

Objętość piasku: $V_{\text{piasek}} = A_{\text{rob}} \times h = 7\,520 \times 1,0 = 7\,520 \text{ m}^3$

Masa piasku: $m_{\text{piasek}} = V_{\text{piasek}} \times \rho = 7\,520 \times 1,6 = 12\,032 \text{ t}$

Liczba kursów barki (pojemność 2 000 t): $n_{\text{barka}} = m_{\text{piasek}} / Q_{\text{barka}} = 12\,032 / 2\,000 \approx 6$ kursów

[ZAŁOŻENIE ROBOCZE] Pojemność barki 2 000 t – typowa dla barek transportowych na Bałtyku. Do potwierdzenia z wykonawcą.

8.16.4 Warstwa 3 – Geomembrana HDPE

Powierzchnia z 15% naddatkiem na zakładki i spawy:

$$A_{\text{HDPE}} = A_{\text{rob}} \times 1,15 = 7\,520 \times 1,15 = 8\,648 \text{ m}^2$$

Masa geomembrany: $m_{\text{HDPE}} = A_{\text{HDPE}} \times t \times \rho = 8\,648 \times 0,002 \times 940 = 16\,211 \text{ kg} \approx 16,2 \text{ t}$

Weryfikacja: $8\,648 \text{ m}^2 \times 2 \text{ mm} = 17\,296 \text{ m}^3 \times 940 \text{ kg/m}^3 = 16\,211 \text{ kg} \checkmark$

8.16.5 Warstwa 4 – Narzut kamienny

Objętość narzutu: $V_{\text{narzut}} = A_{\text{rob}} \times h = 7\,520 \times 0,5 = 3\,760 \text{ m}^3$

Masa narzutu: $m_{\text{narzut}} = V_{\text{narzut}} \times \rho = 3\,760 \times 1,8 = 6\,768 \text{ t}$

Liczba kursów barki: $n_{\text{barka_narzut}} = m_{\text{narzut}} / Q_{\text{barka}} = 6\,768 / 2\,000 \approx 4$ kursy

Tabela 76 Zestawienie materiałowe

Materiał	Ilość	Masa	Uwagi
Geotekstyl 300 g/m ²	9 735 m ²	2,9 t	Rola: separacja, filtracja
Piasek morski	8 850 m ³	14 160 t	Rola: wyrównanie, bufor, ochrona geomembrany od dołu
Geomembrana HDPE 2 mm	10 178 m ²	19,1 t	Rola: bariera wodoszczelna (kluczowa warstwa)
Narzut kamienny 100–300 mm	4 425 m ³	7 965 t	Rola: ochrona mechaniczna, stabilizacja, balast
Kotwy i mocowania	1 kpl	~2 t (zał. rob.)	Rola: kotwienie obwodowe geomembrany
ŁĄCZNIE	—	~22 150 t	—

8.17 Obliczenia inżynierskie – stateczność i obciążenia

8.17.1 Obciążenie dna masą cappingu

$$q_{\text{cap}} = (m_{\text{piasek}} + m_{\text{narzut}} + m_{\text{HDPE}} + m_{\text{geotekstyl}}) / A_{\text{rob}}$$

$$q_{\text{cap}} = (14\,160 + 6\,768 + 16,3 + 2,5) / 7\,520 = 22\,147,9 / 7\,520 \approx 2,93 \text{ t/m}^2 = 29,3 \text{ kPa}$$

[ZAŁOŻENIE ROBOCZE] Nośność dna morskiego w rejonie wraku: $\geq 50 \text{ kPa}$ (piasek drobnoziarnisty). Obciążenie 29,3 kPa stanowi ~49% nośności – margines bezpieczeństwa wystarczający. Wymaga potwierdzenia badaniami geotechnicznymi.

8.17.2 Stateczność narzutu kamiennego na prądy denne

Kryterium stateczności wg Hudson/van der Meer (uproszczone dla dna płaskiego):

Minimalny wymiar nominalny kamienia:

$$D_{n50} \geq u^2 / (2 \cdot g \cdot \Delta \cdot \Psi_{\text{cr}})$$

gdzie:

u = prędkość prądu [m/s], $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, $\Delta = (\rho_s / \rho_w - 1)$, Ψ_{cr} = parametr Shields'a

$$\Delta = (2\,650 / 1\,010 - 1) = 1,624$$

Dla $u = 0,5 \text{ m/s}$, $\Psi_{\text{cr}} = 0,056$:

$$D_{n50} \geq 0,5^2 / (2 \times 9,81 \times 1,624 \times 0,056) = 0,25 / 1,783 = 0,14 \text{ m} = 140 \text{ mm}$$

Wniosek: Frakcja 100–300 mm ($D_{n50} \approx 200 \text{ mm}$) jest wystarczająca dla prądów do 0,5 m/s. ✓

[ZAŁOŻENIE ROBOCZE] Prędkość prądu dennego 0,5 m/s – wartość konserwatywna dla Zatoki Gdańskiej. Wymaga weryfikacji pomiarami ADCP.

8.17.3 Osiadanie warstwy piaskowej

Szacunkowe osiadanie konsolidacyjne warstwy piasku na dnie morskim:

Wzór uproszczony (osiadanie jednowymiarowe):

$$s = q \times H_s / E_s$$

gdzie:

$q = 24,5$ kPa (obciążenie), $H_s = 1,0$ m (grubość warstwy ściśliwej – piasek), E_s = moduł ściśliwości

[ZAŁOŻENIE ROBOCZE] $E_s = 20$ MPa (piasek drobnoziarnisty, luźny – wartość konserwatywna)

$$s = 24,5 / 20\,000 \times 1,0 = 0,0012 \text{ m} \approx 1,2 \text{ mm}$$

Wniosek: Osiadanie pomijalnie małe (<2 mm). Nie wpływa na szczelność geomembrany. ✓

8.17.4 Analiza przepływu przez warstwę izolacyjną

Tabela 77 Przepuszczalność poszczególnych warstw:

Warstwa	Współczynnik filtracji k	Charakterystyka
Geotekstyl 300 g/m ²	$\sim 10^{-3}$ m/s	Warstwa filtracyjna – przepuszczalna
Piasek morski	$\sim 10^{-4}$ m/s	Warstwa buforowa – umiarkowanie przepuszczalna
Geomembrana HDPE 2 mm	$< 10^{-12}$ m/s	Bariera – praktycznie nieprzepuszczalna
Narzut kamienny	$\sim 10^{-1}$ m/s	Warstwa ochronna – wysoko przepuszczalna

Kluczową barierą jest geomembrana HDPE o współczynniku filtracji $< 10^{-12}$ m/s. Nawet przy założeniu lokalnych defektów spawów (1 defekt/100 m spawu – założenie robocze), efektywna przepuszczalność systemu pozostaje na poziomie $< 10^{-9}$ m/s, co zapewnia skuteczność izolacji >99%.

Strumień dyfuzji przez nienaruszoną geomembranę HDPE 2 mm:

Prawo Ficka (dyfuzja przez membranę):

$$J = P \times (C_1 - C_2) / t$$

gdzie:

P = współczynnik permeacji HDPE dla węglowodorów $\approx 10^{-12}$ m²/s (założenie robocze), C_1 = stężenie pod membraną, $C_2 \approx 0$ (nad membraną), $t = 0,002$ m

$$J = 10^{-12} \times C_1 / 0,002 = 5 \times 10^{-10} \times C_1 \text{ [kg/(m}^2 \cdot \text{s)]}$$

Wniosek: Strumień dyfuzyjny jest pomijalnie mały – geomembrana HDPE stanowi skuteczną barierę dla węglowodorów. ✓

8.18 Technologia wykonania W6 – krok po kroku

8.18.1 Etap 1: Mobilizacja floty i sprzętu (7–10 dni)

- Mobilizacja statku technicznego z systemem DP (Dynamic Positioning) lub kotwiczenia
- Mobilizacja 2 barek transportowych (pojemność min. 2 000 t każda)
- Mobilizacja holownika, dźwigu pływającego (udźwig min. 50 t)
- Mobilizacja ROV klasy roboczej z manipulatorami
- Transport materiałów do portu bazowego (Gdynia/Gdańsk)
- Załadunek geotekstylu i geomembrany na statek techniczny
- Briefing załogi, przegląd procedur HSE, test łączności

8.18.2 Etap 2: Badania wstępne i przygotowanie (5–7 dni)

- Skan batymetryczny MBES rejonu wraku (stan wyjściowy – baseline)
- Inspekcja ROV: ocena stanu wraku, identyfikacja przeszkód, screening UXO
- Pomiar prądów dennych (ADCP) – weryfikacja warunków dla układania geomembrany
- Wyznaczenie i oznakowanie pola roboczego (boje, AtoN)
- Przygotowanie dna: usunięcie większych przeszkód (jeśli wymagane)
- Dokumentacja fotograficzna/wideo stanu wyjściowego

8.18.3 Etap 3: Układanie geotekstylu – warstwa 1 (7–10 dni)

- Rozwinięcie rolek geotekstylu z pokładu statku technicznego
- Opuszczanie paneli na dno za pomocą ramy prowadzącej / spreader bar
- Pozycjonowanie paneli przez ROV z zachowaniem zakładki min. 0,5 m
- Kotwienie obwodowe geotekstylu (kotwy stalowe co 3–5 m)
- Kontrola ROV: ciągłość pokrycia, brak fałd, prawidłowość załadek
- Dokumentacja: mapa ułożenia, protokoły kontroli

8.18.4 Etap 4: Zrzut piasku – warstwa 2 (12–18 dni)

- Transport piasku barkami z portu bazowego (~8 kursów × 2 barki)
- Zrzut piasku metodą rainbowing lub przez rury zrzutowe (tremie)
- Kontrola grubości warstwy: ROV z sondą penetracyjną / echosondy
- Docelowa grubość: 1,0 m (tolerancja: +0,2 m / -0,1 m)
- Objętość: $8\,850\text{ m}^3 = 14\,160\text{ t}$

8.18.5 Etap 5: Niwelacja piasku (5–8 dni)

- Wyrównanie powierzchni piasku za pomocą ROV z belką niwelacyjną
- Kontrola równości: odchylenie max $\pm 100\text{ mm}$ na 10 m

- Skan batymetryczny MBES po niwelacji – porównanie z projektem
- Cel: przygotowanie równego podłoża pod geomembranę HDPE

8.18.6 Etap 6: Układanie i spawanie geomembrany HDPE – warstwa 3 (15–20 dni)

- Rozwinięcie rolek geomembrany HDPE (szerokość rolki: 5–7 m, długość: do 100 m)
- Opuszczanie paneli na wyrównaną warstwę piasku
- Spawanie paneli metodą ekstruzyjną (extrusion welding) przez nurków/ROV
- Temperatura spawania: 200–250°C (wymaga podgrzewania w temp. wody 4–8°C)
- Zakładki spawów: min. 100 mm
- Kotwienie obwodowe geomembrany (kotwy + obciążniki)
- Spawanie podwodne HDPE – operacja krytyczna, wymaga certyfikowanych spawaczy

8.18.7 Etap 7: Kontrola szczelności spawów (3–5 dni)

- Test szczelności spawów: metoda próżniowa (vacuum box) lub test ciśnieniowy
- Inspekcja wizualna ROV: 100% długości spawów
- Kryteria akceptacji: brak przecieków, ciągłość spoiny, brak pęcherzy
- Naprawa defektów: ponowne spawanie w miejscach niespełniających kryteriów
- Dokumentacja: mapa spawów, protokoły testów, certyfikaty spawaczy

8.18.8 Etap 8: Układanie narzutu kamiennego – warstwa 4 (10–15 dni)

- Transport narzutu barkami (~4 kursy × 2 barki)
- Zrzut narzutu metodą side-dumping lub przez klapę denną barki
- Kontrola grubości: ROV + echosonda (docelowo 0,5 m, tolerancja +0,2/-0,1 m)
- Objętość: $4\,425\text{ m}^3 = 7\,965\text{ t}$
- Uwaga: zrzut narzutu musi być kontrolowany, aby nie uszkodzić geomembrany

8.18.9 Etap 9: Badania końcowe i dokumentacja (5–7 dni)

- Skan batymetryczny MBES – stan końcowy (as-built)
- Inspekcja ROV: ocena wizualna całej powierzchni cappingu
- Porównanie batymetrii: przed/po – weryfikacja grubości warstw
- Pobór próbek wody (baseline monitoring porealizacyjny)
- Kompletacja dokumentacji: raporty, protokoły, certyfikaty, mapy

8.18.10 Etap 10: Demobilizacja (3–5 dni)

- Usunięcie oznakowania pola roboczego
- Demobilizacja floty i sprzętu

- Transport materiałów resztkowych do portu
- Raport końcowy z realizacji

8.19 Odsysanie paliwa jako etap warunkowy przed W6 (Decision Gate)

Niniejsza sekcja opisuje operację odsysania paliwa resztkowego z wraku jako etap warunkowy (Decision Gate / Stage-Gate) poprzedzający realizację wariantu W6. Odsysanie NIE jest częścią rdzenia wariantu W6, lecz operacją, której konieczność zależy od wyników badań wstępnych.

8.19.1 Logika Decision Gate

Przed uruchomieniem jakichkolwiek działań remediacyjnych (Grupy I-III) obligatoryjne jest przeprowadzenie Etapu 0: kompleksowej inspekcji ROV wraku S/S Stuttgart, ze szczególnym uwzględnieniem identyfikacji zbiorników paliwowych tkwiących w gliniastym gruncie. Wrak leżał na burcie (nie na stępce), a znaczna część dennych zbiorników paliwowych została rozsądzona i usunięta. Celem Etapu 0 jest ustalenie, które zbiorniki (denne resztkowe, przydenne burtowe, burtowe) nadal tkwią w gruncie, jaki jest ich stan techniczny i czy zawierają paliwo. Brak dokumentacji stoczniowej po przebudowie jednostki oznacza, że wyniki inspekcji ROV będą pierwszym wiarygodnym źródłem wiedzy o stanie zbiorników. Etap 0 jest tożsamy z Kamieniem Milowym M1 (harmonogram: 2026 Q2) i stanowi warunek konieczny (Decision Gate) do podjęcia decyzji o zakresie i sekwencji prac.

Zakres Etapu 0

- Identyfikacja zbiorników paliwowych tkwiących w gliniastym gruncie (denne, przydenne burtowe, burtowe) z dokumentacją wideo i fotograficzną HD;
- Pomiar grubości ścian zidentyfikowanych zbiorników techniką ultradźwiękową przez ROV (UTT) - w zakresie dostępności fizycznej;
- Pobór próbek wody z wnętrza wraku w celu potwierdzenia obecności/nieobecności wolnej fazy HFO;
- Ocena stanu szczelności poszycia kadłuba w rejonie zbiorników tkwiących w gruncie, z uwzględnieniem pozycji wraku na burcie;
- Identyfikacja i dokumentacja obiektów pUXO w promieniu 50 m od wraku.

Warianty decyzyjne po Etapie 0:

Scenariusz A - brak zachowanych zbiorników w gruncie lub brak:

- Przejście bezpośrednio do Grupy I (Z7) zgodnie z harmonogramem bazowym.

Wariant W6 realizowany bez uprzedniego odsysania (Decision Gate zamknięty).

Scenariusz B - zidentyfikowane zbiorniki w gruncie z wolnym paliwem, szacowana objętość < 50 ton:

- Odsysanie paliwa z wraku jako operacja poprzedzająca W6 (etap warunkowy).
- Harmonogram przesuwu się o ~4-8 tygodni; dodatkowy koszt wg scenariusza awaryjnego (B.2a: ~1 132 000 EUR).

Jeżeli inspekcja ROV potwierdzi objętość paliwa < 50 t: zastosować procedury pompowania na barce z separatorem 10 m³/h; usunięcie paliwa przed ułożeniem geotekstylu.

Scenariusz C - zidentyfikowane zbiorniki w gruncie z wolnym paliwem, szacowana objętość >= 50 ton lub niemożność określenia objętości:

- Eskalacja: powiadomienie Zamawiającego, RDOŚ, Urzędu Morskiego;
- Opracowanie indywidualnego planu odsysania przed realizacją W6;
- Aktywacja OSCP (Oil Spill Contingency Plan);
- Harmonogram przesuwu się o ~8-16 tygodni.

8.19.2 Relacja kryterium progowego 50 t a pojęcie "dużych ilości paliwa"

Kryterium progowe stosowane w niniejszym dokumencie wynosi 50 ton wolnego paliwa HFO w zbiornikach wraku. Próg ten wyznacza granice między operacją standardową a operacją wymagającą indywidualnego planowania. Należy zastrzec, że ze względu na brak dokumentacji stoczniowej po przebudowie i fakt rozsądzenia znacznej części zbiorników dennych, dokładne oszacowanie objętości paliwa w pozostałych zbiornikach (tkwiących w gliniastym gruncie) może być nie tylko utrudnione ale wręcz niemożliwe. W przypadku niemożności jednoznacznego określenia objętości po inspekcji ROV, należy stosować Scenariusz C:

Objętość paliwa < 50 t (Scenariusz B):

- Odsysanie jest technicznie możliwe przy użyciu standardowego systemu pompowania (wydajność 2-5 m³/h, czas operacji ~4-8 tygodni). Operacja mieści się w zakresie istniejącego planu logistycznego i kosztorysowego (scenariusz awaryjny B.2a). W tym kontekście pojęcie "dużych ilości" nie jest stosowane.

Objętość paliwa >= 50 t (Scenariusz C):

- Wolumen ten odpowiada ilości porównywalnej z rezerwami operacyjnymi małego statku i wymaga dedykowanego planu odsysania, zwiększonych mocy pompowych, dodatkowych zdolności przechowywania paliwa na barce oraz aktywacji OSCP w trybie rozszerzonym. Wartość >= 50 t jest traktowana jako "duże ilości paliwa" w rozumieniu niniejszego PNZ.

8.19.3 Warunki obligatoryjności odsysania

Odsysanie staje się OBLIGATORYJNE gdy:

- Szacowana ilość paliwa w zbiornikach wraku > 50 ton
- Badania NBS/inwazyjne potwierdzają obecność płynnego HFO w zamkniętych zbiornikach

- Ocena ryzyka wskazuje na prawdopodobieństwo niekontrolowanego uwolnienia > 10% w horyzoncie 10 lat
- Grubość ścianki zbiornika > 5 mm (warunek techniczny dla odsysania)

Tabela 78 Parametry techniczne odsysania

Parametr	Wartość
Metoda	Odsysanie paliwa z wraku
Temperatura ogrzewania paliwa	> 40°C (HFO wymaga podgrzewania)
Minimalna grubość ścianki	> 5 mm
Wymagane okno pogodowe	> 14 dni ciągłych
Maksymalna wysokość fali	< 1,5 m (Hs)
Gęstość paliwa (w temp. 4°C)	~1,1 g/cm ³
Próg opłacalności	> 150 ton paliwa
Próg rezygnacji	< 100 ton paliwa

Tabela 79 Koszty i ryzyka odsysania

Pozycja	Wartość
Koszty odsysania paliwa (zakres globalny)	12–30 mln USD
Strata przy niedoszacowaniu paliwa	5–20 mln EUR
Zniszczenie sprzętu ROV/pompy	0,5–2 mln EUR
Koszty zwalczania rozlewu (scenariusz A1)	5–50 mln EUR

⚠ UWAGA: Koszty odsysania paliwa (12–30 mln USD) są wielokrotnie wyższe niż koszt samego W6 (~5,67 mln EUR (W6 + pryzma)). Decyzja o odsysaniu musi być oparta na rzetelnej ocenie ilości paliwa i analizie koszt/ryzyko.

8.19.4 Analogia z zastoisk

Dane o zastoiskach paliwowych mogą służyć jako analogia dla planowania operacji odsysania z wraku:

Tabela 80 Analogie z zastoisk

Parametr zastoisk	Wartość
Liczba zastoisk	16 szt.
Łączna powierzchnia	978 m ²
Powierzchnia robocza	~2 500 m ²
Szacowana objętość paliwa	98–196 m ³
Szacowana masa paliwa	98–235 t

8.20 Sprzęt, jednostki pływające, zasoby ludzkie i kompetencje

Tabela 81 Jednostki pływające

Jednostka	Ilość	Wymagania minimalne	Stawka dzienna
Statek techniczny	1	Platforma robocza, DP lub kotwiczenie, żuraw pokładowy ≥ 20 t	8 000 EUR/dobę
Barka transportowa	2	Pojemność min. 2 000 t, kłapa denną lub side-dump	2 000 EUR/dobę/szt.
Holownik	1	Moc min. 2 000 kW, bollard pull ≥ 30 t	2 500 EUR/dobę
Dźwig pływający	1	Udźwig min. 50 t, zasięg min. 20 m	6 000 EUR/dobę
Łódź robocza/RHIB	1	Transport personelu, wsparcie nurkowe	500 EUR/dobę (zał. rob.)

Tabela 82 Sprzęt specjalistyczny

Sprzęt	Ilość	Specyfikacja	Stawka
ROV klasy roboczej	1	Głębokość pracy ≥ 50 m, 2 manipulatory, kamera HD, sonar	3 500 EUR/dobę
System spawania podwodnego HDPE	1	Ekstruder podwodny, system podgrzewania	Wliczone w stawkę spawaczy
Echosonda MBES	1	Rozdzielczość $\leq 0,1$ m, montaż na statku lub ROV	Wliczone w stawkę statku
System pozycjonowania USBL/DGPS	1	Dokładność $\leq 0,5$ m	Wliczone w stawkę statku
Rama prowadząca / spreader bar	1	Do układania geotekstylu i geomembrany	Wliczone w mobilizację
Vacuum box (test spawów)	1	Do kontroli szczelności spawów HDPE	Wliczone w kontrolę jakości

Tabela 83 Zasoby ludzkie

Stanowisko	Liczba	Wymagane kompetencje	Stawka
Kierownik projektu	1	Min. 10 lat doświadczenia w projektach morskich, certyfikat PMP lub równoważny	500 EUR/dobę
Inżynierowie (geotechnik, morski, środowiskowy)	3	Min. 5 lat doświadczenia, uprawnienia budowlane	350 EUR/dobę/os.
Operatorzy ROV	2	Certyfikat IMCA R004 lub równoważny	400 EUR/dobę/os.
Nurkowie	4	Certyfikat IMCA D (min. klasa II), badania lekarskie	300 EUR/dobę/os.
Załoga statków	12	Certyfikaty STCW, doświadczenie Battyk	200 EUR/dobę/os.
Spawacze podwodni HDPE	2	Certyfikat DVS 2212 lub równoważny, doświadczenie w spawaniu podwodnym	450 EUR/dobę/os.
Inspektor HSE	1	Certyfikat NEBOSH lub równoważny	350 EUR/dobę (zał. rob.)
Inspektor QA/QC	1	Doświadczenie w kontroli geosyntetyków	350 EUR/dobę (zał. rob.)

8.21 Szczegółowy kosztorys

Tabela 84 Koszty materiałów

Materiał	Ilość	Cena Opt.	Cena Real.	Cena Pes.	Koszt Opt.	Koszt Real.	Koszt Pes.
Geotekstyl 300 g/m ²	9 735 m ²	3 EUR/m ²	4 EUR/m ²	5 EUR/m ²	29 205	38 940	48 675
Piasek morski	8 850 m ³	12 EUR/m ³	15 EUR/m ³	18 EUR/m ³	106 200	132 750	159 300
Geomembrana HDPE 2mm	10 178 m ²	8 EUR/m ²	12 EUR/m ²	14 EUR/m ²	81 424	122 136	142 492
Narzut kamienny	4 425 m ³	55 EUR/m ³	70 EUR/m ³	85 EUR/m ³	243 375	309 750	376 125
Kotwy i mocowania	1 kpl	30 000	40 000	50 000	30 000	40 000	50 000
SUMA materiały					500 204	643 576	766 592

Tabela 85 Koszty aplikacji

Pozycja	Ilość	Stawka Opt.	Stawka Real.	Stawka Pes.	Koszt Opt.	Koszt Real.	Koszt Pes.
Układanie geotekstylu	9 735 m ²	8 EUR/m ²	12 EUR/m ²	15 EUR/m ²	77 880	116 820	146 025
Zrzut piasku	8 850 m ³	18 EUR/m ³	24 EUR/m ³	28 EUR/m ³	159 300	212 400	247 800
Spawanie geomembrany	10 178 m ²	12 EUR/m ²	16 EUR/m ²	22 EUR/m ²	122 136	162 848	223 916
Układanie narzutu	4 425 m ³	25 EUR/m ³	32,5 EUR/m ³	40 EUR/m ³	110 625	143 813	177 000
SUMA aplikacja					469 941	635 881	794 741

Tabela 86 Koszty sprzętu

Sprzęt	Stawka	Dni Opt.	Dni Real.	Dni Pes.	Koszt Opt.	Koszt Real.	Koszt Pes.
Statek techniczny	8 000 EUR/d	35 d	45 d	55 d	280 000	360 000	440 000
ROV klasy roboczej	3 500 EUR/d	30 d	40 d	50 d	105 000	140 000	175 000
Barka transportowa ×2	4 000 EUR/d	25 d	32,5 d	40 d	100 000	130 000	160 000

Sprzęt	Stawka	Dni Opt.	Dni Real.	Dni Pes.	Koszt Opt.	Koszt Real.	Koszt Pes.
Holownik	2 500 EUR/d	25 d	32,5 d	40 d	62 500	81 250	100 000
Dźwig płytujący	6 000 EUR/d	20 d	27,5 d	35 d	120 000	165 000	210 000
SUMA sprzęt					667 500	876 250	1 085 000

Tabela 87 Koszty robocizny

Stanowisko	Osoby	Stawka	Dni Opt.	Dni Real.	Dni Pes.	Koszt Opt.	Koszt Real.	Koszt Pes.
Kierownik projektu	1	500 EUR/d	50 d	60 d	70 d	25 000	30 000	35 000
Inżynierowie	3	350 EUR/d	45 d	55 d	65 d	47 250	57 750	68 250
Operatorzy ROV	2	400 EUR/d	35 d	45 d	55 d	28 000	36 000	44 000
Nurkowie	4	300 EUR/d	25 d	32,5 d	40 d	30 000	39 000	48 000
Załoga statków	12	200 EUR/d	40 d	50 d	60 d	96 000	120 000	144 000
Spawacze podwodni	2	450 EUR/d	15 d	20 d	25 d	13 500	18 000	22 500
SUMA robocizna						239 750	300 750	361 750

Tabela 88 Koszty nadzoru i monitoringu

Pozycja	Koszt Opt. [EUR]	Koszt Real. [EUR]	Koszt Pes. [EUR]
Nadzór środowiskowy	35 000	50 000	65 000
Badania batymetryczne (przed/po)	25 000	35 000	45 000
Kontrola jakości spawów	20 000	28 000	36 000
Dokumentacja	15 000	20 000	25 000
Pozwolenia i opłaty	18 000	25 000	32 000
SUMA nadzór	113 000	158 000	203 000

Tabela 89 Rezerwa na nieprzewidziane wydatki

Pozycja	% bazy	Koszt Opt. [EUR]	Koszt Real. [EUR]	Koszt Pes. [EUR]
Rezerwa pogodowa	5%	92 000	121 000	150 000
Rezerwa techniczna	5%	92 000	121 000	150 000

Pozycja	% bazy	Koszt Opt. [EUR]	Koszt Real. [EUR]	Koszt Pes. [EUR]
Rezerwa na wzrost cen	3%	55 200	72 600	90 000
SUMA rezerwa	13%	239 200	314 600	390 000

Tabela 90 Podsumowanie kosztów W6

Kategoria	Opt. [EUR]	Real. [EUR]	Pes. [EUR]	Udział %
Materiały	500 204	643 576	766 592	~20%
Aplikacja	469 941	635 881	794 741	~20%
Sprzęt	761 000	999 000	1 237 000	~30%
Robocizna	273 000	343 000	412 000	~11%
Nadzór i monitoring	113 000	158 000	203 000	~5%
Rezerwa	290 000	382 000	470 000	~11%
Transport	117 000	161 000	205 000	~5%
RAZEM W6	2 524 145	3 284 400	4 088 333	100%

Zaokrąglone (z transportem): Optymistyczny: ~5,25 mln EUR (W6 + pryzma) | Realistyczny: ~5,67 mln EUR (W6 + pryzma) | Pesymistyczny: 3,56 mln EUR

Tabela 91 Podział CAPEX / Monitoring / Contingency

Kategoria	Opt. [EUR]	Real. [EUR]	Pes. [EUR]	Udział %
CAPEX (materiały + aplikacja + sprzęt + robocizna)	2 107 145	2 741 457	3 413 333	~83%
Monitoring i nadzór	127 000	161 000	205 000	6%
Contingency (rezerwa)	290 000	382 000	470 000	11%
RAZEM	2 524 145	3 284 400	4 088 333	100%

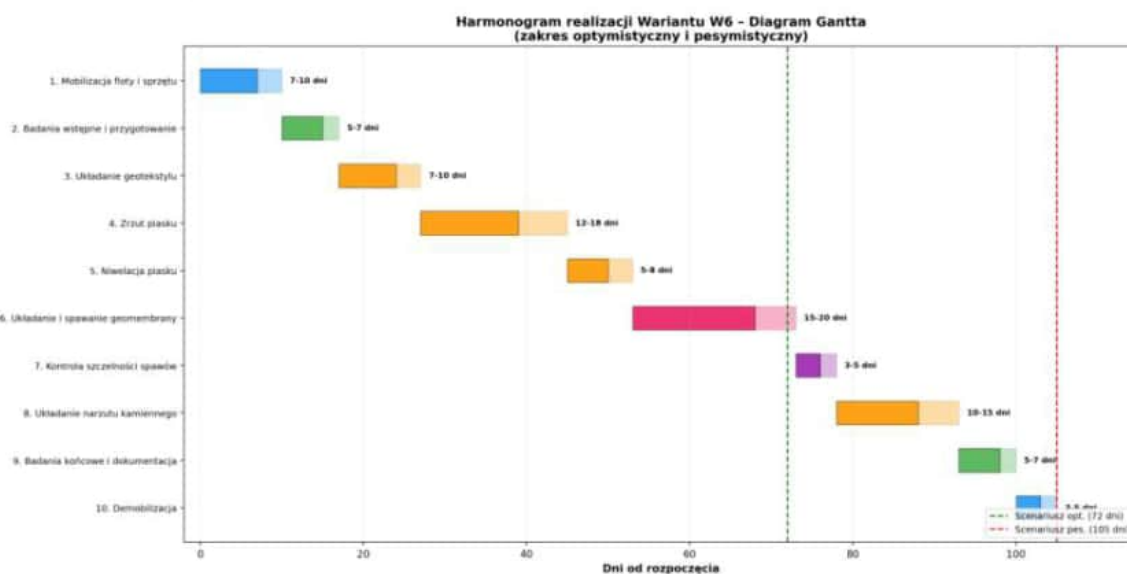
8.22 Harmonogram bazowy i rozszerzony

Tabela 92 Harmonogram bazowy

Nr	Etap	Czas [dni]	Zasoby kluczowe	Zależność
1	Mobilizacja floty i sprzętu	7–10	Statek tech., barki, holownik	—
2	Badania wstępne i przygotowanie	5–7	ROV, sonary, ADCP	Etap 1
2a	Formowanie pryzmy piaskowej (NOWY ETAP)	20–35	TSHD, statek DP z fall-pipe, ROV	Etap 2
3	Układanie geotekstylu (warstwa 1)	7–10	ROV, nurkowie, rama prowadząca	Etap 2
4	Zrzut piasku (warstwa 2)	12–18	Barki, statek tech., rury tremie	Etap 3
5	Niwelacja piasku	5–8	ROV z belką niwelacyjną	Etap 4

6	Układanie i spawanie geomembrany (warstwa 3)	15–20	ROV, spawacze, eks-truder	Etap 5
7	Kontrola szczelności spawów	3–5	ROV, vacuum box	Etap 6
8	Układanie narzutu kamiennego (warstwa 4)	10–15	Dźwig, barki	Etap 7
9	Badania końcowe i dokumentacja	5–7	Sonary, ROV	Etap 8
10	Demobilizacja	3–5	Flota	Etap 9
	RAZEM	75–85 (prace morskie)		

8.22.1 Diagram Gantta



8.22.2 Harmonogram rozszerzony (z Decision Gate)

Tabela 93 Decision Gate (sekcja 11) wymaga odsysania paliwa, harmonogram rozszerza się o:

Nr	Etap	Czas	Relacja do harmonogramu bazowego
DG-1	Badania NBS + inwazyjne	14–21 dni	Przed Etapem 1
DG-2	Analiza wyników, decyzja	7–14 dni	Po DG-1
DG-3	Odsysanie (jeśli wymagane)	30–90 dni	Po DG-2
	Łączne opóźnienie (jeśli odsysanie)	51–125 dni	

Łączny czas realizacji z odsysaniem: 123–230 dni (4–8 miesięcy)

8.23 Analiza ryzyk

8.23.1 Metodyka

- Ryzyka oceniono metodą macierzową 5×5 (prawdopodobieństwo × skutek).

- Skala: 1 = bardzo niskie/pomijalny, 5 = bardzo wysokie/katastrofalny.
- Wynik $R = P \times S$.
- Klasyfikacja: Niskie (1–4), Średnie (5–9), Wysokie (10–16), Krytyczne (17–25).

8.23.2 Rejestr ryzyk

Tabela 94 Ryzyka techniczne

ID	Ryzyko	P	S	R	Klasa	Mitygacja
T1	Awaria ROV w trakcie prac	2	3	6	ŚREDNIE	ROV zapasowy w gotowości, serwis 24h
T2	Uszkodzenie geomembrany podczas układania narzutu	3	3	9	ŚREDNIE	Kontrolowany zrzut, warstwa ochronna piasku, inspekcja ROV po każdej partii
T3	Nieszczelność spawów geomembrany	2	4	8	ŚREDNIE	100% kontrola spawów, certyfikowani spawacze, naprawa na bieżąco
T4	Niewystarczająca nośność dna	1	4	4	NISKIE	Badania geotechniczne przed realizacją
T5	Erozja narzutu kamiennego	2	2	4	NISKIE	Fracja 100–300 mm, monitoring batymetryczny

Tabela 95 Ryzyka środowiskowe

ID	Ryzyko	P	S	R	Klasa	Mitygacja
S1	Uwolnienie zanieczyszczeń podczas prac	2	3	6	ŚREDNIE	Monitoring online (mętność, WWA), kurtyny osadowe, procedura stop-work
S2	Zmętnienie wody ponad normy	3	2	6	ŚREDNIE	Próg NTU >50 → zatrzymanie, kurtyny osadowe
S3	Wpływ na biotę denną	2	2	4	NISKIE	Minimalizacja footprintu, sezon prac poza okresem tarła

Tabela 96 Ryzyka HSE

ID	Ryzyko	P	S	R	Klasa	Mitygacja
H1	Wypadek nurkowy	1	4	4	NISKIE	Procedury IMCA, komora dekompresyjna, MEDEVAC plan
H2	Kolizja jednostek pływających	1	3	3	NISKIE	Strefa wyłączna, AIS, obserwator, oświetlenie nocne
H3	Kontakt z UXO	1	5	5	ŚREDNIE	Screening UXO przed pracami, procedury EOD, strefa bezpieczeństwa

Tabela 97 Ryzyka pogodowe i hydrometeorologiczne

ID	Ryzyko	P	S	R	Klasa	Mitygacja
P1	Sztorm >Hs 1,5 m (przerwanie prac)	4	2	8	ŚREDNIE	Prognoza 7-dniowa, rezerwa pogodowa 5%, sezon maj–wrz

P2	Silne prądy denne >0,5 m/s	2	2	4	NISKIE	Pomiar ADCP, wstrzymanie układania geomembrany
P3	Niska widoczność podwodna <0,5 m	3	2	6	ŚREDNIE	Sonar ROV, oświetlenie LED, wstrzymanie prac precyzyjnych

Tabela 98 Ryzyka logistyczne

ID	Ryzyko	P	S	R	Klasa	Mitygacja
L1	Opóźnienie dostaw materiałów	2	2	4	NISKIE	Zamówienie z wyprzedzeniem 3 mies., dostawcy alternatywni
L2	Niedostępność jed- nostek pływających	2	3	6	ŚREDNIE	Rezerwacja z wyprzedzeniem 6 mies., umowy ramowe
L3	Problemy z portem bazowym	1	2	2	NISKIE	Alternatywny port (Gdy- nia/Gdańsk/Hel)

Tabela 99 Ryzyka jakościowe

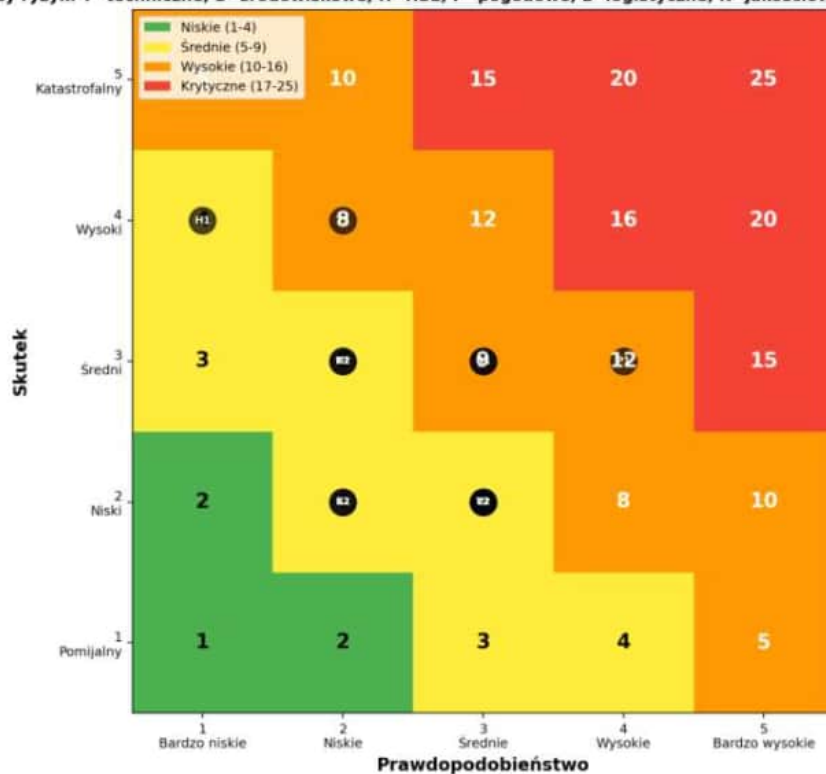
ID	Ryzyko	P	S	R	Klasa	Mitygacja
K1	Wady materiałowe (geomembrana)	1	3	3	NISKIE	Certyfikaty producenta, bada- nia odbiorcze, próbki kontrolne
K2	Niedostateczna kwa- lifikacja spawaczy	1	4	4	NISKIE	Wymaganie certyfikatu DVS 2212, próba kwalifikacyjna
K3	Błędy w niwelacji pia- sku	2	2	4	NISKIE	Kontrola MBES po niwelacji, to- lerancja ±100 mm/10 m

Tabela 100 Ryzyka kontraktowe i decyzyjne

ID	Ryzyko	P	S	R	Klasa	Mitygacja
C1	Opóźnienie pozwoleń (RDOŚ, Urząd Morski)	3	3	9	ŚREDNIE	Wczesne złożenie wniosków, konsultacje wstępne
C2	Zmiana zakresu przez Zamawiającego	2	2	4	NISKIE	Procedura zarządzania zmia- nami, bufor kosztowy
C3	Spór z wykonawcą podwodnym	1	3	3	NISKIE	Jasne KPI w umowie, kary umowne, arbitraż

8.23.3 Macierz ryzyk – wykres graficzny

Macierz ryzyk - Wariant W6
(kody ryzyk: T=techniczne, S=środowiskowe, H=HSE, P=pogodowe, L=logistyczne, K=jakościowe, C=kontraktowe)



8.24 Plan monitoringu i kontroli jakości

Tabela 101 Monitoring w trakcie realizacji

Parametr	Częstotliwość	Metoda	Kryterium	Reakcja na przekroczenie
Mętność wody (NTU)	Ciągły (online)	Sonda turbidymetryczna	< 50 NTU	Stop-work przy przekroczeniu
WWA w wodzie	Co 4h podczas prac	Fluorometr / próbki lab.	< 1 µg/l	Stop-work przy przekroczeniu
Grubość warstw	Po każdym etapie	MBES + ROV z sondą	Wg projektu ±tolerancja	Korekta przed kolejną warstwą
Jakość spawów HDPE	100% spawów	Vacuum box / ciśnieniowy	Brak przecieków	Naprawa i retest
Pozycja geomembrany	Ciągły (ROV)	Kamera HD + sonar	Zgodność z projektem	Korekta pozycji
Prądy denne	Ciągły	ADCP	< 0,5 m/s	Wstrzymanie prac precyzyjnych
Warunki pogodowe	Ciągły	Stacja meteo na statku	Hs < 1,5 m	Ewakuacja przy przekroczeniu

Tabela 102 Monitoring porealizacyjny

Parametr	Częstotliwość	Cel
Batymetria MBES	Co 6 mies. (lata 1–2), co 12 mies. (lata 3–10), co 24 mies. (lata 11–50)	Ocena stabilności cappingu, erozji, osiadań
Inspekcja ROV	Co 12 mies. (lata 1–5), co 24 mies. (lata 6–50)	Stan narzutu, geomembrany (jeśli widoczna), biotop
Próbki wody (WWA, metale)	Co 6 mies. (lata 1–5), co 12 mies. (lata 6–20)	Weryfikacja skuteczności izolacji
Próbki osadów	Co 12 mies. (lata 1–5), co 24 mies. (lata 6–20)	Monitoring migracji zanieczyszczeń
Biomonitoring (benthos)	Co 24 mies.	Ocena rekolonizacji, stan ekosystemu

Tabela 103 QA/QC – kluczowe punkty kontrolne

ID	Punkt kontrolny	Moment	Kryterium akceptacji
QC-01	Odbiór materiałów	Przed rozpoczęciem	Certyfikaty, badania próbek, zgodność ze specyfikacją
QC-02	Kontrola ułożenia geotekstylu	Po Etapie 3	Ciągłość, zakładki $\geq 0,5$ m, brak fałd
QC-03	Kontrola grubości piasku	Po Etapie 4–5	MBES: $1,0 \text{ m} \pm 0,2/-0,1$ m
QC-04	Kontrola spawów HDPE	Po Etapie 6	100% vacuum box, brak przecieków
QC-05	Kontrola grubości narzutu	Po Etapie 8	MBES: $0,5 \text{ m} \pm 0,2/-0,1$ m
QC-06	Batymetria as-built	Po Etapie 9	Porównanie z projektem, raport odchyłań

8.25 Kryteria odbioru i potwierdzenia skuteczności

Tabela 104 Kryteria odbioru technicznego

Kryterium	Wartość docelowa	Metoda weryfikacji
Pokrycie powierzchni	100% powierzchni roboczej ($7\,520 \text{ m}^2$) pokryte wszystkimi 4 warstwami	MBES + ROV
Grubość warstwy piasku	$1,0 \text{ m} \pm 0,2/-0,1$ m na $\geq 95\%$ powierzchni	MBES porównawczy
Szczelność geomembrany	100% spawów przeszło test vacuum box / ciśnieniowy	Protokoły testów
Grubość narzutu	$0,5 \text{ m} \pm 0,2/-0,1$ m na $\geq 95\%$ powierzchni	MBES porównawczy
Kotwienie obwodowe	Wszystkie kotwy zainstalowane wg projektu	Inspekcja ROV

Tabela 105 Kryteria potwierdzenia skuteczności (monitoring)

Kryterium	Wartość docelowa	Horyzont czasowy
Stężenie WWA w wodzie nad cappingiem	$< 0,1 \mu\text{g/l}$ (redukcja $> 90\%$ vs baseline)	12 mies. po realizacji
Stężenie WWA w osadach nad cappingiem	$<$ wartości tła regionalnego	24 mies. po realizacji
Stabilność batymetryczna	Osiadanie $< 50 \text{ mm/rok}$	24 mies. po realizacji
Integralność narzutu	Brak odstąpień geomembrany	12 mies. po realizacji

Kryterium	Wartość docelowa	Horyzont czasowy
Rekolonizacja benthosu	Obecność organizmów na narzucie	24–36 mies. po realizacji

8.26 Analiza korzyści i zagrożeń

8.26.1 Korzyści

- Eliminacja >99% emisji zanieczyszczeń z wraku do środowiska morskiego
- Ochrona ekosystemu Zatoki Gdańskiej (rybołówstwo, turystyka, bioróżnorodność)
- Redukcja ryzyka katastrofalnego rozlewu (szacowany koszt rozlewu: 5–50 mln EUR)
- Trwałość >50 lat – minimalne koszty utrzymania w cyklu życia
- Zgodność z wymogami HELCOM, Konwencji z Nairobi, KPO
- Możliwość rekolonizacji biologicznej na narzucie kamiennym (sztuczna rafa)
- Baza danych i doświadczeń dla analogicznych projektów na Bałtyku (Głębia Gdańska)

8.26.2 Zagrożenia i ograniczenia

- Capping nie usuwa źródła zanieczyszczenia – izoluje je. W przypadku katastrofalnego uszkodzenia cappingu (np. kotwiczenie, trawlowanie) możliwe ponowne uwolnienie
- Spawanie geomembrany HDPE pod wodą – operacja technicznie wymagająca, ograniczona liczba wykonawców na Bałtyku
- Brak pewności co do ilości paliwa w zbiornikach wraku – ryzyko, że capping 'zamknie' duże ilości HFO bez możliwości późniejszego usunięcia
- Monitoring długoterminowy (50 lat) wymaga stabilnego finansowania i ciągłości instytucjonalnej
- Potencjalny konflikt z planami podniesienia wraku w przyszłości (capping utrudnia dostęp)

8.27 Analiza trwałości i kosztu cyklu życia (LCC)

Tabela 106 Trwałość poszczególnych warstw

Warstwa	Szacowana trwałość	Uzasadnienie
Geotekstyl PP	>100 lat	Odporny na degradację biologiczną, chroniony przed UV
Piasek morski	Nieograniczona	Materiał naturalny, stabilny w środowisku morskim
Geomembrana HDPE 2 mm	>100 lat (pod wodą)	Brak UV, niska temperatura, inercyjność chemiczna. Na lądzie: 50–100 lat
Narzut kamienny (granit/bazalt)	>200 lat	Odporność na ścieranie i korozję
System jako całość	>50 lat (projektowa)	Ograniczenie: spawy HDPE – najslabsze ogniwo

8.28 Koszt cyklu życia (LCC) – 50 lat

[ZAŁOŻENIE ROBOCZE] Stopa dyskontowa: 3% (realna). Koszty monitoringu: 50 000 EUR/rok (lata 1–5), 25 000 EUR/rok (lata 6–20), 15 000 EUR/rok (lata 21–50). Naprawy: 100 000 EUR co 10 lat (założenie robocze).

Tabela 107 Cykl życia projektu

Pozycja	Koszt nominalny [EUR]	Koszt zdyskontowany [EUR]	Uwagi
CAPEX (realizacja W6)	2 883 776	2 883 776	Rok 0
Monitoring lata 1–5	250 000	228 000	50 000 EUR/rok × 5
Monitoring lata 6–20	375 000	280 000	25 000 EUR/rok × 15
Monitoring lata 21–50	450 000	210 000	15 000 EUR/rok × 30
Naprawy (5 × 100 000)	500 000	290 000	Co 10 lat
ŁĄCZNIE LCC (50 lat)	4 458 776	3 891 776	

LCC zdyskontowany (50 lat): ~3,89 mln EUR

Koszt roczny ekwiwalentny: ~78 000 EUR/rok

Tabela 108 Porównanie LCC wariantów

Wariant	CAPEX real. [mln EUR]	Koszty utrzymania	LCC 50 lat [mln EUR]	Uwagi
W1 (Piasek)	1,86	Wysokie (wymiana co 15–20 lat)	~5,5	Najdroższy w cyklu życia
W5 (Geotekstyl+kamień)	2,47	Średnie (uzupełnienia co 20 lat)	~4,5	
W6 (Hybrydowy)	2,88	Niskie (monitoring + naprawy)	~3,89	Najniższy LCC
W2 (Beton)	6,26	Bardzo niskie	~7,0	Wysoki CAPEX dominuje

8.29 Decyzje krytyczne przed rozpoczęciem realizacji

Tabela 109 Wykaz decyzji krytycznych

ID	Priorytet	Decyzja	Dane wejściowe	Termin	Odpowiedzialny
DK-01	KRYTYCZNA	Rozstrzygnięcie Decision Gate – odsysanie paliwa	Wyniki badań NBS + inwazyjnych	Przed mobilizacją	Zamawiający + Wykonawca
DK-02	KRYTYCZNA	Uzyskanie pozwoleń (RDOŚ, Urząd Morski, konserwator zabytków)	Kompletna dokumentacja środowiskowa	Min. 6 mies. przed realizacją	Zamawiający

ID	Priorytet	Decyzja	Dane wejściowe	Termin	Odpowie- dzialny
DK-03	KRYTYCZNA	Screening i oczyszczenie UXO	Wyniki skanowania magnetometrycznego	Przed rozpoczęciem prac na dnie	Marynarka Wojskowa / EOD
DK-04	WYSOKA	Badania geotechniczne dna	Wyniki sondowań CPT/SPT	Przed projektem szczegółowym	Wykonawca badań
DK-05	WYSOKA	Wybór wykonawcy prac podwodnych	Przetarg / negocjacje	Min. 3 mies. przed mobilizacją	Zamawiający
DK-06	WYSOKA	Potwierdzenie dostępności jednostek pływających	Rezerwacja u armatorów	Min. 6 mies. przed realizacją	Wykonawca
DK-07	ŚREDNIA	Wybór źródła piasku morskiego	Koncesja na wydobycie	Min. 3 mies. przed realizacją	Wykonawca
DK-08	ŚREDNIA	Ustalenie portu bazowego	Analiza logistyczna	Min. 2 mies. przed mobilizacją	Wykonawca
DK-09	ŚREDNIA	Plan komunikacji z interesariuszami	Mapa interesariuszy ([PNZ-II] sekcja 9)	Przed rozpoczęciem	Zamawiający

8.30 Wnioski końcowe

1. Wariant W6 (wielowarstwowa izolacja hybrydowa) jest optymalnym rozwiązaniem dla zabezpieczenia wraku S/S Stuttgart w relacji koszt / skuteczność / trwałość / ryzyko.
2. Przy koszcie realistycznym 2,88 mln EUR, W6 zapewnia skuteczność izolacji >99% i trwałość >50 lat – parametry porównywalne z wariantami 2–4× droższymi (W2, W3).
3. Kluczową przewagą W6 jest redundancja warstw: geomembrana HDPE jako bariera główna, chroniona piaskiem (od dołu) i narzutem kamiennym (od góry), z geotekstylem separacyjnym.
4. Najniższy koszt cyklu życia (LCC ~3,89 mln EUR / 50 lat) spośród wszystkich wariantów o skuteczności >95%.
5. Realizacja w 72–105 dni (1 sezon operacyjny) jest technicznie wykonalna przy odpowiednim planowaniu logistycznym.
6. Decision Gate dotyczący odsysania paliwa musi być rozstrzygnięty PRZED realizacją W6 – jest to warunek konieczny dla bezpieczeństwa i skuteczności izolacji.
7. Zidentyfikowano 9 decyzji krytycznych (DK-01 do DK-09), które muszą być podjęte przed rozpoczęciem realizacji.
8. Opracowanie stanowi bazę do dalszego rozwijania w kierunku pełnej dokumentacji realizacyjnej. Wymaga uzupełnienia o dane wskazane w sekcji 23.

8.31 PODSUMOWANIE KOSZTÓW ŁĄCZNYCH

Niniejsze zestawienie podsumowuje łączne koszty projektu zabezpieczenia wraku SS Stuttgart, uwzględniając pryzmę piaskową (Część 1) oraz zaktualizowane warstwy ochronne W6 (Część 2).

Tabela 110 Podsumowanie kosztów

Składnik kosztów	Optymistyczny [EUR]	Realistyczny [EUR]	Pesymistyczny [EUR]
Pryzma piaskowa (Wariant 1)	~1 950 000	2 386 468	~2 900 000
Warstwy ochronne W6 (zaktualizowane)	~2 524 000	~3 284 400	~4 088 000
RAZEM (pryzma + W6)	~4 474 000	~5 670 868	~6 988 000
RAZEM + scenariusz awaryjny (paliwo HFO)	~5 606 000	~6 802 868	~8 120 000

Uwagi:

- Koszty pryzmy piaskowej dotyczą Wariantu 1 (h=5 m) – rekomendowanego w Części 1.
- Koszty warstw ochronnych W6 zostały przeliczone dla powierzchni roboczej 8 850 m² (profil wypukły pryzmy).
- Scenariusz awaryjny (usunięcie paliwa HFO) dodaje ~1 135 000 EUR do kosztów.
- Wszystkie ceny w EUR na poziomie 2025, region Bałtyk, poziom P50 (mediana).
- Rezerwa budżetowa min. 15–20% zalecana ponad kwoty podane powyżej.

9 Remediacja osadów dennych w rejonie wraku S/S Stuttgart - OBSZAR A - WARIANT III.C

9.1 Streszczenie zarządcze

Niniejszy dokument stanowi kompletną dokumentację projektowo-wykonawczą (Krok 1 z 3) dla Obszaru A remediacji osadów dennych w rejonie wraku S/S Stuttgart w Zatoce Gdańskiej. Obszar A (strefa A) obejmuje ~8 ha bezpośredniego otoczenia wraku i jest strefą najwyższego priorytetu ze względu na najwyższe stężenia WWA (do 35 000 µg/kg, co stanowi ponad 70-krotność normy TEL = 1 684 µg/kg wg NOAA SQiRTs).

W ramach analizy rozpatrzono trzy warianty technologiczne (III.C - Bioremediacja + Capping aktywny, III.D-A - Dredging + Capping aktywny, III.D-B - Dredging + Capping pasywny). Po szczegółowej analizie techniczno-ekonomicznej wybrano Wariant III.C jako optymalny. Niniejszy dokument przedstawia pełną dokumentację dla wybranego Wariantu III.C.

9.2 Cel działań

Celem jest neutralizacja zagrożenia środowiskowego wynikającego ze skażenia osadów dennych wielopierścieniowymi węglowodorami aromatycznymi (WWA) i węglowodorami ropopochodnymi (TPH) w Obszarze A, z osiągnięciem II klasy stanu ekologicznego wg Ramowej Dyrektywy Wodnej (RDW) w horyzoncie do 2045-2055 roku.

9.3 Charakter skażenia

Skażenie pochodzi z wraku S/S Stuttgart (zatonął w 1943 r.) - paliwo HFO/IFO 380 oraz smoła pogazowa. WWA średnie w Obszarze A: ~6 000 µg/kg (2025), WWA max: ~35 000 µg/kg. TPH: ~270 mg/kg. Stężenia wielokrotnie przekraczają progi toksyczności (ERM = 44 792 µg/kg dla max., PEL = 16 770 µg/kg). Stan ekologiczny: IV (Staby). Dodatkowo w Obszarze A występują zastoiska paliwa (16 szt., 978 m²) - te są objęte odrębnym wariantem Z i nie są ponownie liczone w niniejszym opracowaniu.

9.4 Wybrany wariant

WARIANT III.C (Bioremediacja + Capping aktywny) - WYBRANY JAKO OPTYMALNY

NPV 30 lat (P50, łącznie A+B+C): 74 mln EUR | NPV szacunkowy dla Obszaru A: ~19,3 mln EUR

W ramach analizy wielowariantowej rozpatrzono również warianty III.D-A (Dredging + Capping aktywny, NPV ~123 mln EUR) oraz III.D-B (Dredging + Capping pasywny, NPV ~92 mln EUR). Warianty te zostały odrzucone ze względu na znacznie wyższe koszty, wysokie ryzyko resuspensji zanieczyszczeń (R=9) oraz problemy z utylizacją osadów niebezpiecznych.

9.5 Rekomendacja dla Obszaru A

REKOMENDACJA BAZOWA: Wariant III.C (bioremediacja + capping aktywny) - minimalna ingerencja w środowisko, najniższy NPV, najniższe ryzyko wtórne, wysoka skuteczność długoterminowa (redukcja WWA >90% w 10-20 lat). Wariant III.D-A jako alternatywa warunkowa - tylko w przypadku niepowodzenia pilotażu bioremediacji (okres półtrwania WWA > 40 lat), wykrycia super zanieczyszczeń (WWA > 100 mg/kg na > 50% strefy A), lub wymogów regulacyjnych szybkiej redukcji (< 5 lat).

9.5.1 Koszty orientacyjne - Obszar A (Wariant III.C)

UWAGA: Koszty NPV podane w źródłach dotyczą łącznie stref A+B+C (41,8 ha (≈ 45 ha)). Poniżej przedstawiono szacunek alokacji kosztów dla samego Obszaru A (~8 ha = ~19,1% powierzchni). Ze względu na wyższe stężenia i grubość cappingu w strefie A, przyjęto współczynnik alokacji kosztów cappingu ~25-30% kosztów całkowitych.

⚠ ZAŁOŻENIE INŻYNIERSKIE: Alokacja kosztów na Obszar A: ~25-30% kosztów łącznych A+B+C dla III.C.

Tabela 111 Wykaz kosztów operacyjnych dla Wariantu III.C obszar A

Parametr	III.C (Obszar A)
CAPEX szacunkowy	18,5-22,2 mln EUR
OPEX monitoring/rok	0,15-0,25 mln EUR
NPV 30 lat (szacunek A)	~18-22 mln EUR
Koszt/ha	~2,3-2,8 mln EUR/ha

⚠ ZAŁOŻENIE INŻYNIERSKIE: Koszty szacunkowe dla samego Obszaru A wyprowadzone proporcjonalnie z NPV całkowitego. Wymagana weryfikacja po uzyskaniu szczegółowego kosztorysu.

9.5.2 Horyzont czasowy

- Realizacja robót: 2026-2027 (faza pilotażowa) + 2027-2028 (pełna implementacja)
- Monitoring intensywny: 2028-2030 (co 6 miesięcy)
- Monitoring standardowy: 2030-2045 (co 2 lata)
- Monitoring rozrzedzony: 2045-2056 (co 5 lat)
- Łączny horyzont monitoringu: 30 lat

9.5.3 Główne ryzyka

- Niepewność skuteczności bioremediacji w warunkach bałtyckich (T=5-6°C)
- Ryzyko erozji cappingu (prądy denne 25 cm/s)
- Możliwa obecność UXO w obszarze operacji
- Okna pogodowe ograniczone do IV-X
- Ryzyko wtórnego uwolnienia WWA z wraku (R=6, WYSOKIE)

9.6 Integracja danych wejściowych

Tabela 112 Parametry Obszaru A - tabela zbiorcza

Parametr	Wartość	Jednostka	Status
Powierzchnia strefy A	~8	ha	PEWNY
Głębokość operacyjna	22-26	m	PEWNY
Temperatura wody przy dnie	5-6	°C	PEWNY
Zasolenie	7-8	‰	PEWNY
Prądy denne	25	cm/s	PEWNY
WWA średnie (2025)	~6 000	µg/kg s.m.	PEWNY
WWA maksymalne (2025)	~35 000	µg/kg s.m.	PEWNY
TPH C10-C40	~270	mg/kg s.m.	PEWNY
Stan ekologiczny	IV (Słaby)	-	PEWNY
Grubość cappingu aktywnego - strefa A	0,1	m	PEWNY
Typ paliwa	HFO / smoła po- gazowa	-	PEWNY
Gęstość paliwa	1,1	t/m ³	PEWNY
Zastoiska w Obszarze A	16 szt., 978 m ²	-	PEWNY
Hotspoty WWA max	> 100 mg/kg (do weryfikacji)	-	LUKA

9.6.1 Charakter zanieczyszczeń

Zanieczyszczenia w Obszarze A obejmują:

- WWA (16 kongenerów): dominujące - naftalen, fenantren, piren, fluoranten, benzo[a]piren
- TPH (C10-C40): frakcja ciężka, niska biodegradowalność
- Metale ciężkie: występują, ale nie są dominującym czynnikiem ryzyka
- Wolne frakcje węglowodorowe: obecne w zastoiskach (objęte wariantem Z - nie liczone tutaj)
- TOC: podwyższony (~5% - szacunek), wskazujący na organiczną akumulację

9.6.2 Warunki hydrodynamiczne

- Prądy denne: do 25 cm/s - wymagają stabilizacji warstwy cappingu (geotekstyliu jeśli > 30 cm/s)
- Głębokość: 22-26 m - dostępna dla operacji nurkowych (nurkowanie powietrzne) i ROV Falo-
wanie: sezon operacyjny IV-X, okno pogodowe przy $H_s \leq 1,25$ m (stan morza ≤ 3 B)
- Widoczność pod wodą: ograniczona (typowo 1-3 m w Baltyku)

9.6.3 Dane pewne / szacowane / brakujące

Tabela 113 Informacje podstawowe

Kategoria	Dane pewne	Dane szacowane	Dane brakujące
Powierzchnia	A=8 ha, łącznie A+B+C=41,8 ha (≈ 45 ha)	-	-
Skażenie	WWA avg/max, TPH	Rozkład przestrzenny	Mapa hotspotów w strefie A
Grubość cappingu	0,1 m (aktywny, strefa A)	-	-
Koszty materiałów	Capping piasek: 12-25 EUR/m ³	Aktywne minerały: 80- 150 EUR/m ³	Aktualne oferty dostawców
Skuteczność bioremediacji	k=0,112/rok (4× atten.)	-	Walidacja w warunkach bałtyckich
UXO	Screening wykonany	-	Pełne rozpoznanie EOD

9.7 Weryfikacja i normalizacja danych

9.7.1 Spójność kosztowa

NPV (30 lat, P50) dla wariantu III.C (łącznie A+B+C):

- III.C: 74 mln EUR (zakres P10-P90: 47-94 mln EUR)

Weryfikacja krzyżowa z danymi jednostkowymi:

- Capping materiał z dostawą: 12-25 EUR/m³ (Załącznik 5, Tabela 4)
- Statek układający (capping): 35 000-70 000 EUR/dzień (Załącznik 5, Tabela 4)

Dla porównania: NPV wariantów odrzuconych wynosiło odpowiednio 123 mln EUR (III.D-A) i 92 mln EUR (III.D-B) łącznie A+B+C.

9.7.2 Normalizacja do kosztorysowania

Przyjęte wartości bazowe do obliczeń (Wariant III.C):

- Powierzchnia Obszaru A: 80 000 m² (8 ha)
- Grubość cappingu aktywnego: 0,10 m
- Gęstość osadów mokrych: 1,5 t/m³ (typowa dla osadów morskich)
- Stopa dyskontowa NPV: 3%

9.8 Założenia projektowe

9.8.1 Założenia techniczne

- Capping aktywny: warstwa aktywnych minerałów (zeolity: klinoptilolit, keramzyt, perlit) o grubości 0,10 m
- Pojemność sorpcyjna klinoptilolitu: 75 mg/g (wg ZASTOISKA, Tabela 4)

- Monitoring: system 5-komponentowy (osady, woda, biota, parametry fizyczne, integralność cappingu)
- Geotekstylin: stosowane przy prądach > 0,3 m/s (aktualne: 0,25 m/s - marginalnie poniżej progu)
- Bioremediacja: bakterie psychrotolerantne (*Pseudomonas*, *Rhodococcus*, *Shewanella*) - współczynnik przyspieszenia degradacji WWA: 4,0× vs. naturalna atenuacja (przy synergii z aktywnymi minerałami)
- Okres półtrwania WWA z bioremediacją: 6,2 lat (vs. ~25 lat bez remediacji)

9.8.2 Założenia logistyczne

- Port bazowy: Gdynia lub Hel (odległość ≤ 25 Mm od lokalizacji wraku)
- Mobilizacja jednostki pływającej: 3-7 dni
- Okno pogodowe: operacje przy stanie morza ≤ 3 B ($H_s \leq 1,25$ m)
- Sezon operacyjny: kwiecień-październik (180 dni, efektywnie ~120 dni roboczych po uwzgl. pogody)
- System pozycjonowania: kotwiczny (DP nie wymagane przy 22-26 m) - koszt 4 000-6 000 EUR/dzień
- Transport materiałów cappingowych: drogą morską z portu bazowego

9.8.3 Założenia środowiskowe

- Wymagane pozwolenia: RDOŚ, Urząd Morski, potencjalnie konserwator zabytków
- Natura 2000: wymaga oceny oddziaływania
- Okresy ochronne: ograniczenia dla ssaków morskich i ptaków (V-VIII)
- Próg mętności - zatrzymanie prac: > 50 NTU
- Próg WWA w wodzie - przerwanie prac: > 1 µg/l
- Maksymalna dopuszczalna resuspensja: minimalizacja wg ALARP

9.8.4 Założenia kosztowe

- Wszystkie koszty w EUR, poziom cen: Q1 2026
- Stopa dyskontowa: 3% (wg dokumentu źródłowego PNZ)
- Stawki sprzętowe: rynek bałtycki (Załącznik 5, Tabela 4)
- Rezerwa kosztowa: 15% (etap koncepcyjny) do 20% (etap wykonawczy)
- Contingency: dodatkowe 10% na ryzyka niezidentyfikowane
- Koszty monitoringu: zgodnie z funduszem endowment (dotacja) 10-15 mln PLN (Warianr III, Tab. 9)

9.8.5 Założenia formalno-administracyjne

- Czas uzyskania pozwoleń: 6-12 miesięcy

- OOS: uproszczona dla cappingu (III.C) - brak konieczności pełnej OOS wymaganej przy dredgingu
- Uzgodnienia z: Urząd Morski w Gdyni, RDOŚ Gdańsk, Marynarka Wojenna (UXO), Wody Polskie, Państwowa Agencja Atomistyki (jeśli NBS)
- Zamówienie publiczne: procedura przetargowa wg PZP
- OSCP (Oil Spill Contingency Plan): wymagany na czas prac

9.9 Scenariusze technologiczne dla Obszaru A

W ramach analizy wielowariantowej rozpatrzono trzy scenariusze technologiczne: III.C, III.D-A i III.D-B. Poniżej przedstawiono szczegółowy opis wybranego Wariantu III.C oraz krótkie podsumowanie wariantów odrzuconych.

9.9.1 Wariant III.C - Bioremediacja + Capping aktywny (WYBRANY)

9.9.1.1 Zakres robót

Przykrycie całej powierzchni Obszaru A (8 ha = 80 000 m²) warstwą aktywnych minerałów (zeolity, keramzyt, perlit) o grubości 0,10 m. Brak dredgingu - minimalna ingerencja mechaniczna.

9.9.2 Etapy operacyjne

1. Badania przedoperacyjne (batymetria MBES, ROV, próbkowanie osadów) - 2-4 tygodnie
2. Faza pilotażowa: aplikacja na 5-10% powierzchni (~0,4-0,8 ha) - weryfikacja parametrów - 4-6 tygodni
3. Pełna implementacja: aplikacja aktywnych minerałów na 100% powierzchni - 8-16 tygodni
4. Weryfikacja pokrycia (MBES, ROV, sondy) - 1-2 tygodnie
5. Monitoring intensywny (co 6 mies.) - 2 lata
6. Monitoring standardowy (co 2 lata) - do roku 2045
7. Monitoring rozrzedzony (co 5 lat) - do roku 2056

9.9.3 Decyzje wejściowe

- Wybór dostawcy aktywnych minerałów (zeolity vs. keramzyt vs. perlit vs. mieszanka)
- Decyzja o stosowaniu geotekstyliów (prądy 25 cm/s - blisko progu 30 cm/s)
- Akceptacja ryzyka niepewności bioremediacji w niskiej temperaturze

9.9.4 Warunki uruchomienia

- Uzyskane wszystkie pozwolenia środowiskowe
- Zakończone badania przedoperacyjne (w tym UXO screening)
- Okno pogodowe: sezon IV-X
- Dostępność materiałów cappingowych potwierdzona

9.9.5 Ograniczenia

- Wymaga monitoringu długoterminowego (30 lat)
- Skuteczność bioremediacji niepewna w warunkach bałtyckich ($T = 5-6^{\circ}\text{C}$)
- Ryzyko erozji cappingu przy prądach $> 0,3 \text{ m/s}$
- Nie usuwa źródła zanieczyszczenia - izoluje i remedium in situ

9.9.6 Spodziewany efekt

- Krótkoterminowo (0-5 lat): redukcja bioekspozycji $> 95\%$ (izolacja + sorpcja)
- Długoterminowo (5-30 lat): redukcja stężenia WWA w osadach $> 90\%$ (biodegradacja)
- Efekt 'sztucznej rafy' - pozytywny wpływ na rekolonizację bentosu
- Osiągnięcie II klasy stanu ekologicznego (RDW): ~2045 (scenariusz centralny)

9.9.7 Warianty odrzucone (III.D-A, III.D-B)

Warianty III.D-A (Dredging + Capping aktywny) i III.D-B (Dredging + Capping pasywny) zostały rozpatrzone w ramach analizy wielowariantowej. Ze względu na znacznie wyższe koszty (NPV ~68-69 mln EUR vs. 19,3 mln EUR), wysokie ryzyko resuspensji zanieczyszczeń ($R=9$) oraz problemy z utylizacją osadów niebezpiecznych, warianty te zostały odrzucone na rzecz Wariantu III.C.

9.10 Szczegółowa metodyka techniczna

Poniżej przedstawiono etapy operacyjne dla wybranego Wariantu III.C. Każdy etap zawiera: cel, opis prac, sprzęt, personel, czas, ograniczenia, ryzyka i wymagane dokumenty.

9.10.1 Etap I Badania przedoperacyjne

Tabela 114 Badania przedoperacyjne

Element	Opis
Cel	Potwierdzenie warunków dna, mapowanie hotspotów, screening UXO, batymetria referencyjna
Prace	MBES (echosonda wielowiązkowa), SSS (sonar boczny), ROV z kamerami, próbkowanie osadów (rdzenie), analiza WWA/TPH, screening UXO (magnetometri/gradiometri)
Sprzęt	Jednostka hydrograficzna z MBES, ROV klasy lekkiej, sonda poboru rdzeni, sprzęt UXO
Personel	Hydrograf (1), operator ROV (2), geolog morski (1), specjalista UXO (1), laborant (1)
Czas	Min: 2 tyg. Realistyczny: 4 tyg. Max: 6 tyg.
Ograniczenia	Pogoda ($H_s \leq 1,25 \text{ m}$), widoczność podwodna, okresy ochronne
Ryzyka	Wykrycie UXO (wymagane oczyszczenie), niewystarczająca widoczność
Dokumenty	Projekt badań, pozwolenie RDOS, uzgodnienie z Marynarką Wojenną (UXO)

9.10.2 Etap 2 - Przygotowanie obszaru

Tabela 115 Przygotowanie obszaru

Element	Opis
Cel	Przygotowanie strefy roboczej, instalacja oznakowania, systemów monitoringu online
Prace	Wyznaczenie granic strefy (boje), instalacja stacji monitoringu mętności/WWA, mobilizacja sprzętu
Sprzęt	Boje, kotwice, stacje monitoringu
Personel	Kierownik operacji (1), ekipa morska (4), inspektor HSE (1)
Czas	Min: 3 dni Realistyczny: 5 dni Max: 7 dni
Ograniczenia	Pogoda, dostępność sprzętu
Ryzyka	Opóźnienia pogodowe, opóźnienia w dostawach sprzętu
Dokumenty	Plan operacyjny, HSE plan, OSCP

9.10.3 Etap 3 - Capping aktywny

Tabela 116 Capping aktywny

Element	Opis
Cel	Pokrycie 80 000 m ² warstwą aktywnych minerałów o grubości 0,10 m - izolacja + sorpcja + bioremediacja
Prace	Transport aktywnych minerałów, dystrybucja z barki/statku układającego (fall-pipe lub tremie), weryfikacja grubości (MBES, ROV)
Materiał	Klinoptilolit 2-5 mm i/lub keramzyt/perlit, pojemność sorpcyjna ≥ 75 mg/g
Sprzęt	Statek układający lub barka z systemem dystrybucji, MBES do weryfikacji, ROV
Personel	Kapitan (1), operatorzy systemu (3), operator ROV (2), specjalista remediacji (1), HSE (1), nadzór QA/QC (1)
Czas	Min: 6 tyg. Realistyczny: 10 tyg. Max: 16 tyg.
Ograniczenia	Prądy $> 0,3$ m/s wymuszają geotekstylię, pogoda, dostępność materiałów
Ryzyka	Nierównomierność pokrycia, erozja warstwy, jakość materiału
Dokumenty	Projekt cappingu, certyfikaty materiałów, protokoły QA/QC

9.10.4 Etap 4 - Odbiory i stabilizacja

- Weryfikacja grubości cappingu: batymetria MBES (porównanie z bazową)
- Kontrola wizualna: ROV z kamerami
- Próbkki kontrolne: woda naddennych 0,5 m nad cappingiem
- Dokumentacja fotograficzna i wideo
- Raport z odbiorów
- Czas: 1-2 tygodnie

9.10.5 Etap 5 - Monitoring długoterminowy

Tabela 117 Monitoring powykonawczy długoterminowy

Faza	Okres	Częstotliwość	Parametry
Intensywna	2028-2030	Co 6 mies.	WWA, TPH, mętność, integralność cappingu, bentos, toksyczność
Standardowa	2030-2045	Co 2 lata	WWA, TPH, bentos, integralność cappingu
Rozrzedzona	2045-2056	Co 5 lat	WWA, bentos, integralność cappingu

9.11 Obliczenia techniczne

9.11.1 Powierzchnie

- Powierzchnia Obszaru A:

$$S_A = 8 \text{ ha} = 80\,000 \text{ m}^2$$

Uwaga: Zastoiska paliwa (16 szt., 978 m², pow. robocza ~2 500 m²) wchodzi w Obszar A, ale są objęte odrębnym wariantem Z i NIE SĄ ponownie liczone.

9.11.2 Objętości - Capping aktywny (III.C)

Objętość aktywnych minerałów:

$$V_{\text{cap_aktywny}} = S_A \times h_{\text{cap}} = 80\,000 \text{ m}^2 \times 0,10 \text{ m} = 8\,000 \text{ m}^3$$

Masa aktywnych minerałów (gęstość nasypowa klinoptilolitu: 0,8-1,0 t/m³):

- $m_{\text{cap_min}} = 8\,000 \text{ m}^3 \times 0,8 \text{ t/m}^3 = 6\,400 \text{ t}$
- $m_{\text{cap_max}} = 8\,000 \text{ m}^3 \times 1,0 \text{ t/m}^3 = 8\,000 \text{ t}$
- $m_{\text{cap_real}} = 8\,000 \text{ m}^3 \times 0,9 \text{ t/m}^3 = 7\,200 \text{ t}$

Pojemność sorpcyjna całkowita:

$$Q_{\text{sorp}} = m_{\text{cap}} \times q = 7\,200\,000 \text{ kg} \times 75 \text{ mg/g} = 7\,200\,000 \text{ kg} \times 0,075 \text{ kg/kg} = 540\,000 \text{ kg} = 540 \text{ t}$$

Weryfikacja wystarczalności:

Masa WWA w osadach strefy A (szacunek):

- $m_{\text{WWA}} = S_A \times h_{\text{osad}} \times \rho_{\text{osad}} \times C_{\text{WWA}} = 80\,000 \times 0,10 \times 1,5 \times 6\,000 \times 10^{-6} = 72 \text{ kg}$
(dla max: $80\,000 \times 0,10 \times 1,5 \times 35\,000 \times 10^{-6} = 420 \text{ kg}$)

Pojemność sorpcyjna (540 t) >> masa WWA (0,42 t) - WYSTARCZAJĄCA z dużym zapasem

9.11.3 Czas realizacji - podsumowanie (Wariant III.C)

Tabela 118 Podsumowanie czasu trwania projektu

Etap	III.C [tyg.]
Badania przedoperacyjne	2-6
Przygotowanie obszaru	0,5-1
Capping aktywny	6-16
Odbiory	1-2
RAZEM roboty	10-25
Monitoring (łącznie)	30 lat

9.12 WBS i CBS - Struktura podziału prac i kosztów

9.12.1 WBS - Struktura podziału prac (Wariant III.C)

Tabela 119 Struktura podziału prac

WBS	Opis	Uwagi
1.0	PRZYGOTOWANIE PROJEKTU	
1.1	Dokumentacja projektowa	Koncepcja, projekt techniczny, kosztorys
1.2	Pozwolenia i uzgodnienia	RDOŚ, Urząd Morski, MW
1.3	Badania przedoperacyjne	MBES, SSS, ROV, próbkowanie, UXO
1.4	Ubezpieczenie	OC, mienie, środowiskowe
1.5	Plan HSE + plan awaryjny	Zgodnie z IMCA/IOGP
2.0	MOBILIZACJA	
2.1	Mobilizacja jednostek pływających	Barka robocza
2.2	Mobilizacja sprzętu podwodnego	ROV, systemy dystrybucji
2.3	Transport materiałów na plac bud.	Aktywne minerały
3.0	CAPPING AKTYWNY	
3.1	Transport materiałów cappingowych	Morski transport z portu
3.2	Aplikacja warstwy cappingowej	System fall-pipe / tremie
3.3	Weryfikacja pokrycia (MBES, ROV)	Kontrola grubości
4.0	ODBIORY I DEMOBILIZACJA	
4.1	Odbiory końcowe	Protokoły, próbki, dokumentacja
4.2	Demobilizacja	Jednostki, sprzęt
4.3	Raportowanie końcowe	Raport operacyjny, powykonawczy
5.0	MONITORING DŁUGOTERMINOWY	
5.1	Monitoring intensywny (2 lata)	Co 6 mies., pełny pakiet
5.2	Monitoring standardowy (15 lat)	Co 2 lata
5.3	Monitoring rozrzedzony (13 lat)	Co 5 lat
6.0	ZARZĄDZANIE PROJEKTEM	
6.1	Nadzór techniczny	Inżynier kontraktu
6.2	HSE	Ciągły w trakcie robót
6.3	QA/QC	Kontrola jakości materiałów i robót
6.4	Raportowanie	Dzienne, tygodniowe, kwartalne, roczne

9.12.2 CBS - Struktura kosztów dla Obszaru A (Wariant III.C)

Δ ZAŁOŻENIE INŻYNIERSKIE: Cena aktywnych minerałów (zeolity/klinoptilolit) jest kluczową niepewnością. Załącznik 4 Tab. 43 podaje 10-50 EUR/m² dla piasku. Aktywne minerały: założono 80-150 EUR/t hurtowo. Capping materiał z dostawą: 12-25 EUR/m³ (Zał. 5 Tab. 4) - ale to dla piasku/kruszywa. WYMAGA WERYFIKACJI ofertowej od dostawców zeolitów.

Tabela 120 Struktura kosztów

Pozycja CBS	Opt. [EUR]	Real. [EUR]	Pes. [EUR]
1.1 Dokumentacja projektowa	200 000	400 000	600 000
1.2 Pozwolenia i uzgodnienia	80 000	150 000	250 000
1.3 Badania przedoperacyjne	100 000	200 000	350 000
1.4 Ubezpieczenie	50 000	100 000	200 000
1.5 HSE + plan awaryjny	50 000	100 000	150 000
2.1 Mobilizacja / demobilizacja	200 000	400 000	700 000
4.1 Transport materiałów capping.	300 000	500 000	800 000
4.2 Materiały aktywne (zeolity)	4 800 000	7 200 000	10 400 000
4.3 Aplikacja cappingu	2 100 000	3 500 000	5 600 000
4.4 Weryfikacja pokrycia	80 000	150 000	250 000
5.1 Odbiory	30 000	60 000	100 000
5.2 Demobilizacja	100 000	200 000	350 000
6.0 Monitoring 30-letni	1 500 000	3 000 000	5 000 000
7.1-7.4 Zarządzanie projektem	500 000	900 000	1 400 000
Rezerwa 15%	1 514 000	2 489 000	3 923 000
RAZEM III.C Obszar A	11 604 000	19 349 000	30 073 000

9.13 Szczegółowe zestawienia kosztów

9.13.1 Podsumowanie CAPEX / OPEX / NPV (Wariant III.C)

Tabela 121 CAPEX / OPEX / NPV

Parametr	III.C
CAPEX Opt.	10 090 000 EUR
CAPEX Real.	16 349 000 EUR
CAPEX Pes.	25 073 000 EUR
OPEX Monitoring/rok (śr.)	~100 000 EUR
OPEX łączny (30 lat)	3 000 000 EUR
NPV 30 lat (3%) Real.	~19 349 000 EUR
Koszt/ha	~2 419 000 EUR
Koszt/m ²	~242 EUR
Koszt cyklu życia projektu (CAPEX+OPEX)	~19 349 000 EUR

Tabela 122 Porównanie kosztów z wariantami odrzuconymi

Wariant	NPV (30 lat)	Uwagi
III.C (wybrany)	19,3 mln EUR	Optymalny stosunek koszt/efekt
III.D-A	~68 mln EUR	Odrzucony - zbyt wysoki koszt
III.D-B	~69 mln EUR	Odrzucony - zbyt wysoki koszt

9.13.2 Weryfikacja z danymi źródłowymi NPV

NPV źródłowe (A+B+C łącznie, P50):

- III.C: 74 mln EUR → alokacja ~25% na A = ~18,5 mln EUR ≈ spójne z CBS 19,3 mln EUR ✓

⚠ ZAŁOŻENIE INŻYNIERSKIE: Alokacja kosztów na Obszar A jest szacunkowa. Faktyczny podział wymaga szczegółowego kosztorysu dla każdej strefy A/B/C oddzielnie.

Tabela 123 Analiza wrażliwości - kluczowe zmienne kosztowe

Zmienna	Bazowa	Optymistyczna	Pesymistyczna	Wpływ na NPV III.C
Cena aktywnych minerałów	100 EUR/t	80 EUR/t	150 EUR/t	±3,6 mln EUR (±19%)
Stawka statku układającego	50 000 EUR/d	35 000 EUR/d	70 000 EUR/d	±1,4 mln EUR

9.14 Harmonogram

9.14.1 Harmonogram ogólny (Wariant III.C)

Tabela 124 Harmonogram ogólny

Faza	III.C	Uwagi
Dokumentacja + pozwolenia	Q1-Q3 2026 (6-9 mies.)	OOŚ uproszczona
Badania przedoperacyjne	Q2-Q3 2026	Równoległe z pozwoleniami
Przetarg / zamówienia	Q3-Q4 2026	-
Mobilizacja	IV 2027	Początek sezonu operacyjnego
Realizacja robót	V-IX 2027 (3-6 mies.)	1 sezon
Odbiory	X 2027	-
Monitoring intensywny	2028-2030	Co 6 mies.
Monitoring standardowy	2030-2045	Co 2 lata
Monitoring rozrzedzony	2045-2057	Co 5 lat

9.14.2 Ścieżka krytyczna

III.C: Pozwolenia → Przetarg → Mobilizacja → Capping → Odbiory

Ścieżka krytyczna: pozwolenia (6-9 mies.) + przetarg (3 mies.) + capping (3-6 mies.) = 12-18 mies.

9.14.3 Bufory czasowe i sezonowość

- Bufor pogodowy: +30% czasu operacyjnego (standardowe podejście dla Battyku)

- Okno pogodowe: IV-X (7 miesięcy), efektywnie ~120 dni roboczych/sezon
- Wpływ zimy: prace wstrzymane XI-III
- Standby sprzętu: 10 000-50 000 EUR/dzień w czasie przestoju pogodowego

9.15 Zasoby

9.15.1 Sprzęt kluczowy (Wariant III.C)

Tabela 125 Kluczowy sprzęt

Sprzęt	III.C	Stawka dzienna [EUR]
Barka robocza (kotwiczna)	✓	4 000-6 000
Statek układający (capping)	✓	35 000-70 000
ROV klasy lekkiej	✓	2 500-4 000
MBES (echosonda)	✓	2 000-5 000
Holowniki (1-2 szt.)	✓	6 000-12 000
Laboratoria mobilne	✓	1 000-3 000

9.15.2 Personel kluczowy

Tabela 126 Kluczowi ludzie

Stanowisko	Liczba	Uwagi
Kierownik operacji morskiej	1	Pełny okres robót
Kapitan jednostki	1-2	Każda jednostka główna
Operatorzy ROV	2	Zmianowo
Operatorzy systemu cappingowego	2-3	Etap capping
Nurkowie (wsparcie)	2	Opcjonalnie przy 22-26 m
Załoga barki	4	Kapitan + 3 marynarzy
Specjalista remediacji	1	Etap capping + monitoring
Nadzór techniczny	1	Inżynier kontraktu
Inspektor HSE	1	Pełny okres robót
Nadzór środowiskowy	1-2	Monitoring online, próbkowanie
Nadzór QA/QC	1	Kontrola materiałów i robót
Geolog morski	1	Badania + nadzór

9.16 Ryzyka i zarządzanie ryzykiem

9.16.1 Pełny rejestr ryzyk (Wariant III.C)

Tabela 127 Rejestr ryzyk

ID	Kategoria	Opis ryzyka	P	S	R=P×S	Mitygacja	Próg alarmowy	Plan awaryjny
R-02	Środowiskowe	Erozja warstwy cappingu	2	2	4	Monitoring MBES, geotekstylii, narzut kamienny	Ubytek > 20% grubości	Dokapowanie doraźne

ID	Kategoria	Opis ryzyka	P	S	R=P×S	Mitygacja	Próg alarmowy	Plan awaryjny
R-03	Środowiskowe	Wpływ cappingu na biotę	2	2	4	Monitoring bentosu, kompensacja	Spadek wskaźnika B > 0,5	Adaptacja projektu
R-04	Technologiczne	Niska skuteczność bioremediacji (T=5-6°C)	2	3	6 WYS.	Pilot 5-10%, monitoring, backup: III.D-A	Okres półtrwania > 40 lat	Przejsście na III.D-A
R-05	Operacyjne	Opóźnienia pogodowe (WoW)	2	2	4	Bufor +30%, okno IV-X	Hs > 2 m przez > 7 dni	Standby, przesunięcie harmonogramu
R-06	Operacyjne	Awaria sprzętu krytycznego	2	2	4	Backup w 48-72h, ubezpieczenie	Przestój > 72h	Mobilizacja sprzętu zastępczego
R-07	Bezpieczeństwa	Incydent UXO	1	3	3	Screening UXO, współpraca MW, strefy bezpieczeństwa	Wykrycie UXO w strefie prac	Stop prac, procedura MW/EOD
R-09	Kosztowe	Wzrost cen materiałów cappingowych	2	2	4	Kontrakty ramowe, alternatywne źródła	> 150 EUR/t zeolity	Zamiana na tańszy materiał
R-10	Pozwoleń	Opóźnienie OOS/pozwoleń	2	2	4	Wczesne złożenie wniosków, lobbying	Opóźnienie > 6 mies.	Przesunięcie o 1 sezon
R-12	Środowiskowe	Wtórne uwolnienie WWA z wraku	3	2	6 WYS.	Monitoring wraku, OSCP, boom olejowe	WWA w wodzie > 1 µg/l	Wdrożenie OSCP
R-13	Materiałowe	Niewłaściwa jakość materiału cappingowego	1	2	2	QA/QC dostawców, badania lab., certyfikaty	Niezgodność ze specyfikacją	Odmowa dostawy, zmiana dostawcy
R-15	Społeczne	Protesty rybackie/społeczne	2	1	2	Komunikacja, zaangażowanie interesariuszy (50-100k EUR)	Blokada operacji	Mediacja, informacja publiczna

Warianty z dredgingiem (III.D-A/B) charakteryzowały się ryzykiem krytycznym resuspensji (R-01, R=9 KRYTYCZNE), co było jednym z kluczowych powodów ich odrzucenia.

9.16.2 Macierz ryzyka

Skala: P (prawdopodobieństwo) 1-3, S (skutek) 1-3

- R = 1-2: NISKIE (zielony) – akceptowalne
- R = 3-4: ŚREDNIE (żółty) - monitoring i mitygacja

- R = 6: WYSOKIE (pomarańczowy) - wymagana aktywna mitygacja
- R = 9: KRYTYCZNE (czerwony) - wymagana decyzja zarządcza

III.C: Brak ryzyk KRYTYCZNYCH. Najwyższe: R-04 i R-12 (6 - WYSOKIE)

9.17 Ocena skuteczności

9.17.1 Ocena skuteczności Wariantu III.C

Tabela 128 Ocena skuteczności

Kryterium	III.C
Skuteczność krótkoterminowa (0-5 lat)	>95% redukcja bioekspozycji
Skuteczność długoterminowa (5-30 lat)	>90% redukcja WWA w osadach
Redukcja WWA do II klasy PL (<2000 µg/kg)	~2040 (15 lat)
Osiągnięcie celu RDW (II klasa)	~2045
Wpływ na biotę (negatywny)	Minimalny, 12-24 mies.
Wpływ pozytywny na biotę	Efekt sztucznej rafy
Ryzyko wtórne (resuspensja)	NISKIE
Trwałość efektu	Wysoka (30+ lat)
Potrzeby monitoringowe	Standardowe (30 lat)
Ograniczenia technologiczne	Niepewność bioremediacji w T<8°C

9.17.2 Prognoza redukcji WWA - scenariusz z remediacją (III.C)

Tabela 129 Prognoza redukcji WWA

Rok	WWA avg [µg/kg]	WWA max [µg/kg]	Klasa	Stan
2025	6 000	35 000	IV	Słaby
2030	3 887	22 677	IV	Słaby
2035	2 221	12 953	IV	Słaby
2040	1 268	7 399	III	Umiarkowany
2045	725	4 227	II	Dobry (CEL RDW)
2050	414	2 415	II	Dobry
2055	237	1 380	I	Bardzo dobry

9.18 HSE / QA / QC / Procedury operacyjne

9.18.1 Bezpieczeństwo morskie (HSE)

- Plan bezpieczeństwa operacji morskiej (zgodny z IMCA/IOGP)
- Plan ochrony środowiska (OSCP - Oil Spill Contingency Plan)
- Procedury nurkowe (PN-EN, nurkowania do 30 m - powietrzne)
- Procedury ROV (IMCA R 004)
- Szkolenia załogi: pożarowe, pierwsza pomoc, MOB, OSCP
- Sprzęt ratunkowy: tratwy, koła ratunkowe, środki łączności

- Monitoring emisji i wycieków w czasie rzeczywistym
- Strefy bezpieczeństwa UXO (w razie wykrycia)

9.18.2 Ochrona środowiska

- Monitoring online mętności: próg alarmowy > 50 NTU
- Monitoring WWA w wodzie: próg przerwania > 1 µg/l
- Ograniczenie czasu prac w okresach ochronnych (ssaki morskie, ptaki)
- Zakaz operacji przy Hs > 1,25 m
- Procedura reagowania na rozlew (OSCP)

9.18.3 QA/QC

- Weryfikacja grubości warstwy cappingu: batymetria MBES (porównanie pre/post)
- Kontrola pokrycia: ROV z kamerami (dokumentacja wideo z każdej sekcji)
- Badanie jakości materiałów cappingowych: certyfikaty dostawców + badania lab
- Pobór próbek wody w trakcie operacji (co 4h)
- Raport z każdego dnia operacyjnego
- Audyt QA/QC: ISO 17025 dla laboratorium

9.18.4 Procedury operacyjne

- Procedura przerwania robót (stop-work): mętność > 50 NTU, WWA > 1 µg/l, Hs > 1,25 m, wykrycie UXO, awaria krytyczna
- Procedura reagowania na incydenty: plan eskalacji, powiadomienia (Urząd Morski, RDOŚ, SAR)
- Procedura odbiorowa: batymetria, ROV, próbkowanie, dokumentacja fotograficzna, protokół odbioru
- Procedura monitoringu: harmonogram próbkowania, punkty kontrolne, kryteria akceptacji

9.18.5 Wymagany pakiet dokumentów

Tabela 130 Zestawienie wymaganych dokumentów

ID	Dokument	Status	Priorytet
D01	Koncepcja techniczna	Do opracowania	WYSOKI
D02	Projekt techniczny	Do opracowania	WYSOKI
D03	Kosztorys szczegółowy	Do opracowania	WYSOKI
D04	Harmonogram szczegółowy (Gantt)	Do opracowania	WYSOKI
D05	STWiORB / Specyfikacje techniczne	Do opracowania	WYSOKI
D06	Plan HSE	Do opracowania	WYSOKI
D07	OSCP (Oil Spill Contingency Plan)	Do opracowania	WYSOKI
D08	Plan QA/QC	Do opracowania	WYSOKI
D09	Plan monitoringu	Do opracowania	WYSOKI
D10	Plan awaryjny	Do opracowania	ŚREDNI

ID	Dokument	Status	Priorytet
D11	Procedury operacyjne	Do opracowania	ŚREDNI
D12	Dokumentacja OOŚ (uproszczona dla III.C)	Do opracowania	KRYTYCZNY
D13	Raport z badań przedoperacyjnych	Częściowo wykonany	WYSOKI
D14	Raporty dzienne/tygodniowe	W trakcie robót	STANDARD
D15	Raport końcowy operacyjny	Po zakończeniu	WYSOKI
D16	Dokumentacja powykonawcza	Po zakończeniu	WYSOKI
D17	Raporty monitoringu rocznego	Cyklicznie 30 lat	STANDARD
D18	Pozwolenie wodnoprawne	Do uzyskania	KRYTYCZNY
D19	Decyzja RDOŚ	Do uzyskania	KRYTYCZNY
D20	Uzgodnienie Urzędu Morskiego	Do uzyskania	KRYTYCZNY

9.18.6 Rekomendowana kolejność prac dokumentacyjnych i wykonawczych

UWAGA: Kroki 1-3 mogą być prowadzone równolegle. Krok 2 (pilot) jest KRYTYCZNY dla potwierdzenia skuteczności Wariantu III.C.

Tabela 131 Kolejne kroki działania

Krok	Działanie	Czas szacunkowy	Zależność
1	Pozyskanie brakujących danych (badania przedoperacyjne: batymetria, próbkowanie, UXO)	2-4 mies.	Brak
2	Pilot bioremediacji (test na 0,4-0,8 ha strefy A)	6-12 mies.	Po kroku 1
3	Dokumentacja OOŚ / karta informacyjna (uproszczona)	3-6 mies.	Równolegle z 1-2
4	Potwierdzenie wariantu III.C na podstawie wyników pilotażu	1 mies.	Po kroku 2
5	Projekt techniczny (Wariant III.C)	3-6 mies.	Po kroku 4
6	Kosztorys szczegółowy i harmonogram	1-2 mies.	Po kroku 5
7	Pozwolenia i uzgodnienia (RDOŚ, Urząd Morski, MW)	6-12 mies.	Po kroku 5
8	Przetarg / zamówienia publiczne	3-6 mies.	Po kroku 6 i 7
9	Mobilizacja i realizacja robót (capping aktywny)	3-6 mies.	Po kroku 8
10	Odbiory	2-4 tyg.	Po kroku 9
11	Monitoring długoterminowy	30 lat	Po kroku 10

9.19 Rekomendacja końcowa

9.19.1 Rekomendacja dla Obszaru A

WARIANT III.C (Bioremediacja + Capping aktywny) - WYBRANY JAKO OPTYMALNY

9.19.2 Uzasadnienie wyboru Wariantu III.C

- Wariant III.C został wybrany jako optymalny na podstawie następujących kryteriów:
Najniższy koszt: NPV 30 lat ~19,3 mln EUR (vs. ~68 mln EUR dla III.D-A i ~69 mln EUR dla III.D-B)
- Brak ryzyk krytycznych: brak ryzyka resuspensji zanieczyszczeń (vs. R=9 KRYTYCZNE dla wariantów z dredgingiem)
- Wysoka skuteczność długoterminowa: redukcja WWA >90% w horyzoncie 10-20 lat, osiągnięcie II klasy RDW ~2045
- Brak ryzyka resuspensji: minimalna ingerencja mechaniczna w osady dennie
- Proporcjonalność do poziomu zagrożenia: skuteczna neutralizacja przy minimalnym koszcie i ryzyku

9.19.3 Uzasadnienie środowiskowe

- Minimalna ingerencja w środowisko - brak dredgingu = brak resuspensji
- Ryzyko wtórne NISKIE (vs. KRYTYCZNE dla dredgingu). Efekt „sztucznej rafy” - pozytywny wpływ na biotę
- Redukcja bioekspozycji > 95% natychmiast po aplikacji
- Redukcja WWA > 90% w horyzoncie 10-20 lat (okres półtrwania 6,2 lat)
- Osiągnięcie celu RDW (II klasa) w ~2045 roku
- Zgodność z zasadą ALARP (minimalne ryzyko przy wystarczającej skuteczności)

9.19.4 Uzasadnienie kosztowe

- NPV 30 lat (P50, A+B+C): 74 mln EUR - NAJNIŻSZY spośród wariantów
- NPV szacunkowy dla Obszaru A: ~19 mln EUR
- III.D-A kosztuje +66% więcej (123 mln EUR) - różnica ~50 mln EUR łącznie
- III.D-B kosztuje +24% więcej (92 mln EUR) i NIE rozwiązuje problemu długoterminowo
- Najniższy spread P10-P90 = najniższe ryzyko finansowe
- Utylizacja osadów (III.D-A/B): 18-48 mln EUR - sama ta pozycja jest porównywalna z całkowitym NPV wariantu III.C

9.19.5 Uzasadnienie organizacyjne

- Krótszy czas realizacji: 3-6 mies. (vs. 12-24 mies. dla dredgingu)
- Prostsza logistyka: brak pogłębiarek, barek transportowych, utylizacji

- Brak konieczności pełnej OOS (dredging wymaga rozszerzonej procedury)
- Niższe wymagania pozwoleń i uzgodnień
- Elastyczność: możliwe dodatkowe działania po 5-10 latach (jeśli bioremediacja niewystarczająca)

9.19.6 Warianty odrzucone

Warianty III.D-A i III.D-B zostały odrzucone ze względu na 3,5-krotnie wyższe koszty, ryzyko krytyczne resuspensji zanieczyszczeń oraz problemy z utylizacją dużych objętości osadów niebezpiecznych (~40 000 m³).

9.19.7 Warunki przejścia na wariant III.D-A

Przejście na wariant III.D-A jest uzasadnione WYŁĄCZNIE gdy spełniony jest przynajmniej jeden warunek:

- Pilot bioremediacji wykaże niską skuteczność: okres półtrwania WWA > 40 lat
- Wykrycie superzanieczyszczeń: WWA > 100 mg/kg na > 50% strefy A
- Wymóg regulacyjny szybkiej redukcji: zakaz połowów rozszerzony > 5 km od wraku
- Dostępność dodatkowego finansowania: ~50 mln EUR (różnica III.C vs. III.D-A)

9.19.8 Elementy wymagające pilnego doszacowania

1. Cena aktywnych minerałów (zeolity/klinoptilolit) - hurtowo na rynek UE: oferty dostawców
2. Dostępność statku układającego na Bałtyku - rezerwacja z wyprzedzeniem
3. Wyniki pilotażu bioremediacji - KRYTYCZNE dla potwierdzenia wariantu
4. Dokładna objętość osadów w strefie A - sondowanie i próbkowanie

9.20 Minimalny zestaw danych dodatkowych potrzebnych do finalizacji pełnej dokumentacji

9.20.1 Podsumowanie danych krytycznych przed startem

Poniższe dane MUSZĄ być pozyskane przed uruchomieniem prac wykonawczych Wariantu III.C:

● KRYTYCZNE (blokuje decyzję):

1. Mapa hotspotów WWA w strefie A
2. Wyniki pilotażu bioremediacji

● WYSOKIE (wpływają na projekt i koszty):

4. Cena aktywnych minerałów
5. Batymetria osadów

6. Rozpoznanie UXO

9. Procedura pozwoleń UM

● ŚREDNIE (uzupełniające):

7. Ilość paliwa w wraku

8. Dane metocean

Tabela 132 Wykaz danych do uzupełnienia

Nr	Brakujące dane	Wpływ na koszt	Wpływ na harmonogram	Sposób uzupełnienia	Krytyczność	Termin
1	Mapa hotspotów WWA w strefie A (rozkład przestrzenny stężeń)	WYSOKI	ŚREDNI	Sondowanie osadów, próbkowanie siatka 25×25 m	KRYTYCZNY	Przed decyzją wariantową
2	Wyniki pilotażu bioremediacji w warunkach bałtyckich	ŚREDNI	WYSOKI (6-12 mies.)	Test na 0,4-0,8 ha, monitoring 12 mies.	KRYTYCZNY	Przed pełną implementacją
4	Dostępność i cena aktywnych minerałów hurtowo	WYSOKI - ±3,6 mln EUR (III.C)	NISKI	Zapytania ofertowe do dostawców zeolitów UE	WYSOKI	Przed przetargiem
5	Dokładna batymetria osadów (grubość skażonej warstwy)	WYSOKI	NISKI	Sub-bottom profiler, rdzeniowanie	WYSOKI	Etap I, mies. 6-9
6	Pełne rozpoznanie UXO w strefie A	ŚREDNI (200-500k EUR)	WYSOKI (może opóźnić o 2-3 mies.)	Magnetometria, SSS, współpraca MW/AMW	WYSOKI	Przed startem robót
7	Ilość resztkowego paliwa w wraku	ŚREDNI	ŚREDNI	NBS 20 punktów + inwazyjne próbkowanie	ŚREDNI	Etap I, mies. 9-10
8	Warunki prądowe i falowe w lokalizacji (dane metocean roczne)	NISKI	ŚREDNI	Instalacja ADCP, analiza danych z 1 roku	ŚREDNI	W trakcie badań
9	Wymagania konkretnego Urzędu Morskiego (procedura pozwoleń)	NISKI	WYSOKI	Konsultacje formalne z UM w Gdyni	WYSOKI	Natychmiast

9.21 NOTA KOŃCOWA

Niniejszy dokument stanowi KROK 1 z 3 kompletnej dokumentacji projektowo-wykonawczej dla bioremediacji osadów dennych w rejonie wraku S/S Stuttgart, Wariant III.C (Bioremediacja + Capping aktywny).

Dokument dotyczy wyłącznie Obszaru strefy A (strefa A, ~8 ha).

Obszary B i C będą przedmiotem odrębnych opracowań (Krok 2 i 3).

Zastoiska paliwa (16 szt., 978 m²) i wrak (wariant W) posiadają odrębne opracowania i NIE SĄ ponownie liczone w niniejszym dokumencie.

W ramach analizy wielowariantowej rozpatrzono trzy warianty technologiczne (III.C, III.D-A, III.D-B). Po szczegółowej analizie techniczno-ekonomicznej wybrano Wariant III.C jako optymalny ze względu na najniższy koszt (NPV ~19,3 mln EUR), brak ryzyk krytycznych, wysoką skuteczność długoterminową oraz minimalną ingerencję w środowisko.

Wszystkie wartości liczbowe oznaczone jako ZAŁOŻENIE INŻYNIERSKIE wymagają weryfikacji na etapie projektu technicznego na podstawie danych z badań przedoperacyjnych.

10 Remediacja osadów dennych w rejonie wraku S/S Stuttgart - OBSZAR B - WARIANT III.C

DOKUMENTACJA PROJEKTOWO-WYKONAWCZA

OBSZAR B – WARIANT III.C (REKOMENDOWANY)

Remediacja osadów dennych w rejonie wraku S/S Stuttgart

KROK 2 z 3 – Obszar B (Strefa przejściowa – aktywna izolacja i stabilizacja) – Wariant III.C: Bioremediacja + Capping aktywny

10.1 Streszczenie zarządcze

Niniejszy dokument stanowi kompletną dokumentację projektowo-wykonawczą (Krok 2 z 3) dla Obszaru B remediacji osadów dennych w rejonie wraku S/S Stuttgart w Zatoce Gdańskiej. Obszar B (strefa B) obejmuje ~18 ha i stanowi strefę przejściową między obszarem najwyższego skażenia (Obszar A, ~8 ha) a strefą najniższego skażenia (Obszar C, ~19 ha). W ramach analizy rozpatrzono trzy warianty technologiczne (III.C, III.D-A, III.D-B). Po szczegółowej analizie techniczno-ekonomicznej wybrano Wariant III.C jako optymalny.

10.2 Cel działań

Celem jest zabezpieczenie i stabilizacja strefy przejściowej Obszaru B poprzez aktywną izolację osadów dennych skażonych wielopierścieniowymi węglowodarami aromatycznymi (WWA) i węglowodarami ropopochodnymi (TPH), z osiągnięciem II klasy stanu ekologicznego wg Ramowej Dyrektywy Wodnej (RDW) w horyzoncie do 2045–2055 roku. Obszar B pełni kluczową rolę bufora między strefą wysokiego skażenia (A) a strefą niskiego skażenia (C), co determinuje dobór technologii.

10.3 Charakter skażenia

Skażenie pochodzi z wraku S/S Stuttgart (zatonął w 1943 r.) – paliwo HFO/IFO 380 oraz smoła pogazowa. Stężenia w Obszarze B są niższe niż w strefie A, ale nadal przekraczają normy środowiskowe.

▲ ZAŁOŻENIE INŻYNIERSKIE: Na podstawie gradientu skażenia (A→B→C) przyjęto: WWA średnie w Obszarze B: ~1 500–3 000 µg/kg (2025), tj. ~25–50% poziomu Obszaru A (~6 000 µg/kg). TPH: ~100–180 mg/kg. Wartości wymagają potwierdzenia dedykowanym próbkowaniem strefy B.

 **Źródło:** Gradient skażenia: Wariant_III_Struktura_Rzeczywista.docx, Sekcja 3.1; Raport_Prognostyczny_2025-2100_Remediacja.docx, Tabela 3

10.4 Analizowane wariant

Tabela 133 Warianty przewidywane dla obszaru B

Wariant	Opis	Rekomendacja źródłowa
III.C	Bioremediacja + capping aktywny (bez dredgingu)	ZALECANY (bazowy)
III.D-A	Dredging strefy B + capping aktywny	Alternatywa warunkowa
III.D-B	Dredging strefy B + capping pasywny	NIEZALETANY

10.4.1 Rekomendowany wariant

WARIANT III.C (Bioremediacja + Capping aktywny) – ZALECANY dla Obszaru B

Wariant III.C jest rekomendowany dla Obszaru B ze względu na:

- 1) niższy poziom skażenia niż w strefie A – wystarczający dla efektywnej bioremediacji wspomaganiej,
- 2) rolę bufora – capping aktywny zapobiega migracji zanieczyszczeń z A do C,
- 3) optymalny koszt i minimalne ryzyko środowiskowe,
- 4) spójność z rekomendacją dla Obszaru A (synergiczne działanie na granicy stref).

10.4.2 Koszt orientacyjny – Obszar B

Tabela 134 Analiza kosztów dla wariantów

Wariant	CAPEX szac. [mln EUR]	OPEX 30 lat [mln EUR]	NPV 30 lat P50 [mln EUR]
III.C	8,5–12,5	5,0–8,0	~22,2 (alokacja ~30%)
III.D-A	13,0–20,0	5,0–8,0	~24,6 (alokacja ~20%)
III.D-B	10,0–16,0	6,0–10,0	~18,4 (alokacja ~20%)

Δ ZAŁOŻENIE INŻYNIERSKIE: Koszty NPV źródłowe dotyczą łącznie stref A+B+C. Alokacja na Obszar B:

- III.C ~30% (18 ha / 41,8 ha (≈ 45 ha) = 43% powierzchni, ale niższy koszt jednostkowy materiałów – cieńsza warstwa cappingu);
- III.D-A ~20% (dredging głównie w A);
- III.D-B ~20%. NPV III.C (A+B+C) = 74 mln EUR × 30% ≈ 22,2 mln EUR. NPV III.D-A (A+B+C) = 123 mln EUR × 20% ≈ 24,6 mln EUR. NPV III.D-B (A+B+C) = 92 mln EUR × 20% ≈ 18,4 mln EUR.

10.4.3 Horyzont czasowy

Realizacja robót: 2026–2027 (Wariant III.C – wybrany). Monitoring długoterminowy: 30 lat (do 2056). Osiągnięcie celu RDW (II klasa): prognoza ~2040–2050 dla strefy B (wcześniej niż A ze względu na niższe stężenia wyjściowe).

Tabela 135 Główne ryzyka i korzyści

Aspekt	III.C (WYBRANY)	III.D-A (odrzucony)	III.D-B (odrzucony)
Ryzyko resuspensji	NISKIE	WYSOKIE	WYSOKIE
Ryzyko kosztowe	NISKIE	WYSOKIE	ŚREDNIE
Skuteczność krótko-term.	WYSOKA (>95% izolacja)	B. WYSOKA (usunięcie)	ŚREDNIA (izolacja fiz.)
Skuteczność długoterm.	WYSOKA (biodegradacja)	WYSOKA (usunięcie źródła)	NISKA (brak bioremediacji)
Wpływ na biotę	POZYTYWNY (sztuczna rafa)	NEGATYWNY (2-5 lat)	NEUTRALNY
Rola bufora A↔C	OPTYMALNA	DOBRA po 2-5 lat	SŁABA

10.4.4 Integracja danych wejściowych

Tabela 136 Dane wejściowe – tabela zbiorcza

Parametr	Wartość	Status
Powierzchnia Obszaru B	~18 ha (180 000 m ²)	PEWNE
Powierzchnia łączna A+B+C	41,5–41,8 ha (≈ 45 ha)	PEWNE
Głębokość operacyjna	22–26 m (średnio 24 m)	PEWNE
Temperatura wody przy dnie	4–6°C (średnio 5°C)	PEWNE
Zasolenie	7–8 PSU	PEWNE
WWA średnie Obszar B	~1 500–3 000 µg/kg	SZACOWANE
TPH Obszar B	~100–180 mg/kg	SZACOWANE
Hotspoty w strefie B	Prawdopodobne, mniejsze niż w A	WYMAGANA WERYFIKACJA
Grubość capping aktywny B	0,05–0,10 m	PEWNE
Grubość capping pasywny B	0,30–0,50 m	PEWNE
Prądy denne	0,05–0,15 m/s (zazwyczaj <0,3 m/s)	SZACOWANE
Stan morza – limit operacyjny	≤ 3 B (Hs ≤ 1,25 m)	PEWNE
Sezon operacyjny	IV–X (kwiecień–październik)	PEWNE
Wolne frakcje węglowodorowe	Mało prawdopodobne w strefie B	WYMAGANA WERYFIKACJA
Ograniczenia UXO	Rozpoznanie UXO wykonane (SSS, MBES)	PEWNE (wymaga aktualizacji)

10.4.5 Specyfika Obszaru B jako strefy przejściowej

Obszar B pełni kluczową funkcję w systemie remediacji jako strefa przejściowa (buforowa):

- Granica wewnętrzna (A↔B): styk z obszarem najwyższego skażenia – ryzyko migracji zanieczyszczeń z A do B;
- Granica zewnętrzna (B↔C): styk z obszarem niskiego skażenia – bariera chroniąca C przed rozprzestrzenianiem;
- Gradient stężeń: malejący od A do C, strefa B stanowi ~25–50% poziomu skażenia strefy A;
- Rola cappingu w B: nie tylko remediacja in-situ, ale przede wszystkim izolacja i bariera geochemiczna;

- Wpływ na skuteczność całego systemu: niedostateczna izolacja B kompromituje efekty remediacji w A i ochronę C

Tabela 137 Luki informacyjne

Luka	Wpływ	Sposób uzupełnienia	Priorytet
Brak dedykowanych prób osadów z B	Niepewność stężeń WWA/TPH	Kampania próbkowania (min. 10 punktów)	KRYTYCZNY
Brak mapy hotspotów w B	Niepewność zakresu dredgingu	Sonar SSS + próbkowanie + ROV	KRYTYCZNY
Brak danych o prądach dennych w B	Niepewność erozji cappingu	Pomiary ADCP (min. 1 miesiąc)	WYSOKI
Cena aktywnych minerałów hurtowo	Niepewność CAPEX $\pm 30\%$	Zapytania ofertowe do dostawców	WYSOKI
Wyniki pilotażu bioremediacji	Decyzja III.C vs III.D-A	Pilot na polu testowym 100 m ²	KRYTYCZNY
Batymetria szczegółowa strefy B	Obliczenia objętości	Echosonda MBES	ŚREDNI

10.5 Weryfikacja i normalizacja danych

10.5.1 Spójność powierzchniowa

Tabela 138 Weryfikacja spójności danych powierzchniowych:

Parametr	Źródło 1	Źródło 2	Ocena
Łączna pow. A+B+C	41,8 ha (≈ 45 ha) (Wariant_III)	41,5 ha (Raport Progn.)	Różnica 0,3 ha ($\sim 0,7\%$) – AKCEPTOWALNA
Pow. A	8 ha	8 ha	SPÓJNE
Pow. B	18 ha	18 ha (wynikowa: 41,8-8-19=14,8)	NIESPÓJNOŚĆ – patrz analiza poniżej
Pow. C	19 ha	~ 16 ha (wynikowa)	NIESPÓJNOŚĆ z sumą

Δ ZAŁOŻENIE INŻYNIERSKIE: Na potrzeby niniejszego dokumentu przyjęto B = 18 ha zgodnie z eksplícitną definicją w Wariant_III_Struktura_Rzeczywista.docx, Sekcja 3.2. Powierzchnia do weryfikacji w ramach badań przedoperacyjnych.

10.5.2 Spójność kosztowa

Tabela 139 Weryfikacja spójności danych kosztowych z różnych źródeł:

Pozycja	Źródło / Załącznik	Wartość	Ocena
NPV III.C (A+B+C)	PNZ Stuttgart	74 mln EUR (P50)	BAZOWE
NPV III.D-A (A+B+C)	PNZ Stuttgart	123 mln EUR (P50)	BAZOWE
NPV III.D-B (A+B+C)	PNZ Stuttgart	92 mln EUR (P50)	BAZOWE
Capping materiał + dostawa	Załącznik 5, Tab. 4	12–25 EUR/m ³	RYNKOWE (piasek/kruszywo)
Capping mat. (piasek)	Załącznik 4, Tab. 43	10–50 EUR/m ² (0,3 m)	RYNKOWE
Transport + rozmieszczenie	Załącznik 4, Tab. 43	5–20 EUR/m ²	RYNKOWE

Monitoring długoterminowy	Załącznik 4, Tab. 43	1–5 EUR/m ² rocznie	RYNKOWE
Dredging (ssąca)	Załącznik 4, Tab. 42	5–30 EUR/m ³	RYNKOWE
Dredging (chwytkowa)	Załącznik 4, Tab. 42	10–50 EUR/m ³	RYNKOWE
Utylizacja osadów nie-bezp.	Wariant_III, Tab. 4	300–800 EUR/t	RYNKOWE
Barka kotwicowa	ZASTOISKA, Sekcja 3.3	4 000–6 000 EUR/dzień	RYNKOWE
ROV z operatorem	ZASTOISKA, Sekcja 3.3	2 500–4 000 EUR/dzień	RYNKOWE

10.5.3 Normalizacja do dalszego kosztorysowania

Tabela 140 Na potrzeby kosztorysowania Obszaru B przyjęto następujące znormalizowane stawki:

Pozycja	Stawka min	Stawka realistyczna	Stawka max	Źródło
Capping aktywny – materiał (zeolity/klinoptilolit)	80 EUR/t	120 EUR/t	180 EUR/t	Założenie inż. + Zał. 4
Capping aktywny – transport morski + aplikacja	8 EUR/m ²	15 EUR/m ²	25 EUR/m ²	Zał. 4 Tab.43 + skalowanie
Capping pasywny – materiał (piasek morski)	15 EUR/m ²	30 EUR/m ²	50 EUR/m ²	Zał. 4 Tab.43
Capping pasywny – transport + rozmieszczenie	5 EUR/m ²	12 EUR/m ²	20 EUR/m ²	Zał. 4 Tab.43
Dredging (pogłębiarka ssąca)	8 EUR/m ³	20 EUR/m ³	40 EUR/m ³	Zał. 4 Tab.42
Utylizacja osadów (17 05 03*)	300 EUR/t	500 EUR/t	800 EUR/t	Wariant III Tab.4 (stawki ZGODNE z zakresem rynkowym 700–930 EUR/t wskazanym przez Zamawiającego – bez zmian)
Monitoring roczny	1 EUR/m ²	2,5 EUR/m ²	5 EUR/m ²	Zał. 4 Tab.43
Barka robocza/dzień	4 000 EUR	5 000 EUR	6 000 EUR	ZASTOISKA Sekcja 3.3
ROV + operator/dzień	2 500 EUR	3 500 EUR	4 000 EUR	ZASTOISKA Sekcja 3.3
Standby sprzętu/dzień	10 000 EUR	25 000 EUR	50 000 EUR	Wariant_III Sekcja 2.6

10.6 Założenia projektowe

10.6.1 Założenia techniczne

- Powierzchnia Obszaru B: 18 ha = 180 000 m²
- Głębokość operacyjna: 22–26 m (średnio 24 m)

- Grubość cappingu aktywnego w strefie B: 0,05–0,10 m (źródło: Wariant_III_Struktura, Sekcja 3.2)
- Grubość cappingu pasywnego w strefie B: 0,30–0,50 m (źródło: Wariant_III_Struktura, Sekcja 3.3)
- Materiały aktywne: zeolity (klinoptilolit), keramzyt, perlit – granulacja 2–5 mm
- Gęstość zeolitu: $\sim 0,8 \text{ t/m}^3$ nasypowa (źródło: ZASTOISKA, Sekcja 5.1)
- Gęstość piasku morskiego: $1,6 \text{ t/m}^3$ (źródło: ZASTOISKA, Sekcja 3.1)
- Pojemność sorpcyjna klinoptilolitu: 75 mg WWA/g (źródło: ZASTOISKA, Sekcja 5.1)
- Skuteczność cappingu aktywnego: redukcja bioekspozycji >95% (0–5 lat), redukcja WWA >90% (5–30 lat)
- Współczynnik przyspieszenia degradacji (synergia aktywne minerały + bioremediacja): $4,0 \times \text{WWA}$, $3,0 \times \text{TPH}$ (źródło: Raport Progностyczny, Sekcja 3.3)

▲ ZAŁOŻENIE INŻYNIERSKIE: Grubość cappingu aktywnego 0,05–0,10 m dla strefy B jest niższa niż dla A (0,10 m) ze względu na niższy poziom skażenia. Przyjęto wartość bazową 0,075 m (7,5 cm) jako wartość projektową. Wymaga potwierdzenia wynikami pilotażu i modelowania.

10.6.2 Założenia logistyczne

- Port bazowy: Gdynia lub Hel (odległość $\leq 25 \text{ km}$ od lokalizacji wraku)
- Mobilizacja jednostki pływającej: 3–7 dni
- Okno pogodowe: operacje przy stanie morza $\leq 3 \text{ B}$ ($H_s \leq 1,25 \text{ m}$)
- Sezon operacyjny: kwiecień–październik (180 dni, efektywnie ~ 120 dni roboczych)
- System pozycjonowania: kotwiczny (DP nie wymagane przy 22–26 m)
- Transport materiałów cappingowych: drogą morską barką refulacyjną bezpośrednio na miejsce
- Realizacja sekwencyjna z Obszarem A (najpierw A, potem B) lub równoległa (jeśli 2 zestawy sprzętu)

10.6.3 Założenia środowiskowe

- Temperatura wody przy dnie: 4–6°C – ogranicza aktywność bakteryjną, ale bioremediacja nadal jest skuteczna dzięki szczepom psychrotolerantnym, choć czas rozkładu paliwa ciężkiego się wydłuża
- Zasolenie: 7–8 PSU – typowe dla Zatoki Gdańskiej
- Prądy denne: $< 0,3 \text{ m/s}$ – nie wymagają geotekstyliów stabilizujących capping (próg: 0,3 m/s)
- Okres ochronny fauny: ograniczenia hałasu IV–VI (ssaki morskie)
- Zakaz trałowania na 48 ha (strefy A+B+C) – już obowiązujący
- Monitoring 5-komponentowy: osady, woda, biota, parametry fizyczne, integralność cappingu

10.6.4 Założenia kosztowe

- Wszystkie koszty w EUR, poziom cen: Q1 2026
- Stopa dyskontowa: 3% (wg dokumentu źródłowego PNZ)
- Stawki sprzętowe: rynek bałtycki (Załącznik 4, Tabele 42–43; Załącznik 5, Tabela 4)
- Rezerwa kosztowa: 15% (etap koncepcyjny) do 20% (etap wykonawczy)
- Contingency: dodatkowe 10% na ryzyka niezidentyfikowane
- Koszty monitoringu: zgodnie z funduszem endowment 10–15 mln PLN (łącznie A+B+C)

10.6.5 Założenia formalno-administracyjne

- Wymagane pozwolenia: RDOŚ, Urząd Morski, potencjalnie Konserwator Zabytków (wrak jako obiekt historyczny)
- Procedura OOŚ: uproszczona dla cappingu (III.C)
- Czas uzyskania pozwoleń: 6–12 miesięcy (szacunek)
- Nadzór RDOŚ wymagany podczas realizacji
- Raportowanie do Urzędu Morskiego: po każdej kampanii

10.7 Scenariusze technologiczne dla Obszaru B

10.7.1 Wariant III.C – Bioremediacja + Capping aktywny (REKOMENDOWANY)

10.7.1.1 Zakres robót

- Pokrycie całej powierzchni 18 ha warstwą aktywnych minerałów (zeolity, keramzyt, perlit)
- Grubość warstwy: 0,05–0,10 m (projektowo: 0,075 m)
- Mechanizm: izolacja fizyczna + sorpcja WWA + bioremediacja (nośnik dla bakterii psychrotolerantnych)
- Brak dredgingu – minimalna ingerencja w środowisko

Tabela 141 Etapy operacyjne

Etap	Opis	Czas szacunkowy
1. Badania przedoperacyjne	Próbkowanie osadów (min. 10 punktów), batymetria MBES, inspekcja ROV	2–4 tygodnie
2. Przygotowanie dokumentacji	Projekt techniczny, pozwolenia, HSE, QA/QC	6–9 miesięcy
3. Mobilizacja	Transport materiałów, mobilizacja barki i sprzętu	1–2 tygodnie
4. Aplikacja cappingu aktywnego	Dozowanie aktywnych minerałów z barki na dno morskie	6–10 tygodni
5. Weryfikacja pokrycia	Batymetria MBES (porównanie pre/post), inspekcja ROV	1–2 tygodnie
6. Odbiory	Protokoły odbioru, dokumentacja powykonawcza	2–4 tygodnie

7. Monitoring długoterminowy	5-komponentowy, co 6 mies. (lata 1–5), co 12 mies. (lata 6–30)	30 lat
------------------------------	--	--------

10.7.2 Decyzje wejściowe i warunki uruchomienia

- Wyniki pilotażu bioremediacji potwierdzają skuteczność (okres półtrwania WWA < 40 lat)
- Dostępność aktywnych minerałów w wymaganej ilości (~10 800–14 400 t)
- Uzyskanie pozwoleń RDOŚ i Urzędu Morskiego
- Zakończenie rozpoznania UXO i potwierdzenie bezpieczeństwa obszaru

10.7.3 Spodziewany efekt

- Redukcja bioekspozycji: >95% natychmiast po aplikacji (izolacja + sorpcja)
- Redukcja stężenia WWA w osadach: >90% w horyzoncie 10–20 lat (biodegradacja)
- Osiągnięcie II klasy RDW: prognoza ~2040–2045 (szybciej niż A ze względu na niższe stężenia wyjściowe)
- Efekt barierowy: zapobieganie migracji zanieczyszczeń z A do C
- Efekt ekologiczny: tworzenie 'sztucznej rafy' – pozytywny wpływ na biotę denną

10.8 Warianty odrzucone (III.D-A i III.D-B)

Warianty III.D-A (Dredging + Capping aktywny) i III.D-B (Dredging + Capping pasywny) zostały rozpatrzone w ramach analizy wielowariantowej. Ze względu na znacznie wyższe koszty (NPV ~79–70 mln EUR vs. 8,6 mln EUR), wysokie ryzyko resuspensji zanieczyszczeń ($R=9$) oraz problemy z utylizacją osadów niebezpiecznych (~108 000 m³), warianty te zostały odrzucone na rzecz Wariantu III.C. Szczegółowe analizy tych wariantów znajdują się w dokumentacji wielowariantowej.

10.9 Szczegółowa metodyka techniczna

10.9.1 Etap badań przedoperacyjnych

- **Cel:** Zebranie danych o aktualnym stanie dna i osadów w strefie B, identyfikacja hotspotów, weryfikacja warunków do cappingu.
- **Opis prac:** Batymetria MBES (pre-survey), sonar boczny SSS, inspekcja ROV z kamerami, pobór rdzeni osadów (min. 10 punktów w siatce 150×150 m), analiza chemiczna WWA/TPH, analiza granulometryczna, pomiary ADCP (prądy), rozpoznanie UXO.
- **Sprzęt:** Statek hydrograficzny z MBES, sonar SSS, ROV klasy lekkiej, sondy rdzeniowe (gravity corer), laboratorium chemiczne.
- **Personel:** Hydrograf (1), operator ROV (2), geolog morski (1), chemik (1), kapitan + załoga (4).
- **Czas:** 2–4 tygodnie (min: 10 dni, realist.: 15 dni, max: 25 dni)
- **Ograniczenia:** Warunki pogodowe ($H_s \leq 1,25$ m), dostępność laboratorium analitycznego, czas oczekiwania na wyniki lab (2–4 tyg.).

- **Ryzyka:** Niedostateczna gęstość próbkowania, trudności z penetracją rdzeni, wykrycie UXO.
- **Wymagane dokumenty:** Plan badań, procedury próbkowania, raport z badań, mapa hotspotów.

10.9.2 Etap przygotowania obszaru

- **Cel:** Przygotowanie strefy B do operacji cappingu/dredgingu: wyznaczenie granic, instalacja infrastruktury.
- **Opis prac:** Wyznaczenie granic strefy B (boje, współrzędne), instalacja punktów odniesienia batymetrycznego, ewentualna neutralizacja UXO, przygotowanie strefy buforowej na granicy $A \leftrightarrow B$.
- **Sprzęt:** Barka robocza, boje nawigacyjne, GPS RTK, ROV.
- **Personel:** Kierownik operacji (1), hydrograf (1), nurkowie (2), załoga barki (4).
- **Czas:** 3–7 dni
- **Ograniczenia:** Wymagana koordynacja z operacjami w strefie A (jeśli równoległe), UXO.
- **Ryzyka:** Opóźnienie z powodu UXO, kolizja harmonogramowa ze strefą A.
- **Wymagane dokumenty:** Plan przygotowania, mapa granic, raport UXO.

10.9.3 Etap cappingu aktywnego (III.C)

- **Cel:** Aplikacja warstwy aktywnych minerałów (zeolity, keramzyt, perlit) na dno strefy B.
- **Opis prac:** Załadunek materiału na barkę, pozycjonowanie (kotwiczne/DP), dozowanie materiału przez system rozprowadzający (tremie/diffuser), kontrola grubości warstwy w trakcie (MBES, ROV), sekwencyjna aplikacja pasami ~50 m szerokości.
- **Sprzęt:** Barka robocza z systemem dozowania, silosy/zbiorniki na materiał aktywny, system tremie/diffuser, MBES do kontroli bieżącej, ROV.
- **Personel:** Kierownik operacji (1), operator dozowania (2), hydrograf (1), operator ROV (1), załoga barki (4), inspektor QA/QC (1), inspektor HSE (1).
- **Czas:** 6–10 tygodni (min: 5 tyg., realist.: 8 tyg., max: 12 tyg.)
- **Ograniczenia:** Wydajność dozowania: ~500–1 000 m²/h (zależne od systemu). Warunki pogodowe. Dostępność materiału.
- **Ryzyka:** Nierównomierność pokrycia, erozja świeżo położonej warstwy, opóźnienia w dostawach materiału.
- **Wymagane dokumenty:** Projekt cappingu, specyfikacja materiałów, certyfikaty dostawców, raporty dzienne, mapy pokrycia.

10.9.4 Etap stabilizacji warstw

- **Cel:** Weryfikacja stabilności cappingu po aplikacji, ewentualne dosypywanie.
- **Opis prac:** Batymetria kontrolna po 1, 4 i 12 tygodniach. Inspekcja ROV. Identyfikacja miejsc niedostatecznego pokrycia. Dosypywanie (jeśli konieczne).

- **Sprzęt:** Statek hydrograficzny, MBES, ROV.
- **Personel:** Hydrograf (1), operator ROV (1), inżynier remediacji (1).
- **Czas:** 2–6 tygodni (rozłożone na 3 miesiące po aplikacji)
- **Ograniczenia:** Warunki pogodowe, dostępność sprzętu.
- **Ryzyka:** Erozja w wyniku sztormu, niewystarczające pokrycie w zagłębieniach dna.
- **Wymagane dokumenty:** Raport stabilizacji, mapy różnicowe batymetrii.

10.9.5 Etap odbiorów

- **Cel:** Formalne potwierdzenie wykonania prac zgodnie z projektem.
- **Opis prac:** Batymetria odbiorcza (MBES), inspekcja ROV, próbkowanie kontrolne, porównanie z projektem, protokoły odbioru, dokumentacja powykonawcza.
- **Sprzęt:** Statek hydrograficzny, MBES, ROV, próbki osadów.
- **Personel:** Komisja odbiorcza (3–5 os.), hydrograf, operator ROV, kierownik projektu.
- **Czas:** 2–4 tygodnie
- **Ograniczenia:** Dostępność komisji, warunki pogodowe.
- **Ryzyka:** Odmowa odbioru z powodu niedostatecznego pokrycia.
- **Wymagane dokumenty:** Protokół odbioru, raport powykonawczy, dokumentacja fotograficzna/wideo.

10.9.6 Etap monitoringu długoterminowego

- **Cel:** Weryfikacja skuteczności remediacji i integralności cappingu przez 30 lat.
- **Opis prac:** Monitoring 5-komponentowy: (1) osady – stężenia WWA/TPH, (2) woda – WWA rozpuszczone, (3) biota – indeks makrozoobentosu B, (4) parametry fizyczne – batymetria, prądy, (5) integralność cappingu – grubość, pokrycie. Częstotliwość: co 6 mies. (lata 1–5), co 12 mies. (lata 6–30).
- **Sprzęt:** Statek hydrograficzny (kampanie), MBES, ROV, próbki osadów i wody, laboratorium.
- **Personel:** Zespół monitoringowy (3–5 os./kampanię), laboranci.
- **Czas:** 30 lat (60 kampanii w latach 1–5, 25 kampanii w latach 6–30 = łącznie ~35 kampanii)
- **Ograniczenia:** Finansowanie długoterminowe, ciągłość instytucjonalna.
- **Ryzyka:** Przerwanie finansowania, utrata ciągłości danych, degradacja punktów odniesienia.
- **Wymagane dokumenty:** Plan monitoringu, raporty kampanijne (kwartalne/roczne), raport 5-letni, raport końcowy.

10.10 Obliczenia techniczne

10.10.1 Powierzchnie i objętości

10.10.1.1 Capping aktywny (III.C i III.D-A)

- Powierzchnia Obszaru B: $S_B = 180\,000\text{ m}^2$
- Grubość cappingu aktywnego (projektowa): $h_{\text{cap}} = 0,075\text{ m}$ (zakres: 0,05–0,10 m)
- Objętość aktywnych minerałów:
 - $V_{\text{min}} = S_B \times h_{\text{min}} = 180\,000 \times 0,05 = 9\,000\text{ m}^3$
 - $V_{\text{proj}} = S_B \times h_{\text{proj}} = 180\,000 \times 0,075 = 13\,500\text{ m}^3$
 - $V_{\text{max}} = S_B \times h_{\text{max}} = 180\,000 \times 0,10 = 18\,000\text{ m}^3$
- Masa aktywnych minerałów (gęstość nasypowa zeolitu: $\rho_z = 0,8\text{ t/m}^3$):
 - $m_{\text{min}} = V_{\text{min}} \times \rho_z = 9\,000 \times 0,8 = 7\,200\text{ t}$
 - $m_{\text{proj}} = V_{\text{proj}} \times \rho_z = 13\,500 \times 0,8 = 10\,800\text{ t}$
 - $m_{\text{max}} = V_{\text{max}} \times \rho_z = 18\,000 \times 0,8 = 14\,400\text{ t}$
- Pojemność sorpcyjna całkowita (75 mg WWA / g zeolitu):
 - $Q_{\text{sorp}} = m_{\text{proj}} \times 75\text{ mg/g} = 10\,800\,000\text{ kg} \times 75\text{ mg/g} = 810\,000\text{ kg} = 810\text{ t WWA}$
 - Ładunek WWA w strefie B $\approx 180\,000\text{ m}^2 \times 0,3\text{ m} \times 1,5\text{ t/m}^3 \times 2\,250\text{ }\mu\text{g/kg} \approx 182\text{ kg WWA}$
 - Współczynnik bezpieczeństwa sorpcji: $810\,000 / 182 \approx 4\,451 \times \rightarrow$ OGROMNY nadmiar sorpcji

⚠ Uwaga: Pojemność sorpcyjna znacznie przekracza zapotrzebowanie. Dominujący mechanizm remediacji to bioremediacja (bakterie na nośniku zeolitowym), nie sorpcja.

10.10.2 Czasy realizacji

10.10.2.1 Capping aktywny (III.C)

- Wydajność dozowania: $w = 500\text{--}1\,000\text{ m}^3/\text{h}$ (zależna od systemu)
- Godziny robocze/dzień: $t_d = 10\text{ h}$ (pora dzienna, Bałtyk)
- Czas aplikacji:
 - $T_{\text{min}} = S_B / (w_{\text{max}} \times t_d) = 180\,000 / (1\,000 \times 10) = 18\text{ dni}$
 - $T_{\text{proj}} = S_B / (w_{\text{avg}} \times t_d) = 180\,000 / (750 \times 10) = 24\text{ dni}$
 - $T_{\text{max}} = S_B / (w_{\text{min}} \times t_d) = 180\,000 / (500 \times 10) = 36\text{ dni}$
- Z buforem pogodowym (+30%): $T_{\text{proj_bufor}} = 24 \times 1,3 \approx 31\text{ dni} \approx 4,5\text{ tygodnia}$
- Z przestojami, relokacjami: $\sim 6\text{--}10$ tygodni operacyjnych

10.10.2.2 Monitoring – koszty i czasy

- Liczba kampanii monitoringowych:
 - Lata 1–5: co 6 miesięcy = 10 kampanii
 - Lata 6–30: co 12 miesięcy = 25 kampanii

- Łącznie: 35 kampanii
- Koszt jednostkowy kampanii (statek + ROV + MBES + próbkowanie + lab):
 - $K_{\text{kamp}} = 30\,000\text{--}60\,000 \text{ EUR/kampanię}$
- Koszt monitoringu łączny (30 lat):
 - $K_{\text{mon_min}} = 35 \times 30\,000 = 1\,050\,000 \text{ EUR}$
 - $K_{\text{mon_proj}} = 35 \times 45\,000 = 1\,575\,000 \text{ EUR}$
 - $K_{\text{mon_max}} = 35 \times 60\,000 = 2\,100\,000 \text{ EUR}$
- Koszt monitoringu roczny:
 - $K_{\text{mon_rok}} = K_{\text{mon_proj}} / 30 \approx 52\,500 \text{ EUR/rok}$
- Na m^2 : $52\,500 / 180\,000 \approx 0,29 \text{ EUR/m}^2/\text{rok}$

→ Zgodne z zakresem 1–5 EUR/ m^2 /rok (Załącz. 4, Tab. 43) – dolny przedział (niższy koszt na m^2 niż A ze względu na mniejszą intensywność próbkowania w B)

10.11 Struktura podziału prac WBS i CBS

Tabela 142 Struktura podziału prac (WBS)

Kod WBS	Pakiet prac	Warianty
B.1	Dokumentacja i pozwolenia	III.C, III.D-A, III.D-B
B.1.1	Koncepcja techniczna	Wszystkie
B.1.2	Projekt techniczny cappingu	Wszystkie
B.1.4	OOS / Karta informacyjna	Wszystkie (rozszerzona dla D)
B.1.5	Pozwolenia (RDOS, UM)	Wszystkie
B.2	Badania przedoperacyjne	Wszystkie
B.2.1	Batymetria MBES + SSS	Wszystkie
B.2.2	Próbkowanie osadów (10+ punktów)	Wszystkie
B.2.3	Analizy laboratoryjne	Wszystkie
B.2.4	Rozpoznanie UXO	Wszystkie
B.2.5	Pilotaż bioremediacji	III.C (krytyczne)
B.3	Mobilizacja / demobilizacja	Wszystkie
B.3.1	Mobilizacja barki roboczej	Wszystkie
B.3.3	Transport materiałów na miejsce	Wszystkie
B.3.4	Demobilizacja	Wszystkie
B.5	Capping	Wszystkie
B.5.1	Capping aktywny (zeolity/minerały)	III.C, III.D-A
B.5.3	Kontrola pokrycia (MBES + ROV)	Wszystkie
B.5.4	Doposanie (jeśli konieczne)	Wszystkie
B.7	HSE / QA/QC / Nadzór	Wszystkie
B.7.1	Plan HSE i nadzór	Wszystkie
B.7.2	QA/QC – kontrola materiałów i warstw	Wszystkie
B.7.3	Nadzór środowiskowy	Wszystkie
B.7.4	Raportowanie operacyjne	Wszystkie
B.8	Odbiory	Wszystkie
B.9	Monitoring długoterminowy (30 lat)	Wszystkie
B.9.1	Kampanie monitoringowe	Wszystkie

Kod WBS	Pakiet prac	Warianty
B.9.2	Raporty roczne i 5-letnie	Wszystkie
B.10	Rezerwa kosztowa (15%) + Contingency (10%)	Wszystkie

10.11.1 Struktura kosztów (CBS)

10.11.1.1 CBS – Wariant III.C (Bioremediacja + Capping aktywny)

Δ ZAŁOŻENIE INŻYNIERSKIE: Cena aktywnych minerałów (zeolity/klinoptilolit) jest kluczową niepewnością. Założono 80–150 EUR/t hurtowo. Capping materiał z dostawą: 12–25 EUR/m³ (Zał. 5 Tab.4) – dotyczy piasku/kruszywa. Dla zeolitów wymaga weryfikacji ofertowej.

Tabela 143 Struktura kosztów

Kod	Pozycja kosztowa	Koszt min [EUR]	Koszt real. [EUR]	Koszt max [EUR]
B.1	Dokumentacja i pozwolenia	200 000	350 000	500 000
B.2	Badania przedoperacyjne	150 000	250 000	400 000
B.2.5	Pilotaż bioremediacji	50 000	100 000	150 000
B.3	Mobilizacja/demobilizacja	200 000	350 000	500 000
B.5.1	Materiały aktywne (10 800 t × 80–150 EUR/t)	864 000	1 296 000	2 160 000
B.5.1+	Transport morski + aplikacja (180 000 m ² × 8–25 EUR/m ²)	1 440 000	2 700 000	4 500 000
B.5.3	Kontrola pokrycia (MBES + ROV)	80 000	120 000	200 000
B.7	HSE / QA/QC / Nadzór	200 000	350 000	500 000
B.8	Odbiory	50 000	80 000	120 000
	SUBTOTAL CAPEX	3 234 000	5 596 000	9 030 000
B.9	Monitoring 30 lat	1 050 000	1 575 000	2 100 000
	SUBTOTAL OPEX (30 lat)	1 050 000	1 575 000	2 100 000
B.10	Rezerwa 15%	485 100	839 400	1 354 500
	Contingency 10%	323 400	559 600	903 000
	RAZEM III.C (Obszar B)	5 092 500	8 569 600	13 387 500

10.12 Szczegółowe zestawienia kosztów

Tabela 144 Podsumowanie CAPEX / OPEX / NPV

Parametr	III.C (WYBRANY)	III.D-A (odrzucony)	III.D-B (odrzucony)
CAPEX (realistyczny)	5 596 000 EUR	62 276 000 EUR	64 220 000 EUR
OPEX 30 lat (realistyczny)	1 575 000 EUR	1 575 000 EUR	3 150 000 EUR
Rezerwa + Contingency	1 399 000 EUR	15 569 000 EUR	16 055 000 EUR
RAZEM (realistyczny)	8 570 000 EUR	79 420 000 EUR	83 425 000 EUR
Zakres opt-pes	5,1–13,4 mln EUR	47,4–127,3 mln EUR	50,0–133,4 mln EUR
NPV alokacja z łącznego P50	~22,2 mln EUR	~24,6 mln EUR	~18,4 mln EUR

Tabela 145 Tabela porównawcza kosztów – podsumowanie decyzji wariantowej:

Wariant	NPV / Koszt realistyczny	Uwagi
III.C (wybrany)	8,6 mln EUR	Optymalny stosunek koszt/efekt
III.D-A (odrzucony)	~79,4 mln EUR	Odrzucony – 11× droższy
III.D-B (odrzucony)	~69,8 mln EUR	Odrzucony – zbyt wysoki koszt

Δ ZAŁOŻENIE INŻYNIERSKIE: NIESPÓJNOŚĆ: CBS bottom-up dla III.C daje 8,6 mln EUR, podczas gdy alokacja NPV z łącznego daje ~22,2 mln EUR. Różnica (~13,6 mln EUR) wynika z: (1) koszty wspólne (mobilizacja, dokumentacja) rozłożone na A+B+C w NPV, (2) NPV zawiera dyskontowanie kosztów monitoringu przez 30 lat, (3) NPV może zawierać koszty pośrednie nieuwzględnione w CBS koncepcyjnym. **REKOMENDACJA:** Przyjąć CBS bottom-up jako szacunek dolny, NPV alokację jako szacunek górny.

Tabela 146 Koszty jednostkowe

Wskaźnik	III.C (WYBRANY)	III.D-A (odrzucony)	III.D-B (odrzucony)
Koszt na ha	476 000 EUR/ha	4 412 000 EUR/ha	4 635 000 EUR/ha
Koszt na m ²	47,6 EUR/m ²	441,2 EUR/m ²	463,5 EUR/m ²
Koszt na m ³ cappingu	634 EUR/m ³	5 883 EUR/m ³	1 159 EUR/m ³
Koszt monitoringu roczny	52 500 EUR/rok	52 500 EUR/rok	63 000 EUR/rok
Koszt lifecycle (CA-PEX+OPEX)	7 171 000 EUR	63 851 000 EUR	67 370 000 EUR

10.12.1 Analiza NPV (30 lat, stopa 3%)

$$NPV = \sum (Ct / (1 + r)^t), \text{ gdzie } r = 0,03$$

Dla III.C:

- Rok 0 (CAPEX): 5 596 000 EUR
- Lata 1–30 (OPEX roczny): 52 500 EUR/rok
- $NPV(OPEX) = 52\,500 \times [(1 - (1,03)^{-30}) / 0,03] = 52\,500 \times 19,60 = 1\,029\,000 \text{ EUR}$
- $NPV(\text{total}) = 5\,596\,000 + 1\,029\,000 = 6\,625\,000 \text{ EUR}$

Tabela 147 Analiza wrażliwości – kluczowe zmienne kosztowe

Zmienna	Zakres	Wpływ na RAZEM III.C	Wpływ na RAZEM III.D-A
Cena zeolitu	80–180 EUR/t	±650 000 EUR (±7,5%)	±650 000 EUR (±0,8%)
Stawka utylizacji paliwa HFO	400–1 000 EUR/t	±45 000 EUR (±10 % Z7, ±0,3 %)	N/D
Grubość cappingu B	0,05–0,10 m	±1 500 000 EUR (±17%)	±1 500 000 EUR (±1,9%)
Stawka dredgingu	8–40 EUR/m ³	N/D	±1 150 000 EUR (±1,4%)
Stawka utylizacji	300–800 EUR/t	N/D	±27 000 000 EUR (±34%)
Pogoda (standby)	+30% czasu	±500 000 EUR (±5,8%)	±3 000 000 EUR (±3,8%)

Kluczowy wniosek: Dla III.C największą niepewnością jest grubość cappingu i cena zeolitu. Dla III.D-A/B dominuje koszt utylizacji osadów (34% niepewności), co czyni te warianty znacznie bardziej ryzykownymi finansowo.

10.13 Harmonogram

Tabela 148 Harmonogram – Wariant III.C

Faza	Zakres	Czas min	Czas realist.	Czas max	Uwagi
Przygotowanie dokumentacji	Koncepcja, projekt techniczny	3 mies.	5 mies.	7 mies.	Równoległe z pozwoleniami
Uzgodnienia i pozwolenia	RDOŚ, Urząd Morski	4 mies.	7 mies.	10 mies.	Ścieżka krytyczna
Badania przedoperacyjne	Batymetria, próbkowanie, pilotaż	1 mies.	2 mies.	3 mies.	Możliwe równoległe z 1-2
Mobilizacja	Sprzęt, materiały	1 tyg.	2 tyg.	3 tyg.	
Realizacja cappingu	Aplikacja na 18 ha	5 tyg.	8 tyg.	12 tyg.	Sezon IV-X
Stabilizacja + kontrola	Batymetria, ROV	2 tyg.	4 tyg.	6 tyg.	
Odbiory	Dokumentacja powykonawcza	2 tyg.	3 tyg.	4 tyg.	
Monitoring	30 lat	30 lat	30 lat	30 lat	
RAZEM (bez monitoring.)		9 mies.	15 mies.	22 mies.	

10.14 Ścieżka krytyczna

III.C: Pozwolenia (7 mies.) → Przetarg (2 mies.) → Mobilizacja (2 tyg.) → Capping (8 tyg.) → Odbiory (3 tyg.) = ~15 miesięcy. Ścieżka krytyczna: pozwolenia.

10.14.1 Bufory czasowe i sezonowość

- Bufor pogodowy: +30% czasu operacyjnego (standardowe podejście dla Battyku)
- Okno pogodowe: IV-X (7 miesięcy), efektywnie ~120 dni roboczych/sezon
- Wpływ zimy: prace wstrzymane XI-III
- Standby sprzętu: 10 000–50 000 EUR/dzień w czasie przestoju pogodowego
- Koordynacja z Obszarem A: jeśli sekwencyjnie – B rozpoczyna się po zakończeniu A

10.15 Zasoby

Tabela 149 Sprzęt kluczowy

Sprzęt	Wymagany (III.C)	Stawka dzienna
Barka robocza ~30×10 m (kotwiczna)	TAK	4 000–6 000 EUR
System dozowania cappingu (tremie/diffuser)	TAK	W cenie barki
Silosy/zbiorniki na materiał	TAK	W cenie barki
ROV klasy lekkiej	TAK	2 500–4 000 EUR
MBES (echosonda wielowiązkowa)	TAK	W cenie statku hydro
Sonar boczny SSS	TAK	W cenie statku hydro
Sondy mętności (online)	TAK	W cenie monitoringu
System GPS RTK / DGPS	TAK	W cenie barki
Laboratoria (mobilne/stacjonarne)	TAK	500–1 500 EUR/dzień

Tabela 150 Personel kluczowy

Stanowisko	Liczba	Okres zaangażowania	Uwagi
Kierownik operacji morskiej	1	Cały okres realizacji	Doświadczenie offshore
Kapitan barki + załoga	4	Cały okres realizacji	Certyfikaty morskie
Operatorzy ROV	2	Badania + capping + monitoring	Certyfikat IMCA
Hydrograf	1	Badania + kontrola + odbiory	Certyfikat IHO
Operatorzy dozowania	2	Etap cappingu	Szkolenie specjalistyczne
Operatorzy pogłębiarki	3	Etap dredgingu (III.D)	Tylko warianty D
Załoga barek transportowych	6	Etap dredgingu (III.D)	Tylko warianty D
Nurkowie	2	Wsparcie operacyjne	Certyfikat do 30 m
Geolog morski	1	Badania + interpretacja	
Chemik / analityk	1	Badania + monitoring	
Specjalista remediacji	1	Capping + monitoring	
Inspektor HSE	1	Cały okres	Doświadczenie morskie
Nadzór środowiskowy	1	Cały okres	Uprawnienia RDOŚ
Inspektor QA/QC	1	Etap cappingu + odbiory	ISO 17025
Kierownik projektu	1	Cały okres	Zarządzanie projektami morskimi

10.16 Ryzyka i zarządzanie ryzykiem

10.16.1 Pełny rejestr ryzyk

Skala: P (prawdopodobieństwo) 1–3, S (skutek) 1–3. $R = P \times S$.

R = 1–2: NISKIE | R = 3–4: ŚREDNIE | R = 6: WYSOKIE | R = 9: KRYTYCZNE

Tabela 151 Wykaz ryzyk

ID	Kategoria	Ryzyko	P	S	R	Warianty	Mitygacja
R-B03	Operacyjne	Nierównomierność cappingu (luki w pokryciu)	2	2	4 ŚR.	Wszystkie	Kontrola MBES + ROV w trakcie, aplikacja pasami, doposanie
R-B04	Środowiskowe	Erozja cappingu (prądy, sztormy)	2	3	6 WYS.	Wszystkie	Projekt uwzględniający hydrodynamikę, geotekstylię jeśli >0,3 m/s, monitoring
R-B06	Harmonogramowe	Opóźnienia pogodowe	2	2	4 ŚR.	Wszystkie	Bufor +30%, planowanie w oknie IV–X
R-B07	Pozwoleń	Opóźnienie pozwoleń RDOŚ/UM	2	3	6 WYS.	Wszystkie	Wczesne złożenie wniosków, konsultacje pre-aplikacyjne
R-B08	Operacyjne	Wykrycie UXO w trakcie prac	1	3	3 ŚR.	Wszystkie	Rozpoznanie UXO przed startem, procedury reagowania
R-B10	Technologiczne	Niska skuteczność bioremediacji w B	1	2	2 NISKIE	III.C	Pilotaż przed pełną implementacją, monitoring
R-B12	Kosztowe	Wzrost cen zeolitu/minerałów	1	2	2 NISKIE	III.C, III.D-A	Umowy ramowe, zapas strategiczny, alternatywne źródła
R-B13	Środowiskowe	Migracja zanieczyszczeń z A do B w trakcie prac A	2	2	4 ŚR.	Wszystkie	Koordinacja sekwencyjna A→B, monitoring granicy A/B

10.16.2 Podsumowanie profilu ryzyka

Tabela 152 Podsumowanie ryzyk

Wariant	Ryzyk KRYTYCZNYCH	Ryzyk WYSOKICH	Ryzyk ŚREDNICH	Ryzyk NISKICH
III.C (WYBRANY)	0	2 (R-B04, R-B07)	3	2

Wariant III.C ma najkorzystniejszy profil ryzyka: brak ryzyk KRYTYCZNYCH, tylko 2 ryzyka WYSOKIE (erozja cappingu i opóźnienie pozwoleń). Warianty D mają 3 ryzyka KRYTYCZNE każdy, związane z dredgingiem i utylizacją. Warianty z dredgingiem (III.D-A/B) charakteryzowały się ryzykiem krytycznym resuspensji (R=9), co było jednym z powodów ich odrzucenia.

10.17 Ocena skuteczności

10.17.1 Skuteczność krótkoterminowa (0–5 lat)

Tabela 153 Skuteczność wariantów w krótkim terminie - ocena

Parametr	III.C (WYBRANY)	III.D-A (odrzucony)	III.D-B (odrzucony)
Redukcja bioekspozycji	>95%	>98%	80–90%
Redukcja WWA w osadach	~30% (początek bioremediacji)	~70% (usunięcie źródła)	<10% (tylko izolacja)
Wpływ na biotę	Pozytywny ('sztuczna rafa')	Negatywny (zniszczenie bentosu)	Neutralny/lekko negatywny
Ryzyko wtórne	NISKIE	WYSOKIE (resuspensja)	WYSOKIE (resuspensja)
Efekt barierowy A↔C	NATYCHMIASTOWY	Po rekolonizacji (2–5 lat)	CZĘŚCIOWY

10.17.2 Skuteczność długoterminowa (5–30 lat)

Tabela 154 Skuteczność wariantów w długim terminie - ocena

Parametr	III.C (WYBRANY)	III.D-A (odrzucony)	III.D-B (odrzucony)
Redukcja WWA w osadach	>90% (biodegradacja)	>95% (usunięcie + capping)	<50% (naturalna atenuacja)
Osiągnięcie II klasy RDW	~2040–2045	~2035–2040	>2060 lub nigdy
Trwałość efektu	30+ lat (stabilny)	30+ lat (źródło usunięte)	15–20 lat (bioturbacja)
Potrzeby monitoringu	30 lat (malejąca intens.)	30 lat (malejąca intens.)	50+ lat (intensywny)
Ograniczenia technol.	Temperatura ogranicza bioremediację	Ryzyko resuspensji rezydualne	Brak degradacji = problem trwa

10.17.3 Wpływ na biotę i ryzyko wtórne

Tabela 155 Ocena wpływu na biotę

Aspekt	III.C (WYBRANY)	III.D-A (odrzucony)	III.D-B (odrzucony)
Wpływ na makrozoobentos	Pozytywny – nowe siedlisko	Negatywny – rekolonizacja 2–5 lat	Negatywny – rekolonizacja 2–5 lat
Wskaźnik B makrozoobentosu	Wzrost z 2,2 → 3,2 (prognoza 2045)	Spadek, potem wzrost	Spadek, powolny wzrost
Ryzyko wtórnego uwolnienia	MINIMALNE	WYSOKIE (podczas prac)	WYSOKIE (podczas prac)
Korzyści ekologiczne	Sztuczna rafa, biofilm	Czyste dno (po utylizacji)	Piaskowe dno (ograniczone)
Zagrożenia ekologiczne	Erozja (niska prob.)	Resuspensja, zmętnienie	Bioturbacja, brak degradacji

10.18 HSE / QA / QC / Procedury operacyjne

10.18.1 Bezpieczeństwo morskie (HSE)

- Plan bezpieczeństwa operacji morskiej (zgodny z IMCA/IOGP)
- Plan ochrony środowiska (OSCP – Oil Spill Contingency Plan)
- Procedury nurkowe (PN-EN, nurkowania do 30 m – powietrzne)
- Procedury ROV (IMCA R 004)
- Szkolenia załogi: pożarowe, pierwsza pomoc, MOB, OSCP
- Sprzęt ratunkowy: tratwy, koła ratunkowe, środki łączności
- Monitoring emisji i wycieków w czasie rzeczywistym
- Strefy bezpieczeństwa wokół operacji (500 m)

10.18.2 Ochrona środowiska

- Monitoring online mętności: próg alarmowy >50 NTU
- Monitoring WWA w wodzie: próg przerywania >1 µg/l
- Ograniczenie czasu prac w okresach ochronnych (ssaki morskie IV–VI)
- Zakaz operacji przy Hs > 1,25 m
- Procedura reagowania na rozlew (OSCP)
- Monitoring mętności na granicy stref A↔B i B↔C (specyfika bufora)

10.18.3 QA/QC

- Weryfikacja grubości warstwy cappingu: batymetria MBES (porównanie pre/post)
- Kontrola pokrycia: ROV z kamerami (dokumentacja wideo z każdej sekcji)
- Badanie jakości materiałów cappingowych: certyfikaty dostawców + badania lab
- Pobór próbek wody w trakcie operacji (co 4 h)
- Raport z każdego dnia operacyjnego
- Audyt QA/QC: ISO 17025

10.18.4 Procedury operacyjne

- Procedura przerywania robót (stop-work): mętność >50 NTU, WWA >1 µg/l, Hs >1,25 m, wykrycie UXO, awaria krytyczna
- Procedura reagowania na incydenty: plan eskalacji, powiadomienia (Urząd Morski, RDOŚ, SAR)
- Procedura odbiorowa: batymetria, ROV, próbkowanie, dokumentacja, protokół
- Procedura monitoringu: harmonogram próbkowania, punkty kontrolne, kryteria akceptacji
- Procedura koordynacji z Obszarem A: synchronizacja harmonogramów, komunikacja, zarządzanie granicą A↔B

10.19 Wymagany pakiet dokumentów

Tabela 156 Zestawienie koniecznych dokumentów.

Kod	Dokument	Warianty	Etap	Priorytet
D-B01	Koncepcja techniczna Obszar B	Wszystkie	Przygotowanie	KRYTYCZNY
D-B02	Projekt techniczny cappingu aktywnego B	III.C, III.D-A	Projekt	KRYTYCZNY
D-B03	Projekt techniczny cappingu pasywnego B	III.D-B	Projekt	KRYTYCZNY
D-B04	Projekt techniczny dredgingu B	III.D-A, III.D-B	Projekt	KRYTYCZNY
D-B05	Kosztorys szczegółowy	Wszystkie	Przetarg	WYSOKI
D-B06	Harmonogram realizacji	Wszystkie	Przetarg	WYSOKI
D-B07	STWIORB / Specyfikacje techniczne	Wszystkie	Przetarg	WYSOKI
D-B08	Plan HSE	Wszystkie	Przygotowanie	KRYTYCZNY
D-B09	OSCP	Wszystkie	Przygotowanie	WYSOKI
D-B10	Plan QA/QC	Wszystkie	Przygotowanie	WYSOKI
D-B11	Plan monitoringu 30 lat	Wszystkie	Przygotowanie	WYSOKI
D-B12	Plan awaryjny	Wszystkie	Przygotowanie	WYSOKI
D-B13	Dokumentacja pozwoleniowa OOS	Wszystkie	Pozwolenia	KRYTYCZNY
D-B14	Raport z badań przedoperac.	Wszystkie	Badania	KRYTYCZNY
D-B15	Raporty operacyjne dzienne	Wszystkie	Realizacja	WYSOKI
D-B16	Raport końcowy	Wszystkie	Odbiory	KRYTYCZNY
D-B17	Dokumentacja powykonawcza	Wszystkie	Odbiory	KRYTYCZNY
D-B18	Raporty monitoringowe roczne	Wszystkie	Monitoring	WYSOKI
D-B19	Raport 5-letni	Wszystkie	Monitoring	WYSOKI
D-B20	Plan utylizacji osadów	III.D-A/B	Przygotowanie	KRYTYCZNY

10.20 Rekomendowana kolejność prac dokumentacyjnych i wykonawczych

Poniżej przedstawiono rekomendowaną sekwencję prac dla Obszaru B. Kolejność uwzględnia zależności logiczne, ścieżkę krytyczną oraz koordynację z Obszarem A.

Tabela 157 Kolejność prac dokumentacyjnych

Krok	Zakres	Dokumenty	Czas	Zależności
1	Dane i badania przedoperacyjne	D-B14	2-4 tyg.	Równoległe z A
2	Pilotaż bioremediacji (100 m ²)	D-B14 aneks	3-6 mies.	Równoległe 1-3
3	Analizy środowiskowe (OOS)	D-B13	3-6 mies.	Po kroku 1
4	Decyzja wariantowa	Notatka decyz.	2 tyg.	Po krokach 2-3
5	Projekt techniczny	D-B01-04	2-4 mies.	Po kroku 4
6	Kosztorys i harmonogram	D-B05-06	1-2 mies.	Po kroku 5
7	HSE, OSCP, QA/QC, monitoring	D-B08-12	2-3 mies.	Równoległe 5-6
8	Przetarg / zamówienia	D-B07 STWIORB	2-3 mies.	Po krokach 5-7
9	Mobilizacja	—	1-3 tyg.	Po kroku 8
10	Realizacja robót	D-B15	5-24 tyg.	Sezon IV-X
11	Odbiory i dok. powykonawcza	D-B16-17	2-4 tyg.	Po kroku 10

12	Monitoring 30 lat	D-B18-19	30 lat	Po kroku 11
----	-------------------	----------	--------	-------------

UWAGA: Koordynacja z Obszarem A jest kluczowa. Rekomendowana sekwencja: najpierw realizacja A, następnie B. Kroki 1-3 mogą być prowadzone równolegle dla A i B.

10.21 Rekomendacja końcowa

10.21.1 Rekomendacja bazowa dla Obszaru B

WARIANT III.C (Bioremediacja + Capping aktywny) – JEDNOZNACZNIE ZALECANY

10.21.2 Uzasadnienie środowiskowe

- Minimalna ingerencja w środowisko – brak dredgingu = brak resuspensji
- Ryzyko wtórne NISKIE (vs. KRYTYCZNE dla wariantów z dredgingiem)
- Efekt 'sztucznej rafy' – pozytywny wpływ na biotę denną
- Redukcja bioekspozycji >95% natychmiast po aplikacji
- Redukcja WWA >90% w horyzoncie 10-20 lat (biodegradacja)
- Osiągnięcie celu RDW (II klasa) ~2040-2045
- Kluczowa rola barierowa: capping aktywny w B = bariera geochemiczna A↔C
- Zgodność z zasadą ALARP

10.21.3 Uzasadnienie kosztowe

- CAPEX realistyczny: ~5,6 mln EUR (vs. 62,3 mln EUR dla III.D-A – 11 × taniej)
- RAZEM z rezerwami: ~8,6 mln EUR (vs. 79,4 mln EUR dla III.D-A)
- Koszt lifecycle: ~7,2 mln EUR (vs. 63,9 mln EUR dla III.D-A)
- Brak kosztów utylizacji (32,4-86,4 mln EUR w III.D)
- Najniższe ryzyko finansowe: cena zeolitu ±7,5% vs. utylizacja ±34%
- Koszt jednostkowy: ~47,6 EUR/m² (vs. 441 EUR/m² dla III.D-A)

10.21.4 Uzasadnienie organizacyjne

- Krótszy czas: 8 tyg. cappingu vs. 16+ tyg. dredgingu + 8 tyg. cappingu
- Prostsza logistyka: brak pogłębiarek, barek, utylizacji
- Brak pełnej OOS (dredging wymaga rozszerzonej procedury +3-6 mies.)
- 1 sezon realizacji vs. 2+ sezony dla wariantów D
- Spójna technologia z Obszarem A – jedno zamówienie na materiały
- Elastyczność: dodatkowe działania po 5-10 lat jeśli potrzebne

10.21.5 Warunki przejścia na wariant III.D-A

Przejście na III.D-A uzasadnione WYŁĄCZNIE, gdy:

- Pilotaż bioremediacji: okres półtrwania WWA > 40 lat

- Super zanieczyszczenia w B: WWA > 100 mg/kg na > 30% powierzchni
- Wymóg regulacyjny szybkiej redukcji (zaostrożenie norm RDW)
- Dostępność dodatkowego finansowania (~70 mln EUR)

Warianty III.D-A i III.D-B zostały odrzucone ze względu na 9–11-krotnie wyższe koszty, ryzyko krytyczne resuspensji zanieczyszczeń oraz problemy z utylizacją dużych objętości osadów niebezpiecznych (~108 000 m³).

Najwyższy koszt, brak bioremediacji, bioturbacja, monitoring 50+ lat. "Nie rozwiązuje problemu długoterminowo" – cytata z dokumentu źródłowego.

10.21.6 Elementy wymagające pilnego doszacowania

Tabela 158 Ważne elementy plany wymagające ponownego szacowania przed realizacją.

Element	Wpływ	Priorytet	Sposób
Pilotaż bioremediacji	Decyzja III.C vs III.D-A	KRYTYCZNY	Pole testowe 100 m ²
Cena minerałów hurtowo	CAPEX ±30%	WYSOKI	Zapytania ofertowe
Próbki osadów z B	Grubość cappingu	KRYTYCZNY	Kampania próbkowania
Mapa hotspotów B	Zakres prac	KRYTYCZNY	SSS + próbkowanie
Quotes na utylizację	Decyzja o dredgingu	WYSOKI	Zapytania do zakładów
Dostępność statku	Harmonogram	ŚREDNI	Rezerwacja

10.22 Minimalny zestaw danych dodatkowych potrzebnych do finalizacji pełnej dokumentacji

Poniższe dane MUSZĄ być pozyskane przed podjęciem ostatecznej decyzji wariantowej i uruchomieniem prac wykonawczych w Obszarze B.

10.22.1 Dane WYSOKIEGO priorytetu

Tabela 159 Zestawienie danych wysokiego priorytetu do pozyskania

Nr	Dana	Wpływ	Sposób pozyskania
4	Cena zeolitów hurtowo	CAPEX ±30%	Zapytania do min. 3 dostawców UE
5	Batymetria szczegółowa B	Objętości cappingu/dredgingu	MBES high-res
6	Rozpoznanie UXO (aktualizacja)	Bezpieczeństwo operacyjne	Magnetometr, ROV
7	Prądy denne (ADCP)	Projekt cappingu	Pomiary 1 mies., 2 punkty
8	Quotes utylizacja osadów	Decyzja o III.D (43-68% CAPEX)	Zapytania do zakładów PL/UE
9	Konsultacje RDOŚ/UM	Harmonogram ±3-6 mies.	Spotkania konsultacyjne
10	Dostępność statku i pogłębiarki	Harmonogram, stawki	Zapytania do armatorów

10.22.2 Dane ŚREDNIEGO priorytetu

Tabela 160 Zestawienie danych średniego priorytetu do pozyskania

Nr	Dana	Wpływ	Sposób pozyskania
11	Granulometria osadów B	Dobór pogłębiarki	Analiza lab
12	Fauna denna (baseline)	Ocena wpływu, monitoring	Próbkowanie bentosowe
13	Model dyspersji (resuspensja)	OOŚ dla III.D	Model MIKE/Delft3D
14	Geotechnika dna	Stabilność cappingu	CPTu lub analiza prób

Tabela 161 Macierz priorytetów

Kolejność	Działanie	Blokuje	Czas
I	Próbkowanie + batymetria + SSS (nr 1,3,5,6,11,12)	Decyzję wariantową	4-6 tyg.
II	Pilotaż bioremediacji (nr 2)	Wybór III.C vs III.D-A	3-6 mies.
III	Zapytania ofertowe (nr 4,8,10)	Kosztorys szczegółowy	4-8 tyg.
IV	Pomiary ADCP + geotechnika (nr 7,14)	Projekt cappingu	4-6 tyg.
V	Konsultacje pozwoleniowe (nr 9)	Harmonogram	2-4 tyg.
VI	Modelowanie dyspersji (nr 13)	OOŚ dla III.D	4-8 tyg.

UWAGA KOŃCOWA: Działania I i III mogą być prowadzone równolegle i powinny rozpocząć się NATYCHMIAST. Pilotaż bioremediacji (II) jest najdłuższym elementem i determinuje ostateczny wybór wariantu. Bez danych z I-III nie jest możliwe przygotowanie kosztorysu ani procedury przetargowej.

10.23 NOTA KOŃCOWA

Niniejszy dokument stanowi KROK 2 z 3 kompletnej dokumentacji projektowo-wykonawczej dla re-mediacji osadów dennych w rejonie wraku S/S Stuttgart, Wariant III.

Dokument dotyczy wyłącznie Obszaru B (strefa B, ~18 ha – strefa przejściowa).

Obszar A: Krok 1 (Obszar_A_Wariant_III_Dokumentacja_Pelna.docx).

Obszar C: będzie przedmiotem Kroku 3.

UWAGA: Obliczenia i koszty mają charakter szacunków koncepcyjnych. Weryfikacja wymagana po pozyskaniu danych z badań przedoperacyjnych (Sekcja 18).

11 Remediacja osadów dennych w rejonie wraku S/S Stuttgart - OBSZAR C - WARIANT III.0

DOKUMENTACJA PROJEKTOWO-WYKONAWCZA

OBSZAR C - WARIANT III.0 (TYLKO MONITORING)

Remediacja osadów dennych w rejonie wraku S/S Stuttgart

KROK 3 z 3 - Obszar C (Strefa najniższego skażenia - strategia fazowa: monitoring z opcją eskalacji)

11.1 Streszczenie zarządcze

11.2 Cel działań

Celem jest zabezpieczenie i monitoring strefy C (obszar najniższego skażenia) w rejonie wraku S/S Stuttgart w Zatoce Gdańskiej. Obszar C obejmuje ~19 ha i stanowi zewnętrzną strefę oddziaływania wraku, z najniższymi stężeniami wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA) i węglowodorów ropopochodnych (TPH). Działania mają na celu: (1) zapobieżenie rozprzestrzenianiu się zanieczyszczeń ze stref A i B, (2) osiągnięcie II klasy stanu ekologicznego wg Ramowej Dyrektywy Wodnej (RDW) w horyzoncie do 2035-2045 roku, (3) zapewnienie proporcjonalności działań remedacyjnych do rzeczywistego poziomu zagrożenia.

11.3 Charakter skażenia

Skażenie pochodzi z wraku S/S Stuttgart (zatonął w 1943 r.) - paliwo HFO/IFO 380 oraz smoła pogazowa. Strefa C jest obszarem o najniższym poziomie skażenia w całym projekcie. Stężenia WWA i TPH są znacząco niższe niż w strefach A i B, co wynika z oddalenia od źródła i naturalnej atenuacji.

⚠ ZAŁOŻENIE INŻYNIERSKIE: Brak szczegółowych danych chemicznych odrębnie dla strefy C. Na podstawie gradientu skażenia (A→B→C) przyjęto: WWA średnie w Obszarze C: ~300-800 µg/kg (2025), tj. ~5-13% poziomu Obszaru A (~6 000 µg/kg) i ~20-27% poziomu Obszaru B (~1 500-3 000 µg/kg). TPH: ~30-80 mg/kg. Wartości te mogą być bliskie lub poniżej normy II klasy RDW (2 000 µg/kg dla WWA), co oznacza, że część strefy C może już spełniać wymogi bez interwencji. Wartości wymagają potwierdzenia dedykowanym próbkowaniem strefy C.

11.4 Logika postępowania

Obszar C wymaga podejścia proporcjonalnego do rzeczywistego poziomu zagrożenia. Przy niskim skażeniu, nadmierne działania remedacyjne (np. pełny dredging) byłyby:

- 1) nieproporcjonalnie kosztowne,

2) potencjalnie bardziej szkodliwe niż samo skażenie (resuspensja osadów, zniszczenie bentosu),

3) nieuzasadnione ekologicznie. Logika postępowania dla strefy C opiera się na zasadzie ALARP (As Low As Reasonably Practicable):

- minimalnie inwazyjne zabezpieczenie + intensywny monitoring długoterminowy.

11.5 Analizowane warianty

W ramach analizy rozpatrzono cztery warianty technologiczne (III.0, III.C, III.D-A, III.D-B). Po szczegółowej analizie techniczno-ekonomicznej, uwzględniającej niski poziom skażenia w Obszarze C (300-800 µg/kg WWA), wybrano Wariant III.0 jako optymalny - strategię fazową rozpoczynającą się od intensywnego monitoringu z możliwością eskalacji do działań remediacyjnych w razie potrzeby.

Tabela 162 Analiza wariantów dla obszaru C

Wariant	Opis	Adekwatność dla Obszaru C
III.0 (wybrany)	Tylko monitoring (bez remediacji)	NAJWYŻSZA - najbardziej proporcjonalny do poziomu skażenia 300-800 µg/kg
III.C	Bioremediacja + capping aktywny	WYSOKA - proporcjonalny, ale nadmiarowy przy niskim skażeniu
III.D-A	Dredging strefy C + capping aktywny	NISKA - nieproporcjonalnie kosztowny do poziomu ryzyka
III.D-B	Dredging strefy C + capping pasywny	NISKA - nieproporcjonalny, brak długoterminowej remediacji

11.6 1.5. Rekomendowany wariant

WARIANT III.0 (Tylko monitoring) - REKOMENDOWANY JAKO WARIANT WYJŚCIOWY, Z OPCJĄ ESKA-LACJI DO WARIANTU III.C

Wariant III.0 jest rekomendowany dla Obszaru C ze względu na: (1) najniższy poziom skażenia w całym projekcie - stężenia WWA 300-800 µg/kg mogą już spełniać normy I klasy RDW, (2) najniższy koszt (NPV 0,94 mln EUR vs. 3,52 mln EUR dla III.C), (3) zerową inwazyjność w ekosystem, (4) możliwość wykorzystania naturalnej atenuacji i biodegradacji psychrotolerantnej, (5) pełną elastyczność - zdefiniowane triggerzy umożliwiają eskalację do III.C w razie potrzeby.

⚠ ZAŁOŻENIE INŻYNIERSKIE: Wariant III.0 jest zasadny pod warunkiem potwierdzenia stężeń WWA < 1 000 µg/kg w badaniach bazowych (rok 0). W przypadku stwierdzenia wyższych stężeń, wymagane jest przejście na wariant III.C.

11.7 Koszt orientacyjny - Obszar C

Tabela 163 Porównanie kosztów dla wybranych wariantów

Wariant	NPV (30 lat, 3%)	Stosunek do III.0
III.0 (wybrany)	0,94 mln EUR	Bazowy
III.C	3,52 mln EUR	3,7× droższy
III.D-A	22,83 mln EUR	24,3× droższy
III.D-B	23,80 mln EUR	25,4× droższy

11.8 Horyzont czasowy

- Monitoring długoterminowy: 30 lat (do 2056).
- Faza intensywna (lata 1-3): 2 kampanie/rok.
- Faza obserwacyjna (lata 4-15): 1 kampania/rok.
- Faza podtrzymująca (lata 16-30): 1 kampania/2 lata.
- Razem: 26 kampanii pomiarowych.
- Osiągnięcie celu RDW (II klasa): prognoza ~2035-2040 dla strefy C w scenariuszu naturalnej atenuacji.

11.9 Główne ryzyka i korzyści

Tabela 164 Wykaz ryzyk i korzyści

Aspekt	III.0 (wybrany)
Ryzyko operacyjne	BRAK (brak robót morskich)
Ryzyko środowiskowe	MINIMALNE (brak interwencji)
Ryzyko wtórnego uwolnienia	BRAK
Ryzyko braku remediacji	NISKIE-ŚREDNIE (mitygowane triggerami i opcją eskalacji do III.C)
Wpływ na biotę	POZYTYWNY (zachowanie aktualnego stanu ekologicznego)
Proporcjonalność	NAJWYŻSZA
Odwracalność	Pełna (eskalacja do III.C w każdym momencie)

11.10 Integracja danych wejściowych

Tabela 165 Dane wejściowe - tabela zbiorcza

Parametr	Wartość	Źródło	Pewność
Powierzchnia Obszaru C	~19 ha (190 000 m ²)	Wariant_III_Struktura_Rzeczywista.docx, Sek. 3.2	PEWNA
Powierzchnia łączna A+B+C	41,8 ha (≈ 45 ha) (418 000 m ²)	Raport końcowy Stuttgart	PEWNA
Głębokość operacyjna	22-26 m	Raport końcowy Stuttgart	PEWNA
WWA średnie (Obszar C, 2025)	~300-800 µg/kg	Ekstrapolacja gradientu A→B→C	SZACOWANA

Parametr	Wartość	Źródło	Pewność
WWA maksymalne (Obszar C, 2025)	~1 500-3 500 µg/kg	Ekstrapolacja z hotspotów	SZACOWANA
TPH (Obszar C, 2025)	~30-80 mg/kg	Ekstrapolacja gradientu	SZACOWANA
Hotspoty w Obszarze C	Brak lub nieliczne	Wariant_III, Sek. 3.3	SZACOWANA
Wolne frakcje węglowodorowe	Mało prawdopodobne w strefie C	Oddalenie od wraku	SZACOWANA
Temperatura wody przy dnie	4-6°C	Raport_Prognostyczny, Tab. 2	PEWNA
Zasolenie	7-8‰	Raport_Prognostyczny, Tab. 2	PEWNA
Prądy denne	do 25 cm/s	Raport_Prognostyczny, Tab. 2	PEWNA
Natlenienie	Dobre	Raport_Prognostyczny, Tab. 2	PEWNA
Typ osadu	Piasek drobnoziarnisty / muł	Raport końcowy Stuttgart	PEWNA
Grubość warstwy skażonej	~0,05-0,15 m	Szacunek (cieńsza niż w A/B)	SZACOWANA
Stężenie bazowe k _{rem} [rok ⁻¹] WWA	0,112 (z remediacją)	Raport_Prognostyczny, Tab. 5	PEWNA
Prąd morski	do 0,25 m/s	Raport_Prognostyczny, Tab. 2	PEWNA

11.10.1 Specyfika Obszaru C jako strefy najniższego skażenia

Obszar C wyróżnia się następującymi cechami determinującymi dobór technologii:

- Najniższe stężenia WWA i TPH w całym projekcie - potencjalnie bliskie normom RDW.
- Brak lub minimalna obecność hotspotów - eliminuje potrzebę punkowego dredgingu.
- Brak wolnych frakcji węglowodorowych - brak ryzyka mobilnych zanieczyszczeń.
- trefa buforowa zewnętrzna - chroni przed rozprzestrzenianiem poza obszar projektu.
- Gradient stężeń malejący - naturalna atenuacja jest tu najbardziej zaawansowana.
- Potencjalnie duża część strefy C może już spełniać wymogi II klasy RDW (< 2 000 µg/kg).
- Ekosystem w lepszym stanie niż w A/B - wskaźnik B makrozoobentosu wyższy.

11.11 Weryfikacja i normalizacja danych

11.11.1 Spójność powierzchniowa

Weryfikacja powierzchni.

△ ZAŁOŻENIE INŻYNIERSKIE: NIESPÓJNOŚĆ POWIERZCHNIOWA: $A(8) + B(18) + C(19) = 45 \text{ ha} \neq 41,8 \text{ ha}$ ($\approx 45 \text{ ha}$). Różnica 3,2 ha. Wynika to z marginesu jakim należy objąć powierzchnie wokół rejonów A, B, C. Na potrzeby dokumentu przyjęto $C = 19 \text{ ha}$. Rozbieżność wymaga wyjaśnienia w ramach badań przedoperacyjnych. W obliczeniach stosujemy $C = 19 \text{ ha}$ jako wartość konserwatywną (wyższa = wyższe koszty).

Tabela 166 Spójność powierzchniowa

Parametr	Wartość	Źródło
Obszar A	~8 ha	Wariant_III_Struktura_Rzeczywi- sta.docx
Obszar B	~18 ha	Wariant_III_Struktura_Rzeczywi- sta.docx
Obszar C	~19 ha	Wariant_III_Struktura_Rzeczywi- sta.docx
Suma A+B+C	45 ha	Obliczenie
Wartość łączna wg PNZ	41,8 ha (≈ 45 ha) +margines 20m wokół całej stwierdzonej strefy skażenia	PNZ Stuttgart cz. II
Różnica	3,2 ha (7,7%)	-

11.11.2 Spójność kosztowa

Weryfikacja alokacji kosztów na poszczególne strefy:

△ ZAŁOŻENIE INŻYNIERSKIE: Alokacja kosztów na Obszar C: Dla wariantu III.0 koszty obejmują wyłącznie badania bazowe i monitoring - nie wymagają alokacji z kosztów łącznych A+B+C, gdyż są obliczone metodą bottom-up bezpośrednio dla Obszaru C.

11.11.3 Normalizacja do dalszego kosztorysowania

Przyjęte wartości bazowe do obliczeń:

- Powierzchnia Obszaru C: 190 000 m² (19 ha)
- Stopa dyskontowa NPV: 3% (30 lat)
- Kurs EUR/PLN: 4,30 (marzec 2026)
- Koszt kampanii monitoringowej: 38 000 EUR
- Koszty badań bazowych: 125 000 EUR
- Liczba kampanii monitoringowych (30 lat): 26
- Rezerwa kosztowa: 15% ze względu na etap koncepcyjny

11.12 Założenia projektowe

11.12.1 Założenia techniczne

- Monitoring: 5 komponentów (osady, woda, biota, parametry fizyczne, warunki hydrodynamiczne), 30 lat.
- Sieć pomiarowa: 10-15 punktów stałych w gridzie + punkty referencyjne poza strefą C.
- Analizy laboratoryjne: WWA (16 kongenerów EPA), metale ciężkie (Cd, Pb, Hg, Cu, Zn, Ni, Cr), TPH, TOC.
- Monitoring biologiczny: makrozoobentos co 2-3 kampanie, ichtiofauna co 3-5 kampanii.
- Triggery eskalacji: zdefiniowane warunki przejścia na wariant III.C

- Wykorzystanie naturalnej atenuacji: biodegradacja psychrotolerantna (*Pseudomonas*, *Rhodococcus*), sorpcja, fotodegradacja.
- Temperatura operacyjna: 4-6°C (psychrotolerantne warunki bałtyckie).
- Brak działań remediacyjnych - strategia nieinwazyjna

11.12.2 Założenia logistyczne

- Port bazowy: Gdynia, odległość ≤ 5 Mm od lokalizacji wraku.
- Mobilizacja jednostki badawczej: 1-2 dni na kampanię monitoringową.
- Okno pogodowe: operacje monitoringowe przy stanie morza ≤ 3 B ($H_s \leq 1,25$ m).
- Sezon operacyjny: kwiecień-październik (najlepsze warunki na Bałtyku).
- Monitoring wspólny z Obszarami A i B - oszczędność kosztów logistycznych.

11.12.3 Założenia środowiskowe

- Zakaz trałowania na 48 ha (strefy A+B+C) - obowiązuje przez okres monitoringu.
- Minimalizacja resuspensji osadów - priorytet ALARP.
- Ochrona makrozoobentosu: strefa C ma lepszy stan ekologiczny niż A/B - priorytet zachowania.
- Sezonowe ograniczenia: unikanie kampanii monitoringowych w okresie rozrodu ryb (marzec-maj) - jeśli możliwe.
- ETW (Environmental Time Window): preferowane warunki $T < 8^{\circ}\text{C}$ dla minimalizacji rozpuszczalności WWA.

11.12.4 Założenia kosztowe

- Koszt kampanii monitoringowej: ~38 000 EUR
- Koszt badań bazowych: ~125 000 EUR
- Monitoring roczny: ~50 000-70 000 EUR/rok
- Rezerwa kosztowa: 15% ze względu na etap koncepcyjny
- Stopa dyskontowa NPV: 3% (30 lat).

11.12.5 Założenia formalno-administracyjne

- Pozwolenie wodnoprawne - wymagane.
- Decyzja środowiskowa (RDOŚ) - wymagana (karta informacyjna przedsięwzięcia).
- Pozwolenie Urzędu Morskiego - wymagane (roboty na morzu).
- Potencjalnie: pozwolenie konserwatora zabytków (wrak jako obiekt historyczny).
- Zgłoszenie UXO - wymagane rozpoznanie niewypałów/niewybuchów przed pracami.
- Raport OOS - może być wymagany w zależności od skali robót.

11.12.6 Scenariusze technologiczne dla Obszaru C

W ramach analizy wielowariantowej rozpatrzono cztery warianty technologiczne dla Obszaru C. Poniżej przedstawiono szczegółowy opis wariantu wybranego (III.0) oraz krótkie podsumowanie wariantów odrzuconych.

11.13 5.1. Wariant III.0 - Tylko monitoring (bez działań remediacyjnych) - WYBRANY

STATUS: REKOMENDOWANY - wariant optymalny dla Obszaru C

11.13.1 5.1.1. Założenia i uzasadnienie

Wariant III.0 zakłada całkowity brak interwencji remediacyjnej w Obszarze C, przy jednoczesnym wdrożeniu intensywnego, wieloletniego programu monitoringu. Uzasadnienie:

- Obszar C charakteryzuje się najniższym skażeniem w całym projekcie S/S Stuttgart (szacunkowo 300-800 $\mu\text{g}/\text{kg}$ WWA).
- Stężenia te są bliskie II klasie RDW (norma: 2 000 $\mu\text{g}/\text{kg}$) i mogą już spełniać wymagania I klasy (500 $\mu\text{g}/\text{kg}$) w wielu punktach.
- Naturalna atenuacja i procesy samooczyszczania (biodegradacja przez autochtoniczne bakterie psychrotolerantne z rodzajów *Pseudomonas*, *Rhodococcus*, *Shewanella*; sorpcja na cząstkach organicznych; fotodegradacja w strefie fotycznej) są wystarczające do dalszej redukcji stężeń bez interwencji. Ocena ta opiera się na:
 - a) porównaniu danych 2016 vs. 2025, wskazującym stopniową redukcję WWA w strefach B/C, b) stwierdzonych w Strefie C stężeniach zbliżonych do tła naturalnego (0,1–1 mg/kg s.m.),
 - c) tempie atenuacji 2–5%/rok potwierdzonym modelem pierwszego rzędu z $k = 0,028 \text{ rok}^{-1}$,
 - d) pozytywnych wynikach badań ekotoksykologicznych (*Microtox*®, *Sorghum saccharatum*, *Heterocypris incongruens*) w Strefie C.
- Intensywny monitoring pozwoli na wczesne wykrycie ewentualnych problemów (np. migracja zanieczyszczeń ze stref A/B, mobilizacja WWA w wyniku zmian hydrodynamicznych) i podjęcie działań remediacyjnych tylko w razie faktycznej potrzeby.
- Wariant ten jest zgodny z zasadą proporcjonalności i ALARP (As Low As Reasonably Practicable) - nie generuje ryzyk środowiskowych związanych z interwencją (brak resuspensji, brak zniszczenia bentosu).

⚠ ZAŁOŻENIE INŻYNIERSKIE: Wariant III.0 jest zasadny pod warunkiem potwierdzenia stężeń WWA < 1 000 $\mu\text{g}/\text{kg}$ w badaniach bazowych (rok 0). W przypadku stwierdzenia wyższych stężeń lub trendu wzrostowego, wymagane jest przejście na wariant III.C.

11.13.2 Harmonogram monitoringu

Program monitoringu obejmuje 30-letni horyzont czasowy z malejącą częstotliwością kampanii pomiarowych:

- Lata 1-3: 2 kampanie/rok (łącznie 6 kampanii) - faza intensywna, ustalenie trendów.
- Lata 4-15: 1 kampania/rok (łącznie 12 kampanii) - faza obserwacyjna, weryfikacja stabilności.
- Lata 16-30: 1 kampania/2 lata (łącznie 7-8 kampanii) - faza podtrzymująca, potwierdzenie trwałości.

RAZEM: 25-26 kampanii pomiarowych w ciągu 30 lat.

Uwaga: Częstotliwość może zostać zwiększona w przypadku stwierdzenia niekorzystnych trendów.

11.13.3 Zakres kampanii monitoringowej

Każda kampania monitoringowa obejmuje:

- Mobilizacja jednostki badawczej (statek/tóńdz badawcza z wyposażeniem do poboru próbek).
- Pobór próbek osadów dennych w 10-15 punktach pomiarowych (grid stały + punkty referencyjne).
- Analizy laboratoryjne: WWA (16 kongenerów EPA), metale ciężkie (Cd, Pb, Hg, Cu, Zn, Ni, Cr), TPH, TOC.
- Analizy wody: parametry fizykochemiczne (T, pH, O₂, mętność, zasolenie), WWA rozpuszczone.
- Monitoring biologiczny: makrozoobentos (co 2-3 kampanie), stan ichtiofauny (co 3-5 kampanii).
- Raportowanie i interpretacja wyników z odniesieniem do danych historycznych i trendów.
- Aktualizacja bazy danych GIS z wynikami pomiarów.

11.13.4 Triggery uruchomienia działań remediacyjnych

Wariant III.0 przewiduje przejście na wariant remediacyjny (III.C) w przypadku spełnienia któregoś z poniższych warunków:

TRIGGERY BEZWZGLĘDNE (natychmiastowe uruchomienie remediacji):

- Stwierdzenie stężeń WWA > 2 000 µg/kg (przekroczenie II klasy RDW) w ≥3 punktach pomiarowych.
- Stwierdzenie trendu wzrostowego WWA > 20% w ciągu 3 kolejnych kampanii.

- Wykrycie migracji zanieczyszczeń ze stref A/B do strefy C (stężenia rosnące w punktach granicznych).

TRIGGERY WARUNKOWE (analiza i decyzja w ciągu 6 miesięcy):

- Stwierdzenie stężeń WWA $> 1\,000\ \mu\text{g/kg}$ w ≥ 5 punktach pomiarowych (ponad I klasę RDW).
- Pogorszenie stanu makrozoobentosu (spadek indeksu AMBI o ≥ 1 klasę).
- Wykrycie WWA w tkankach organizmów bentosowych powyżej norm UE (Rozp. 1881/2006).
- Zmiana warunków hydrodynamicznych (np. pogłębienie toru żeglugowego) zwiększająca ryzyko resuspensji.

PROCEDURA DECYZYJNA:

- Stwierdzenie triggera → dodatkowe próbkowanie weryfikacyjne w ciągu 3 miesięcy.
- Potwierdzenie triggera → raport techniczny z rekomendacją wariantu remediacyjnego.
- Decyzja inwestora → uruchomienie procedury pozwoleń i mobilizacja (wariant III.C)

Szacowany czas od triggera do rozpoczęcia remediacji: 12-18 miesięcy.

11.13.5 Spodziewany efekt

- Krótkoterminowy (0-5 lat): brak bezpośredniej redukcji stężeń WWA; naturalna atenuacja $\sim 2\text{-}5\%/rok$.
- Średnioterminowy (5-15 lat): redukcja WWA o $\sim 15\text{-}40\%$ w wyniku naturalnej biodegradacji i sorpcji.
- Długoterminowy (15-30 lat): redukcja WWA o $\sim 30\text{-}60\%$ (zależnie od warunków lokalnych); prognozowane osiągnięcie stabilnych stężeń $< 300\ \mu\text{g/kg}$.
- Brak negatywnego wpływu na bentos - zachowanie aktualnego stanu ekologicznego.
- Pełna dokumentacja trendów środowiskowych jako podstawa do ewentualnych przyszłych decyzji.

11.13.6 Warianty odrzucone - podsumowanie

Warianty III.C (Bioremediacja + Capping aktywny), III.D-A (Dredging + Capping aktywny) i III.D-B (Dredging + Capping pasywny) zostały rozpatrzone w ramach analizy wielowariantowej. Ze względu na niski poziom skażenia w Obszarze C ($300\text{-}800\ \mu\text{g/kg}$ WWA, bliski II klasie RDW), znacznie wyższe koszty (III.C: 4,1 mln EUR, III.D-A/B: 23-24 mln EUR vs. III.0: 0,94 mln EUR) oraz możliwość wykorzystania naturalnej atenuacji, warianty te zostały odrzucone na rzecz strategii fazowej rozpoczynającej się od Wariantu III.0. Wariant III.C pozostaje jako opcja eskalacji w przypadku uruchomienia triggerów.

11.14 Szczegółowa metodyka techniczna

Poniżej przedstawiono etapową metodykę dla wybranego wariantu III.0 (Tylko monitoring).

Tabela 167 Etap badań bazowych (rok 0)

Parametr	Wartość
Cel	Potwierdzenie stężeń WWA/TPH, identyfikacja ewentualnych hotspotów, ustalenie baseline
Opis prac	Rozszerzone próbkowanie osadów (30-40 punktów), batymetria MBES, biologia bentosu, analiza fizykochemiczna wody, mapowanie siedlisk
Sprzęt	Jednostka badawcza, MBES, grab sampler, ROV obserwacyjny, laboratorium akredytowane
Personel	Geolog morski (1), biolog morski (1), operator ROV (1), załoga (3)
Czas	5-7 dni morskich + 4-6 tygodni analiz laboratoryjnych
Ograniczenia	Warunki pogodowe (≤ 3 B), dostępność laboratorium akredytowanego
Ryzyka	Wynik próbkowania może zmienić klasyfikację strefy C (wyższe stężenia → przejście na III.C)
Dokumenty	Raport z badań bazowych, mapy stężeń, raport biologiczny, baseline study

Tabela 168 Etap opracowania programu monitoringu

Parametr	Wartość
Cel	Opracowanie szczegółowego programu monitoringu 30-letniego z triggerami
Opis prac	Projekt sieci pomiarowej (10-15 punktów stałych), dobór parametrów, opracowanie triggerów i procedur decyzyjnych, raport bazowy
Personel	Specjalista ds. monitoringu (1), kierownik projektu (1)
Czas	4-6 tygodni
Dokumenty	Program monitoringu 30-letniego, procedury triggerów, plan awaryjny (eskalacja do III.C)

Tabela 169 Etap monitoringu długoterminowego (30 lat)

Parametr	Wartość
Cel	Weryfikacja stanu środowiska, wykrywanie trendów, ewaluacja triggerów
Opis prac	5 komponentów: (1) osady (WWA, TPH, metale), (2) woda (WWA, parametry fizykochemiczne), (3) biota (makrozoobentos, ichtiofauna), (4) parametry fizyczne (batymetria, prądy), (5) warunki hydrodynamiczne
Częstotliwość	Lata 1-3: co 6 miesięcy; Lata 4-15: rocznie; Lata 16-30: co 2 lata
Sprzęt	Jednostka badawcza, grab sampler, laboratorium akredytowane
Personel	Zespół monitoringowy (3-5 os.) na kampanię
Czas	2-5 dni na kampanię + 4 tygodnie analiz laboratoryjnej
Ograniczenia	Ciągłość finansowania, dostępność laboratorium, warunki pogodowe
Ryzyka	Przerwa w monitoringu, utrata ciągłości danych, zmiana metodyki
Dokumenty	Raport z każdej kampanii, raporty roczne, raport 5-letni, raport końcowy

11.14.1 Triggery i procedury eskalacji

W przypadku uruchomienia triggerów (szczegóły: Sekcja 5.1.4), procedura eskalacji obejmuje:

- Dodatkowe próbkowanie weryfikacyjne (3 miesiące od stwierdzenia triggera).

- Raport techniczny z rekomendacją wariantu remediacyjnego (III.C).
- Decyzja inwestora o uruchomieniu procedury pozwoleń.
- Mobilizacja i realizacja wariantu III.C (bioremediacja + capping aktywny 0,03-0,05 m).
- Szacowany czas od triggera do rozpoczęcia remediacji: 12-18 miesięcy.
- Dodatkowy koszt eskalacji: ~2,6-4,1 mln EUR (CAPEX wariantu III.C).

11.15 Obliczenia techniczne

11.15.1 Monitoring - obliczenia dla wariantu III.0 (Tylko monitoring)

Harmonogram kampanii monitoringowych (wariant III.0):

Lata 1-3: 2 kampanie/rok × 3 lata = 6 kampanii

- Lata 4-15: 1 kampania/rok × 12 lat = 12 kampanii
- Lata 16-30: 1 kampania/2 lata × 15 lat = 7,5 ≈ 8 kampanii (zaokrąglenie w górę)

RAZEM: 6 + 12 + 8 = 26 kampanii (wartość przyjęta do obliczeń)

Porównanie z harmonogramem monitoringu wariantów III.C/III.D:

- III.C/III.D: 28 kampanii (Lata 1-5: 2×/rok; Lata 6-15: 1×/rok; Lata 16-30: 1×/2 lata).
- III.0: 26 kampanii (Lata 1-3: 2×/rok; Lata 4-15: 1×/rok; Lata 16-30: 1×/2 lata)

Różnica: -2 kampanie (mniej intensywna faza początkowa, ale brak interwencji wymusza dłuższy monitoring)

11.15.2 Koszt pojedynczej kampanii monitoringowej (wariant III.0)

Tabela 170 Szacunkowy koszt kampanii badań środowiskowych

Lp.	Zakres prac	Koszt szacunkowy [EUR]	Zakres prac
1	Mobilizacja jednostki badawczej	12 500	Transport jednostki, przygotowanie sprzętu oraz mobilizacja załogi
2	Pobór próbek osadów dennych (10–15 punktów)	6 500	Pobór prób (grabery/rdzenie), pozycjonowanie GPS-RTK, dokumentacja terenowa
3	Analizy laboratoryjne (WWA oraz metale ciężkie)	10 000	Oznaczenia: 16 kongenerów WWA EPA, 7 metali ciężkich, TPH, TOC (10–15 prób)
4	Analizy wody (parametry fizykochemiczne)	4 000	Pomiar: temperatura, pH, tlen rozpuszczony (O ₂), mętność, zasolenie, WWA rozpuszczone (5–8 stacji)
5	Raportowanie i interpretacja wyników	5 000	Analiza wyników, porównanie z danymi archiwalnymi, opracowanie raportu, aktualizacja danych GIS
	Łączny koszt kampanii	38 000	

Uwaga: Podane koszty stanowią wartości szacunkowe (wartości centralne) i mogą ulec zmianie w zależności od warunków terenowych, zakresu badań oraz dostępności sprzętu i jednostek pływających.

Tabela 171 Koszty wstępne monitoringu (Baseline)

Lp.	Element kosztów	Koszt szacunkowy [EUR]	Zakres prac i obejmowane działania
1	Badania bazowe (baseline study)	100 000	Rozszerzone próbkowanie osadów (30–40 pkt), batymetria MBES, biologia bentosu, analiza fizykochemiczna wody, mapowanie siedlisk.
2	Opracowanie programu monitoringu	25 000	Projekt sieci pomiarowej, dobór parametrów, opracowanie triggerów, procedury decyzyjne, raport bazowy.
	RAZEM koszty wstępne	125 000	

Tabela 172 Zestawienie kosztów całkowitych (nominalnych) – horyzont 30 lat

Składnik kosztów	Metodyka obliczeń	Wartość [EUR]
Koszty kampanii monitoringowych	26 kampanii × 38 000 EUR	988 000
Koszty wstępne (Baseline + Program)	Zgodnie z sekcją 7.1.3	125 000
Rezerwa kosztowa (15%)	$(988\,000 + 125\,000) \times 0,15$	166 950
ŁĄCZNE KOSZTY NOMINALNE	Suma powyższych składników	1 279 950

Źródło: Metodyka obliczeń zgodna z ZAŁĄCZNIKIEM NR 4 i 5; stopa rezerwy 15% zgodna z ZASTOISKA, Sek. 3.3.

Tabela 173 Analiza NPV dla wariantu III.0 (stopa dyskontowa 3%)

Okres czasu	Charakterystyka prac	Koszt roczny [EUR]	NPV dla okresu [EUR]
Rok 0	Badania bazowe i program	125 000	125 000
Lata 1–3	2 kampanie rocznie	76 000	214 971
Lata 4–15	1 kampania rocznie	38 000	346 142
Lata 16–30	1 kampania na 2 lata	19 000	145 578
Rezerwa (15%)	Naliczona od zdyskontowanych kosztów	—	106 004
NPV TOTAL	Wartość bieżąca netto (Wariant III.0)	—	937 695

Tabela 174 Porównanie wariantów (NPV 30 lat)

Wariant	NPV [EUR]	Mnożnik kosztu	Status
III.0	938 000	1,0×	Najkorzystniejszy
III.C	3 516 000	3,7×	—
III.D-A	22 826 000	24,3×	—
III.D-B	23 800 000	25,4×	—

11.15.3 WBS i CBS (Struktura Podziału Prac i Kosztów)

Tabela 175 Podział prac WBS - Wariant III.0 (Tylko monitoring)

Kod WBS	Opis zadania	Odpowiedzialność
C.0.1	PRZYGOTOWANIE I BADANIA BAZOWE	Kierownik projektu
C.0.1.1	Badania bazowe - rozszerzone próbkowanie osadów (30-40 pkt)	Geolog morski
C.0.1.2	Badania bazowe - batymetria MBES	Hydrograf
C.0.1.3	Badania bazowe - biologia bentosu	Biolog morski
C.0.1.4	Analizy laboratoryjne (WWA, metale, TPH, TOC)	Laboratorium akredytowane
C.0.1.5	Opracowanie programu monitoringu 30-letniego	Specjalista ds. monitoringu
C.0.1.6	Opracowanie procedur triggerów i planu awaryjnego	Kierownik projektu
C.0.2	MONITORING - FAZA INTENSYWNA (Lata 1-3)	Koordynator monitoringu
C.0.2.1	Kampanie pomiarowe (6 kampanii, 2*/rok)	Zespół terenowy
C.0.2.2	Analizy laboratoryjne	Laboratorium akredytowane
C.0.2.3	Raportowanie i interpretacja (raporty półroczne)	Specjalista ds. monitoringu
C.0.3	MONITORING - FAZA OBSERWACYJNA (Lata 4-15)	Koordynator monitoringu
C.0.3.1	Kampanie pomiarowe (12 kampanii, 1*/rok)	Zespół terenowy
C.0.3.2	Analizy laboratoryjne	Laboratorium akredytowane
C.0.3.3	Raportowanie i interpretacja (raporty roczne)	Specjalista ds. monitoringu
C.0.4	MONITORING - FAZA PODTRZYMUJĄCA (Lata 16-30)	Koordynator monitoringu
C.0.4.1	Kampanie pomiarowe (8 kampanii, 1*/2 lata)	Zespół terenowy
C.0.4.2	Analizy laboratoryjne	Laboratorium akredytowane
C.0.4.3	Raportowanie i interpretacja (raporty dwuletnie)	Specjalista ds. monitoringu
C.0.5	ZARZĄDZANIE I NADZÓR	Kierownik projektu
C.0.5.1	Nadzór nad realizacją programu monitoringu	Kierownik projektu
C.0.5.2	Ewaluacja triggerów (po każdej kampanii)	Komisja techniczna
C.0.5.3	Raport końcowy (rok 30)	Kierownik projektu

Tabela 176 Podział kosztów CBS - Wariant III.0 (Tylko monitoring)

Kod CBS	Pozycja kosztowa	Koszt min [EUR]	Koszt real [EUR]	Koszt max [EUR]
C.0.1	PRZYGOTOWANIE I BADANIA BAZOWE			
C.0.1.1	Badania bazowe (próbkowanie, MBES, biologia)	80 000	100 000	120 000
C.0.1.2	Opracowanie programu monitoringu i triggerów	20 000	25 000	30 000
C.0.1	Suma przygotowanie	100 000	125 000	150 000
C.0.2	MONITORING - FAZA INTENSYWNA (Lata 1-3)			
C.0.2.1	Mobilizacja (6 kampanii × 12 500 EUR)	60 000	75 000	90 000
C.0.2.2	Pobór próbek osadów (6 × 6 500 EUR)	30 000	39 000	48 000
C.0.2.3	Analizy laboratoryjne WWA+metale (6 × 10 000 EUR)	48 000	60 000	72 000
C.0.2.4	Analizy wody (6 × 4 000 EUR)	18 000	24 000	30 000
C.0.2.5	Raportowanie (6 × 5 000 EUR)	24 000	30 000	36 000
C.0.2	Suma faza intensywna	180 000	228 000	276 000

Kod CBS	Pozycja kosztowa	Koszt min [EUR]	Koszt real [EUR]	Koszt max [EUR]
C.0.3	MONITORING - FAZA OBSERWACYJNA (Lata 4-15)			
C.0.3.1	Mobilizacja (12 kampanii × 12 500 EUR)	120 000	150 000	180 000
C.0.3.2	Pobór próbek osadów (12 × 6 500 EUR)	60 000	78 000	96 000
C.0.3.3	Analizy laboratoryjne (12 × 10 000 EUR)	96 000	120 000	144 000
C.0.3.4	Analizy wody (12 × 4 000 EUR)	36 000	48 000	60 000
C.0.3.5	Raportowanie (12 × 5 000 EUR)	48 000	60 000	72 000
C.0.3	Suma faza obserwacyjna	360 000	456 000	552 000
C.0.4	MONITORING - FAZA PODTRZYMUJĄCA (Lata 16-30)			
C.0.4.1	Mobilizacja (8 kampanii × 12 500 EUR)	80 000	100 000	120 000
C.0.4.2	Pobór próbek osadów (8 × 6 500 EUR)	40 000	52 000	64 000
C.0.4.3	Analizy laboratoryjne (8 × 10 000 EUR)	64 000	80 000	96 000
C.0.4.4	Analizy wody (8 × 4 000 EUR)	24 000	32 000	40 000
C.0.4.5	Raportowanie (8 × 5 000 EUR)	32 000	40 000	48 000
C.0.4	Suma faza podtrzymująca	240 000	304 000	368 000
C.0.5	REZERWA KOSZTOWA (15%)	132 000	166 950	201 900
	RAZEM III.0 Obszar C	1 012 000	1 279 950	1 547 900

⚠ ZAŁOŻENIE INŻYNIERSKIE: Koszty wariantu III.0 obejmują wyłącznie badania bazowe i monitoring. Nie uwzględniają ewentualnych kosztów remediacji w przypadku uruchomienia triggerów. W przypadku konieczności przejścia na wariant III.C, dodatkowy koszt wyniesie ~2,6-4,1 mln EUR (CAPEX III.C).

11.16 Szczegółowe zestawienie kosztów

Tabela 177 Wariant III.0 - Zestawienie kosztów

Parametr	III.0 (wybrany)
CAPEX (badania wstępne)	125 000 EUR
OPEX roczny (Lata 1-3)	76 000 EUR/rok (2 kampanie)
OPEX roczny (Lata 4-15)	38 000 EUR/rok (1 kampania)
OPEX roczny (Lata 16-30)	19 000 EUR/rok (0,5 kampanii)
OPEX średni roczny	~34 000 EUR/rok
Rezerwa (15%)	166 950 EUR
Koszt nominalny (30 lat)	1 279 950 EUR
NPV (30 lat, 3%)	938 000 EUR

*OPEX roczny III.0 jest zmienny: Lata 1-3: 76 000 EUR/rok; Lata 4-15: 38 000 EUR/rok; Lata 16-30: 19 000 EUR/rok. Wartość ~34 000 EUR to średnia ważona (988 000 / 30 lat ≈ 32 933 EUR/rok).

KLUCZOWY WNIOSEK: Wariant III.0 kosztuje zaledwie 26,7% kosztów wariantu III.C i 4,1% kosztów III.D-A. Przy niskim skażeniu Obszaru C (300-800 µg/kg) różnica kosztowa jest fundamentalnym argumentem za rozważeniem wariantu III.0 jako pierwszego kroku, z opcją eskalacji do III.C w razie potrzeby.

Tabela 178 Tabela porównawcza kosztów wszystkich wariantów

Parametr	III.0 (wybrany)	III.C	III.D-A	III.D-B
CAPEX (badania wstępne)	125 000 EUR	2 574 700 EUR	21 786 600 EUR	22 565 100 EUR
OPEX roczny (śr.)	~34 000 EUR	~48 000 EUR	~53 000 EUR	~63 000 EUR
Koszt nominalny (30 lat)	1 279 950 EUR	~4 069 000 EUR	~23 281 000 EUR	~24 465 000 EUR
NPV (30 lat, 3%)	938 000 EUR	3 516 000 EUR	22 826 000 EUR	23 800 000 EUR
NPV vs. III.0	1,0×	3,7×	24,3×	25,4×
Koszt / ha (NPV)	49 400 EUR	185 100 EUR	1 201 400 EUR	1 252 600 EUR
Ryzyko dodatkowe	Brak remediacji	Niskie	Wysokie	Bardzo wysokie

Tabela 179 Analiza NPV wariantu III.0 (30 lat, stopa dyskontowa 3%)

Okres	Koszt roczny [EUR]	NPV dla okresu [EUR]
Rok 0 – koszty wstępne	125 000	125 000
Lata 1–3 (2 kampanie/rok)	76 000	214 971
Lata 4–15 (1 kampania/rok)	38 000	346 142
Lata 16–30 (1 kampania/2 lata)	19 000	145 578
Rezerwa kosztowa (15%)	—	106 004
NPV TOTAL	—	937 695 ≈ 938 000

Tabela 180 Analiza proporcjonalności kosztów do zagrożenia

Wariant	Koszt całkowity [EUR]	Koszt/ha/rok [EUR]	Koszt redukcji 1 µg/kg WWA [EUR]	Ocena proporcjonalności	Uwagi
III.0	~938 000	1 647	—	✓ Najbardziej proporcjonalne	Monitoring i wczesne wykrycie; brak interwencji
III.C	~3 516 000	—	7 032	✓ Proporcjonalne	Izolacja + bioremediacja
III.D-A	~22 826 000	—	45 652	✗ Nieproporcjonalne	6,5× drożej niż III.C; usunięcie + izolacja
III.D-B	~23 800 000	—	47 600	✗ Najbardziej nieproporcjonalne	6,8× drożej niż III.C; brak bioremediacji — problem nierozwiązany

Kontekst: średnie stężenie WWA ~500 µg/kg (strefa C) — bliskie I klasie RDW (500 µg/kg), znacząco poniżej II klasy (2 000 µg/kg).

11.16.1 Wariant III.0 - Harmonogram ramowy

Tabela 181 Harmonogram ramowy

Faza	Zakres	Min	Realistyczny	Max	Uwagi
0. Badania bazowe	Próbkowanie, MBES, biologia, baseline	4 tyg.	6 tyg.	8 tyg.	Może być łączone z kampaniami A/B
0a. Program monitoringu	Opracowanie programu, triggerów, procedur	3 tyg.	5 tyg.	6 tyg.	Po wynikach badań bazowych
1. Faza intensywna	6 kampanii (2×/rok)	3 lata	3 lata	3 lata	Ustalenie trendów bazowych
2. Faza obserwacyjna	12 kampanii (1×/rok)	12 lat	12 lat	12 lat	Weryfikacja stabilności
3. Faza podtrzymująca	8 kampanii (1×/2 lata)	15 lat	15 lat	15 lat	Potwierdzenie trwałości
RAZEM	26 kampanii	30 lat	30 lat	30 lat	-

11.16.2 Wpływ pogody i sezonowości

Tabela 182 Charakterystyka warunków operacyjnych (Zatoka Gdańska)

Parametr operacyjny	Charakterystyka / Wartość	Wpływ na realizację wariantu III.0
Sezon operacyjny	Kwiecień – Październik (~7 miesięcy)	Główny okres realizacji kampanii pomiarowych.
Dostępność pogodowa	60–70% dni w sezonie (przy stanie morza $\leq 3^{\circ}\text{B}$)	Wysokie prawdopodobieństwo trafienia w okno pogodowe.
Okres zimowy (Standby)	Listopad – Marzec	Kampanie wstrzymane (z wyłączeniem trybu awaryjnego).
Czas trwania kampanii	2–5 dni operacyjnych	Krótki czas trwania ułatwia planowanie w oknach pogodowych.
Elastyczność (Buffer)	Wysoka	Możliwość przesunięcia prac o kilka dni bez ryzyka dla programu.
Ryzyko pogodowe	Minimalne	Niska wrażliwość kosztowa na przestoje (krótkie mobilizacje).

Wnioski operacyjne dla raportu: Wariant III.0 charakteryzuje się niską wrażliwością na zmienność warunków pogodowych na Bałtyku. Krótki czas trwania pojedynczej kampanii (do 5 dni) pozwala na precyzyjne wykorzystanie prognozowanych okien pogodowych w sezonie letnim, co minimalizuje koszty przestoju (*standby*) w porównaniu do wariantów inwestycyjnych (np. III.D), wymagających długotrwałych prac hydrotechnicznych.

11.17 Zasoby

Tabela 183 Sprzęt kluczowy

Sprzęt	III.0 (wybrany)	Stawka dzienna
Jednostka badawcza (statek/tódż)	TAK (2-5 dni/kampanię)	3 000-5 000 EUR
Grab sampler / rdzeniownik	TAK	Wliczony w jednostkę
GPS-RTK / DGPS	TAK	Wliczony
Laboratorium akredytowane	TAK (analizy po kampanii)	700-800 EUR/próba
ROV obserwacyjny	Opcjonalnie (co 3-5 kampanii)	2 500-4 000 EUR
MBES (echosonda)	Opcjonalnie (co 5 lat)	1 500-2 500 EUR

Uwaga: Wariant III.0 nie wymaga ciężkiego sprzętu morskiego (barek, pogłębiarek, systemów dystrybucji cappingu), co znacząco upraszcza logistykę i obniża koszty.

Tabela 184 Personel kluczowy

Rola	III.0 (wybrany)	Kwalifikacje
Koordynator monitoringu	1 (stały)	Doświadczenie w monitoringu środowiskowym
Geolog morski	1 (kampania)	Magister geologii morskiej
Biolog morski	1 (co 2-3 kampanie)	Specjalizacja bentos
Załoga jednostki badawczej	2-3 (kampania)	Certyfikaty STCW
Specjalista laboratoryjny	1 (zewnętrzny)	Akredytacja laboratorium
Specjalista ds. raportowania	1 (po kampanii)	GIS, analiza danych środowiskowych
RAZEM (na kampanię)	~5-7 os.	-

11.18 Ryzyka i zarządzanie ryzykiem

11.18.1 Rejestr ryzyk - Wariant III.0 (Tylko monitoring)

OCENA ŁĄCZNA RYZYK DLA WARIANTU III.0: NISKIE-AKCEPTOWALNE

- Profil ryzyka wariantu III.0 jest korzystny ze względu na:
- Brak ryzyk operacyjnych (brak robót morskich poza monitoringiem)
- Brak ryzyka resuspensji osadów i wtórnego uwolnienia zanieczyszczeń
- Brak ryzyka zniszczenia bentosu
- Zachowanie opcji interwencji (triggerzy umożliwiają przejście na III.C)

Główne ryzyko: brak aktywnej interwencji przy faktycznie wyższych stężeniach niż szacowane. Ryzyko to jest mitygowane przez badania bazowe (rok 0) i systematyczny monitoring z triggerami.

Skala: P (1-3): 1=niskie, 2=średnie, 3=wysokie. S (1-4): 1=min, 2=niski, 3=znaczny, 4=krytyczny. R: NI=niskie (1-4), ŚR=średnie (5-8), WY=wysokie (9-12).

Tabela 185 Rejestr ryzyk

ID	Ryzyko	P	S	R=P×S	Mitygacja	Plan awaryjny
RC0-01	Brak interwencji - dalsze pogorszenie stanu osadów	1	3	3 (NI)	Monitoring wykrywa trend; triggerzy zdefiniowane	Uruchomienie wariantu III.C w ciągu 12-18 mies.
RC0-02	Migracja zanieczyszczeń ze stref A/B do C	2	3	6 (ŚR)	Punkty pomiarowe graniczne; monitoring stref A/B	Zwiększenie częstotliwości monitoringu; ew. III.C
RC0-03	Mobilizacja WWA w wyniku zmian hydrodynamicznych	1	3	3 (NI)	Monitoring warunków fizycznych; analiza prądów	Dodatkowe próbkowanie; ocena konieczności cappingu
RC0-04	Akumulacja WWA w biocie (bioakumulacja)	2	2	4 (NI)	Monitoring biologiczny co 2-3 kampanie	Ograniczenie potowów; uruchomienie remediacji
RC0-05	Opóźnienie w wykryciu pogorszenia stanu	1	3	3 (NI)	Regularna częstotliwość kampanii; stała sieć pomiarowa	Próbkowanie weryfikacyjne w ciągu 3 mies.
RC0-06	Zmiana regulacji prawnych (zaostrzenie norm)	2	2	4 (NI)	Śledzenie zmian prawnych; rezerwa budżetowa	Przejsie na wariant III.C
RC0-07	Presja społeczna na podjęcie działań remediacyjnych	2	1	2 (NI)	Transparentne raportowanie; konsultacje publiczne	Komunikacja wyników monitoringu
RC0-08	Koszty remediacji wyższe w przyszłości (inflacja)	2	2	4 (NI)	Rezerwa budżetowa na ewentualną remediację	Waloryzacja kosztów w planie awaryjnym

11.18.2 Macierz ryzyka porównawcza

Warianty aktywne (III.C, III.D-A/B) charakteryzowały się wyższymi kosztami i ryzykami operacyjnymi, co w kontekście niskiego skażenia Obszaru C czyniło je nieproporcjonalnymi do poziomu zagrożenia.

Tabela 186 Porównanie ryzyk

Kategoria ryzyka	III.0 (wybrany)	III.C	III.D-A	III.D-B
Ryzyka operacyjne	BRAK (brak robót)	NISKIE (R=4-6)	WYSOKIE (R=6-9)	WYSOKIE (R=6-9)
Ryzyka środowiskowe	MINIMALNE	MINIMALNE (R=3-4)	WYSOKIE (R=8-9)	WYSOKIE (R=8-9)
Ryzyka wtórnego uwolnienia	BRAK	MINIMALNE	KRYTYCZNE (R=9)	KRYTYCZNE (R=9)
Ryzyka logistyczne	MINIMALNE	NISKIE	WYSOKIE	WYSOKIE
Ryzyka pozwoleń	NISKIE (R=2-3)	ŚREDNIE (R=6)	WYSOKIE (R=8)	WYSOKIE (R=8)

Kategoria ryzyka	III.0 (wybrany)	III.C	III.D-A	III.D-B
Ryzyka kosztowe	MINIMALNE	NISKIE	KRYTYCZNE (utyli- zacja)	KRYTYCZNE (utyli- zacja)
Ryzyka skuteczno- ści	ŚREDNIE (brak ak- tywnej redukcji)	NISKIE-ŚREDNIE	ŚREDNIE	WYSOKIE (brak biorem.)
OCENA ŁĄCZNA	AKCEPTOWALNE	AKCEPTOWALNE	NIEAKCEPTO- WALNE	NIEAKCEPTO- WALNE

11.18.3 Ocena skuteczności

Tabela 187 Skuteczność wariantu III.0 – krótkoterminowa (0–5 lat)

Mechanizm	Charakterystyka procesu	Parametry / Założenia	Znaczenie dla redukcji WWA
Naturalna atenua- cja	Samoistna degradacja za- nieczyszczeń	$k = 0,02-0,05 \text{ rok}^{-1}$	Główny mechanizm reduk- cji (ok. 2–5% rocznie)
Biodegradacja psy- chrotolerantna	Aktywność bakterii (Pseu- domonas, Rhodococcus)	$T = 4-6^{\circ}\text{C}$	Efektywna nawet w warun- kach Bałtyku
Sorpcja na TOC	Wiązanie WWA przez mate- rię organiczną	Zależne od zawartości TOC	Ogranicza mobilność i bio- dostępność
Fotodegradacja	Rozkład pod wpływem pro- mieniowania	Strefa fotyczna (ograni- czona przy 22–26 m)	Niewielki, lokalny wpływ

Tabela 188 Prognoza redukcji (5 lat):

Parametr	Wartość
Stężenie początkowe C_0	500 $\mu\text{g/kg}$
Stała degradacji	$k = 0,035 \text{ rok}^{-1}$
Stężenie po 5 latach $C(5)$	420 $\mu\text{g/kg}$
Redukcja	~16%

Tabela 189 Skuteczność wariantu III.0 – długoterminowa (5–30 lat)

Rok	Czas [lata]	Stężenie WWA [$\mu\text{g/kg}$]	Status względem RDW
2030	5	420	I klasa (<500) – możliwe spełnienie
2035	10	352	I klasa
2040	15	296	stabilnie <300
2045	20	248	znacznie poniżej I klasy
2050	25	208	niskie stężenia
2055	30	175	stabilizacja długoterminowa

Tabela 190 Podsumowanie skuteczności wariantu III.0

Aspekt	Ocena	Znaczenie
Inwazyjność	Brak	Brak ingerencji w bentos i środowisko
Mechanizm działania	Naturalny	Wykorzystanie procesów samooczyszczania
Skuteczność długoterminowa	Wysoka	<300 $\mu\text{g/kg}$ w 15–20 lat

Aspekt	Ocena	Znaczenie
Elastyczność zarządzania	Wysoka	Możliwość przejścia do wariantu III.C
Wartość decyzyjna	Wysoka	Pełna dokumentacja trendów

Wniosek (do raportu):

Wariant III.0 zapewnia stopniową, stabilną redukcję stężeń WWA bez ingerencji technicznej, osiągając poziomy znacznie poniżej progów regulacyjnych w horyzoncie 15–20 lat, przy jednoczesnym zachowaniu pełnej kontroli monitoringowej.

11.19 HSE / QA / QC / Procedury operacyjne

11.19.1 Bezpieczeństwo morskie (HSE)

- Plan bezpieczeństwa operacji morskiej (zgodny z IMCA/IOGP) - w zakresie kampanii monitoringowych.
- Plan ochrony środowiska (OSCP - Oil Spill Contingency Plan).
- Procedury ratunkowe: MOB (Man Overboard), pożarowe, ewakuacyjne.
- Sprzęt ratunkowy: tratwy, koła ratunkowe, środki łączności (VHF, EPIRB).
- Szkolenia załogi: pożarowe, pierwsza pomoc, MOB, OSCP - przed rozpoczęciem kampanii.
- Procedura przerywania kampanii monitoringowej: stan morza >3 B, prognoza pogorszenia >6 h.
- Monitoring emisji i wycieków w czasie rzeczywistym.

11.19.2 Ochrona środowiska

- Monitoring online WWA w wodzie (limit: 10 µg/L ponad tło) - podczas kampanii monitoringowych.
- Procedura reagowania na incydenty środowiskowe.
- Minimalizacja hałasu podwodnego (ochrona ssaków morskich).
- Zakaz zrzutu jakichkolwiek substancji do morza.
- Postępowanie z odpadami zgodne z MARPOL 73/78.

11.19.3 Kontrola jakości (QA/QC)

- Walidacja metod analitycznych: laboratoria akredytowane (PCA/ILAC).
- Duplikaty próbek: min. 10% próbek pobieranych w duplikacie (QA).
- Próbkę ślepe: min. 1 próba ślepa na kampanię (kontrola zanieczyszczeń).
- Stałe punkty pomiarowe z koordynatami GPS-RTK (powtarzalność).
- Dokumentacja fotograficzna z każdej kampanii monitoringowej.
- Raport z każdej kampanii z analizą trendów i porównaniem danych historycznych.

11.19.4 Procedury odbiorowe

- Odbiór kampanii monitoringowej: po dostarczeniu raportu z wynikami i interpretacją.
- Raport roczny: podsumowanie kampanii, ewaluacja triggerów, rekomendacje.
- Raport 5-letni: kompleksowa analiza trendów, prognoza, rekomendacja kontynuacji/eskalacji.
- Raport końcowy (rok 30): podsumowanie 30-letniego programu monitoringu, ocena końcowa.
- Komisja techniczna: ewaluacja triggerów po każdej kampanii.

11.20 Wymagany pakiet dokumentów

Tabela 191 Zastaw koniecznych dokumentów

Nr	Dokument	Priorytet	Etap
D01	Koncepcja techniczna monitoringu Obszaru C	WYSOKI	Przed projektem
D04	Kosztorys szczegółowy	WYSOKI	Przed kontraktem
D05	Harmonogram szczegółowy monitoringu (30 lat)	WYSOKI	Przed realizacją
D07	Plan HSE (dla kampanii monitoringowych)	WYSOKI	Przed pierwszą kampanią
D08	Plan OSCP (reagowanie na wycieki)	WYSOKI	Przed pierwszą kampanią
D09	Plan QA/QC monitoringu	WYSOKI	Przed pierwszą kampanią
D10	Program monitoringu 30-letniego z triggerami	NAJWYŻSZY	Przed rozpoczęciem
D11	Plan awaryjny (eskalacja do III.C)	WYSOKI	Przed rozpoczęciem
D12	Karta informacyjna przedsięwzięcia	NAJWYŻSZY	Jako pierwszy
D14	Raport z badań bazowych (baseline study)	NAJWYŻSZY	Przed monitoringiem
D15	Pozwolenie wodnoprawne	NAJWYŻSZY	Przed pierwszą kampanią
D16	Decyzja RDOŚ	NAJWYŻSZY	Przed pozwoleniem wod.
D17	Pozwolenie Urzędu Morskiego	NAJWYŻSZY	Przed pierwszą kampanią
D21	Raporty monitoringowe (po każdej kampanii)	WYSOKI	Co kampania

11.21 Rekomendowana kolejność prac dokumentacyjnych i wykonawczych

OPTIMALIZACJA: Prace w Obszarze C powinny być zsynchronizowane z Obszarami A i B:

- Sekwencja realizacji: A → B → C (od najwyższego do najniższego skażenia).
- Wspólna kampania badawcza bazowa z Obszarami A i B → oszczędność mobilizacji (~50 000 EUR).
- Wspólna dokumentacja pozwoleniowa dla A+B+C → oszczędność czasu 3-6 miesięcy.
- Monitoring wspólny dla A+B+C → oszczędność ~30% kosztów monitoringu.

Tabela 192 Rekomendacja kolejności prowadzenia prac

Krok	Zakres	Czas	Wynik	Zależności
1	Badania bazowe (próbkowanie strefy C)	4-8 tyg.	Raport z badań bazowych	START - brak
2	Decyzja wariantowa (na podstawie wyników próbkowania)	2 tyg.	Protokół decyzji: III.0 lub III.C	Po kroku 1
3	Opracowanie programu monitoringu 30-letniego i triggerów	4-6 tyg.	Program monitoringu	Po kroku 2
4	Pozwolenia (wodnoprawne, RDOŚ, UM)	3-6 mies.	Pozwolenia	Równolegle z 3
5	Rozpoczęcie fazy intensywnej monitoringu (Lata 1-3)	3 lata	Raporty półroczne	Po krokach 3-4
6	Faza obserwacyjna (Lata 4-15)	12 lat	Raporty roczne	Po kroku 5
7	Faza podtrzymująca (Lata 16-30)	15 lat	Raporty dwuletnie	Po kroku 6
8	Raport końcowy (rok 30)	2 mies.	Raport końcowy 30-letni	Po kroku 7

11.22 Rekomendacja końcowa

11.22.1 Rekomendacja bazowa dla Obszaru C

REKOMENDACJA: WARIANT III.0 (Tylko monitoring) JAKO WARIANT WYJŚCIOWY, Z OPCJĄ ESKALACJI DO WARIANTU III.C (Bioremediacja + Capping aktywny)

Dla Obszaru C - strefy o najniższym poziomie skażenia w projekcie S/S Stuttgart - rekomendujemy podejście fazowe: rozpoczęcie od wariantu III.0 (tylko monitoring) z możliwością eskalacji do wariantu III.C (bioremediacja + capping aktywny) w przypadku stwierdzenia niekorzystnych trendów. Podejście to jest najbardziej proporcjonalne do faktycznego, udokumentowanego badaniami 2025–2026 poziomu zagrożenia, zgodne z zasadą ALARP oraz z obserwowanymi trendami samooczyszczania środowiska morskiego potwierdzonymi porównaniem danych 2016–2025 (stabilność/spadek WWA w Strefie C). Wariant III.0 jest bezpośrednią odpowiedzią na postulat unikania ryzykownych dla środowiska morskiego operacji technicznych tam, gdzie nie są one uzasadnione skalą skażenia.

Szczegółowe uzasadnienie wyboru wariantu III.0

Wariant III.0 jest rekomendowany na podstawie następujących przesłanek:

UZASADNIENIE KOSZTOWE:

- Najniższy koszt: NPV 0,94 mln EUR (vs. III.C: 3,52 mln EUR, III.D-A: 22,83 mln EUR, III.D-B: 23,80 mln EUR).
- Stanowi zaledwie 26,7% kosztów wariantu III.C i 4,1% kosztów III.D-A.
- Nawet w scenariuszu pesymistycznym (eskalacja do III.C w roku 5), łączny koszt NPV nie przekroczy ~4,5 mln EUR.

UZASADNIENIE ŚRODOWISKOWE:

- Proporcjonalność do poziomu zagrożenia: stężenia 300-800 µg/kg WWA są bliskie normom I klasy RDW.
- Wykorzystanie naturalnej atenuacji i biodegradacji psychrotolerantnej.
- Zerowa inwazyjność w ekosystem - brak resuspensji osadów, brak zniszczenia bentosu.
- Zachowanie aktualnego stanu ekologicznego strefy C (lepszego niż A/B).
- Brak ryzyka resuspensji - nie pogorszy stanu otaczających obszarów.

UZASADNIENIE STRATEGICZNE:

- Elastyczność - możliwość eskalacji do III.C w każdym momencie na podstawie zdefiniowanych triggerów.
- Strategia fazowa z triggerami zapewnia bezpieczeństwo przy minimalnych kosztach początkowych.
- Zgodność z zasadą ALARP (As Low As Reasonably Practicable).
- Pełna odwracalność decyzji - brak nieodwracalnych działań.

11.22.2 Triggery do eskalacji

Wariant III.0 przewiduje przejście na wariant III.C w przypadku spełnienia któregośkolwiek z poniższych warunków:

TRIGGERY BEZWZGLĘDNE:

- Stężenia WWA > 2 000 µg/kg (przekroczenie II klasy RDW) w ≥3 punktach pomiarowych.
- Trend wzrostowy WWA > 20% przez 2-3 kolejne kampanie.
- Migracja zanieczyszczeń poza strefę C (stężenia rosnące w punktach granicznych).

TRIGGERY WARUNKOWE:

- Pogorszenie stanu makrozoobentosu (spadek indeksu AMBI o ≥1 klasę).

- Stężenia WWA > 1 000 µg/kg w ≥5 punktach (ponad I klasę RDW).
- Wykrycie WWA w tkankach organizmów bentosowych powyżej norm UE.
- Zmiana warunków hydrodynamicznych zwiększająca ryzyko resuspensji.

Procedura od triggera do remediacji: 12-18 miesięcy.

11.22.3 Strategia fazowa dla Obszaru C

Tabela 193 Strategia fazowa dla obszaru C

Faza	Opis	Warunek / Decyzja	Następny krok
FAZA 1 (Rok 0)	Badania bazowe – weryfikacja faktycznych stężeń WWA w strefie C	WWA < 1 000 µg/kg	FAZA 2a (III.0)
FAZA 1 (Rok 0)	Badania bazowe – weryfikacja faktycznych stężeń WWA w strefie C	WWA > 1 000 µg/kg	FAZA 2b (III.C)
FAZA 2a – Wariant III.0 (preferowany)	Monitoring 30-letni z triggerami	Triggery NIE uruchomione	Kontynuacja monitoringu do roku 30
FAZA 2a – Wariant III.0 (preferowany)	Monitoring 30-letni z triggerami	Triggery uruchomione	FAZA 2b
FAZA 2b – Wariant III.C (zapasowy)	Bioremediacja + capping aktywny	Realizacja działań	W jednym sezonie operacyjnym
FAZA 2b – Wariant III.C (zapasowy)	Bioremediacja + capping aktywny	Po zakończeniu robót	Monitoring 30-letni

11.23 Informacja o odrzuconych wariantach

Warianty III.C, III.D-A i III.D-B zostały odrzucone jako nieproporcjonalne do niskiego poziomu skażenia w Obszarze C. Wariant III.C (4,1 mln EUR) jest 4,3× droższy, a warianty z dredgingiem (23-24 mln EUR) są 24-25× droższe od wariantu III.0. Wariant III.C pozostaje jako opcja eskalacji w przypadku uruchomienia triggerów, co zapewnia elastyczność strategii przy minimalnych kosztach początkowych.

Tabela 194 Porównanie odrzuconych wariantów

Kryterium	III.0 (wybrany)	III.C (zapasowy)	III.D-A (odrzucony)	III.D-B (odrzucony)
NPV (30 lat, 3%)	938 000 EUR	3 516 000 EUR	22 826 000 EUR	23 800 000 EUR
Koszt nominalny	1 280 000 EUR	4 069 000 EUR	23 281 000 EUR	24 465 000 EUR
Inwazyjność	ZEROWA	NISKA	WYSOKA	WYSOKA
Ryzyko środowiskowe	MINIMALNE	NISKIE	WYSOKIE	BARDZO WYSOKIE
Skuteczność redukcji WWA	Naturalna: 30-60%/30lat	Aktywna: >80%/30lat	Usunięcie: >90%	Izolacja: ~70%
Zachowanie bentosu	TAK - pełne	TAK - częściowe	NIE - zniszczenie	NIE - zniszczenie

Kryterium	III.0 (wybrany)	III.C (zapasowy)	III.D-A (odrzucony)	III.D-B (odrzucony)
Odpady niebezpieczne	BRAK	BRAK	28 500 t	28 500 t
Odwracalność	Pełna (eskalacja do III.C)	Częściowa	Nieodwracalny	Nieodwracalny
Proporcjonalność	NAJWYŻSZA	WYSOKA	NISKA	NAJNIŻSZA
REKOMENDACJA	WARIANT WYJŚCIOWY	WARIANT ZAPASOWY	NIEZALECANY	ZDECYDOWANIE NIEZALECANY

11.23.1 Uzasadnienie kosztowe

KLUCZOWY ARGUMENT KOSZTOWY:

Wariant III.0 (tylko monitoring) kosztuje zaledwie 938 000 EUR (NPV), co stanowi:

- 26,7% kosztu wariantu III.C (3 516 000 EUR)
- 4,1% kosztu wariantu III.D-A (22 826 000 EUR)
- 3,9% kosztu wariantu III.D-B (23 800 000 EUR)

Nawet w scenariuszu pesymistycznym (uruchomienie triggerów i eskalacja do III.C w roku 5), łączny koszt NPV nie przekroczy ~4,5 mln EUR - nadal znacząco mniej niż warianty III.D.

Warianty III.D-A i III.D-B kosztują odpowiednio 24,3× i 25,4× więcej niż III.0, przy marginalnej lub zerowej przewadze skuteczności w strefie o niskim skażeniu.

Tabela 195 Spójność z rekomendacjami dla Obszarów A i B

Obszar	Rekomendacja	Wariant	Koszt szacunkowy (P50)	Uzasadnienie kluczowe
A (8 ha)	III.C (bazyowy)	Bioremediacja + capping aktywny 0,10 m	~18,5 mln EUR	Najwyższe skażenie, ale ALARP
B (18 ha)	III.C (bazyowy)	Bioremediacja + capping aktywny 0,05-0,10 m	~8,6 mln EUR (CBS)	Strefa buforowa, proporcjonalny
C (19 ha)	III.0 (monitoring)	Tylko monitoring z opcją eskalacji do III.C	~0,94 mln EUR (NPV)	Najniższe skażenie, strategia fazowa

11.24 Minimalny zestaw danych dodatkowych potrzebnych do finalizacji pełnej dokumentacji

Poniższa sekcja identyfikuje dane brakujące, ich wpływ na koszty/harmonogram/wybór wariantu oraz sposób ich pozyskania. Dane uporządkowano wg priorytetu (od krytycznych do pomocniczych).

11.24.1 Minimalna kampania badawcza przed startem - Obszar C

Koszt szacunkowy minimalnej kampanii badawczej:

- Jednostka badawcza (5 dni): 25 000 EUR

- MBES (3 dni): 7 500 EUR
- Próbkowanie osadów (15 stacji): 15 000 EUR
- Magnetometria UXO (2 dni): 8 000 EUR
- Próbkowanie bentosu (5 stacji): 5 000 EUR
- Analizy laboratoryjne (WWA, TPH, metale): 24 000 EUR
- Analiza biologiczna: 8 000 EUR
- Raportowanie: 10 000 EUR
- RAZEM: ~102 500 EUR

Czas: 5-7 dni morskich + 4-6 tygodni analiz laboratoryjnych.

REKOMENDACJA: Kampanię badawczą strefy C prowadzić łącznie z kampanią dla A i B - oszczędność mobilizacji (~50 000 EUR) i synergiczna logistyka.

Tabela 196 Zalecenia

Nr	Brakujące dane	Wpływ na projekt	Sposób uzupełnienia	Priorytet	Krytyczne przed startem?
1	Stężenia WWA/TPH w osadach strefy C (min. 15 stacji)	KRYTYCZNY - determinuje wybór wariantu (III.0 vs. III.C)	Kampania próbkowania morskiego + analiza laboratoryjna	NAJWYŻSZY	TAK
2	Batymetria MBES strefy C (rozdzielczość ≤ 1 m)	WYSOKI - precyzja planowania sieci monitoringowej	Kampania MBES z barki badawczej (3-5 dni)	WYSOKI	TAK
3	Stan makrozoobentosu strefy C (min. 5 stacji)	WYSOKI - baseline biologiczny do monitoringu	Próbkowanie grabem Van Veena + identyfikacja	WYSOKI	TAK
4	Rozpoznanie UXO strefy C (magnetometria)	WYSOKI - bezpieczeństwo operacji	Kampania magnetometryczna (2-3 dni)	WYSOKI	TAK
5	Dane metocean strefy C (prądy, fale, temperatura)	ŚREDNI - optymalizacja planowania kampanii	Dane modelowe (IMGW) lub pomiar in-situ	ŚREDNI	NIE
6	Modelowanie dyspersji sedymentu	ŚREDNI - ocena wpływu prac w A/B na strefę C	Modelowanie numeryczne (DHI/Delft3D)	ŚREDNI	NIE

11.24.2 Decyzje kluczowe zależne od wyników badań

Tabela 197 Warunkowość decyzji w zależności od wyników badań.

Wynik badań	Decyzja	Wpływ
WWA <500 µg/kg na >80% pow. C	III.0 - monitoring 30-letni (variant bazowy)	Potwierdzenie strategii, budżet ~0,94 mln EUR NPV
WWA 500-1000 µg/kg	III.0 z wzmożonym monitoringiem (faza intensywna wydłużona)	Zwiększenie częstotliwości, budżet ~1,1-1,3 mln EUR
WWA >1000 µg/kg (niezgodne z szacunkiem)	III.C - bioremediacja + capping aktywny 0,03-0,05 m	Zmiana wariantu, budżet ~4,1 mln EUR
Hotspoty WWA >5000 µg/kg w C	III.C + punktowy dredging hotspotów	Wzrost budżetu o 2-5 mln EUR

12 Wpływ planowanej działalności na stan środowiska morskiego

Niniejszy rozdział przedstawia kompleksową analizę oddziaływania planowanych działań naprawczych określonych w Planie Neutralizacji Zagrożeń (PNZ) dla wraku S/S Stuttgart na stan środowiska morskiego Zatoki Gdańskiej. Analiza obejmuje fazę realizacji (oddziaływanie krótkoterminowe) oraz fazę eksploatacji (oddziaływanie długoterminowe) dla wszystkich zdefiniowanych wariantów działań, ze szczególnym uwzględnieniem wariantów rekomendowanych: Z7 (zastoiska paliwa), W6 (zabezpieczenie wraku) oraz III.C (remediacja osadów w strefach A i B) i III.0 (monitoring pasywny w strefie C). Wrak S/S Stuttgart – statek pasażerski o długości 168 m i szerokości 20 m, zatopiony w 1943 roku na głębokości 22–24 m p.p.m. – stanowi jedno z najpoważniejszych zagrożeń ekologicznych w polskiej strefie Morza Bałtyckiego. Wieloletnia degradacja konstrukcji doprowadziła do chronicznego uwalniania substancji ropopochodnych, wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA) oraz węglowodorów ropopochodnych (TPH) do środowiska morskiego, a łączny obszar skażenia obejmuje ok. 45 ha.

12.1 1. Syntetyczne zestawienie wariantów (Z, W, III)

Plan Neutralizacji Zagrożeń definiuje trzy główne grupy wariantów działań naprawczych, realizowanych sekwencyjnie: najpierw neutralizacja zastoisk paliwa (Grupa I – warianty Z), następnie izolacja wraku (Grupa II – warianty W), a na końcu remediacja osadów dennych (Grupa III). Logika sekwencji Z → W → III jest kluczowa dla zapobieżenia dalszej migracji zanieczyszczeń – eliminacja najbardziej skoncentrowanych źródeł emisji poprzedza remediację osadów, co eliminuje ryzyko ponownego skażenia oczyszczonych obszarów.

Zestawienie wariantów remediacyjnych

Kompleksowa tabela porównawcza wszystkich wariantów – Zastoiska HFO | Wrak S/S Stuttgart | Osady denne

LEGENDA KOLORÓW: ■ REKOMENDOWANY / BAZOWY ■ ALTERNATYWA ■ NIEZALECANY / ODRZUCONY ■ STANDARDOWY

Wariant	Opis / Mechanizm działania	Skuteczność (%)	Trwałość (lata)	Koszt (EUR)	Powierzchnia / Objętość	Ocena wielokryt.	Status / Uwagi / Ryzyka
WARIANTY Z – Zastoiska paliwa HFO							
Obszar: 16 zastoisk paliwowych Powierzchnia: 978 m² (robocza ~2 500 m²) Objętość paliwa: 98–196 m³ (98–235 t)							
Z1	Pokrycie piaskiem morskim Warstwa 1,5 m (~6 000 t) Mechanizm: bariera fizyczna ograniczająca kontakt wody z paliwem	70–75%	10–15	Niski (materiał naturalny) ~392 150	Pow. robocza: ~2 500 m ² Piasek: ~6 000 t	—	Wariant podstawowy, prosty w realizacji. Ograniczona skuteczność – brak aktywnej sorpcji. Ryzyko erozji warstwy piaskowej.
Z2	Geotekstyl + narzut kamienny Geotekstyl 300 g/m ² + kamień 100–300 mm Mechanizm: bariera fizyczna wzmocniona	75–80%	15–25	Średni ~556 740	Pow. robocza: ~2 500 m ² Geotekstyl + narzut	—	Lepsza trwałość niż Z1. Kamień chroni przed erozją. Brak komponentu sorpcyjnego.
Z3	Barьеры PRB (Permeable Reactive Barriers) Fe ⁰ + węgiel aktywny Mechanizm: redukcja chemiczna + sorpcja WWA	85–90%	20–30	Wysoki (materiały reaktywne) ~893 200	Pow. robocza: ~2 500 m ² Barьеры reaktywne	—	Wysoka skuteczność dzięki aktywnemu mechanizmowi. Złożoność instalacji podwodnej. Konieczność wymiany materiału reaktywnego.
Z4	Hybrydowy wielowarstwowy 4 warstwy: geotekstyl + piasek + geomembrana HDPE + narzut Mechanizm: pełna izolacja – paliwo pozostaje pod barierą	>95%	>40	Wysoki (wielowarstwowy system) ~709 775	Pow. robocza: ~2 500 m ² System wielowarstwowy	—	Najwyższa trwałość wśród wariantów Z. Paliwo nie jest usuwane – pozostaje pod izolacją. Złożony montaż podwodny.
Z5	Odsysanie mechaniczne paliwa Wydajność: 2,625 m ³ /h Mechanizm: fizyczne usunięcie paliwa z dna	70–85%	Brak trwałej izolacji	Średni–wysoki (sprzęt + utylizacja) ~221 087	Obj. paliwa: 98–196 m ³ (98–235 t)	—	Aktywne usuwanie zanieczyszczenia. Brak zabezpieczenia residualnego. Niepełne usunięcie paliwa zagęszczonego.
Z6	Odsysanie + capping piaskowy Odsysanie mechaniczne + piasek 0,5 m (~2 000 t) Mechanizm: usunięcie + izolacja rezydualna	90–95%	15–25	Średni–wysoki ~303 520	Obj. odsysania: 98–196 m ³ Piasek: ~2 000 t	—	Kombinacja usuwania i izolacji. Dobra skuteczność. Brak komponentu sorpcyjnego.
Z7 ★	Odsysanie + piasek + zeolity ★ REKOMENDOWANY Odsysanie 70–85% + piasek 0,5 m (1 250 m ³) + zeolit 5 cm (125 m ³)	95–98%	10–20 (zeolity aktywne)	~370 000	Piasek: 1 250 m ³ Zeolit: 125 m ³ Odsysanie: 98–196 m ³	Najwyższy stosunek skuteczność/koszt	★ WARIANT REKOMENDOWANY Potrójna bariera zapewnia najwyższą skuteczność. Zeolity aktywnie sorbują WWA.

Wariant	Opis / Mechanizm działania	Skuteczność (%)	Trwałość (lata)	Koszt (EUR)	Powierzchnia / Objętość	Ocena wielokryt.	Status / Uwagi / Ryzyka
	Mechanizm: POTRÓJNA BARIERA – usunięcie + izolacja + aktywna sorpcja						Optimalny koszt: ~370 000 EUR. Trwałość zeolitów: 10–20 lat (aktywne działanie).
WARIANTY W – Zabezpieczenie wraku S/S Stuttgart							
Wrak: 168×20 m Powierzchnia: 3 360 m² Głębokość: 22–24 m Pow. nominalna: 3 360 m² Pow. rob. operacyjna: 7 520 m² Pow. rob. rozszerzona (z przymą): 8 850 m²							
W1	Pokrycie piaskiem Warstwa 2,0 m (~24 064 t) Mechanizm: bariera fizyczna	Ograniczona (erozja)	10–15	Średni (duża ilość materiału) ~1 860 000	Pow. robocza: 7 520 m ² Piasek: ~24 064 t	—	Bardzo duża ilość materiału. Wysoka podatność na erozję podwodną. Ograniczona skuteczność długoterminowa.
W2	Beton podwodny Beton C25/30, warstwa 1,5 m (~27 072 t) Mechanizm: monolityczna bariera betonowa	>95%	>50	Bardzo wysoki (beton + roboty podwodne) ~6 260 000	Pow.: 3 360 m ² Beton: ~27 072 t (~18 048 m ³)	—	Wysoka skuteczność i trwałość. WADA: wysoka emisja CO ₂ . WADA: ekstremalnie wysoki koszt. Złożona logistyka betonowania podwodnego.
W3	Siarkobeton Grubość 1,5 m, gęstość 2,3 t/m ³ Mechanizm: monolityczna bariera z siarkobetonu	>98%	>50	Bardzo wysoki (technologia eksperymentalna) ~8 720 000	Pow.: 3 360 m ² Siarkobeton: ~11 592 t	—	Najwyższa skuteczność wśród betonów. WADA: TECHNOLOGIA EKSPERYMENTALNA. RYZYKO: emisja H ₂ S (siarkowodór). WADA: bardzo wysoki koszt, brak referencji podwodnych.
W4	Cofferdam (grodza stalowa) Grodza 200×55 m + wypełnienie betonem (~33 000 m ³) Mechanizm: pełne zamknięcie wraku w szczelnej strukturze	100%	>100	~15 870 000 (~15,87 mln)	Grodza: 200×55 m Beton: ~33 000 m ³ Stal: konstrukcyjna	—	Teoretycznie idealna skuteczność. WADA: EKSTREMALNY KOSZT (~15,87 mln EUR). Złożoność inżynierska bez precedensu. Długi czas realizacji.
W5	Geotekstyl + narzut kamienny Geotekstyl 300 g/m ² + kamień 0,8 m (~10 829 t) Mechanizm: bariera fizyczna wzmocniona	75–85%	20–30	~2 470 000 (~2,47 mln)	Pow. robocza: 7 520 m ² Geotekstyl + narzut: ~10 829 t	—	Wariant ekonomiczny. Dobra trwałość. Ograniczona szczelność vs. W6. Koszt: ~2,47 mln EUR.
W6 ★	Wielowarstwowa izolacja hybrydowa ★ REKOMENDOWANY 4 warstwy: geotekstyl 300 g/m ² + piasek 1,0 m (12 032 t) + geomembrana HDPE 2 mm (8 648 m ²) + narzut 100–300 mm (6 768 t) Mechanizm: pełna wielowarstwowa izolacja	>99%	>50	~5 670 000 (~5,67 mln)	Geotekstyl: 7 520 m ² Piasek: 12 032 t HDPE: 8 648 m ² Narzut: 6 768 t	4,3 / 5,0	★ WARIANT REKOMENDOWANY Najwyższa skuteczność (>99%) przy rozsądnym koszcie. Ocena wielokryterialna: 4,3/5,0. Koszt: ~5,67 mln EUR. 4-warstwowy system zapewnia redundancję. Trwałość >50 lat.
WARIANTY III – Remediacja osadów dennych							
Obszar: ~45 ha Strefa A: 8 ha (hotspoty WWA >10 mg/kg) Strefa B: 18 ha (WWA 1–10 mg/kg) Strefa C: 19 ha (WWA 0,1–1 mg/kg)							

Wariant	Opis / Mechanizm działania	Skuteczność (%)	Trwałość (lata)	Koszt (EUR)	Powierzchnia / Objętość	Ocena wielokryt.	Status / Uwagi / Ryzyka
III.0	Tylko monitoring (naturalna atenuacja) Dla Strefy C (19 ha, WWA 0,1–1 mg/kg) Monitoring 30 lat (26 kampanii) Mechanizm: naturalna atenuacja + obserwacja	Brak aktywnej remediacji (monitoring)	30 (okres monitoringu)	NPV 30 lat: ~940 000 (~0,94 mln)	Strefa C: 19 ha 26 kampanii pomiarowych	—	Wariant pasywny – tylko dla Strefy C. NPV 30 lat: ~0,94 mln EUR. Brak ingerencji w środowisko. Wymaga regularnego monitoringu.
III.C ★	Bioremediacja + Capping aktywny ★ WARIANT BAZOWY Dla Stref A i B Zeolity/keramzyt/perlit: • Strefa A: warstwa 0,10 m • Strefa B: warstwa 0,05–0,10 m Mechanizm: izolacja + sorpcja + bioremediacja	Krótkoterm.: >95% Długoterm.: >90%	Długo-terminowy (aktywny capping)	NPV 30 lat (A+B+C): ~74 000 000 (~74 mln)	Strefa A: 8 ha Strefa B: 18 ha + Strefa C: 19 ha (monitoring) łącznie: ~45 ha	Wariant bazowy (referencyjny)	★ WARIANT BAZOWY (REKOMENDOWANY) Najlepszy stosunek skuteczności do kosztów. NPV 30 lat: ~74 mln EUR. Potrzebny mechanizm: izolacja + sorpcja + bio. Minimalna ingerencja w ekosystem. Zeolity/keramzyt/perlit – materiały aktywne.
III.D-A	Hybrydowy z aktywnymi minerałami (ALTERNATYWA) Dredging w Strefie A (25 000–60 000 m³) + capping aktywny w Strefach B i C Mechanizm: usunięcie osadów + izolacja aktywna	Wysoka (dredging + capping)	Długo-terminowy	NPV 30 lat: ~123 000 000 (~123 mln) (+66% vs III.C)	Dredging A: 25 000–60 000 m³ Capping B+C: ~37 ha	Alternatywa (wyższy koszt)	WARIANT ALTERNATYWNY NPV 30 lat: ~123 mln EUR (+66% vs. III.C). ⚠ RYZYKO RESUSPENSJI: R=9 (KRYTYCZNE). Dredging może spowodować wtórne zanieczyszczenie. Wyższy koszt przy porównywalnej skuteczności.
III.D-B	Hybrydowy pasywny (NIEZALECANY) Jak III.D-A, ale capping pasywny (piasek) Brak bioremediacji Mechanizm: usunięcie + izolacja pasywna	Niższa niż III.D-A (brak bio)	Ograniczona (erozja piasku)	NPV 30 lat: ~92 000 000 (~92 mln)	Dredging A: 25 000–60 000 m³ Capping pasywny B+C: ~37 ha	Niezalecany	❌ WARIANT NIEZALECANY NPV 30 lat: ~92 mln EUR. Brak bioremediacji – tylko pasywna izolacja. Ryzyko bioturbacji i erozji. Gorsza skuteczność niż III.C przy wyższym koszcie.

Uwagi metodologiczne:

- NPV – Net Present Value (wartość bieżąca netto) obliczona dla horyzontu 30 lat.
 - WWA – wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne.
 - PRB – Permeable Reactive Barriers (przepuszczalne bariery reaktywne).
 - HDPE – polietylen wysokiej gęstości.
 - HFO – Heavy Fuel Oil (ciężki olej opałowy).
 - Ocena wielokryterialna uwzględnia: skuteczność, trwałość, koszt, wpływ na środowisko, złożoność realizacji.
 - Warianty rekomendowane (★) wybrane na podstawie analizy wielokryterialnej i optymalizacji kosztowej.
 - Koszty podane w EUR, w cenach bieżących. NPV uwzględnia stopę dyskontową.
- Ryzyko resuspensji R=9 oznacza poziom krytyczny w skali 1–10.

12.2 Analiza oddziaływania – faza realizacji (krótkoterminowa)

Faza realizacji prac naprawczych wiąże się z czasową ingerencją w środowisko morskie Zatoki Gdańskiej. Poniżej zidentyfikowano główne ryzyka środowiskowe wynikające z prowadzenia operacji na dnie morskim na głębokości 22–24 m, wraz z mechanizmami ich mitygacji określonymi w PNZ.

12.2.1 Resuspensja osadów

Mechanizm i skala: Operacje na dnie morskim – w szczególności odsysanie paliwa z zastoisk (wariant Z7, etap 1), układanie materiałów cappingowych, zrzut piasku oraz ewentualny dredging (warianty III.D-A/B) – powodują mechaniczne zaburzenie struktury osadów dennych i ich przejście do fazy zawieszanej w kolumnie wody. W przypadku wariantów z dredgingiem ryzyko resuspensji zostało ocenione jako KRYTYCZNE (R=9), co stanowiło jeden z głównych powodów odrzucenia wariantów III.D-A i III.D-B. Dla wariantu rekomendowanego III.C (capping aktywny bez dredgingu) ryzyko resuspensji jest minimalne, ponieważ materiał cappingowy jest aplikowany na powierzchnię osadów bez ich mechanicznego naruszania.

Zagrożone obszary: Strefa A (bezpośrednie otoczenie wraku, ~8 ha) oraz granice stref A↔B i B↔C, gdzie resuspensja może prowadzić do migracji zanieczyszczeń między strefami. Szczególnie wrażliwa jest granica A↔B ze względu na gradient stężeń WWA.

12.2.2 Mętność wody

Wpływ na organizmy: Podwyższona mętność wody (wyrażona w jednostkach NTU) ogranicza przenikanie światła, zaburza procesy fotosyntezy fitoplanktonu, utrudnia odżywianie organizmów filtrujących (małże, wieloszczety) oraz może prowadzić do zasypywania i uszkodzenia skrzelu ryb dennych. Zgodnie z PNZ, próg alarmowy mętności ustalono na poziomie **>50 NTU**, przy którego przekroczeniu następuje obligatoryjne zatrzymanie prac (procedura stop-work). Zasięg strefy podwyższonej mętności zależy od intensywności operacji i warunków hydrodynamicznych; monitoring mętności prowadzony jest w trybie online na granicy stref.

12.2.3 Hałas podwodny

Źródła: Główne źródła hałasu podwodnego podczas prac obejmują: operacje pojazdów podwodnych zdalnie sterowanych (ROV) klasy lekkiej, pracę pomp ssących (wydajność 2–5 m³/h) podczas odsysania paliwa, operacje barek roboczych z systemami kotwiczenia, jednostki pływające zaangażowane w transport piasku i materiałów cappingowych, oraz ewentualne prace nurkowe (nurkowania powietrzne do 30 m).

Wpływ na faunę: Hałas podwodny może oddziaływać na ssaki morskie (morświny) oraz ichtiofaunę w rejonie operacji. PNZ uwzględnia ograniczenia czasowe prac w okresach ochron-

nych dla ssaków morskich i ptaków (V–VIII dla Obszaru A, IV–VI dla Obszaru B). Strefy bezpieczeństwa wokół operacji (500 m) ograniczają oddziaływanie akustyczne na faunę. Sezon operacyjny (kwiecień–październik) jest dopasowany do najkorzystniejszych warunków meteorologicznych i minimalizacji konfliktu z okresami rozrodczymi.

12.2.4 Ryzyko uwolnienia HFO podczas prac

Scenariusze: Ryzyko niekontrolowanego uwolnienia paliwa ciężkiego (HFO) występuje przede wszystkim podczas etapu odsysania paliwa z zastoisk (wariant Z7, etap 1) – możliwa jest awaria systemu pompowego, rozszczelnienie rurociągów (HDPE $\varnothing 100$ mm, ~36 m) lub niekontrolowane rozlanie podczas separacji paliwo-woda na barce (separator $10 \text{ m}^3/\text{h}$). Ponadto, w kontekście wariantu W6 (zabezpieczenie wraku), istnieje ryzyko uwolnienia paliwa z nieznanymi zbiorników wraku podczas prac izolacyjnych – ilość paliwa w zbiornikach wraku jest nieznana i wymaga badań NBS/inwazyjnych. Decision Gate (etap 0) w wariantcie W6 określa warunki obligatoryjności odsysania paliwa z wraku przed realizacją izolacji. Prawdopodobieństwo wycieku paliwa z wraku wskutek postępującej korozji oszacowano orientacyjnie na 10–20% w ciągu 10 lat.

Uwaga metodyczna dotycząca szacunku 10-20%. Wartość 10-20% prawdopodobieństwa wycieku paliwa z wraku w horyzoncie 10 lat stanowi szacunek ekspercki oparty na następujących przesłankach: Wiek i stan korozji konstrukcji:

1. Wrak S/S Stuttgart zalega na dnie morskim od 1943 r. (>80 lat), przy czym leżał na burcie (nie na równej stępce). Wyniki badań 2025 r. potwierdzają zaawansowany stan korozji kadłuba i elementów strukturalnych, szczególnie w strefach naprężeń i spoin. Znaczna część dennych zbiorników paliwowych została rozsądzona podczas prac wyburzeniowych w latach 50. XX w., a ich konstrukcje stalowe zostały usunięte. Część zbiorników dennych, przydenne burtowe oraz burtowe (o ile statek takie posiadał) mogą jednak nadal tkwić w gliniastym gruncie. Stan tych potencjalnie zachowanych zbiorników nie został dotychczas potwierdzony bezpośrednią inspekcją.
2. Analogie historyczne: Przegląd literatury naukowej dotyczącej zachowania wraków stalowych z lat 1939-1945 w warunkach Morza Bałtyckiego (zasolenie 7-8 PSU, temperatura denna 4-8 st.C, pH ok. 8,0) wskazuje na szybkość korozji rzędu 0,1-0,3 mm/rok, co w horyzoncie >80 lat prowadzi do znaczącej redukcji grubości ścian zbiorników.
3. Zakres niepewności: Podana wartość 10-20% obarczona jest znaczącą niepewnością (szacunkowo +/-5-10 punktów procentowych, przy czym faktyczny zakres może być szerszy) wynikającą z:
 - a. braku bezpośrednich pomiarów grubości ścian zbiorników wraku,
 - b. braku dokumentacji stoczniowej po okresie przebudowy jednostki, co uniemożliwia określenie dokładnego układu, liczby i pojemności zbiorników paliwowych,
 - c. niewiedzy co do tego, które zbiorniki (denne, przydenne burtowe, burtowe) zachowały się w gliniastym gruncie po rozsądzeniu znacznej części zbiorników dennych.

Zaleca się

1. przeprowadzenie formalnej analizy niezawodnościowej (FMEA lub FTA) na podstawie wyników inspekcji ROV (etap M1, termin: 2026 Q2), która powinna w pierwszej kolejności zidentyfikować zbiorniki tkwiące w gruncie i ocenić ich stan. Wyniki powinny zostać uwzględniane w kolejnej wersji PNZ.
2. przeprowadzenie szczegółowej inspekcji ROV zbiorników wraku z oceną stanu technicznego ścian zbiorników;
3. analizę porównawczą z danymi literaturowymi dla wraków stalowych z lat 1940. na Morzu Bałtyckim;
4. modelowanie korozji z uwzględnieniem warunków geochemicznych dna.

Decision Gate w ramach wariantu W6 (etap 0) obejmuje obligatoryjną weryfikację obecności paliwa w zbiornikach wraku i ocenę konieczności odsysania przed izolacją.

Tabela 198 Rozróżnienie scenariuszy ryzyka wycieku paliwa z wraku S/S Stuttgart

Scenariusz	Prawdopodob.	P x S	Klasa	Kontekst
Samoistny wyciek korozyjny (bez prac, 10 lat)	10–20%	R=8 (P=2, S=4)	ŚREDNI	Szacunek ekspercki; weryfikacja inspekcją ROV (Etap 0)
Wyciek indukowany pracami Z7 (odsysanie)	~5–15%	R=8 (P=2, S=4)	ŚREDNI	Mitygacja: OSCP, boomy, sorbenty, separator na barce (patrz R4 w Tab. 8)
Katastrofalny wyciek całej zawartości zachowanych zbiorników	<5% (marginalny)	R=4 (P=1, S=4)	NISKI–ŚREDNI	Scenariusz ekstremalny; wolumen ograniczony do zbiorników w gruncie; wymaga modelowania transgranicznego (rozdz. 4.1.2)

12.2.5 Mechanizmy mitygacji określone w PNZ

Plan Neutralizacji Zagrożeń definiuje następujące środki ograniczania negatywnego oddziaływania na środowisko podczas fazy realizacji:

- **Procedury stop-work:** Obligatoryjne zatrzymanie prac przy: mętności >50 NTU, stężeniu WWA w wodzie >1 µg/l, stanie morza Hs >1,25 m, wykryciu niewypałów/niewybuchów (UXO), awarii krytycznej sprzętu.
- **Monitoring online:** Ciągły pomiar mętności na granicy stref, monitoring emisji i wycieków w czasie rzeczywistym, pobór próbek wody co 4 godziny podczas operacji.
- **Plan reagowania na wycieki olejowe (OSCP – Oil Spill Contingency Plan):** Obowiązkowy na czas prac, obejmujący procedury reagowania na rozlew, powiadomienia Urzędu Morskiego, RDOŚ i SAR.

- **Ograniczenia sezonowe i pogodowe:** Sezon operacyjny kwiecień–październik; operacje przy stanie morza ≤ 3 B ($H_s \leq 1,25$ m) dla zastoisk, $H_s < 1,5$ m dla wraku; zakaz prac w okresach ochronnych (ssaki morskie, ptaki).
- **Strefy bezpieczeństwa:** 500 m wokół operacji; strefy bezpieczeństwa UXO w razie wykrycia materiałów wybuchowych; współpraca z Marynarką Wojenną (EOD).
- **System QA/QC:** Weryfikacja grubości warstw cappingu batymetrią MBES (porównanie pre/post), kontrola pokrycia ROV z kamerami, audyt QA/QC zgodny z ISO 17025 dla laboratorium, dokumentacja fotograficzna i wideo z każdej sekcji/zastoiska, raport z każdego dnia operacyjnego.
- **Bezpieczeństwo operacji morskiej (HSE):** Plan zgodny z IMCA/IOGP, procedury nurkowe zgodne z PN-EN, procedury ROV zgodne z IMCA R 004, szkolenia załogi (pożarowe, pierwsza pomoc, MOB, OSCP), sprzęt ratunkowy.
- **W odniesieniu do obiektów pUXO potencjalnie zawierających BST/CWA** – procedury neutralizacji zgodne z wariantem Z8 (Wariant Z8): szczelny zasobnik, dekontaminacja, utylizacja plazmowa na pokładzie, monitoring analityczny i pakiet dowodowy CWC/OPCW.

12.3 Analiza oddziaływania – faza eksploatacji (długoterminowa)

Po zakończeniu prac realizacyjnych planowane działania naprawcze generują szereg pozytywnych oddziaływań długoterminowych na środowisko morskie Zatoki Gdańskiej. Docelowy wpływ obejmuje fundamentalną redukcję zagrożenia ekologicznego związanego z wrakiem S/S Stuttgart.

12.3.1 Redukcja bioekspozycji na WWA i TPH

Realizacja wariantów rekomendowanych prowadzi do znaczącej redukcji **bioekspozycji** organizmów morskich na **WWA** i **TPH**. W wariantcie **Z7** potrójna bariera (usunięcie 70–85% paliwa + izolacja piaskiem + sorpcja zeolitowa) zapewnia 95–98% redukcji bioekspozycji w rejonie zastoisk, przy czym zeolity zachowują pojemność sorpcyjną ($100\,000\text{ kg} \times 75\text{ mg/g} = 7\,500\text{ kg}$ zanieczyszczeń) przez okres 10–20 lat. Wariant **W6** eliminuje >99% emisji zanieczyszczeń z wraku dzięki wielowarstwowej, redundantnej barierze izolacyjnej (geomembrana HDPE jako bariera główna). W strefach osadów dennych wariant **III.C** zapewnia krótkoterminową redukcję bioekspozycji >95% natychmiast po aplikacji cappingu aktywnego (efekt izolacji + sorpcji), a w horyzoncie 5–30 lat prognozowana jest redukcja stężenia **WWA** w osadach >90% dzięki procesom biodegradacji (okres półtrwania WWA z bioremediacją: ok. 6,2–20 lat, w zależności od warunków temperaturowych). Cel nadrzędny – osiągnięcie II klasy stanu ekologicznego wg Ramowej Dyrektywy Wodnej (RDW) – prognozowany jest na ok. 2040–2055 roku.

12.3.2 Stabilizacja dna morskiego

Zastosowanie warstw cappingowych (piasek, zeolity, geotekstyl, narzut kamienny) stabilizuje strukturę dna morskiego w rejonie wraku i zastoisk. Wariant **W6** przewiduje usypanie pryzmy piaskowej

(wymiały 180 × 35 m) wyrównującej nierówny profil wraku (elementy wystające do 5 m ponad dno), a następnie ułożenie czterowarstwowej struktury izolacyjnej. Narzut kamienny (frakcja 100–300 mm) stanowi trwałą ochronę przed erozją mechaniczną – obliczenia stateczności potwierdzają odporność na prądy denne <0,5 m/s. W strefach osadów dennych warstwa cappingu aktywnego (zeolity, keramzyt, perlit o grubości 0,05–0,10 m) stabilizuje powierzchnię osadów i zapobiega ich resuspensji przez czynniki hydrodynamiczne, choć przy prądach >0,3 m/s może być wymagane wzmocnienie geotekstylami.

12.3.3 Rekolonizacja bentosu

Powierzchnie cappingowe, w szczególności narzut kamienny w wariancie **W6** oraz warstwa aktywnych minerałów w wariancie **III.C**, tworzą substrat umożliwiający rekolonizację przez organizmy bentosowe. PNZ wskazuje na efekt „sztucznej rafy” – narzut kamienny i warstwa minerałów aktywnych stanowią nowe siedlisko o korzystnych właściwościach dla makrozoobentosu. Prognozowany czas pełnej rekolonizacji zależy od rodzaju substratu i lokalnych warunków środowiskowych; w przypadku wariantów z dredgingiem (odrzucone) zniszczenie bentosu wymagałoby 2–5 lat rekolonizacji, podczas gdy wariant III.C (brak dredgingu) minimalizuje destrukcję istniejących zbiorowisk bentosowych. Strefowanie obszaru (A/B/C) zapewnia ochronę ekosystemu poprzez ograniczenie ingerencji do absolutnego minimum, co przyspiesza rekolonizację w obszarach mniej dotkniętych skażeniem.

12.3.4 Eliminacja ryzyka katastrofalnego wycieku

Postępująca korozja konstrukcji wraku S/S Stuttgart generuje ryzyko dalszego uwolnienia paliwa resztkowego (HFO/IFO) ze zbiorników wraku (ilość paliwa nieznana – wymaga weryfikacji inspekcją ROV zgodnie z Decision Gate, etap 0 wariantu W6).

Prawdopodobieństwo takiego zdarzenia nie jest wysokie, ale nie może zostać pominięte. Realizacja wariantu **W6** – wielowarstwowej izolacji hybrydowej o skuteczności >99% i trwałości >50 lat – fundamentalnie redukuje to ryzyko. Redundancja warstw (piasek + geomembrana HDPE + narzut kamienny = trzy niezależne bariery) zapewnia, że awaria jednej warstwy nie eliminuje funkcji izolacyjnej dalszych warstw. Koszt cyklu życia (LCC) wariantu W6 na 50 lat wynosi ~3,89 mln EUR, co stanowi wielokrotnie niższą wartość niż potencjalne (zakładane ale niemożliwe do określenia) koszty rozlewu.

12.3.5 Weryfikacja hipotezy ciągłej emisji paliwa

Raport porównawczy prognoz rozpadu zanieczyszczeń (dokument z 20.04.2026) wykazał, że horyzonty czasowe naturalnej regeneracji osadów są silnie uzależnione od przyjętego modelu matematycznego:

- Model bez ciągłej emisji paliwa z wraku (Raport 2025–2100): Cel RDW (II klasa) osiągnięty w 2075 r. (~50 lat), pełna regeneracja do poziomu tła naturalnego w 2090 r.

- Model z ciągłą emisją paliwa z wraku (Raport 2025–2200): Cel RDW osiągnięty dopiero po 2100 r. lub NIGDY w scenariuszu bazowym – ze względu na założenie ciągłego dopływu zanieczyszczeń ze źródła.

Kluczowe pytanie nie dotyczy poprawności obliczeniowej modeli, lecz tego, CZY z wraku Stuttgart nadal wycieka paliwo (i w jakim tempie)?⁷. Raport porównawczy jednoznacznie wskazuje na pilną konieczność weryfikacji tej hipotezy jako warunku dalszego precyzowania prognoz środowiskowych.

Zalecane działania diagnostyczne (priorytet pilny):

1. Inspekcja ROV zbiorników wraku;
2. Pułapki osadowe (sediment traps) w rejonie wraku i zastoisk na okres 6–12 miesięcy;
3. Analiza trendów czasowych – porównanie wyników badań 2025 r. z danymi historycznymi

Weryfikacja hipotezy ciągłej emisji paliwa powinna być włączona do Decision Gate (etap 0) wariantu W6 jako obligatoryjny element oceny ryzyka przed izolacją wraku.

12.3.6 Odniesienie do celów środowiskowych i ram regulacyjnych

Planowane działania naprawcze wpisują się w ramy regulacyjne wynikające z zobowiązań międzynarodowych i krajowych Polski:

- **Dyrektywa Ramowa w sprawie Strategii Morskiej (MSFD):** (Marine Strategy Framework Directive) – działania przyczyniają się do osiągnięcia dobrego stanu środowiska morskiego, w szczególności w odniesieniu do deskryptorów dotyczących zanieczyszczeń w środowisku morskim (substancje priorytetowe, w tym WWA), integralności dna morskiego oraz stanu ekologicznego. Zobowiązania MSFD stanowią jeden z głównych argumentów za realizacją PNZ.
- **Natura 2000:** – rejon wraku S/S Stuttgart wymaga oceny oddziaływania na obszary Natura 2000. Planowane działania są zgodne z celami ochrony, ponieważ:
 - 1) eliminują źródło chronicznego zanieczyszczenia ekosystemu morskiego,
 - 2) minimalizują ingerencję w siedliska (wariant III.C – brak dredgingu),
 - 3) uwzględniają okresy ochronne dla gatunków chronionych (ssaki morskie, ptaki). Wymagane jest uzyskanie pozwolenia RDOŚ.
- **Ramowa Dyrektywa Wodna (RDW):** – cel nadrzędny: osiągnięcie II klasy stanu ekologicznego w horyzoncie do 2045–2055 roku. Obecny stan ekologiczny Strefy A oceniony na IV klasę (Słaby).

⁷ Odpowiedź na tak postawione pytanie jest kluczowa dla poprawności wyliczeń czasu naturalnego rozpadu ciężkich węglowodorów w określonych badaniach warunkach fizycznych i biologicznych. W chwili obecnej nie posiadamy jednoznacznie określonych (punktowych) źródeł wycieku paliwa z wraku. Odnalezione i potwierdzone badaniami geofizycznymi „zastoiskowe jeziora” w których zalega paliwo ciężkie wskazują na istnienie takich źródeł, jednak z pomiarów nie uzyskaliśmy informacji pozwalających na wiarygodne określenie dokładnego miejsca i tempa wycieku.

- **HELCOM:** – działania zgodne z rekomendacjami Komisji Helsińskiej dotyczącymi eliminacji zagrożeń ze strony wraków stanowiących źródło zanieczyszczeń w Morzu Bałtyckim.
- **Konwencja z Nairobi:** – konwencja o usuwaniu wraków; zgodność z wymogami dotyczącymi neutralizacji zagrożeń ze strony zatopionych obiektów.
- **KPO:** – Krajowy Plan Odbudowy, w ramach którego projekt może uzyskać finansowanie.

12.4 Studium przypadku: wariant „zero” (III.0) – analiza zaniechania vs. monitoring pasywny

Wariant III.0 (tylko monitoring) stanowi szczególny przypadek w strukturze PNZ – w Strefach A i B reprezentuje scenariusz zaniechania działań aktywnych, natomiast w Strefie C jest wariantem rekomendowanym. Poniższa analiza konfrontuje skutki obu podejść.

12.4.1 Skutki zaniechania działań aktywnych w Strefach A i B

Zastosowanie wariantu III.0 (zaniechanie interwencji remediacyjnej) w Strefach A i B prowadziłoby do następujących konsekwencji środowiskowych:

- **Kontynuacja bioekspozycji na WWA/TPH:** Organizmy bentosowe, ichtiofauna denna oraz organizmy wyższe w łańcuchu troficznym (bentos → ryby denne → ryby drapieżniki → ludzie) pozostałyby narażone na chroniczne oddziaływanie WWA i TPH. Stężenia WWA w Strefie A (średnio ~6 000 µg/kg, maksymalnie ~35 000 µg/kg) wielokrotnie przekraczają progi toksyczności (ERM = 44 792 µg/kg dla wartości max., PEL = 16 770 µg/kg). Naturalny okres półtrwania WWA w osadach przekracza 50 lat, co oznacza, że bez interwencji ekspozycja utrzymywałaby się przez dekady.
- **Ryzyko migracji zanieczyszczeń:** Przy braku izolacji cappingowej osady skażone w Strefie A pozostawałyby narażone na resuspensję przez czynniki hydrodynamiczne (prądy denne ~25 cm/s, falowanie), bioturbację (organizmy bentosowe przekopujące osady) oraz procesy dyfuzji. Gradient stężeń między strefami (A→B→C) generowałby stały transport zanieczyszczeń do stref o niższym skażeniu.
- **Wpływ na ekosystem:** Utrzymujący się wysoki poziom WWA prowadziłby do degradacji zbiorowisk bentosowych (wskaźnik makrozoobentosu AMBI), obniżenia bioróżnorodności, akumulacji zanieczyszczeń w tkankach ryb i potencjalnego zagrożenia dla zdrowia ludzi (przekroczenie norm UE – Rozporządzenie 1881/2006). Wpływ na ptaki morskie i ssaki morskie (morświny) byłby pośredni – przez skażony łańcuch pokarmowy.
- **Długoterminowe konsekwencje (10–30 lat):** W horyzoncie 10–30 lat postępująca korozja wraku zwiększałaby ryzyko katastrofalnego rozlewu (prawdopodobieństwo 10–20%/10 lat). Naturalna atenuacja w Strefie A byłaby niewystarczająca – prognozowana redukcja WWA bez interwencji: zaledwie 2–5%/rok w pierwszych latach, z asymptotycznym spowolnieniem procesu. Osiągnięcie II klasy RDW w Strefie A bez interwencji jest prognozowane na ponad 50 lat.

12.4.2 Adekwatność monitoringu pasywnego w Strefie C

W przeciwieństwie do Stref A i B, wariant III.0 jest uznany za adekwatny i rekomendowany dla Strefy C. Uzasadnienie tej strategii opiera się na następujących przesłankach:

- **Uzasadnienie strategii pasywnej:** Stężenia WWA w Strefie C (szacunkowo 300–800 µg/kg) są najniższe w całym projekcie i mogą już spełniać wymogi I klasy RDW (<500 µg/kg) w wielu punktach pomiarowych. Brak hotspotów, brak wolnych frakcji węglowodorowych, malejący gradient stężeń – naturalna atenuacja jest tu najbardziej zaawansowana. Ekosystem w lepszym stanie niż w Strefach A/B (wyższy wskaźnik makrozoobentosu).
- **Parametry monitoringu:** Program monitoringu obejmuje 30-letni horyzont: faza intensywna (lata 1–3, 2 kampanie/rok), faza obserwacyjna (lata 4–15, 1 kampania/rok), faza podtrzymująca (lata 16–30, 1 kampania/2 lata). Łącznie 26 kampanii pomiarowych. Zakres: osady dennie (WWA 16 kongenerów EPA, metale ciężkie, TPH, TOC), woda (parametry fizykochemiczne, WWA rozpuszczone), monitoring biologiczny (makrozoobentos, ichtiofauna).
- **Triggery eskalacji:** Triggery bezwzględne (natychmiastowe): WWA >2 000 µg/kg w ≥3 punktach; trend wzrostowy WWA >20% przez 2–3 kampanie; migracja zanieczyszczeń ze stref A/B. Triggery warunkowe (analiza w 6 miesięcy): WWA >1 000 µg/kg w ≥5 punktach; spadek indeksu AMBI o ≥1 klasę; wykrycie WWA w tkankach organizmów powyżej norm UE; zmiana warunków hydrodynamicznych.
- **Prognoza rozwoju sytuacji:** Krótkoterminowo (0–5 lat): naturalna atenuacja ~2–5%/rok. Średnio-terminowo (5–15 lat): redukcja WWA o ~15–40%. Długoterminowo (15–30 lat): redukcja o ~30–60%, stabilne stężenia <300 µg/kg. Osiągnięcie celu RDW (II klasa): prognoza ~2035–2040 dla Strefy C.

Strategia monitoringu pasywnego w Strefie C jest zgodna z zasadą **ALARP** (As Low As Reasonably Practicable) – nie generuje ryzyk środowiskowych związanych z interwencją, zachowuje pełną odwracalność decyzji i jest proporcjonalna do faktycznego poziomu zagrożenia. Koszt wariantu III.0 (NPV 0,94 mln EUR) stanowi zaledwie 26,7% kosztu wariantu III.C (3,52 mln EUR), co uzasadnia przyjęcie strategii fazowej z opcją eskalacji.

12.5 Głęboka analiza wybranych wariantów

Niniejsza sekcja zawiera szczegółową, ekspercką analizę oddziaływania środowiskowego czterech kluczowych wariantów działań naprawczych: **Z7** (zastoiska paliwa), **W6** (zabezpieczenie wraku), **III.C** (remediacja osadów w strefach najwyższego skażenia) oraz **III.0** (monitoring pasywny w strefie peryferyjnej). Analiza opiera się na danych technicznych, obliczeniach inżynierskich i prognozach skuteczności zawartych w dokumentacji PNZ.

12.5.1 Wariant Z7 (Zastoiska paliwa HFO) – Wpływ usunięcia wolnej fazy paliwa i aktywnego cappingu na chemię wody i osadów

Mechanizm działania Z7. Wariant Z7 stanowi najbardziej kompleksowe rozwiązanie dla zastoisk paliwa, łączące trzy komplementarne technologie w logicznej sekwencji operacyjnej zgodnej z koncepcją „cappingu aktywnego” opisaną w PNZ Stuttgart.

- Etap 1 – odsysanie wolnej fazy paliwa HFO/smoły pogazowej z 16 zastoisk na dnie morskim (łączna powierzchnia 978 m², głębokość 22–24 m) przy użyciu pomp ssących o wydajności 3,5 m³/h (efektywnie 2,625 m³/h przy sprawności 75%). Cel: usunięcie 70–85% wolnego paliwa (szacowana objętość 146,7 m³, zakres 98–196 m³; masa 146,7 t). Ciąg technologiczny obejmuje lokalizację zastoisk (SSS, MBES, ROV), pozycjonowanie barki (DGPS), odsysanie przez rurociąg HDPE (~36 m), separację paliwo-woda na barce (separator 10 m³/h) i magazynowanie w zbiornikach 50–100 m³.
- Etap 2 – pokrycie zastoisk warstwą piasku morskiego o grubości 0,5 m (objętość 1 250 m³, masa 2 000 t, gęstość 1,6 t/m³) jako izolacja mechaniczna.
- Etap 3 – aplikacja warstwy klinoptilolitu (zeolit naturalny) o grubości 5 cm (objętość 125 m³, masa 100 t, granulacja 2–5 mm) jako aktywna bariera sorpcyjna.

Wpływ na stężenia WWA/TPH w wodzie i osadach. Potrójna bariera wariantu Z7 oddziałuje na stężenia zanieczyszczeń w trzech mechanizmach jednocześnie:

- 1) fizyczne usunięcie źródła – odsysanie eliminuje 70–85% wolnego paliwa, bezpośrednio redukując pulę substancji ropopochodnych w środowisku;
- 2) izolacja mechaniczna – warstwa piasku 0,5 m odcina kontakt resztkowego paliwa z kolumną wody, ograniczając transport dyfuzyjny i adwekcyjny WWA;
- 3) aktywna sorpcja – warstwa zeolitu o pojemności sorpcyjnej 7 500 kg zanieczyszczeń (100 000 kg × 75 mg/g) wiąże resztkowe WWA i fenole migrujące przez warstwę piasku, immobilizuje metale ciężkie metodą wymiany jonowej oraz katalizuje degradację związków organicznych.

Łączny efekt: skuteczność redukcji bioekspozycji na poziomie 95–98% – najwyższa spośród wszystkich wariantów Z.

Skuteczność izolacji źródła zanieczyszczeń. Wariant Z7 jest jedynym rozwiązaniem, które łączy usunięcie źródła z aktywną remediacją długoterminową. Warianty bez odsysania (Z1–Z4) pozostawiają pełną objętość paliwa pod izolacją – tworząc dodatkowy obszar skażenia. Wariant Z5 (samo odsysanie) usuwa źródło, ale nie zapewnia trwałej izolacji (pozostałości 15–30%). Wariant Z6 (odsysanie + piasek) ma skuteczność 90–95%, ale brak aktywnej remediacji oznacza, że piasek jest prze-

puszczalny i trwałość ogranicza się do 15–25 lat. Z7 – dzięki warstwie zeolitowej – zachowuje aktywność remediacyjną przez 10–20 lat, a zeolity mogą być regenerowane (wymiana warstwy).

Wpływ na bioekspozycję organizmów. Zastoiska paliwa stanowią skoncentrowane źródła emisji zanieczyszczeń w bezpośrednim otoczeniu wraku. Organizmy bentosowe zasiedlające dno w rejonie zastoisk (strefa A) są narażone na bezpośredni kontakt z wolną fazą paliwa ciężkiego. Realizacja wariantu Z7 redukuje tę ekspozycję o 95–98%, przy czym efekt izolacji jest natychmiastowy (po ułożeniu cappingu), a efekt sorpcyjny i degradacyjny narasta w czasie. Warstwa zeolitu tworzy ponadto substrat korzystny dla rekolonizacji przez mikroorganizmy zdolne do biodegradacji węglowodorów, co wzmacnia samooczyszczanie środowiska.

Długoterminowa stabilność rozwiązania. Prognozowana trwałość wariantu Z7 wynosi 20–30 lat. Warstwa piasku jest narażona na erozję hydrodynamiczną – przy prądach dennych $>0,3$ m/s może być wymagane wzmocnienie. Warstwa zeolitu jest potencjalnie narażona na rozmycie (zidentyfikowane ryzyko w PNZ). Program monitoringu 10-letniego obejmuje: batymetrię MBES (kontrola grubości warstw), inspekcję ROV (dokumentacja wideo), pobór próbek osadów i wody, analizy laboratoryjne WWA/TPH. Monitoring prowadzony w pięciu kampaniach: rok 1, 2, 3, 5, 10.

Ryzyka środowiskowe podczas realizacji. Kluczowe ryzyka fazy realizacji wariantu Z7 obejmują: ryzyko uwolnienia paliwa podczas odsysania (awaria systemu pompowego, rozszczelnienie rurociągu), chwilowe zaburzenie mętności wody przy aplikacji piasku i zeolitu, hałas podwodny z operacji ROV i pomp, oraz ograniczone okno pogodowe (kwiecień–październik, stan morza ≤ 3 B). Czas realizacji: 30–50 dni (Etap 1: 15–25 dni, Etap 2: 8–12 dni, Etap 3: 3–9 dni). Mitygacja: procedury stop-work przy mętności >50 NTU i WWA w wodzie >1 $\mu\text{g/l}$, monitoring online, OSCP.

Korzyści środowiskowe po realizacji. Po zakończeniu prac wariant Z7 zapewnia:

- 1) eliminację 70–85% paliwa z zastoisk (efekt trwałości),
- 2) redukcję bioekspozycji o 95–98%,
- 3) aktywną remediację resztkowych zanieczyszczeń przez 10–20 lat (zeolity),
- 4) stabilizację dna w rejonie zastoisk,
- 5) substrat korzystny dla rekolonizacji bentosu. Całkowity koszt ($\sim 370\,000$ EUR) przy skuteczności 95–98% stanowi optymalną relację koszt/efekt środowiskowy.

Porównanie z innymi wariantami Z. Wariant Z7 przewyższa wszystkie pozostałe warianty Z pod względem skuteczności środowiskowej. Warianty izolacyjne bez odsysania (Z1–Z4) pozostawiają pełną objętość paliwa in situ: Z1 (piasek) – 70–75% skuteczności, erozja 10–15 lat; Z2 (geotekstyl + kamień) – 75–80%, trwałość 15–25 lat; Z3 (PRB) – 85–90%, ale wysoki koszt (~ 893 tys. EUR); Z4 (hybrydowy) – $>95\%$, trwałość >40 lat, ale paliwo pozostaje. Warianty z odsysaniem: Z5 (samo odsysanie) – 70–85% skuteczności, brak izolacji; Z6 (odsysanie + piasek) – 90–95%, brak aktywnej remediacji. Z7 łączy zalety wszystkich podejść w jednym rozwiązaniu o najwyższej skuteczności.

12.5.2 Wariant W6 (Zabezpieczenie wraku) – Skuteczność wielowarstwowej izolacji hybrydowej jako bariery ekologicznej

Struktura wielowarstwowej izolacji. Wariant W6 łączy najlepsze cechy wariantów W1, W2 i W5, tworząc wielowarstwową strukturę izolacyjną o optymalnej relacji koszt/skuteczność. Struktura od dołu do góry obejmuje:

- 1) **Warstwa 1 – Geotekstyl separacyjny** (300 g/m^2 , $\sim 8\,272 \text{ m}^2$, $\sim 2,5 \text{ t}$) – zapobiega mieszanii się materiałów warstw i stanowi warstwę ochronną dla geomembrany od strony wraku;
- 2) **Warstwa 2 – Piasek morski** (grubość $1,0 \text{ m}$, $\sim 7\,520 \text{ m}^3$, $\sim 12\,032 \text{ t}$) – wyrównanie powierzchni i warstwa buforowa chroniąca geomembranę od dołu; (
- 3) **Warstwa 3 – Geomembrana HDPE** (grubość 2 mm , $\sim 8\,648 \text{ m}^2$, $\sim 16,3 \text{ t}$) – bariera główna, nieprzepuszczalna warstwa izolacyjna spawana pod wodą;
- 4) **Warstwa 4 – Narzut kamienny** (frakcja $100\text{--}300 \text{ mm}$, grubość $0,5 \text{ m}$, $\sim 3\,760 \text{ m}^3$, $\sim 6\,768 \text{ t}$) – ochrona mechaniczna geomembrany, stabilizacja antyerozyjna, substrat dla rekolonizacji biologicznej.

Przed ułożeniem warstw wymagane jest usypanie pryzmy piaskowej ($180 \times 35 \text{ m}$) wyrównującej nierówny profil wraku (elementy wystające do 5 m). Wymiary obszaru warstw ochronnych z marginesami bezpieczeństwa: $190 \times 45 \text{ m} = 8\,550 \text{ m}^2$.

Mechanizm działania jako bariera ekologiczna. Wielowarstwowa struktura W6 pełni funkcję bariery ekologicznej na zasadzie redundancji: geomembrana HDPE stanowi nieprzepuszczalną barierę główną, chroniącą przed migracją zanieczyszczeń z wraku do kolumny wody i biosfery; piasek wyrównawczy absorbuje nierówności podłoża i chroni geomembranę przed przebiciami od strony wraku; geotekstyl separacyjny zapobiega mieszanii warstw i uszkodzeniom mechanicznym; narzut kamienny chroni całą strukturę przed erozją mechaniczną (kotwiczenie, trawlowanie) oraz prądami dennymi. Kluczową cechą W6 jest to, że awaria jednej warstwy nie eliminuje funkcji izolacyjnej – piasek + geomembrana + narzut = trzy niezależne bariery.

Skuteczność w zapobieganiu migracji zanieczyszczeń. Skuteczność izolacji wariantu W6 została określona na $>99\%$ – najwyższa spośród wariantów o umiarkowanym koszcie. Obliczenia inżynierskie przepływu przez warstwę izolacyjną potwierdzają, że geomembrana HDPE o grubości 2 mm jest praktycznie nieprzepuszczalna dla substancji ropopochodnych w warunkach morskich. Eliminacja $>99\%$ emisji zanieczyszczeń z wraku do środowiska morskiego obejmuje zarówno chroniczne uwalnianie (dyfuzja, adwekcja) jak i potencjalne wycieki z degradujących zbiorników paliwa.

Trwałość rozwiązania. Prognozowana trwałość wariantu W6 przekracza 50 lat . Geomembrana HDPE jest odporna na degradację w warunkach morskich – brak ekspozycji na promieniowanie UV pod wodą, niska temperatura ($4\text{--}8^\circ\text{C}$ przy dnie), chemiczna inertność polimeru. Narzut kamienny (frakcja $100\text{--}300 \text{ mm}$) jest odporny na erozję hydrodynamiczną – obliczenia stateczności potwierdzają stabilność przy prądach dennych $<0,5 \text{ m/s}$, typowych dla Zatoki Gdańskiej. Analiza kosztu cyklu życia (LCC)

na 50 lat wynosi ~3,89 mln EUR, przy założeniu napraw ~100 000 EUR co 10 lat i monitoringu: 50 000 EUR/rok (lata 1–5), 25 000 EUR/rok (lata 6–20), 15 000 EUR/rok (lata 21–50). Jest to najniższy LCC spośród wariantów o skuteczności >95%.

Wpływ na stabilizację dna. Pryzma piaskowa i warstwy cappingowe fundamentalnie zmieniają rzeźbę dna w rejonie wraku – z nierównego profilu (elementy wystające do 5 m) na łagodną, stabilną powierzchnię. Obliczenia obciążenia dna masą cappingu potwierdzają dopuszczalność nacisku na grunt dna morskiego. Analiza osiadania warstwy piaskowej w czasie wskazuje na stopniową konsolidację, która nie zagraża integralności struktury izolacyjnej. Nachylenie skarp bocznych pryzmy (1:3) odpowiada naturalnemu kątowi zsypania pod wodą.

Możliwość rekolonizacji bentosu na powierzchni cappingu. PNZ wskazuje na pozytywny efekt ekologiczny wariantu W6 – narzut kamienny na powierzchni cappingu tworzy substrat o korzystnych właściwościach dla organizmów bentosowych, funkcjonując jako „sztuczna rafa”. Kamienie o frakcji 100–300 mm zapewniają różnorodność mikrosiedlisk (szczeliny, powierzchnie, krawędzie), sprzyjając kolonizacji przez wieloszczety, małże, skorupiaki i inne organizmy sessylne (osiadłe). Efekt ten nie tylko kompensuje chwilowe zaburzenie siedliska podczas prac budowlanych, ale może długoterminowo zwiększyć bioróżnorodność w rejonie wraku – przekształcając źródło skażenia w element wzbogacający ekosystem.

Ryzyka środowiskowe. Zidentyfikowane ryzyka długoterminowe obejmują:

- 1) potencjalne uszkodzenie cappingu przez kotwiczenie lub trawlowanie – wymagane ustanowienie strefy zakazu;
- 2) spawanie geomembrany HDPE pod wodą stanowi operację technicznie wymagającą z ograniczoną liczbą wykonawców na Bałtyku;
- 3) brak pewności co do ilości paliwa w zbiornikach wraku – ryzyko, że capping „zamknie” duże ilości HFO bez możliwości późniejszego usunięcia (rozwiązane przez Decision Gate);
- 4) monitoring długoterminowy (50 lat) wymaga stabilnego finansowania i ciągłości instytucjonalnej;
- 5) potencjalny konflikt z ewentualnymi planami podniesienia wraku w przyszłości.

Monitoring długoterminowy. Plan monitoringu wariantu W6 obejmuje kontrolę integralności warstw izolacyjnych, monitoring chemiczny (stężenia WWA/TPH w osadach i wodzie w otoczeniu cappingu), monitoring biologiczny (stan bentosu na powierzchni i w otoczeniu cappingu) oraz inspekcje batymetryczne (MBES) i wizualne (ROV). Zgodnie z PNZ, kryteria potwierdzenia skuteczności obejmują: brak przekroczeń progowych stężeń w kolumnie wody, stabilność geometryczna warstw, integralność spawów geomembrany.

12.5.3 **Wariant III.C (Obszary A i B) – Analiza korzyści z aktywnej remediacji i cappingu w strefach najwyższego skażenia**

Charakterystyka Stref A i B. Strefa A (~8 ha) stanowi bezpośrednie otoczenie wraku i jest strefą najwyższego priorytetu ze względu na ekstremalnie wysokie stężenia zanieczyszczeń: **WWA** średnie ~6 000 µg/kg, maksymalnie ~35 000 µg/kg (ponad 70-krotność normy TEL = 1 684 µg/kg wg NOAA SQiRTs), **TPH** ~270 mg/kg. Stan ekologiczny: IV klasa (Staby). Obecność 16 zastoisk paliwa (978 m²) – te są objęte odrębnym wariantem Z. Strefa B (~18 ha) to strefa przejściowa ze stężeniami WWA 1–10 mg/kg, z podstrefami B1 (4–10 mg/kg) i B2 (1–4 mg/kg). Strefa B pełni kluczową rolę barierową geochemiczną na osi A↔C. Dominujące zanieczyszczenia obejmują 16 kongenerów WWA (naftalen, fenantren, piren, fluoranten, benzo[a]piren) oraz TPH frakcji ciężkiej o niskiej biodegradowalności.

Mechanizm bioremediacji + capping aktywny. Wariant III.C zakłada pokrycie całej powierzchni Stref A i B warstwą aktywnych minerałów (zeolity, keramzyt, perlit) o grubości 0,10 m w Strefie A i 0,05–0,10 m w Strefie B, bez dredgingu – minimalna ingerencja mechaniczna w osady dennie. Trójstopniowy mechanizm działania:

- 1) izolacja fizyczna – warstwa minerałów aktywnych odcina skażone osady od kolumny wody i biosfery, natychmiast redukując bioekspozycję;
- 2) sorpcja – minerały aktywne (szczególnie zeolity – klinoptilolit) wiążą WWA na swojej powierzchni, immobilizując je w matrycy mineralnej;
- 3) bioremediacja – minerały aktywne tworzą mikrośrodowisko o korzystnych warunkach (porowatość, wymiana jonowa, buforowanie pH) dla autochtonicznych bakterii psychrotolerantnych zdolnych do degradacji węglowodorów (*Pseudomonas*, *Rhodococcus*, *Shewanella*).

Degradacja biologiczna zachodzi pomimo niskiej temperatury wody przy dnie (5–6°C), choć z obniżoną kinetyką w porównaniu z warunkami cieplejszymi.

Skuteczność redukcji WWA/TPH. Prognoza redukcji zanieczyszczeń dla wariantu III.C: krótkoterminowo (0–5 lat) – redukcja bioekspozycji >95% (dominujący efekt izolacji fizycznej i sorpcji); długoterminowo (5–30 lat) – redukcja stężenia WWA w osadach >90% (dominujący efekt biodegradacji). Okres półtrwania WWA z bioremediacją oszacowano na ok. 6,2 lat dla Strefy A (w scenariuszu z remediacją). Osiągnięcie II klasy stanu ekologicznego (RDW) prognozowane jest na ~2045 rok dla Strefy A i ~2040–2045 dla Strefy B. NPV 30 lat (łącznie A+B+C): ~74 mln EUR – najniższy spośród wariantów aktywnych. Szacunkowy NPV dla samego Obszaru A: ~19,3 mln EUR.

Wpływ na bioekspozycję w strefach krytycznych. W Strefie A, gdzie stężenia WWA wielokrotnie przekraczają progi toksyczności, natychmiastowa redukcja bioekspozycji >95% po aplikacji cappingu ma fundamentalne znaczenie dla ochrony bentosu i łańcucha pokarmowego. Izolacja osadów zapobiega bezpośredniemu kontaktowi organizmów z zanieczyszczeniami, a sorpcja na zeolitach redukuje stężenia WWA w warstwie przydennej kolumny wody. W Strefie B capping aktywny pełni dodatkową

funkcję bariery geochemicznej na granicy A↔C, zapobiegając migracji zanieczyszczeń z rejonu wraku do strefy peryferyjnej.

Czas osiągnięcia celów środowiskowych. Realizacja prac cappingowych: 3–6 miesięcy dla Strefy A (faza pilotażowa 4–6 tygodni na 5–10% powierzchni, pełna implementacja 8–16 tygodni), analogicznie dla Strefy B (8 tygodni cappingu). Monitoring intensywny: co 6 miesięcy przez 2 lata po aplikacji. Monitoring standardowy: co 2 lata do 2045. Monitoring rozrzedzony: co 5 lat do 2056. Łączny horyzont monitoringu: 30 lat. Rekomendowana sekwencja: najpierw realizacja Strefy A, następnie Strefy B; kroki dokumentacyjne mogą być prowadzone równolegle.

Korzyści ekologiczne. Wariant III.C generuje szereg korzyści ekologicznych wykraczających poza samą redukcję zanieczyszczeń:

- 1) efekt „sztucznej rafy” – warstwa aktywnych minerałów stanowi nowy substrat dla rekolonizacji makrozoobentosu, potencjalnie zwiększając bioróżnorodność lokalną;
- 2) minimalna destrukcja istniejących zbiorowisk bentosowych (brak dredgingu);
- 3) przerwanie łańcucha bioakumulacji WWA (bentos → ryby denne → drapieżniki → ludzie);
- 4) redukcja chronicznego uwalniania WWA z osadów, którego naturalny okres półtrwania przekracza 50 lat;
- 5) zgodność z zasadą ALARP – minimalne ryzyko przy wystarczającej skuteczności.

Porównanie z wariantem biernym (III.0) w Strefach A i B. Zastosowanie wariantu III.0 (zaniechanie) w Strefach A i B byłoby nieadekwatne do poziomu zagrożenia. Przy stężeniach WWA do 35 000 µg/kg w Strefie A naturalna atenuacja (2–5%/rok) nie zapewniłaby osiągnięcia celów RDW w akceptowalnym horyzoncie czasowym (>50 lat). Wariant III.C redukuje ten czas do ~20–25 lat dzięki aktywnej biodegradacji. Ponadto brak izolacji oznaczałby utrzymanie pełnej bioekspozycji przez cały okres naturalnej degradacji, podczas gdy III.C redukuje ją o >95% natychmiast. Warianty z dredgingiem (III.D-A, III.D-B) zostały odrzucone ze względu na: ryzyko krytyczne resuspensji (R=9), koszty wyższe o 24–66% (NPV 92–123 mln EUR vs. 74 mln EUR), problemy z utylizacją ~40 000 m³ osadów niebezpiecznych (szacowany koszt utylizacji 18–48 mln EUR) oraz destrukcję bentosu wymagającą 2–5 lat rekolonizacji.

12.5.4 Wariant III.0 (Obszar C) – Uzasadnienie środowiskowe dla strategii monitoringu pasywnego

Charakterystyka Strefy C. Strefa C (~19 ha) stanowi zewnętrzną, peryferyjną strefę oddziaływania wraku S/S Stuttgart, charakteryzującą się najniższymi stężeniami zanieczyszczeń w całym projekcie. Szacowane stężenia **WWA**: 300–800 µg/kg (tj. ~5–13% poziomu Strefy A), **TPH**: ~30–80 mg/kg. Wartości te mogą być bliskie lub poniżej normy II klasy RDW (2 000 µg/kg dla WWA), a część strefy może już spełniać wymogi I klasy (<500 µg/kg). Strefa C wyróżnia się: brakiem lub minimalną obecnością hot-spotów, brakiem wolnych frakcji węglowodorowych, malejącym gradientem stężeń (naturalna atenuacja jest tu najbardziej zaawansowana), lepszym stanem ekosystemu niż w Strefach A/B (wyższy

wskaźnik makrozoobentosu). Strefa pełni funkcję bufora zewnętrznego chroniącego przed rozprzestrzenianiem poza obszar projektu.

Uzasadnienie braku interwencji aktywnej. Decyzja o rezygnacji z aktywnej remediacji w Strefie C wynika z zasady proporcjonalności i analizy kosztów/korzyści. Przy niskim skażeniu nadmierne działania remediacyjne byłyby:

- 1) nieproporcjonalnie kosztowne – wariant III.C kosztuje 3,52 mln EUR (NPV) vs. 0,94 mln EUR dla III.0, warianty z dredgingiem 22–24 mln EUR;
- 2) potencjalnie bardziej szkodliwe niż samo skażenie – jakiegokolwiek prace na dnie (nawet capping) wiąże się z chwilowym zaburzeniem osadów i bentosu;
- 3) nieuzasadnione ekologicznie – stężenia mogą już spełniać normy bez interwencji. Zerowa inwazyjność wariantu III.0 oznacza brak resuspensji osadów, brak zniszczenia zbiorowisk bentosowych i zachowanie aktualnego stanu ekologicznego.

Naturalne procesy degradacji (atenuacja). Strefa C korzysta z naturalnych procesów samooczyszczania środowiska morskiego:

- 1) biodegradacja – autochtoniczne bakterie psychrotolerantne obecne w osadach bałtyckich (zdolne do aktywności w temperaturze 4–8°C) rozkładają związki organiczne, w tym WWA;
- 2) sorpcja na cząstkach organicznych osadu (TOC) – immobilizacja zanieczyszczeń w matrycy sedymentu;
- 3) fotodegradacja w strefie fotycznej – rozkład WWA pod wpływem promieniowania UV (ograniczone do warstw powierzchniowych przy widoczności podwodnej 1–5 m).

Prognoza: krótkoterminowo (0–5 lat) naturalna atenuacja ~2–5%/rok; średnioterminowo (5–15 lat) redukcja WWA o ~15–40%; długoterminowo (15–30 lat) redukcja o ~30–60%, stabilne stężenia <300 µg/kg.

Program monitoringu. Wariant III.0 zakłada 30-letni program monitoringu o malejącej częstotliwości: faza intensywna (lata 1–3) – 2 kampanie/rok (6 kampanii), faza obserwacyjna (lata 4–15) – 1 kampania/rok (12 kampanii), faza podtrzymująca (lata 16–30) – 1 kampania/2 lata (8 kampanii). Łącznie 26 kampanii pomiarowych. Każda kampania obejmuje: pobór próbek osadów w 10–15 punktach (grid stały + punkty referencyjne), analizy laboratoryjne (WWA 16 kongenerów EPA, metale ciężkie, TPH, TOC), analizy wody (parametry fizykochemiczne, WWA rozpuszczone), monitoring biologiczny (makrozoobentos co 2–3 kampanie, ichtiofauna co 3–5 kampanii), raportowanie i aktualizację bazy danych GIS. Szacowany koszt kampanii: ~38 000 EUR (faza intensywna: ~76 000 EUR/rok, faza obserwacyjna: ~38 000 EUR/rok, faza podtrzymująca: ~19 000 EUR/rok).

Triggerzy eskalacji. System triggerów zapewnia bezpieczeństwo strategii pasywnej. Triggerzy bezwzględne (natychmiastowe uruchomienie remediacji III.C): stężenia WWA >2 000 µg/kg (przekroczenie II klasy RDW) w ≥3 punktach pomiarowych; trend wzrostowy WWA >20% przez 2–3 kolejne kampanie; migracja zanieczyszczeń poza strefę C. Triggerzy warunkowe (analiza i decyzja w 6 miesięcy):

stężenia WWA $>1\,000\ \mu\text{g/kg}$ w ≥ 5 punktach; spadek indeksu AMBI o ≥ 1 klasę; wykrycie WWA w tkankach organizmów powyżej norm UE (Rozp. 1881/2006); zmiana warunków hydrodynamicznych zwiększająca ryzyko resuspensji. Procedura: stwierdzenie triggera $\rightarrow$ próbkowanie weryfikacyjne (3 miesiące) $\rightarrow$ potwierdzenie $\rightarrow$ raport techniczny $\rightarrow$ decyzja inwestora $\rightarrow$ mobilizacja wariantu III.C. Szacowany czas od triggera do rozpoczęcia remediacji: 12–18 miesięcy. Dodatkowy koszt eskalacji: $\sim 2,6\text{--}4,1$ mln EUR.

Prognoza rozwoju sytuacji (10–30 lat). W scenariuszu bazowym (brak uruchomienia triggerów) Strefa C osiąga cel RDW (II klasa) do $\sim 2035\text{--}2040$, wyłącznie dzięki procesom naturalnej atenuacji. Ten horyzont czasowy regeneracji Strefy C stanowi bezpośredni kontrast z tezą ogólną o „braku naturalnej regeneracji w 50+ lat” – rzeczywiste horyzonty są silnie zróżnicowane strefowo i uzależnione od lokalnej skali skażenia oraz obecności/braku źródła emisji. W scenariuszu pesymistycznym (eskalacja do III.C w roku 5) łączny koszt NPV nie przekroczy $\sim 4,5$ mln EUR – nadal znacząco mniej niż warianty z dredgingiem. Wariant III.0 zakłada również utrzymanie zakazu trałowania na 48 ha (łącznie ze strefami A+B) jako środka ochronnego zapobiegającego mechanicznej resuspensji osadów.

Warunki eskalacji do działań aktywnych. Warunkiem zasadności wariantu III.0 jest potwierdzenie stężeń WWA $<1\,000\ \mu\text{g/kg}$ w badaniach bazowych (rok 0). W przypadku stwierdzenia wyższych stężeń wymagane jest bezpośrednie przejście na wariant III.C. Strategia fazowa dla Strefy C obejmuje: Fazę 0 (rok 0) – badania bazowe i potwierdzenie kwalifikacji do III.0;

Fazę 1 (lata 1–3) – monitoring intensywny;

Fazę 2 (lata 4–15) – monitoring obserwacyjny;

Fazę 3 (lata 16–30) – monitoring podtrzymujący. Pełna odwracalność decyzji zapewnia bezpieczeństwo strategii.

Zgodność z zasadą ALARP. Wariant III.0 jest modelowym przykładem zastosowania zasady **ALARP** (As Low As Reasonably Practicable) w kontekście remediacji środowiska morskiego. Przy niskim poziomie zagrożenia (stężenia bliskie normom) i dostępności systemu triggerów eskalacji, brak interwencji aktywnej stanowi rozwiązanie minimalizujące ryzyko (zarówno środowiskowe, jak i finansowe) przy zachowaniu pełnej kontroli nad sytuacją.

Efektywność kosztowa vs. środowiskowa. Analiza porównawcza wariantów dla Strefy C jednoznacznie wskazuje na wariant III.0 jako optymalny: NPV 0,94 mln EUR stanowi 26,7% kosztu III.C (3,52 mln EUR) i 4,1% kosztu III.D-A (22,83 mln EUR). Nawet warianty z dredgingiem (III.D-A/B: 22–24 mln EUR, tj. $24\text{--}25\times$ więcej niż III.0) nie oferują proporcjonalnie wyższej skuteczności w strefie o niskim skażeniu. Kluczowy argument: koszt utylizacji osadów w wariantach III.D sięga 32–86 mln EUR, a sama ta pozycja jest wielokrotnie wyższa niż całkowity NPV wariantu III.0. Strategia fazowa z opcją eskalacji zapewnia równowagę między ochroną środowiska a racjonalnością ekonomiczną.

Spis ilustracji

Rysunek 1 Wizualizacja dwóch prostopadłych SBP (linie 1040 i 1336) wraz z przestrzenną rekonstrukcją przestrzennego rozkładu strefy zanieczyszczenia (kolor czerwono-różowy) w wariantie wstępnej interpretacji.	45
Rysunek 2 Wizualizacja dwóch prostopadłych SBP (linie 1051 i 1336) wraz z przestrzenną rekonstrukcją przestrzennego rozkładu strefy zanieczyszczenia (kolor czerwono-różowy) w wariantie wstępnej interpretacji.	46
Rysunek 3 Wizualizacja linii 1051, 1091 i 1336) wraz z przestrzenną rekonstrukcją przestrzennego rozkładu strefy zanieczyszczenia (kolor czerwono-różowy) w wariantie wstępnej interpretacji.	46
Rysunek 4 Korelacja mapy obrazującej zasięg skażenia dna z granicami stref zanieczyszczenia opracowanymi na podstawie pomiarów SBP. Żółtymi strzałkami oznaczono potencjalne kierunki migracji potwierdzające trafność wykonanej interpretacji.	47
Rysunek 5 Mapa delimitacji skażonych osadów dennych na podstawie pomiarów SBP.	48
Rysunek 6 Mapa spągu warstwy skażonych osadów dennych na podstawie pomiarów SBP	49
Rysunek 7 Mapa miąższości warstwy skażonych osadów dennych na podstawie pomiarów SBP	50
Rysunek 8 Mapa delimitacji głębszych osadów prawdopodobnie skażonych płynną formą paliwa na podstawie pomiarów SBP	51
Rysunek 9 Mapa spągu głębszych osadów prawdopodobnie skażonych płynną formą paliwa na podstawie pomiarów SBP	52
Rysunek 10 Mapa miąższości głębszych osadów prawdopodobnie skażonych płynną formą paliwa na podstawie pomiarów SBP	53
Rysunek 11 Zasięg skażenia dna paliwem ciężkim wypływającym z wraku Stuttgart w latach 1999 – 2016), Źródło: Opinie i ekspertyzy OE-364, Warszawa 2021. Opracowanie pt.: Analiza dotycząca zanieczyszczeń Morza Bałtyckiego, ze szczególnym uwzględnieniem statków zatopionych podczas I i II wojny światowej. Informacja na temat działań podjętych w związku z zanieczyszczeniami przez Parlament Europejski, Komisję Helsińską oraz rządy innych państw	54
Rysunek 12 Histogram rozkładu powierzchni (ang. Planar Area) w klasach miąższości co 0,05 m dla interpretowanej warstwy głębszych osadów dennych (izopacha oparta na założeniach interpretacyjnych ze względu na słabą jakość danych akustycznych).	55
Rysunek 13 Histogram rozkładu objętości w klasach miąższości co 0,05 m dla interpretowanej warstwy głębszych osadów dennych (izopacha oparta na założeniach interpretacyjnych ze względu na słabą jakość danych akustycznych).	56
Rysunek 14 Histogram rozkładu powierzchni (ang. Planar Area) w klasach miąższości co 0,05 m dla interpretowanej warstwy głębszych osadów dennych (izopacha oparta na założeniach interpretacyjnych ze względu na słabą jakość danych akustycznych).	57
Rysunek 15 Histogram rozkładu objętości w klasach miąższości co 0,05 m dla interpretowanej warstwy głębszych osadów dennych (izopacha oparta na założeniach interpretacyjnych ze względu na słabą jakość danych akustycznych).	57
Rysunek 16 Mapa wydzieleni obszarów o różnych poziomach skażenia gruntu (w skali 5 stopniowej).	61
Rysunek 17 Obszar wydzieleni obszaru o zmienionej echogeniczności wykonana w oparciu o badania w 2025	61
Rysunek 18 Zbiorcza mapa obszarów skażeń określona w 2016 i 2025/6 roku.	62
Rysunek 19 Zbiorcza mapa z kompletem badań w latach 2016-2025:	63
Rysunek 20 Mapa wydzieleni obszarów o różnych poziomach skażeń według skali przyjętej do dalszego przetwarzania w ramach zakładanego działania w PNZ.	64

<i>Rysunek 21. Schemat strefowania A/B/C wokół wraku Stuttgart (na podstawie Rysunek 6, Analiza ryzyka)</i>	<i>64</i>
<i>Rysunek 22 Mozaika sonarowa wraku wysokiej rozdzielczości wraku Stuttgart (2025)</i>	<i>65</i>
<i>Rysunek 23 Mozaika sonarowa wraku Stuttgart z wydzielonymi obszarami, w których może znajdować się „zastoisko”</i>	<i>68</i>
<i>Rysunek 24 Wydzielenie dużego obszaru stanowiącego obszar zastoiskowy dla paliwa ciężkiego.</i>	<i>70</i>
<i>Rysunek 25 Mapa lokalizacji wraku S/S Stuttgart i zastoisk paliwowych.....</i>	<i>70</i>

Spis tabel

Tabela 1 Parametry skażenia – wartości średnie, maksymalne i normy referencyjne	24
Tabela 2 Lokalizacje hot-spotów z priorytetyzacją.....	24
Tabela 3 Analiza trendów – porównanie danych historycznych z obecnymi.....	24
Tabela 4 Parametry stref – powierzchnia, objętość osadów, status ekosystemu	27
Tabela 5 Porównanie wariantów (Master Table)	27
Tabela 6 Kamienie milowe M1–M7	31
Tabela 7 Szczegółowe zestawienie kosztów projektu PNZ Stuttgart	32
Tabela 8 Macierz kluczowych ryzyk – Top 5	34
Tabela 9 Lista kluczowych terminów:	35
Tabela 10 Wykaz osób biorących udział w opracowaniu PNZ	42
Tabela 11 Rozkład miąższości warstwy zanieczyszczonych osadów (klasy co 5 cm) – bilans powierzchni i objętości	56
Tabela 12 Rozkład miąższości interpretowanej warstwy głębszej (klasy co 5 cm) – bilans powierzchni i objętości	57
Tabela 13 Strefowanie obszaru skażonego	59
Tabela 14 Współrzędne i obszary zastoisk paliwa w pobliżu wraku SS Stuttgart	69
Tabela 15 Charakterystyka pozostałych obszarów uznanych za skażone.	71
Tabela 16 Tabela porównawcza wariantów Z1–Z7	77
Tabela 17 Materiały i koszty dla Z1	78
Tabela 18 Materiały i koszty dla Z2	78
Tabela 19 Materiały i koszty dla Z3	79
Tabela 20 Materiały i koszty dla Z4	79
Tabela 21 Materiały i koszty dla Z5	80
Tabela 22 Materiały i koszty dla Z6	81
Tabela 23 Materiały i koszty dla Z7	81
Tabela 24 Tabela porównawcza wariantów W1–W6	82
Tabela 25 Materiały i koszty dla W1	82
Tabela 26 Materiały i koszty dla W2.....	83
Tabela 27 Materiały i koszty dla W3.....	83
Tabela 28 Materiały i koszty dla W4.....	84
Tabela 29 Materiały i koszty dla W5.....	84
Tabela 30 Materiały i koszty dla W6.....	85
Tabela 31 Szacunek kosztów dla W6.....	85
Tabela 32 Tabela porównawcza wariantów III	86
Tabela 33 Materiały i koszty dla III.C.....	87

Tabela 34 Tabela porównawcza szczegółowa wariantów III.....	89
Tabela 35 Dane zestawione w przejrzystej formie tabelarycznej:.....	89
Tabela 36 Parametry techniczne.....	91
Tabela 37 Dane wejściowe – tabela zbiorcza	92
Tabela 38 Wymagany sprzęt :	95
Tabela 39 Parametry warstwy piasku	95
Tabela 40 Warstwa zeolitowa	96
Tabela 41 Struktura podziału prac (WBS)	96
Tabela 42 Koszty bezpośrednie operacyjne	97
Tabela 43 Koszty pełne	97
Tabela 44 Wyliczone wskaźniki kosztowe	98
Tabela 45 Wykaz czynności	98
Tabela 46 Czas trwania procesu	99
Tabela 47 Zestawienie ryzyk	99
Tabela 48 Zestawienie skuteczności oddziaływania	100
Tabela 49 Monitoring zastoisk	101
Tabela 50 Niezbędne dokumenty	101
Tabela 51 Rzeczy do zrobienia	102
Tabela 52 Główne parametry działania	102
Tabela 53 Struktura wielowarstwowa (od dołu do góry)	104
Tabela 54 Parametry techniczne.....	104
Tabela 55 Charakterystyka głębokościowa na obszarze wraku	106
Tabela 56 Kosztorys pryzmy – Wariant 1	108
Tabela 57 zestawienie sprzętu	109
Tabela 58 Siły i środki	110
Tabela 59 Obliczenie objętości dla poszczególnych stref:	110
Tabela 60 Kosztorys pryzmy – Wariant 3	110
Tabela 61 Kosztorys prac awaryjnych – usunięcie paliwa	111
Tabela 62 Zestawienie powierzchni warstw ochronnych dla poszczególnych wariantów:	112
Tabela 63 Obliczenia dla Wariantu 1 (pow. = 8,850 m ²):	113
Tabela 64 Parametry prac nurkowych	114
Tabela 65 Zestawienie kosztów wariantów	115
Tabela 66 Analiza porównawcza	115
Tabela 67 Orientacyjny harmonogram dla Wariantu 1 (rekomendowanego)	115
Tabela 68 Analiza ryzyk	116
Tabela 69 Koszty	118
Tabela 70 Dane wraku	121
Tabela 71 Rejon wraku charakteryzuje się następującymi warunkami środowiskowymi:	121
Tabela 72 Charakterystyka wariantów	122
Tabela 73 Parametry użyte do analizy	123
Tabela 74 Założenia geometryczne	125
Tabela 75 Założenia materiałowe	125
Tabela 76 Zestawienie materiałowe	127
Tabela 77 Przepuszczalność poszczególnych warstw:	128
Tabela 78 Parametry techniczne odsysania	133
Tabela 79 Koszty i ryzyka odsysania	133

Tabela 80 Analogie z zastoisk	133
Tabela 81 Jednostki pływające	134
Tabela 82 Sprzęt specjalistyczny	134
Tabela 83 Zasoby ludzkie	134
Tabela 84 Koszty materiałów	135
Tabela 85 Koszty aplikacji	135
Tabela 86 Koszty sprzętu	135
Tabela 87 Koszty robocizny	136
Tabela 88 Koszty nadzoru i monitoringu	136
Tabela 89 Rezerwa na nieprzewidziane wydatki	136
Tabela 90 Podsumowanie kosztów W6	137
Tabela 91 Podział CAPEX / Monitoring / Contingency	137
Tabela 92 Harmonogram bazowy	137
Tabela 93 Decision Gate (sekcja 11) wymaga odsysania paliwa, harmonogram rozszerza się o:	138
Tabela 94 Ryzyka techniczne	139
Tabela 95 Ryzyka środowiskowe	139
Tabela 96 Ryzyka HSE	139
Tabela 97 Ryzyka pogodowe i hydrometeorologiczne	139
Tabela 98 Ryzyka logistyczne	140
Tabela 99 Ryzyka jakościowe	140
Tabela 100 Ryzyka kontraktowe i decyzyjne	140
Tabela 101 Monitoring w trakcie realizacji	141
Tabela 102 Monitoring porealizacyjny	142
Tabela 103 QA/QC – kluczowe punkty kontrolne	142
Tabela 104 Kryteria odbioru technicznego	142
Tabela 105 Kryteria potwierdzenia skuteczności (monitoring)	142
Tabela 106 Trwałość poszczególnych warstw	143
Tabela 107 Cykl życia projektu	144
Tabela 108 Porównanie LCC wariantów	144
Tabela 109 Wykaz decyzji krytycznych	144
Tabela 110 Podsumowanie kosztów	146
Tabela 111 Wykaz kosztów operacyjnych dla Wariantu III.C obszar A	148
Tabela 112 Parametry Obszaru A - tabela zbiorcza	149
Tabela 113 Informacje podstawowe	150
Tabela 114 Badania przedoperacyjne	153
Tabela 115 Przygotowanie obszaru	154
Tabela 116 Capping aktywny	154
Tabela 117 Monitoring powykonawczy długoterminowy	155
Tabela 118 Podsumowanie czasu trwania projektu	156
Tabela 119 Struktura podziału prac	156
Tabela 120 Struktura kosztów	157
Tabela 121 CAPEX / OPEX / NPV	157
Tabela 122 Porównanie kosztów z wariantami odrzuconymi	158
Tabela 123 Analiza wrażliwości - kluczowe zmienne kosztowe	158
Tabela 124 Harmonogram ogólny	158
Tabela 125 Kluczowy sprzęt	159

Tabela 126 Kluczowi ludzie	159
Tabela 127 Rejestr ryzyk	159
Tabela 128 Ocena skuteczności	161
Tabela 129 Prognoza redukcji WWA	161
Tabela 130 Zestawienie wymaganych dokumentów	162
Tabela 131 Kolejne kroki działania	163
Tabela 132 Wykaz danych do uzupełnienia	166
Tabela 133 Warianty przewidywane dla obszaru B	169
Tabela 134 Analiza kosztów dla wariantów	169
Tabela 135 Główne ryzyka i korzyści	170
Tabela 136 Dane wejściowe – tabela zbiorcza	170
Tabela 137 Luki informacyjne	171
Tabela 138 Weryfikacja spójności danych powierzchniowych:	171
Tabela 139 Weryfikacja spójności danych kosztowych z różnych źródeł:	171
Tabela 140 Na potrzeby kosztorysowania Obszaru B przyjęto następujące znormalizowane stawki:	172
Tabela 141 Etapy operacyjne	174
Tabela 142 Struktura podziału prac (WBS)	179
Tabela 143 Struktura kosztów	180
Tabela 144 Podsumowanie CAPEX / OPEX / NPV	180
Tabela 145 Tabela porównawcza kosztów – podsumowanie decyzji wariantowej:	181
Tabela 146 Koszty jednostkowe	181
Tabela 147 Analiza wrażliwości – kluczowe zmienne kosztowe	181
Tabela 148 Harmonogram – Wariant III.C	182
Tabela 149 Sprzęt kluczowy	183
Tabela 150 Personel kluczowy	183
Tabela 151 Wykaz ryzyk	184
Tabela 152 Podsumowanie ryzyk	184
Tabela 153 Skuteczność wariantów w krótkim terminie - ocena	185
Tabela 154 Skuteczność wariantów w długim terminie - ocena	185
Tabela 155 Ocena wpływu na biotę	185
Tabela 156 Zestawienie koniecznych dokumentów	187
Tabela 157 Kolejność prac dokumentacyjnych	187
Tabela 158 Ważne elementy plany wymagające ponownego szacowania przed realizacją	189
Tabela 159 Zestawienie danych wysokiego priorytetu do pozyskania	189
Tabela 160 Zestawienie danych średniego priorytetu do pozyskania	190
Tabela 161 Macierz priorytetów	190
Tabela 162 Analiza wariantów dla obszaru C	192
Tabela 163 Porównanie kosztów dla wybranych wariantów	193
Tabela 164 Wykaz ryzyk i korzyści	193
Tabela 165 Dane wejściowe - tabela zbiorcza	193
Tabela 166 Spójność powierzchniowa	195
Tabela 167 Etap badań bazowych (rok 0)	200
Tabela 168 Etap opracowania programu monitoringu	200
Tabela 169 Etap monitoringu długoterminowego (30 lat)	200
Tabela 170 Szacunkowy koszt kampanii badań środowiskowych	201
Tabela 171 Koszty wstępne monitoringu (Baseline)	202

Tabela 172 Zestawienie kosztów całkowitych (nominalnych) – horyzont 30 lat.....	202
Tabela 173 Analiza NPV dla wariantu III.0 (stopa dyskontowa 3%)	202
Tabela 174 Porównanie wariantów (NPV 30 lat)	202
Tabela 175 Podział prac WBS - Wariant III.0 (Tylko monitoring)	203
Tabela 176 Podział kosztów CBS - Wariant III.0 (Tylko monitoring)	203
Tabela 177 Wariant III.0 - Zestawienie kosztów	204
Tabela 178 Tabela porównawcza kosztów wszystkich wariantów	205
Tabela 179 Analiza NPV wariantu III.0 (30 lat, stopa dyskontowa 3%)	205
Tabela 180 Analiza proporcjonalności kosztów do zagrożenia	205
Tabela 181 Harmonogram ramowy	206
Tabela 182 Charakterystyka warunków operacyjnych (Zatoka Gdańska)	206
Tabela 183 Sprzęt kluczowy	207
Tabela 184 Personel kluczowy.....	207
Tabela 185 Rejestr ryzyk	208
Tabela 186 Porównanie ryzyk	208
Tabela 187 Skuteczność wariantu III.0 – krótkoterminowa (0–5 lat)	209
Tabela 188 Prognoza redukcji (5 lat):.....	209
Tabela 189 Skuteczność wariantu III.0 – długoterminowa (5–30 lat)	209
Tabela 190 Podsumowanie skuteczności wariantu III.0.....	209
Tabela 191 Zastaw koniecznych dokumentów	211
Tabela 192 Rekomendacja kolejności prowadzenia prac	212
Tabela 193 Strategia fazowa dla obszaru C.....	214
Tabela 194 Porównanie odrzuconych wariantów	214
Tabela 195 Spójność z rekomendacjami dla Obszarów A i B	215
Tabela 196 Zalecenia.....	216
Tabela 197 Warunkowość decyzji w zależności od wyników badań.....	217
Tabela 198 Rozróżnienie scenariuszy ryzyka wycieku paliwa z wraku S/S Stuttgart	224