

Głębokowodny Terminal Kontenerowy T3: Modelowanie Numeryczne Transportu Osadów i Jakości Wody



eCoast
eTakutai

**MOHIO - AUAHA - TAUTOKO
UNDERSTAND - INNOVATE - SUSTAIN**

PO Box 151, Raglan 3225, New Zealand
Ph: +64 7 825 0087 | info@ecoast.co.nz | www.ecoast.co.nz

Głębokowodny Terminal Kontenerowy T3: Modelowanie Numeryczne Transportu Osadów i Jakości Wody

Status Raportu

Wersja	Data	Status	Zaakceptowane
V1	10 lipca 2022	Draft	SDG
V2	27 lipca 2022	Final	SDG

Obowiązkiem czytelnika jest zweryfikowanie numeru wersji tego raportu.

Autorzy:

Dougal Greer MSc Jose C. Borrero Ph.D. Rhys Mcintosh MSc Jai Davies Campbell MSc

Klient

Arup

Informacje zawarte w niniejszym dokumencie, w tym własność intelektualna, są poufne i należą do firmy Ecological and Physical Coastal Consultants Limited (T/A eCoast). Może być używany przez osoby, którym jest dostarczany, w określonym celu i nie może być przekazywany osobom trzecim bez uprzedniej pisemnej zgody eCoast. eCoast zastrzega sobie wszelkie prawa i środki zaradcze w związku z jakimkolwiek naruszeniem jej praw w odniesieniu do informacji poufnych. eCoast 2022

Podsumowanie

Port Gdański jest portem morskim zlokalizowanym w Gdańsku, na południowym wybrzeżu Zatoki Gdańskiej i jest jednym z największych portów morskich na Bałtyku. Gdański Głębokowodny Terminal Kontenerowy (DCT) jest jedynym głębokowodnym terminalem kontenerowym na Morzu Bałtyckim i stanowi główny port dla Polskich i Bałtyckich operacji przeładunkowych. Istniejący obiekt podzielony jest na dwa główne obszary operacyjne: Terminal T1 oraz Terminal T2. W 2020 roku do istniejącego falochronu dobudowano dwa dodatkowe segmenty. DCT ma obecnie plany dotyczące przyszłego rozwoju o Terminal 3 (T3), który będzie obejmował działania pogłębiarskie oraz ładotwórcze. Powierzchnia T3 ma wynosić około 37 ha (0,37 km²). Plaża Stogi leży bezpośrednio na wschód od Portu Gdańsk i jest popularnym kąpieliskiem o doskonałej jakości wody. Stanowi również siedlisko dla wielu zagrożonych gatunków ptaków.

Niniejsze opracowanie zawiera:

- Badanie ewolucji morfologii plaży z wykorzystaniem modeli numerycznych w celu oceny potencjalnych negatywnych oddziaływań na przyległą plażę ze względu na rozbudowę T3 i falochronów przybrzeżnych.
- Modelowanie numeryczne pozwalające zweryfikować potencjalne problemy z jakością wody w strefie przybrzeżnej wynikające z rozbudowy T3.

Komponenty modelowania numerycznego uwzględniały trzy scenariusze:

1. Układ portu przed 2020 r. z T1 i T2, ale bez przedłużeń falochronu, które zostały zbudowane w 2020 r. Żadne z proponowanych pogłębień nie jest uwzględnione w tym scenariuszu.
2. Układ portu w obecnym kształcie, z T1 i T2 i przedłużeniami falochronu, a także pogłębianiem związanym z kanałami podejściowymi i manewrowymi.
3. To samo co w scenariuszu 2 z dodatkiem rozbudowy T3, w tym niezbędnego pogłębiania pod obszar T3.

Powyższe scenariusze zaprezentowano na Rysunku 5.2.

Morfologia Plaży

Budowa terminalu T1 w 2005 roku doprowadziła do przyrostu zachodniego krańca plaży Stogi (sąsiadującego z T1) w tempie około 3,4 m rocznie od 2008 do 2018 roku. Tempo akumulacji zmniejsza się wraz z odległością na wschód od T1, obserwuje się erozję w środkowej części plaży oraz na wschód od centralnej części plaży, podczas gdy daleko wschodnia część plaży jest zasadniczo stabilna. Tempo akumulacji na zachodnim krańcu plaży jest większe niż tempo erozji w kierunku środka i na wschód od centrum, co sugeruje akumulację osadów wzdłuż plaży. Choć źródło gromadzących się osadów nie jest jasne, najprawdopodobniej pochodzą one z morza.

Wyniki modelowania wskazują, że falochrony zbudowane w 2020 r. wpływają na zmiany w dynamice transportu osadów na plaży Stogi. Zmniejszą one akumulację wywołane falami na zachodnim krańcu plaży i doprowadzą do akumulacji osadów wzdłuż centralnego obszaru plaży. Wzorce erozji i akumulacji na wschodnim krańcu plaży pozostaną w dużej mierze nienaruszone.

Rozwój T3 doprowadzi do dalszego narastania linii brzegowej na dalekim zachodnim krańcu plaży Stogi, co będzie pogarszane przez transport piasku napędzany przez wiatr. Załadowanie T3 nie wpłynie na wzorce transportu osadów na plaży na wschód od tego obszaru.

Modelowanie jakości wód

Wyniki modelowania wskazują, że napływy słodkowodnej wody z Wisły rozchodzą się szeroko nad południową częścią Zatoki Gdańskiej i docierają do Portu Gdańskiego- szczególnie w warunkach dużego przepływu i występowania wiatru wschodniego. Napływy wody rzecznej w obszarze morskim między terminalem T3 a plażą Stogi zostanie zmniejszona wraz z rozwojem T3 ze względu na jego wpływ na przepływ prądów morskich w otoczeniu. Woda rzeczna jest prawdopodobnie jednym z największych czynników obciążających środowisko morskie bakteriami. Budowa T3 prawdopodobnie nie doprowadzi do podwyższenia stężeń zanieczyszczeń bakteryjnych lub rzecznych na zachodnim krańcu plaży Stogi.

Modelowanie wykazało również, że na analizowanym obszarze, w związku ze zmianą wzorców przepływu prądów morskich i warunków wiatrowych, mieszanie się wód będzie średnio 7 razy wolniejsze po wybudowaniu T3. Pomimo tego, że woda z Wisły ma mniejsze szanse przedostania się na obszar między terminalem T3 a plażą Stogi, to po dostaniu się na ten obszar zanieczyszczeń wodnych, ich usunięcie pod wpływem czynników naturalnych zajmie średnio 7 razy dłużej. W związku z tym istnieje duże prawdopodobieństwo, że w tym terenie nastąpi gromadzenie się odpadów.

Spis Treści

Podsumowanie i	
Spis Treści	iii
Spis Rysunków	iv
Spis Tabel	v
1	Wstęp..... 6
1.1	Definicje i konwencje 6
1.2	Tło projektu..... 6
1.3	Cel opracowania..... 10
2	Źródła danych 11
3	Przegląd literatury 15
3.1	Wiatr oraz falowanie 15
3.2	Poziom morza..... 19
3.3	Jakość wody 19
3.4	Zmiany klimatu..... 21
3.4.1	Falowanie 21
3.4.2	Poziom morza..... 21
3.4.3	Spływ rzeczny..... 21
3.4.4	Obciążenie rzek pierwiastkami biofilnymi..... 22
3.4.5	Wiatr 22
4	Scenariusze modelowania..... 23
5	Morfologia Plaży..... 24
5.1	Metodyka 24
5.1.1	Historyczna analiza wybrzeża..... 24
5.1.2	Długoterminowe modelowanie falowania 25
5.1.3	Modelowanie morfologii plaży 27
5.1.4	Ograniczenia 28
5.2	Wyniki modelowania transport osadów 30
5.2.1	Historyczna analiza wybrzeża..... 30
5.2.2	Długoterminowe modelowanie falowania 39
5.2.3	Modelowanie transportu osadów 42
5.3	Podsumowanie 46
6	Modelowanie jakości wód..... 48
6.1	Metodyka 48
6.1.1	Modelowanie wpływu rzecznoego..... 48
6.1.2	Wskaźnik ruchu wód 48
6.1.3	Ograniczenia 51
6.2	Wyniki modelowania jakości wód 52
6.2.1	Modelowanie wpływu rzecznoego..... 52
6.2.2	Przepłukiwanie 57
6.3	Podsumowanie 59
7	Spis źródeł 60
Załącznik A	Dodatkowe zdjęcia saterlitarne 62
Załącznik B	Ewolucja szerokości plaży Stogi 66
Załącznik C	Prądy morskie w otoczeniu T3..... 74

Spis Rysunków

Rysunek 1.1 Położenie Portu w Gdańsku względem Polski i innych istotnych punktów.....	7
Rysunek 1.2 Istniejąca infrastruktura Portu DCT (góra) i plan jej rozbudowy (dół). Żółtym okręgiem oznaczono półzamknięty zbiornik wodny („Strefa Zacienienia T3”) który powstanie w wyniku realizacji rozbudowy portu o T3.....	8
Rysunek 1.3 Układ portu w 2018 roku (góra) i dodatkowe falochrony utworzone w 2020 roku (dół)	9
Rysunek 1.4 Lokalizacja proponowanego terminalu T3 (żółty), pogłębiania dla obszaru cumowania T3 (fioletowy), strefy buforowej obszaru cumowania (brązowy) oraz kanału podejściowego i manewrowego (zielony)....	9
Rysunek 1.5 Plaża Stogi (góra) i infrastruktura na plaży (dół)	10
Rysunek 2.1 Przykładowa mapa hydrograficzna (na górze po lewej), badanie plaży Stogi (2022) (na górze po prawej) oraz zestaw danych batymetrycznych EMODnet dla Morza Bałtyckiego (na dole).....	12
Rysunek 2.2 Wyniki pomiarów 30 letnich w ramach NOAA Wave Watch III (źródło: NOAA).....	12
Rysunek 2.3 Rysunek Autocad przedstawiający planowaną rozbudowę portu przedstawiający terminal T3 oraz obszary prac pogłębiarskich (źródło: DCT)	13
Rysunek 2.4 Lokalizacja poboru 19 próbek w ramach analizy sitowej osadów.....	14
Rysunek 3.1 Lokalizacja modelu falowego (54,8N, 19,2E) (NOAA)	16
Rysunek 3.2 Różne wiatrów dla lokalizacji 54,8N, 19,2E (źródło: NOAA)	16
Rysunek 3.3 Wykresy rozproszenia wiatru i fal dla lokalizacji 54,8N, 19,2E (źródło: NOAA).....	17
Rysunek 3.4 Różne wiatrów dla lokalizacji 54,8N, 19,2E (źródło: NOAA).....	18
Rysunek 3.5 Lokalizacja miejsc badania odpadów (źródło: Główny Inspektoriat Ochrony Środowiska, 2020)	20
Rysunek 3.6 Łączna liczba sztuk odpadów (z czterech okresów badawczych) zarejestrowanych na poszczególnych sekcjach w siedmiu głównych kategoriach w 2020 roku. Najwięcej sztuk odpadów stwierdzono w Gdańsku w 2020 roku (źródło: Główny Inspektoriat Ochrony Środowiska, 2020).....	20
Rysunek 3.7 Średnia prognozowana wysokość fal (góra) w trakcie zimy (DJF) oraz lata (JJA) i porównanie do obecnego stanu falowania (dół) (źródło: Bonduce i in., 2019)	21
Rysunek 5.1 Miejsca pomiaru szerokości plaży wykorzystywane do oceny historycznych zmian szerokości plaży Stogi	25
Rysunek 5.2 Siatki batymetryczne SWAN wykorzystane w badaniu modelowania fal dla trzech scenariuszy.	26
Rysunek 5.3 Transekty do wykorzystania w jednoliniowym modelowaniu transportu osadów nałożonych na mapę batymetryczną. Litera „T” w legendzie oznacza tutaj „Transekt”	28
Rysunek 5.4 Plaża Stogi na wschód od Portu Gdańsk. Etykiety zawierają konwencję nazewnictwa używaną w tym raporcie. Litera „T” w legendzie oznacza tutaj „Transekt”	30
Rysunek 5.5 Efemeryczne wyłaniające się osady obserwowane wzdłuż centralnej części plaży Stogi	32
Rysunek 5.6 Zmiany Szerokości plaży na 10 transektach. Litera „T” w legendzie oznacza tutaj „Transekt”	32
Rysunek 5.7 Regresja liniowa przedstawiająca zmiany szerokości plaży. Nachylenie linii (3.4) wskazuje tempo zmian szerokości plaży w metrach na rok. „95% CI” zapewnia 95% przedział ufności wokół nachylenia.....	34
Rysunek 5.8 Ujście Martwej Wisły nie wykazało znaczącej akumulacji osadu na ścianie wschodniej.....	35
Rysunek 5.9 Ewolucja zachodniego krańca linii brzegowej plaży Stogi. Czerwona linia wskazuje linię brzegową w maju 2018 roku dla porównania.....	36
Rysunek 5.10 Ewolucja zachodniego krańca linii brzegowej plaży Stogi. Czerwona linia wskazuje linię brzegową w maju 2018 roku dla porównania.....	37
Rysunek 5.11 Ewolucja zachodniego krańca linii brzegowej plaży Stogi. Czerwona linia wskazuje linię brzegową w maju 2018 roku dla porównania.....	38
Rysunek 5.12 Róża falowania (po lewej) podsumowująca klimat falowy bezpośrednio na morzu przy Porcie Gdańsk (po prawej).....	39
Rysunek 5.13 Znacząca wysokość fali dla umiarkowanych warunków fali 0,5 m NE dla scenariusza przeszłego (góra), teraźniejszego (środek) i przyszłego (dół).	40
Rysunek 5.14 Znacząca wysokość fali dla warunków dużej fali 3 m NE dla scenariusza przeszłego (góra), teraźniejszego (środek) i przyszłego (dół).....	41

Rysunek 5.15 Dane wyjściowe z Genius pokazujące strumień netto na każdym transekcie (u góry) i anomalię strumienia na każdym transekcie (na dole).	43
Rysunek 5.16 Związek między modelowaną anomalią przepływu osadów a zmianą szerokości plaży na podstawie analizy historycznej linii brzegowej.	43
Rysunek 5.17 Przewidywana zmiana linii brzegowej dla scenariusza „Przeszłego” pokazująca ciągłą akumulację na zachodnim krańcu plaży i mniej wyraźną erozję na wschodzie.	44
Rysunek 5.18 Przewidywana zmiana linii brzegowej dla „obecnego” scenariusza	44
Rysunek 5.19 Przewidywana zmiana linii brzegowej dla „przyszłego” scenariusza	45
Rysunek 5.20 Przewidywana zmiana linii brzegowej dla „przyszłego” scenariusza uwzględniająca zmiany klimatu ..	45
Rysunek 5.21 Schematyczna ilustracja transportu osadów dla scenariusza przeszłego	46
Rysunek 5.22 Schematyczna ilustracja transportu osadów dla scenariusza teraźniejszego	47
Rysunek 5.23 Schematyczna ilustracja transportu osadów dla scenariusza przyszłego	47
Rysunek 6.1 Siatka batymetryczna użyta do modelu hydrodynamicznego, z powiększeniem do T1 oraz T3	50
Rysunek 6.2 Dane o przepływie rzeki z wodowskazu Tczew za lata 2014-2021. Zielony prostokąt oznacza okres symulowany przez model hydrodynamiczny.	51
Rysunek 6.3 Minimalne rozcieńczenie warstwy wierzchniej w obszarze portu dla scenariusza (od góry) przeszłego, teraźniejszego i przyszłego	53
Rysunek 6.4 Mediana rozcieńczenia w obszarze portu dla scenariusza (od góry) przeszłego, teraźniejszego i przyszłego	54
Rysunek 6.5 Mediana rozcieńczenia w obszarze portu dla scenariusza przeszłego przeskalowana dla przewidywanego zmniejszenia przepływu rzeki o 18.25% ze względu na skutki zmian klimatu w latach 2018-2100	55
Rysunek 6.6 Model zasolenia w obszarze zamkniętym między terminalem T3 a plażą Stogi.....	55
Rysunek 6.7 Uśredniona wartość rezydualna głębokości (uśrednione wektorowo) i bieżące prędkości dla scenariusza przeszłego (górnego), teraźniejszego (środek) i przyszłego (dół).....	56
Rysunek 6.8 Uśrednione prądy powierzchniowe (górne) i głębokościowe (dolne) u ujścia Wisły podczas szczytowego przepływu (2490 m ³ /s) w dniu 1 lipca 2020 r. 17:00.....	57
Rysunek 6.9 Przepływ wód dla znacznika konserwatywnego w obszarze półzamkniętym T3 po i przed rozbudową T3	58
Rysunek 7.1 Przewidywana zmiana linii brzegowej plaży Stogi. Czerwona linia wskazuje linię brzegową w maju 2018 roku dla porównania. Źródło: Google Earth.....	63
Rysunek 7.2 Przewidywana zmiana linii brzegowej plaży Stogi. Czerwona linia wskazuje linię brzegową w maju 2018 roku dla porównania. Źródło: Google Earth.....	64
Rysunek 7.3 Przewidywana zmiana linii brzegowej plaży Stogi. Czerwona linia wskazuje linię brzegową w maju 2018 roku dla porównania. Źródło: Google Earth.....	65

Spis Tabel

Tabela 5.1 Specyfikacje siatek modelu SWAN wykorzystanych w tym projekcie	25
Tabela 5.2 Zmierzone szerokości plaży w 14 punktach pomiarowych	33
Tabela 5.3 Tempo erozji i akumulacji na każdym uwzględnionym transekcie	34
Tabela 6.1 Czas przepływania dla obszaru półzamkniętego T3 przed oraz po rozbudowie T3	58

1 Wstęp

1.1 Definicje i konwencje

Jednostki (Units) – O ile nie zaznaczono inaczej, wszystkie pomiary podano w jednostkach SI, z wyjątkiem temperatury, w której stosuje się stopnie Celsjusza.

Średni poziom morza (MSL)– Wszystkie głębokości są podane w odniesieniu do tego punktu odniesienia, chyba że zaznaczono inaczej.

H_s – Wysokość fali znacznej (m).

T_p – Okres szczytowy fali (s).

D_p – kierunek fali znacznej (stopnie).

1.2 Tło projektu

Port w Gdańsku jest portem morskim zlokalizowanym w Gdańsku, na południowym wybrzeżu Zatoki Gdańskiej i jest jednym z największych portów morskich na Bałtyku. Gdański Głębokowodny Terminal Kontenerowy (DCT) jest jedynym głębokowodnym terminalem kontenerowym na Morzu Bałtyckim i stanowi główny port dla Polskich i Bałtyckich operacji przeładunkowych. Istniejący obiekt podzielony jest na dwa główne obszary operacyjne: Terminal T1 oraz Terminal T2. W 2020 roku do istniejącego falochronu dobudowano dwa dodatkowe segmenty (Rysunek 1.3). DCT ma obecnie plany dotyczące przyszłego rozwoju o Terminal 3 (T3), który będzie obejmował działania pogłębiarskie oraz lądowirnicze.

Planowany obszar pogłębiania zaprezentowano na Rysunku 1.4. Powierzchnia pogłębiania pod T3 ma wynosić około 38 ha (0,38 km²). Pogłębianie związane z kanałami podejściowymi i manewrowym nie jest częścią rozbudowy T3, i nie jest oceniana jako jego efekt.

Maksymalna głębokość pogłębiania wynosi -17,5 m p.p.m. Jednak biorąc pod uwagę tolerancję pogłębiania wartość ta może wynosić do -17,8 m p.p.m. w strefie buforowej obszaru, i do -19,5 m w pozostałej części obszaru. Kubaturę robót czerpalnych w ramach planowanego Przedsięwzięcia oszacowano na 4 000 000 m³ (ok. 10 000 000 ton) (DŚU, 2019). Teren przewidziany do załadownienia pod T3 wyniesie około 37 ha (0,37 km²). Przyszłe rozbudowy terminali o T4 i T5, planowane w dłuższej perspektywie po zakończeniu prac nad T3, nie są uwzględniane w niniejszym opracowaniu. Planowane T4 i T5 zwiększą łączny obszar załadownienia do 80 ha (0,80 km²).

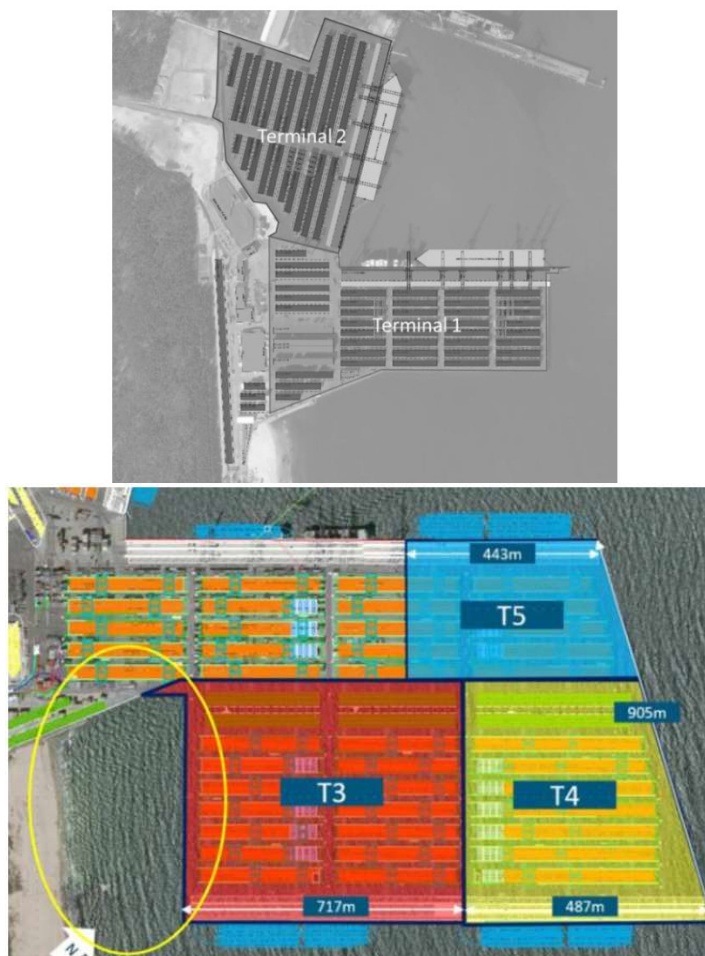
Popularna Plaża Stogi znajduje się bezpośrednio na wschód od Portu w Gdańsku i jest popularnym miejscem kąpielii. Stanowi również siedlisko dla wielu zagrożonych gatunków ptaków (Arup, 2022). Jest to plaża o piasku średniej wielkości (D₅₀ = 0.386 mm), 4 km długa, 130 m szeroka w części zachodniej i mniej niż 30 m szeroka w części wschodniej. Plaża ta jest szczególnie popularna w miesiącach letnich i doskonałą/bardzo dobrą jakością wody do celów kąpielowych. Próbkę jakości wody w 2021 r. wykazały liczbę E.coli wynoszącą 29 jtk(NPL)/100 ml i liczbę enterokoków w 9 jtk(NPL)/100 ml.¹

Rozwój T3 wypłynie na powstanie półzamknięty zbiornik pomiędzy obszarem załadownienia T3 a plażą Stogi, która w niniejszym raporcie będzie określana jako „Strefa Zacienienia T3”.

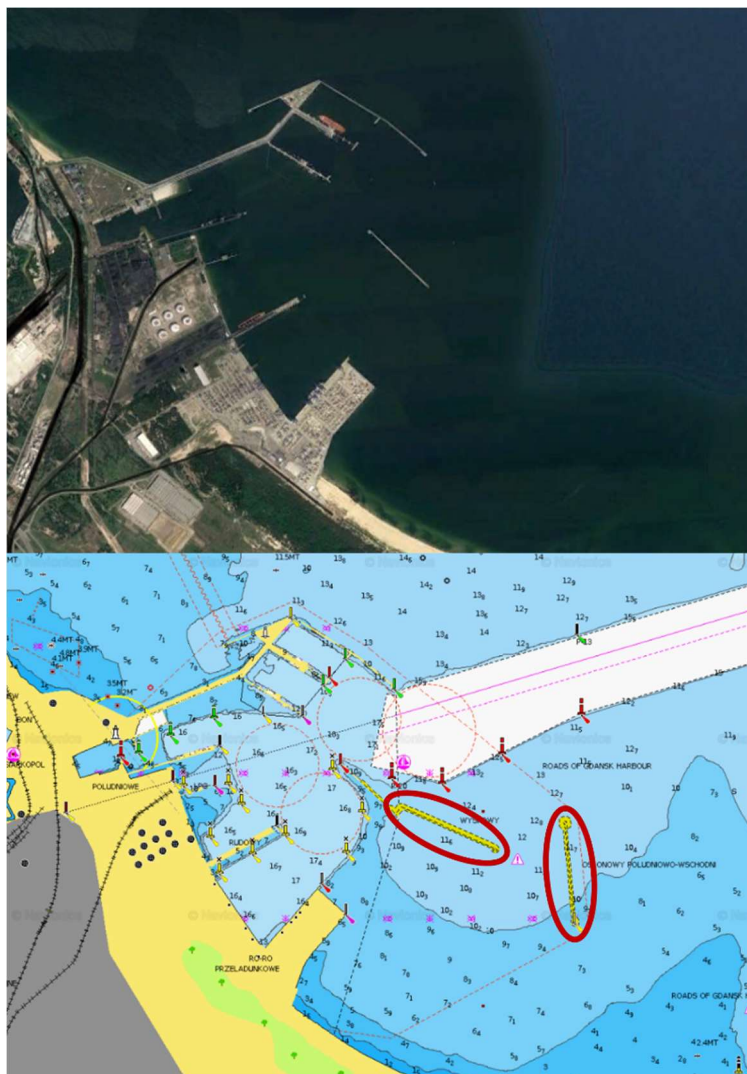
¹ [Gdańsk Stogi serwis kąpieliskowy](#)



Rysunek 1.1 Położenie Portu w Gdańsku względem Polski i innych istotnych punktów



Rysunek 1.2 Istniejąca infrastruktura Portu DCT (góra) i plan jej rozbudowy (dół). Żółtym okręgiem oznaczono półzamknięty zbiornik wodny („Strefa Zacienienia T3”) który powstanie w wyniku realizacji rozbudowy portu o T3



Rysunek 1.3 Układ portu w 2018 roku (górną) i dodatkowe falochrony utworzone w 2020 roku (dół)



Rysunek 1.4 Lokalizacja proponowanego terminalu T3 (żółty), pogłębienia dla obszaru cumowania T3 (fioletowy), strefy buforowej obszaru cumowania (brązowy) oraz kanału podejściowego i manewrowego (zielony)



Rysunek 1.5 Plaża Stogi (górze) i infrastruktura na plaży (dół)

1.3 Cel opracowania

Celem opracowania jest:

- Zbadanie ewolucji morfologii plaży z wykorzystaniem modeli numerycznych w celu oceny potencjalnych negatywnych oddziaływań na przyległą plażę ze względu na rozbudowę T3 i falochronów przybrzeżnych.
- Wykonanie modelowania numerycznego które pomoże zweryfikować potencjalne problemy z jakością wody w strefie przybrzeżnej powstałe w wyniku rozbudowy T3.

2 Źródła danych

Do sporządzenia niniejszego Raportu wykorzystano poniższe źródła danych:

Dane Batymetryczne (Rysunek 2.1) zostały pobrane ze zdigitalizowanych map hydrograficznych, badań zrealizowanych przez DCT dla T2 i T3, Cyfrowy zestaw danych batymetrycznych z 2018 r. EMODnet (rozdzielczość 115 m szerokości geograficznej × 47–68 m) (Jakobsson i in., 2019) oraz badań topografii plaży (do głębokości -1 m) przeprowadzonych w maju 2022 r.

Dane falowania i prędkości wiatru zostały pozyskane z 30 letnich pomiarów w ramach NOAA Wave Watch III faza 1² (Rysunek 2.2.) dla lat 1979-2009. Dla okresów po 2009 r. dane dotyczące wiatru uzyskano z modelu retrospektywnego ECMWF ERA5 (Hersbach i in., 2020).

T3 i specyfikacja prac pogłębiarskich zostały dostarczone w formie plików AutoCAD dostarczonych przez DCT (Rysunek 2.3).

Dane dotyczące wielkości cząsteczek osadów pochodzą z badań analizy osadów³ przeprowadzonej w maju 2022 jako część tego opracowania. Podczas badania przeanalizowano próbki w 19 lokalizacjach wzdłuż plaży Stogi.

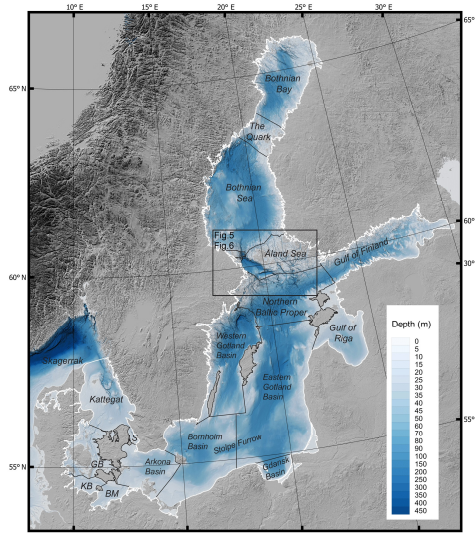
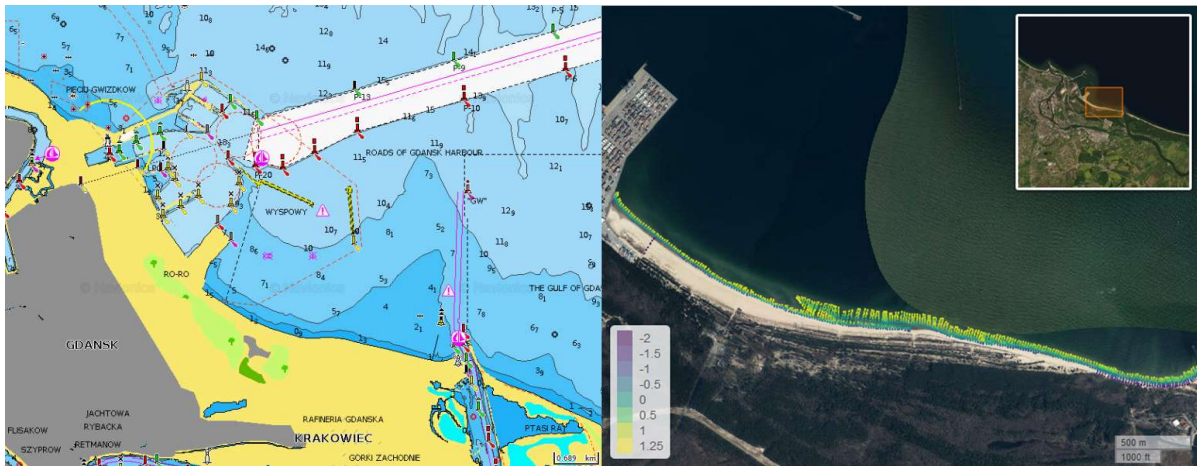
Zdjęcia satelitarne zostały pobrane z archiwum Google Earth and I bazy Landsat⁴.

Dane przepływu rzeki o godzinowej częstotliwości próbkowania z przepływomierza Tczew na lata 2014-2021 dostarczył Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej - Państwowy Instytut Badawczy (Polska).

² <https://polar.ncep.noaa.gov/waves/hindcasts/nopp-phase1.php>

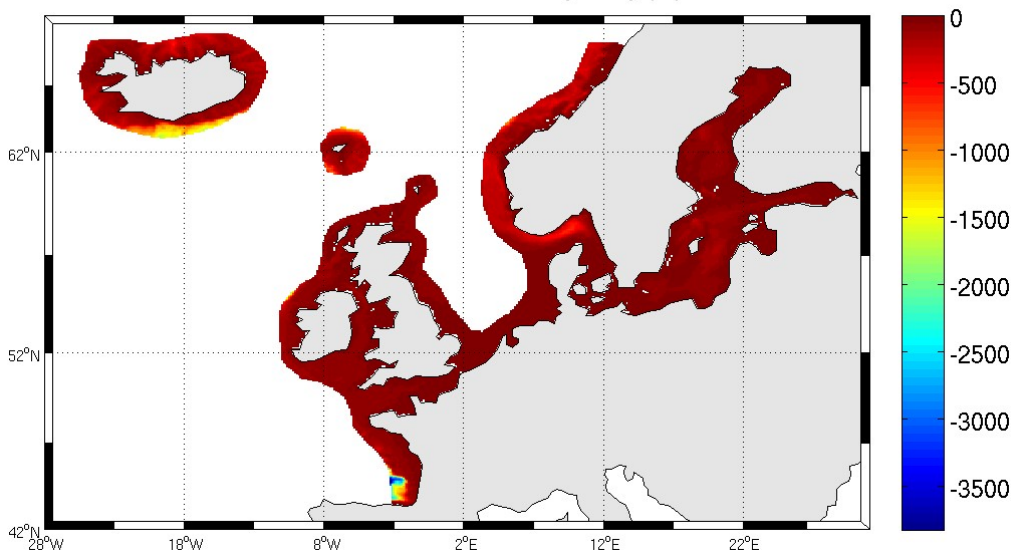
³ Geoteko, Projekty i Konsultacje Geotechniczne, 83/5755/22.

⁴ <https://www.usgs.gov/landsat-missions>

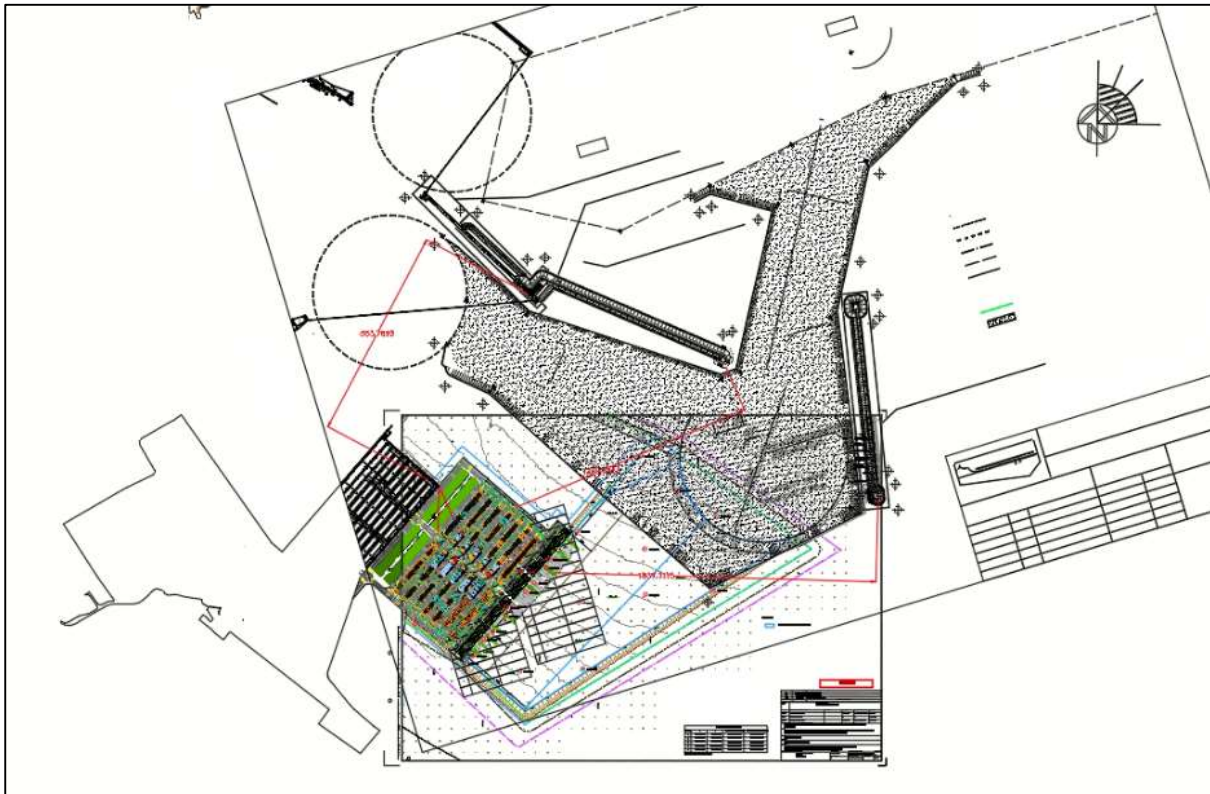


Rysunek 2.1 Przykładowa mapa hydrograficzna (na górze po lewej), badanie plaży Stogi (2022) (na górze po prawej) oraz zestaw danych batymetrycznych EMODnet dla Morza Bałtyckiego (na dole)

North-Sea Baltic 4 minute bathymetry (m)



Rysunek 2.2 Wyniki pomiarów 30 letnich w ramach NOAA Wave Watch III (źródło: NOAA)



Rysunek 2.3 Rysunek Autocad przedstawiający planowaną rozbudowę portu przedstawiający terminal T3 oraz obszary prac pogłębiarskich (źródło: DCT)



Rysunek 2.4 Lokalizacja poboru 19 próbek w ramach analizy sitowej osadów

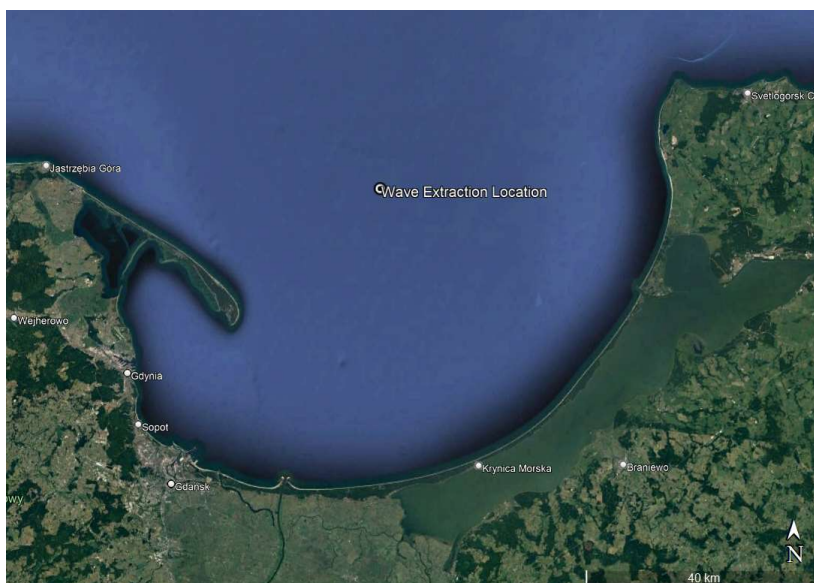
3 Przegląd literatury

Port Gdańsk położony jest na południu Zatoki Gdańskiej na południowym wybrzeżu Morza Bałtyckiego. Zatoka Gdańska to akwen formalnie dzielony przez Polskę i Rosję. Jest to zatoka zwrócona na północ z dużą mierzeją (Mierzeja Wiślana) w jej wschodniej części. Ujście rzeki Wisły znajduje się 14 km na zachód od portu. Jest to najdłuższa rzeka (1,047 km) uchodząca do Bałtyku oraz druga największa pod względem zlewni (183,176 km²)

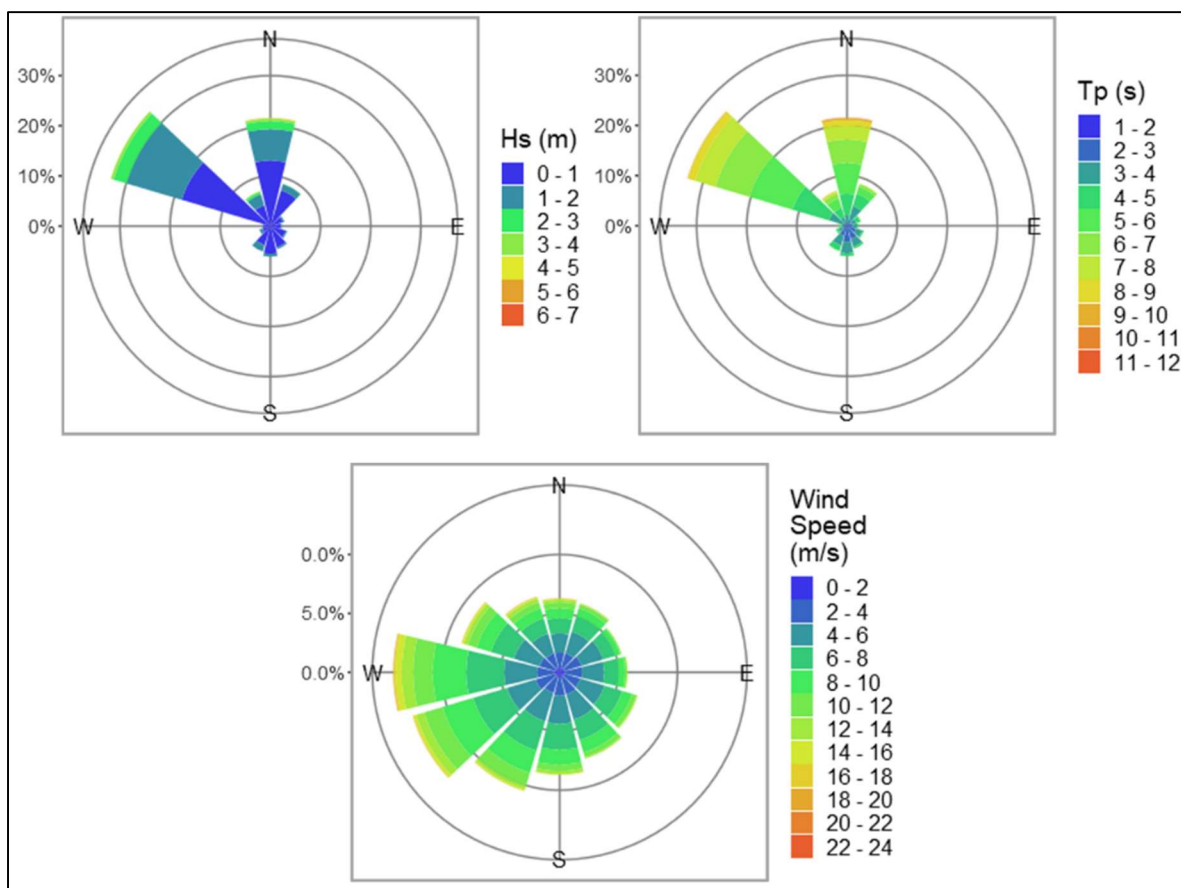
3.1 Wiatr oraz falowanie

W ramach tego badania, zapisy wiatru i fal zostały wyodrębnione z długoterminowego 30-letniego modelu fal w węźle sieci odpowiadającym 54,8 N, 19,2 E (Rysunek 3.1), który podsumowano na Rysunkach 3.2-3.4. Zaobserwowano, że wietrzeenie występuje ze wszystkich kierunków, choć najczęściej z zachodu i południowego zachodu z prędkością zwykle mniejszą niż 14 ms⁻¹. Pewną sezonowość obserwuje się w od kwietnia do czerwca, kiedy występują lżejsze wiatry. Kierunki fal występują głównie z północnego zachodu, choć często obserwuje się również fale północne. Zaobserwowano również inne kierunki wiatru i fal, ale występują znacznie rzadziej.

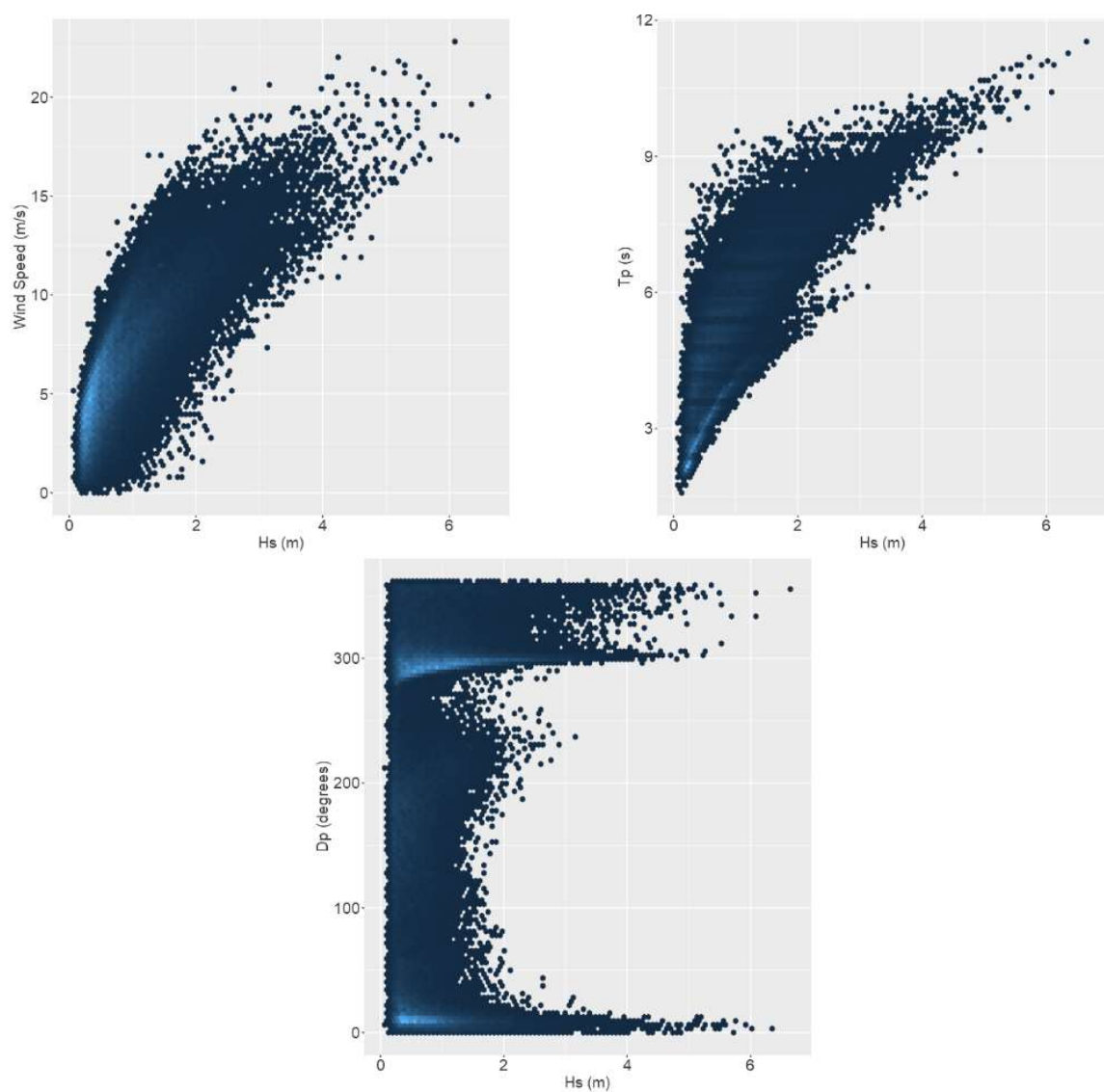
Wysokości fali znacznej (H_s) są zazwyczaj niższe niż 2 m, przy związanym z nimi okresie szczytów (T_p) poniżej 10s. Wykresy rozrzutu wskazują, że H_s i T_p wykazują silne powiązanie z prędkością wiatru, czasem zaś, choć rzadko, H_s przekracza 6 m, co dzieje się przy prędkościach wiatru przekraczających ok. 17 ms⁻¹. Przy falach takiej wielkości, T_p sięga prawie 12 s, przepływają zaś one z kierunku północnego. Fale te związane są z największym rozbiegiem fal na Bałtyku, sięgającym w głąb Zatoki Gdańskiej (ok. 600 km). Przewiduje się, że na charakterystykę falowania w badanym obszarze duży wpływ będą miały duża kosa przy zachodnim wejściu do zatoki oraz infrastruktura portowa na zachód od obszaru badania.



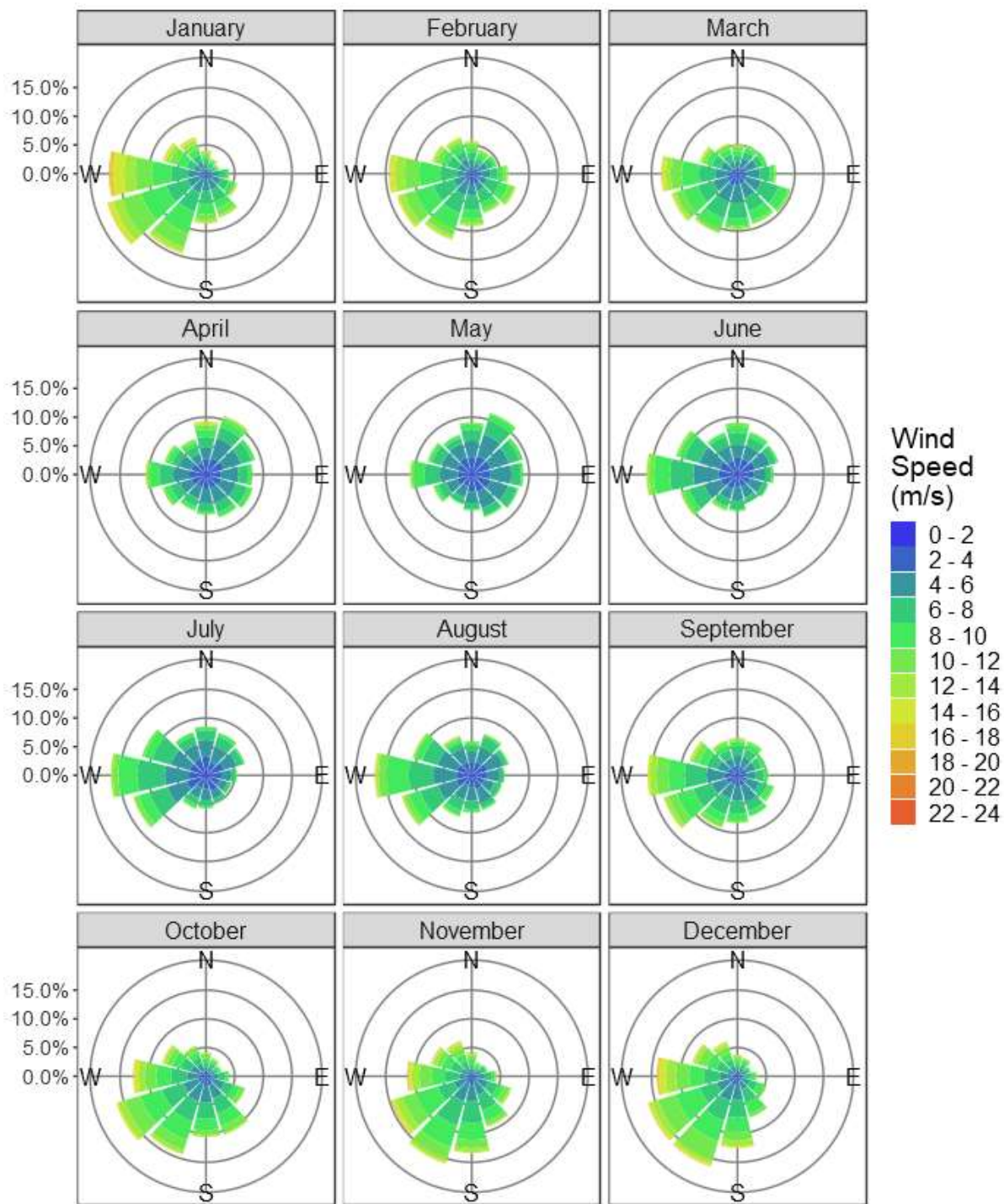
Rysunek 3.1 Lokalizacja modelu falowego (54,8N, 19,2E) (NOAA)



Rysunek 3.2 Róże wiatrów dla lokalizacji 54,8N, 19,2E (źródło: NOAA)



Rysunek 3.3 Wykresy rozproszenia wiatru i fal dla lokalizacji 54,8N, 19,2E (źródło: NOAA)



Rysunek 3.4 Róże wiatrów dla lokalizacji 54,8N, 19,2E (źródło: NOAA)

3.2 Poziom morza

Zakres pływów na Bałtyku jest bardzo mały, co wynika z bardzo wąskiego połączenia z Morzem Północnym. Ogólnie rzecz biorąc, zakres pływów mieści się głównie w zakresie od 0,02 m do 0,05, chociaż w zachodnich obszarach morza obserwowane są zakresy pływów sięgające 0,1-0,3 m (Weisse i in., 2021). Zmienność poziomu morza niezwiązana z pływami może być znaczna, maksymalne poziomy morza w Porcie Gdańskim sięgające 0,38 m obserwowane są z częstotliwością 1 roku. Poziomy te wzrastają do 1,06 m i 1,20 m z częstotliwością odpowiednio co for 5 i co 10 lat (Royal Haskoning DHV, 2020).

3.3 Jakość wody

Średnia ilość wody wpływającej z Wisły do Zatoki Gdańskiej wynosi 1080 m³/s, przy średnim obciążeniu osadem zawieszonym wynoszącym 14,6 mg/l, wahającym się w zakresie 8 - 40 mg/dm³ (Damrat i in., 2013). Według Pruszaka i in. (2005), roczne obciążenie osadami wprowadzanymi do Zatoki Gdańskiej mieści się w zakresie od 0,6 to 1,5 mln m³ osadu.

Eutrofizacja stanowi jedno z największych zagrożeń ekologicznych środowiska Bałtyku⁵. Eutrofizacja polega na wzroście zasilenia ekosystemu materią organiczną w wyniku wzbogacenia pierwiastkami biofilnymi, a wywołuje ją nadmierna dostępność azotu i fosforu dla pierwszorzędnych producentów biomasy (glony, sinice i makrobentos). Większość substancji biofilnych w Bałtyku dostarczanych jest z cieków słodkowodnych (HELCOM, 2018). Na badanym obszarze głównym źródłem tych składników odżywczych jest prawdopodobnie Wisła, która cechuje się największym powierzchniowym obciążeniem substancjami odżywczymi na obszarze Bałtyku (HELCOM, 2021a). Ilość wprowadzanego azotu całkowitego z Wisły (średnio 118 000 t/rok) sięga 15%, zaś ilość wprowadzanego fosforu (średnio 7 000 t/rok) 19% całkowitego rzecznoego dopływu tych substancji do Bałtyku. Duży wpływ Wisły wynika z charakteru jej dorzecza, w którym 60% stanowią grunty rolne. Dorzecze Wisły zamieszkuje 20 milionów ludzi, co stanowi 27% całej ludności zamieszkującej zlewnię Bałtyku. W rezultacie presji antropogenicznej ekosystem Zatoki Gdańskiej ulegał w ciągu ostatnich 50 lat znacznym zmianom. Główny Inspektorat Ochrony Środowiska (2020) prowadził regularne próbkowanie wskaźników eutrofizacji Zatoki Gdańskiej, obejmujących fosfor, azot, chlorofil a, przejrzystość wody i tlen rozpuszczony, którego wyniku prezentuje od 2010 r. Ogólnie rzecz biorąc, stężenia azotanów uległy w tym czasie zmniejszeniu, wzrosły natomiast stężenia fosforanów. W badaniu tym wskazano ogólne zmniejszenie zawartości chlorofilu, chociaż badanie HELCOM (2018) wskazuje, że jego poziom nie uległ znaczącym zmianom. Przejrzystość wody wykazuje nieznaczny trend do pogorszenia. W pobliżu badanego obszaru monitoring wskazuje, że wykwyty wiosenne wciąż są najbardziej intensywne, w tym też okresie odnotowuje się wyższe stężenia chlorofilu a niż latem. Łączna masa fitoplanktonu w zatoce latem jest jednak bardzo duża (Atkins, 2014).

Co się tyczy jakości wody dla celów kąpielii, w ciągu ostatnich dziesięciu lat zbudowano szereg oczyszczalni ścieków, w wyniku czego tylko 20% polskiego wybrzeża Zatoki Gdańskiej jest niedostępnych do kąpielii. Można to porównać z faktem, że w latach 80. zamknięte były wszystkie plaże (Andrulewicz i Witek, 2002). Plaża Stogi natomiast jest w ostatnich latach oceniana jako posiadająca doskonałą/bardzo dobrą jakość wody do celów kąpielowych.

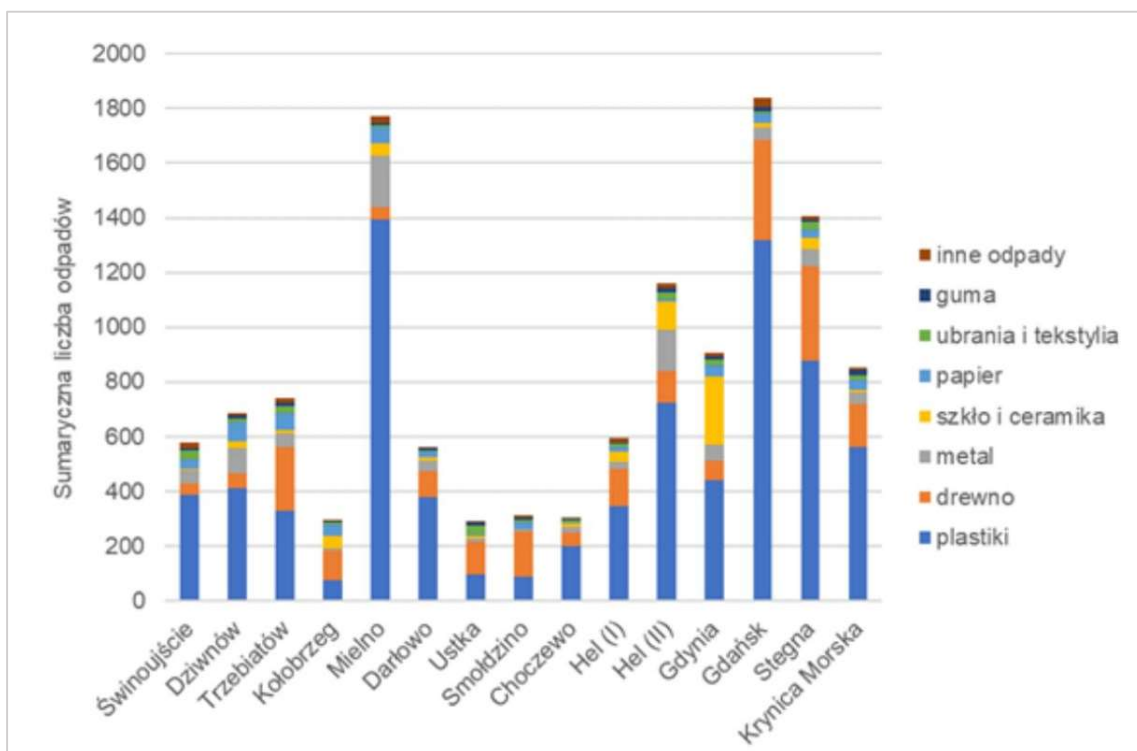
Zaśmiecenie mórz jest na całym świecie problemem poważnym i stale narastającym. W roku 2015 przeprowadzono w kilku lokalizacjach na polskim wybrzeżu Bałtyku 3-letni program pilotażowy monitorowania zaśmiecenia środowiska morskiego południowego Bałtyku (zob. Ilustracja 3.5) (Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, 2020). Od roku 2018 prowadzony jest regularny monitoring odpadów zbieranych na brzegu, unoszony na powierzchni wody oraz na dnie morza. Chociaż wyniki wykazują wahania z roku na rok, to badanie za rok 2020 wykazuje, że największą ilość śmieci znajduje się w Gdańsku (Łączna liczba sztuk odpadów (z czterech okresów badawczych) zarejestrowanych na poszczególnych sekcjach w siedmiu

⁵ <http://stateofthebalticsea.helcom.fi/pressures-and-their-status/eutrophication/>

głównych kategoriach w 2020 roku. Najwięcej sztuk odpadów stwierdzono w Gdańsku w 2020 roku (źródło: Główny Inspektoriat Ochrony Środowiska, 2020)



Rysunek 3.5 Lokalizacja miejsc badania odpadów (źródło: Główny Inspektoriat Ochrony Środowiska, 2020)

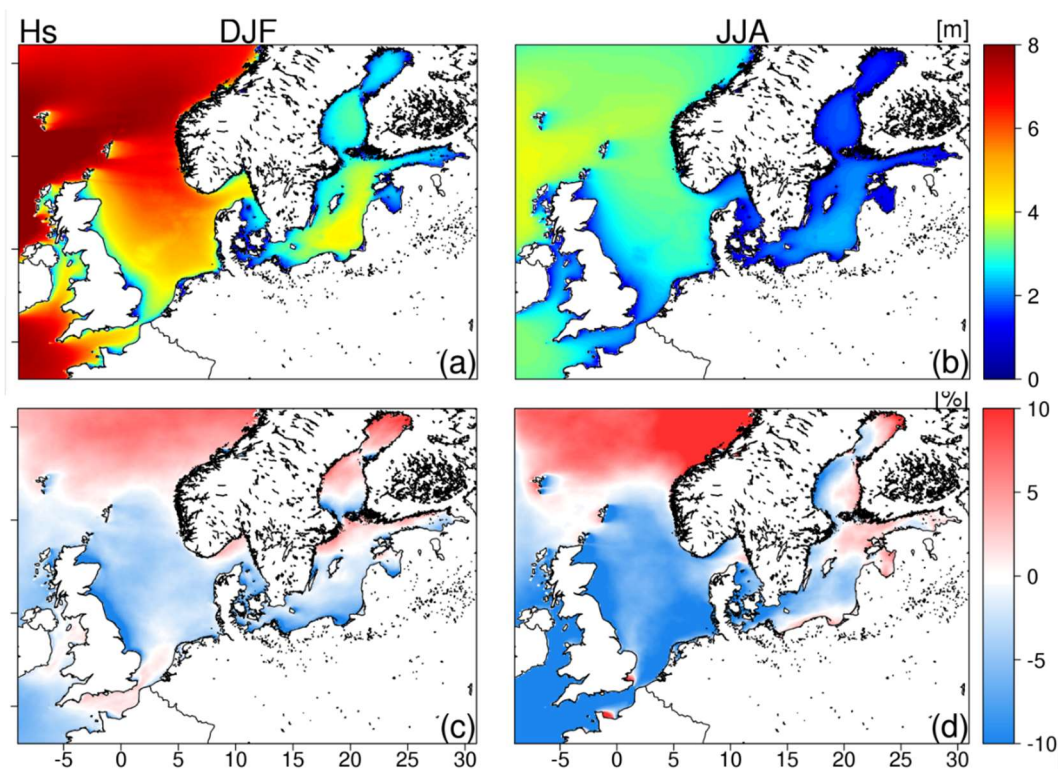


Rysunek 3.6 Łączna liczba sztuk odpadów (z czterech okresów badawczych) zarejestrowanych na poszczególnych sekcjach w siedmiu głównych kategoriach w 2020 roku. Najwięcej sztuk odpadów stwierdzono w Gdańsku w 2020 roku (źródło: Główny Inspektoriat Ochrony Środowiska, 2020)

3.4 Zmiany klimatu

3.4.1 Falowanie

Badanie wpływu zmian klimatycznych na falowanie, przeprowadzone przez Bonaduce et al. (2019), przewidywało jedynie niewielkie zmiany wysokości fal w Zatoce Gdańskiej do końca XXI w. (2075-2100) (Rysunek 3.7). Wyniki te wykazują nieznaczne zmniejszenie (od 5% do 10%) zimą i nieznaczne zmiany w okresie letnim. HELCOM (2021b) wykazał, że zmiany falowania na Bałtyku są ściśle powiązane ze zmianami wiatrów i są wysoce nieprzewidywalne. Z dużym stopniem pewności można przewidywać zmniejszenie pokrywy lodowej, które może zwiększyć rozbieg fal i być może wpływać na ogólne zmiany falowania. Przewiduje się, że do roku 2100 wysokości fali znacznej mogą wzrosnąć o ok. 5% w porównaniu do stanu obecnego, zwłaszcza w północnej i wschodniej części Bałtyku. Na zmiany takie nakłada się jednak znaczny poziom zmienności wielodekadowej i pomiędzy różnymi symulacjami, nie prowadzą więc one do znaczących wniosków.



Rysunek 3.7 Średnia prognozowana wysokość fal (górną) w trakcie zimy (DJF) oraz lata (JJA) i porównanie do obecnego stanu falowania (dół) (źródło: Bonaduce i in., 2019)

3.4.2 Poziom morza

Wzrost poziomu morza na świecie będzie ulegał przyspieszeniu. Według aktualnych prognoz szacuje się, że poziom Bałtyku wzrastać będzie w tempie ok. 87% tempa światowego. Przewidywany wzrost średniego światowego poziomu morza do roku 2100 wahają się w zakresie od 43 cm (RCP2.6) do 84 cm (RCP8.5). Prawdopodobne zakresy tych oszacowań wynoszą od 29 do 56 cm (RCP2.6) i od 61 do 110 cm (RCP8.5) HELCOM, (2021b).

3.4.3 Spływ rzeczny

HELCOM, (2021b) wskazuje, że na przestrzeni ostatnich stuleci nie stwierdzono znaczących zmian łącznego rocznego spływu rzecznej, mają natomiast miejsce duże zmiany dekadowe i regionalne. Na północy Bałtyku i w Zatoce Fińskiej zwiększony spływ rzeczny statystycznie

wiąże się z podwyższoną temperaturą powietrza i zwiększoną ilością opadów, zaś bardziej na południe ze wzrostem temperatur powietrza wiąże się zmniejszony spływ. Na przestrzeni XX w. wzrastały spływy zimowe, zmniejszały się natomiast spływy z roztopów wiosennych.

Prognozuje się zwiększenie łącznego spływu rzeczego do Bałtyku w porównaniu z chwilą obecną o 2-22%, co wiąże się ze wzrostem temperatur. Wzrost następować będzie głównie na północy, a towarzyszyć mu może zmniejszenie spływu na południu, przy czym w związku z okresowymi roztopami wzrastać będzie spływ zimowy. Średnio ujmując, rzeki wpływające do południowo-wschodniej części Bałtyku prawdopodobnie ulegną zmniejszeniu spływu wynoszącemu ok. 18,25% do roku 2081 - 2100 (Šarauskienė i in., 2017).

3.4.4 Obciążenie rzek pierwiastkami biofilnymi

Prognozy wskazują, że spływ rzeczny w południowej części regionu bałtyckiego będzie się zmniejszać, co może potencjalnie prowadzić do zmniejszenia rzeczego obciążenia pierwiastkami biofilnymi (HELCOM, 2021b).

3.4.5 Wiatr

Przewidywane zmiany charakterystyki wiatrów nacechowane są dużym poziomem niepewności, co wiąże się z dużą naturalną zmiennością w obszarze Bałtyku. Symulacje oparte na modelach klimatycznych sugerują niewielki lecz niepomijalny wzrost prędkości wiatrów jesienią i jej zmniejszenie w okresie wiosennym (HELCOM, 2021b).

4 Scenariusze modelowania

Elementy oparte na modelowaniu matematycznych uwzględniają trzy warianty:

4. Wariant **Przeszły**: układ portu sprzed roku 2020, z T1 i T2 ale bez przedłużenia falochronu, zbudowanego w roku 2020. Wariant nie uwzględnia żadnego z proponowanych pogłębień.
5. Wariant **Obecny**: aktualny układ portu z T1 i T2 i z przedłużeniami falochronów, a także z pogłębieniami związanymi z kanałem podejściowym i manewrowym
6. Wariant **Przyszły**: taki sam jak wariant Obecny z poszerzeniem o budowę T3, w tym pogłębienie dla obszaru cumowania T3.

Warianty te przedstawiono graficznie na Rysunku 5.2.

Wariant „Przeszły” uwzględniono, ponieważ przedłużenia falochronów zbudowane zostały niedawno (w 2020 r.) i przewiduje się, że będą one miały znaczący wpływ na falowanie na plaży Stogi i transport osadów. Kompleksowa ocena zmian falowania i transportu osadów w wyniku budowy T3 powinna uwzględniać oddzielnie oddziaływanie przedłużeń falochronów.

5 Morfologia Plaży

Przeprowadzono analizę zmian morfologii plaży, służącą zrozumieniu wpływu T3 na lokalną charakterystykę transportu osadów.

5.1 Metodyka

Badanie przeprowadzono w ujęciu trój etapowym:

1. **Historyczna analiza wybrzeża** w oparciu o zdjęcia satelitarne, służąca ustaleniu trendów nanoszenia i erozji na długości plaży Stogi.
2. **Długoterminowe modelowanie fal**, służące opracowaniu ewidencji fal na badanym obszarze z nową zabudową i bez niej.
3. **Modelowanie transportu osadów**, w celu zrozumienia zmian charakterystyki transportu osadów na długości plaży Stogi z nową zabudową i bez niej.

W zakresie modelowania morfologii plaży uwzględniono dodatkowy wariant, służący badaniu skutków zmiany klimatu, w którym wykorzystano takie same parametry jak w scenariuszu *Przyszłym*, ale przy zmniejszeniu energii fal o 10%, zgodnym z zachowawczymi przewidywaniami Bonaduce i in. (2019).

5.1.1 Historyczna analiza wybrzeża

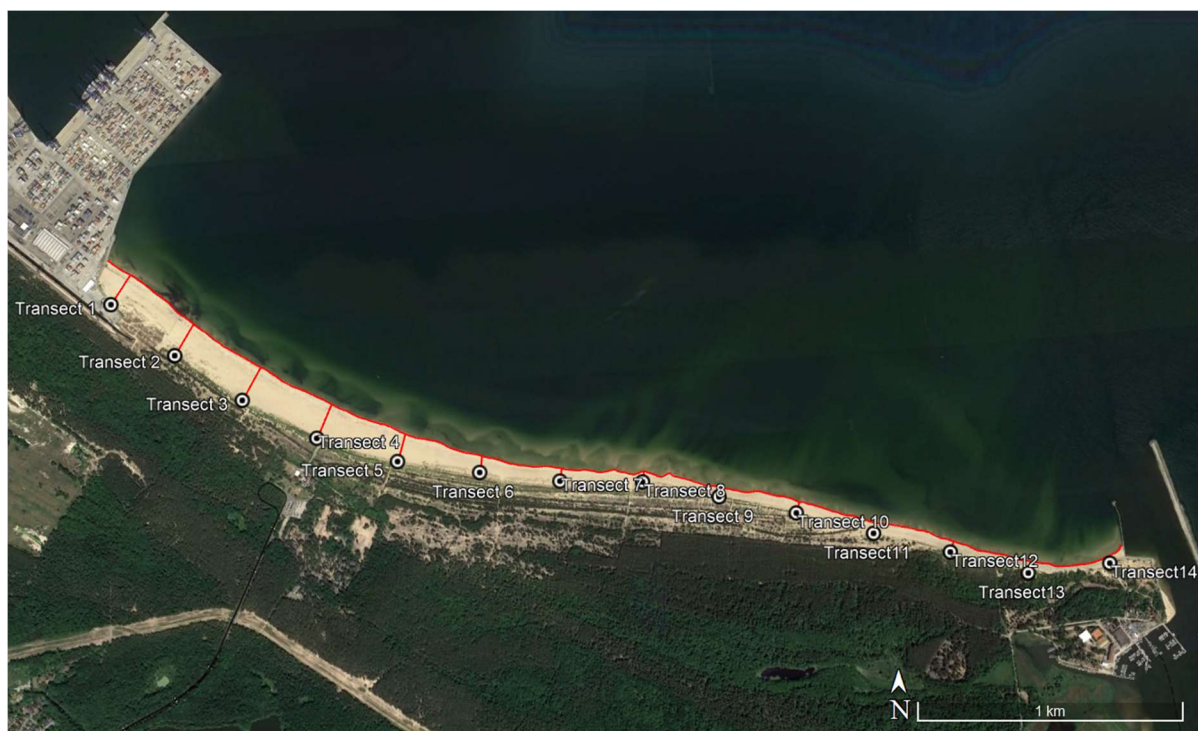
Analizę wybrzeża przeprowadzono poprzez badanie historycznych zdjęć satelitarnych. Zdjęcia pozyskano z archiwum historycznego Google Earth oraz z bazy danych Landsat⁶. Obrazy zestawiono w celu objęcia całej plaży Stogi z naciskiem na kraniec zachodni, zbliżony do terminalu T1.

Obrazy z Google Earth są w wysokiej rozdzielczości, lecz sporadycznie obejmują plażę w okresie od roku 2008 do 2018. Po roku 2018 brak jest pełnego objęcia plaży Stogi zdjęciami z Google Earth. Obrazy z bazy Landsat zestawiono z okresu 1986 – 2020 i są one w różnych rozdzielczościach. Nawet przy najwyższej rozdzielczości, wynoszącej 10 m, nie była to jakość wystarczająca do dokonania rzetelnych pomiarów szerokości plaży, chociaż zdjęcia te użyteczne były przy określaniu zmian zabudowy lokalnej infrastruktury przybrzeżnej.

Szerokość plaży ustalano w 14 lokalizacjach (Rysunek 5.1.) na 24 obrazach, a wyniki tej analizy przedstawiono w Tabeli 5.2. Pierwszą lokalizację pomiaru wybrano w miejscu położonym w odległości 100 m na wschód od terminalu T1. Analiza zdjęć wskazała, że jest to stabilna lokalizacja, oddalona od okresowych zmian powodowanych wymywaniem i gromadzeniem materiału na krawędzi kamiennego umocnienia T1. Dalsze transekty rozmieszczono dalej co 300 m. Wyniki tej analizy przedstawiono w punkcie 5.2.1.

Należy zauważyć, że pomiary wymywania/gromadzenia materiału wykonane zostały, gdy nie istniała dodatkowa infrastruktura falochronowa, zbudowana w roku 2020. Czas dokonania tej budowy ustalony został na podstawie przeglądu zdjęć z bazy Landsat. Obecność tych falochronów i terminalu T3 prawdopodobnie spowoduje dalsze zmiany charakterystyki transportu osadów na tym obszarze.

⁶ <https://www.usgs.gov/landsat-missions>



Rysunek 5.1 Miejsca pomiaru szerokości plaży wykorzystywane do oceny historycznych zmian szerokości plaży Stogi

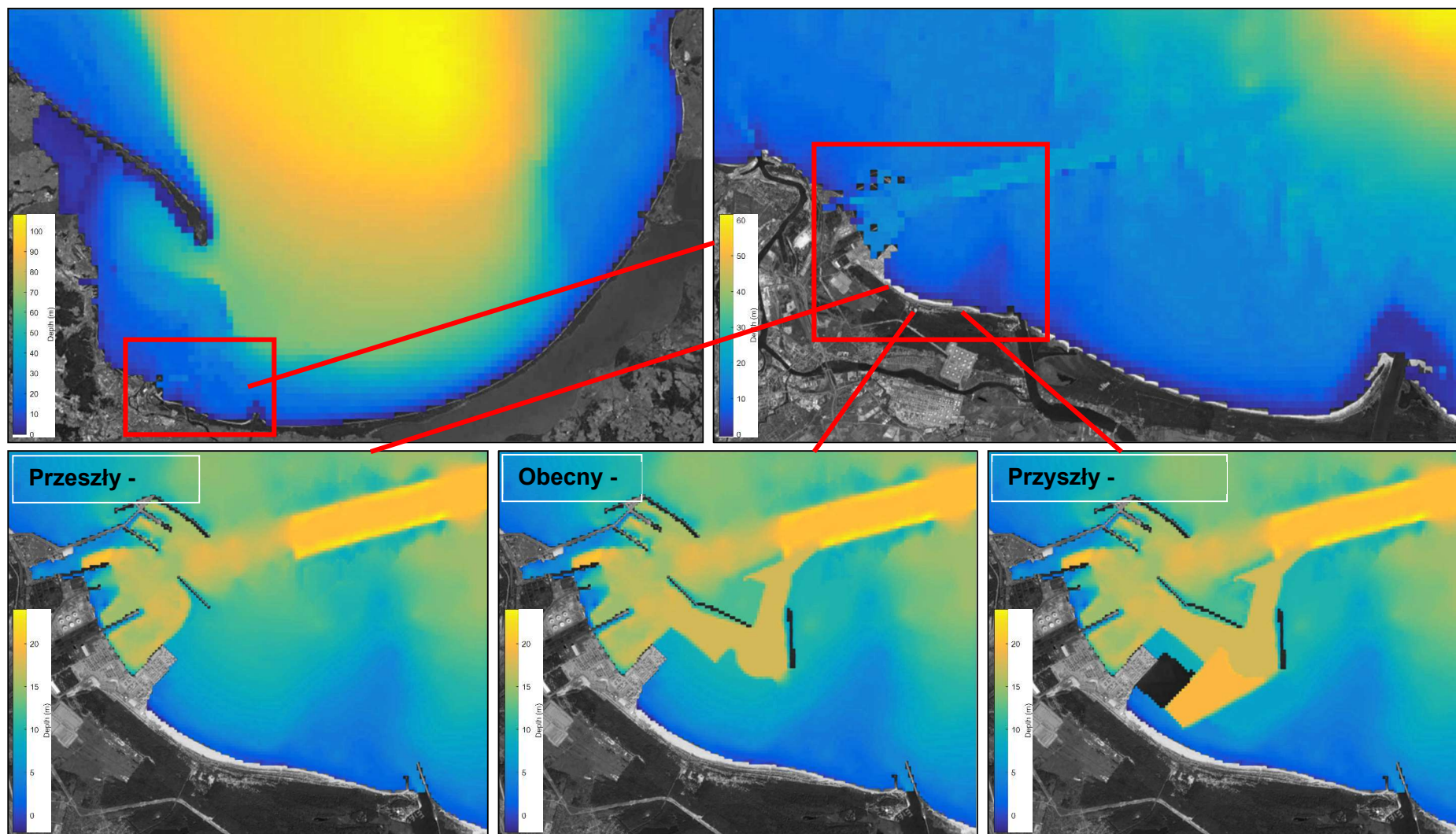
5.1.2 Długoterminowe modelowanie falowania

Modelowania falowania dokonano w oparciu o model falowania SWAN (Holthuijsen i in., 2004), stanowiący branżowy standard symulacji powstawania i propagacji fal. SWAN jest modelem propagacji fal oceanicznych trzeciej generacji, rozwiązującym równanie równowagi gęstości oddziaływania widmowego dla widm częstotliwościowo-kierunkowych.

W konfiguracji do modelu przyjęto trój etapowy, zagnieżdżony schemat batymetryczny, przedstawiony na Rysunku 5.2. Należy zwrócić uwagę na duży, wyniesiony obszar batymetryczny wychodzący w głąb zatoki ze wschodniego końca plaży. Wymiary poszczególnych siatek podano w 5.1. Prezentacja zagnieżdżona umożliwia zwiększanie rozdzielczości modelu w miarę zbliżania do obszaru badania. Warunki falowania określono na granicy północnej w oparciu o dane H_s , T_p oraz D_p uzyskane z 30-letniej prognozy wstecznej NOAA Wave Watch III (Sekcja 3.1.) w punkcie 19,200 E, 54,933 N. Dane dotyczące wiatrów pozyskano z tego samego modelu dla punktu 19,200 E, 54,667 N. 30-letnia prognoza wsteczna falowania została przeprowadzona przez model dla 3 wariantów modelu z podaniem szczegółowych warunków falowych na obszarze badania. Nie były dostępne zmierzone dane falowania, przy użyciu których można by skalibrować model falowania, w związku z czym do parametryzacji modelu przyjęto ustawienia standardowe. Wyniki dla modelu przedstawiono w punkcie 5.2.2.

Tabela 5.1 Specyfikacje siatek modelu SWAN wykorzystanych w tym projekcie

	nx	ny	Rozmiar komórki (m)
Siatka 1	107	69	1000
Siatka 2	111	66	200
Siatka 3	176	141	40



Rysunek 5.2 Siatki batymetryczne SWAN wykorzystane w badaniu modelowania fal dla trzech scenariuszy.

5.1.3 Modelowanie morfologii plaży

Modelowania morfologii plaży dokonano w oparciu o jednoliniową metodykę modelowania. Modele jednoliniowe są jednowymiarowe i analizują one nabrzeżny przepływ osadów w oparciu o linię normalną do izobaty. Charakterystykę falowania wyekstrahowano z długookresowego modelu falowania na wysuniętych w zatokę końcach transektów. Wyekstrahowanymi z modelu cechami falowania były H_s , T_p i D_p fali znacznej. Dane falowania zgrupowano w celu opracowania tabeli reprezentatywnych warunków falowania dla poszczególnych transektów. Przyjęto je jako warunki graniczne dla modelu.

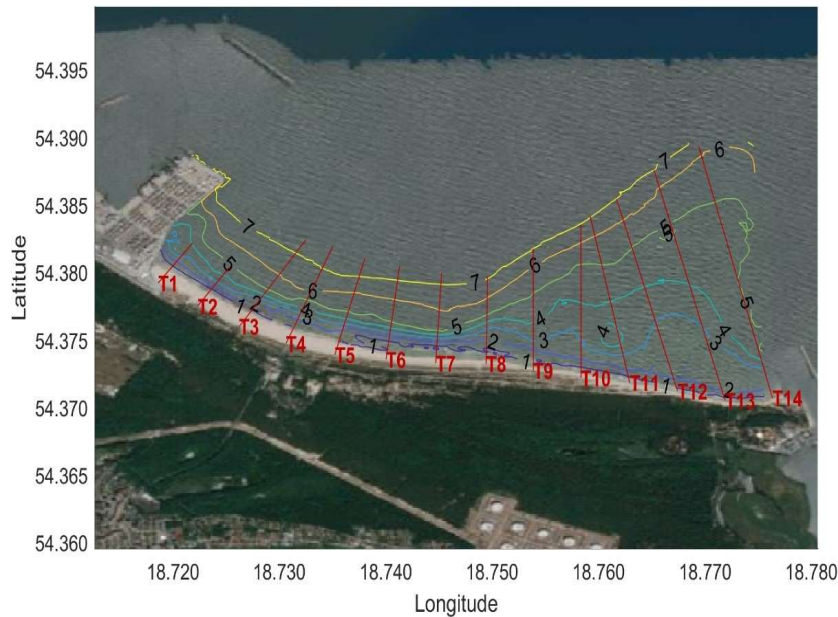
Dla celów tego badania zastosowaliśmy model transportu osadów GENIUS. Model ten przewiduje refrakcję, przelomowe warunki falowania oraz nabrzeżny transport osadów na plażach. Jest on podobny do jego dobrze znanego odpowiednika GENESIS (Hanson i Kraus, 1989), obejmuje jednak kilka dodatkowych właściwości, takich jak tarciove tłumienie wysokości fal oraz oparte o zjawiska fizyczne ujęcie przenoszenia fal przez podwodne rafy.

Ziarnistość osadów określono na podstawie analizy piasków plaży Stogi, podjętej w ramach tego badania (zob. Sekcja 2). W ramach analizy pobrano próbkę osadu z plaży w 19 lokalizacjach wzdłuż plaży, wykazując bardzo równomierny rozkład ziarnistości. Średnia wielkość ziarna D_{50} w 19 lokalizacjach pobierania próbek wynosiła 0,386 mm.

Jednoliniowy model zastosowano w 14 lokalizacjach, które poddawane były analizie historii linii brzegowej (Sekcja 5.1.1.). Transekty poprzeczne do wybrzeża w tych lokalizacjach przedstawia Rysunek 5.3.. Każdy transekt rozciągnięty jest do izobaty 7 m z wyjątkiem transektów 1 i 2, które są skrócone w celu uwzględnienia zajęcia obszaru przez T3 w wariantcie Przyszłym.

Wynikiem modelu jednoliniowego jest wielkość transportu osadów przy wybrzeżu w określonych punktach poszczególnych transektów. Wielkości transportu osadów zsumowano w ciągu czasowym warunków falowania w celu obliczenia wielkości transportu netto w okresie objętym modelem. Wynik z modelu przedstawia liczbowo wielkość i kierunek transportu osadu na poszczególnych transektach.

W oparciu o wyniku z wariantu *Przeszłego* ustalono relację pomiędzy wielkościami gromadzenia i erozji z historycznej analizy linii brzegowej a wielkościami transportu osadów na poszczególnych transektach, uzyskanymi z modelu. Powiązanie to zastosowano następnie do prognozowania zmian linii brzegowej w wariantach *Obecnym* i *Przyszłym*. Wyniki morfologii plaży przedstawiono w punkcie 5.2.3.



Rysunek 5.3 Transekty do wykorzystania w jednoliniowym modelowaniu transportu osadów nałożonych na mapę batymetryczną. Litera „T” w legendzie oznacza tutaj „Transekt”

5.1.4 Ograniczenia

Historycznej analizie linii brzegowej dokonano w oparciu o dostępne zdjęcia historyczne. Gdyby dostępne były obrazy bardziej aktualne, byłyby one przydatne w analizie zmian linii brzegowej od czasu budowy dodatkowych konstrukcji falochronowych w roku 2020. Przydatna byłaby też dostępność dodatkowych danych pozwalających na zrozumienie zmian morfologii plaży przed zbudowaniem terminala T1.

Dla określenia wartości granicznych modelu falowania przyjęto parametry fal (H_s , T_p oraz D_p), nie zaś wartości graniczne falowania oparte na funkcji widmowej. O ile, ogólnie rzecz biorąc, preferuje się widmowe wartości graniczne, w tym przypadku rozkład energii falowania jest prawie zawsze unimodalny, co wynika z charakterystyki Bałtyku pod względem ograniczania rozbiegu fal, przez co wartości widmowe nie są tak bardzo potrzebne.

Jednoliniowe modele falowania nie symulują złożonych układów prądów, generowanych przez propagację fal (np. komórek prądów wstecznych). Niemniej jednak, plaża Stogi jest w miarę prosta i jednolita, zatem w jej przypadku zastosowanie modelu jednoliniowego jest uzasadnione.

Ekstrapolowanie zmian linii brzegowej w przyszłość nie uwzględnia zmian kierunku ukształtowania batymetrycznego w stosunku do kąta natarcia fal. Ukierunkowanie linii brzegowej zazwyczaj ulega z czasem zmianie na prostopadłe do kąta natarcia fal, kiedy osiągnięty zostaje stan równowagi. Z tego względu należy z ostrożnością podchodzić do ekstrapolacji wyników zmiany linii brzegowej w przyszłość.

Zmierzone tempa erozji i akumulacji na plaży Stogi wskazują na akumulację netto osadu wzdłuż plaży oraz na to, że plaża prawdopodobnie zasilana jest piaskiem z głębszych części zatoki, co może mieć związek z dużym wypłyceniem batymetrycznym sięgającym w głąb zatoki przy wschodnim końcu plaży. Tego dodatkowego źródła osadu nie uwzględniono w modelu jednoliniowym.

Dla długookresowego modelu falowania brak było dostępnych danych do kalibracji. W normalnych warunkach branżowym standardem w modelowaniu falowania jest porównanie z danymi pomiarowym. Jednakże charakterystyka falowania w tej lokalizacji jest stosunkowo prosta w porównaniu z lokalizacjami na otwartym oceanie, gdzie długookresowym przyborom towarzyszą lokalne przybory wywołane wiatrem.

W modelowaniu nie uwzględniono zacumowanych statków. Chociaż zakłada się, że będą one w pewnej mierze tłumić energię fal, raczej nie będą mieć dużego wpływu na charakterystykę transportu osadów.

Morfologię plaży oparto na czynnikach powodowanych falowaniem. Model nie obejmuje transportu osadów przez wiatr.

5.2 Wyniki modelowania transportu osadów

W tej części zaprezentowano wyniki historycznej analizy linii brzegowej, długoterminowego modelowania falowania oraz modelowania transportu osadów.

5.2.1 Historyczna analiza wybrzeża

Wykorzystanie zdjęć z serwisu Google Earth zapewnia dość wysoką rozdzielczość (ok. 1 m na 1 m) obrazowania plaży Stogi. Zdjęcia te wykorzystano do badania zmian szerokości plaży w okresie od roku 2008 do 2018. Ilustracje zachodniego krańca plaży Stogi przedstawiono na rysunkach od 5.2.9. do 5.11. Te same obrazy w oddaleniu, ukazujące całość plaży Stogi, przedstawiono w 0. W archiwum znajduje się również jedno zdjęcie z roku 1985, ukazujące, że przed zbudowaniem terminala T1 plaża była znacznie węższa, przy czym należy zaznaczyć, że zdjęcie wykonano na ok. 20 lat przed budową T1 w 2005 r.

Analiza zdjęć wykazała, że w środkowej części plaży Stogi sporadycznie kształtują się efemeryczne mierzeje (przykład na Rysunku 5.5.). Mierzeje często kształtują się ukośnie do linii brzegowej i sporadycznie wystają ponad powierzchnię wody.

Zmiany szerokości plaży w czasie Rysunek 5.6. W zaprezentowanych tu wynikach plażę podzielono na część zachodnią, środkową i wschodnią, co przedstawia Rysunek 5.4.. Istnieją dowody na trwającą akumulację na zachodnim krańcu plaży (na zachód od Transektu 6) na przestrzeni obrazów z lat od 2008 do 2018. W części środkowej i na wschód od środka plaży (transekty od 7 do 11) stwierdzono tendencję do stałej erozji. Ta tendencja erozji jest proporcjonalnie mniejsza niż trend akumulacji w części zachodniej. Jeżeli nie liczyć wahań, położona najdalej na wschód część plaży Stogi (transekty od 12 do 14) miała szerokość w miarę stabilną (0) w całym okresie objętym analizą.

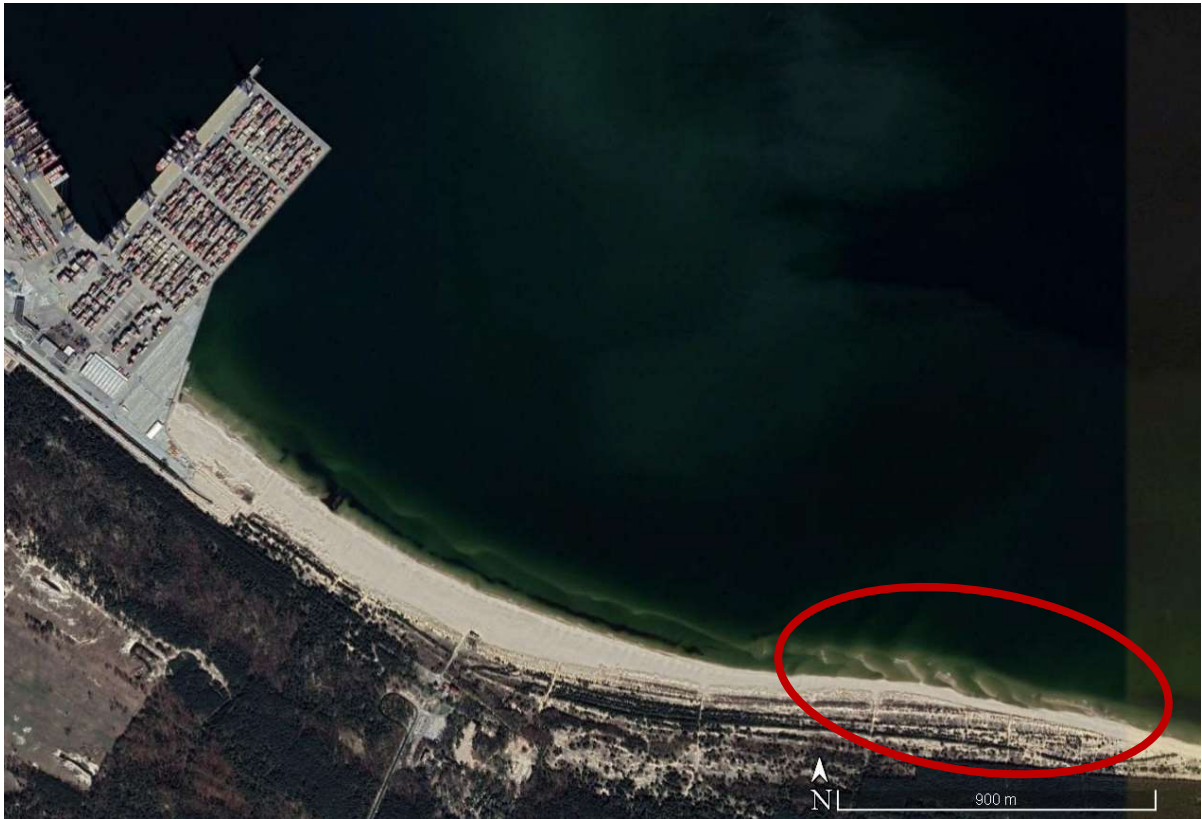


Rysunek 5.4 Plaża Stogi na wschód od Portu Gdańsk. Etykiety zawierają konwencję nazewnictwa używaną w tym raporcie. Litera „T” w legendzie oznacza tutaj „Transekt”.

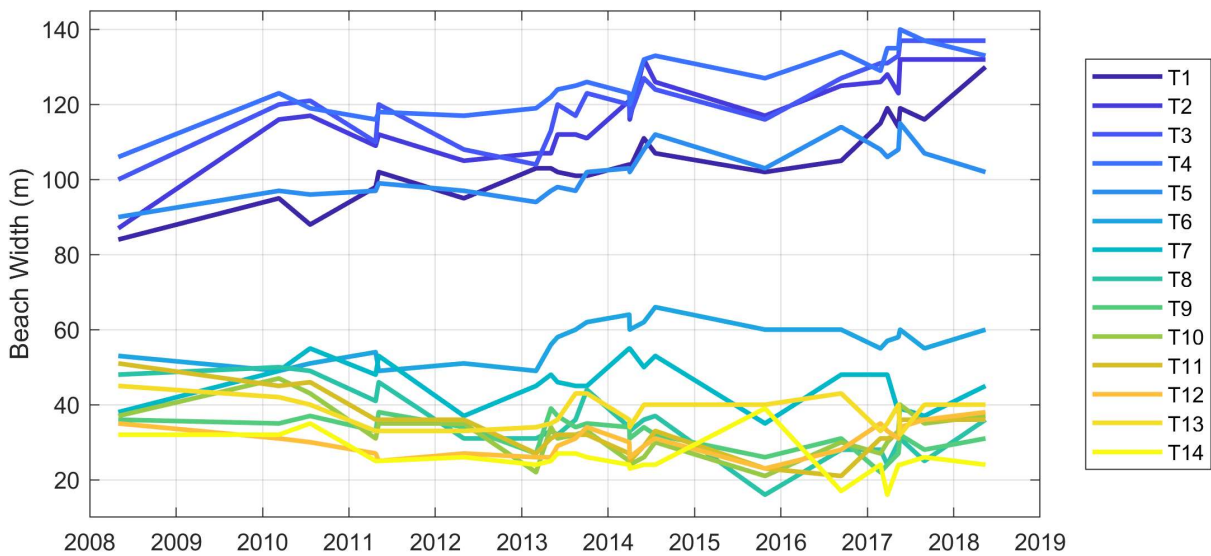
Dla każdego transektu zastosowano regresję liniową w celu obliczenia rocznej wielkości zmian szerokości plaży w każdym miejscu pomiaru. Przykład tych ustaleń przedstawiono na Rysunku 5.7. dla transektu 1. W tym przypadku plaża narasta w tempie 3,4 m rocznie (przedział ufności 95% od 2,66 to 4,15 m/rok). Największe tempo erozji (-2.36 m/rok) pojawia

się na transekcie 8. Wielkości erozji i akumulacji plaży przedstawia tabela 5.3. Wykresy regresyjne dla wszystkich transektów przedstawiono w 0.

O ile na zachodnim krańcu plaży Stogi na dostępnych zdjęciach satelitarnych z okresu 10 lat można zauważy znaczącą akumulację, to nie stwierdzono proporcjonalnie dużej erozji w środkowej i wschodniej części plaży. Wskazuje to na istnienie źródła osadu, zwiększającego łączną objętość piasku plaży, przy czym nie jest całkiem jasne, jaki charakter ma to dodatkowe źródło osadu. Transport osadów zachodzi głównie z kierunku wschodniego na zachód (co potwierdza późniejsze modelowanie transportu osadów – punkt 5.1.3.). Groble u ujścia Martwej Wisły (Wisły Śmiałej) (od wschodu) zdają się zatrzymywać transport osadu ze wschodu; nie zauważa się jednak powstawania łachy piachu przy wschodniej grobli (zob. Rysunek 5.8.) co wskazuje po pierwsze, że transport osadu ze wschodu na zachód nie jest znaczący na wschód od grobli, po drugie zaś, że piasek nie przemieszcza się przy grobli w znaczącym stopniu w pobliżu brzegu. Najprawdopodobniej zatem dopływ osadu na plażę Stogi następuje w kierunku poprzecznym do wybrzeża (tj. nanoszenie piasku na wybrzeże z głębszych wód w głębi zatoki). Możliwe, że źródłem tego dopływu osadu jest wyniesiona figura batymetryczna wychodząca w wody zatoki ze wschodniego krańca plaży Stogi.



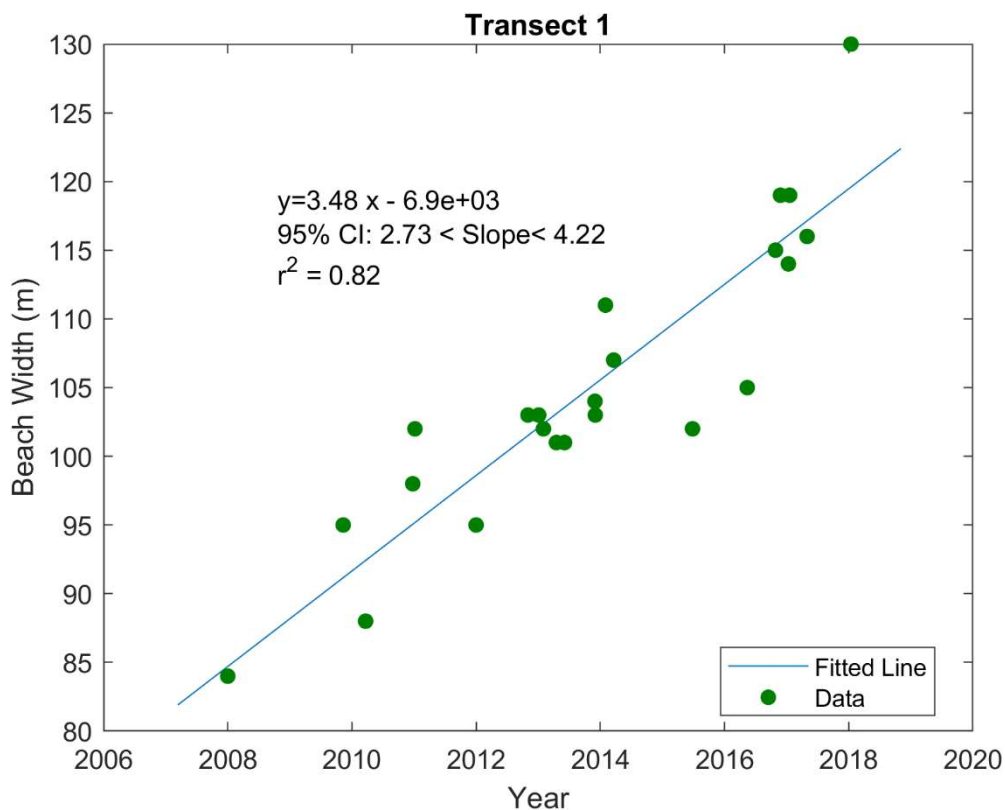
Rysunek 5.5 Efemeryczne wyłaniające się osady obserwowane wzdłuż centralnej części plaży Stogi



Rysunek 5.6 Zmiany Szerokości plaży na 10 transektach. Litera „T” w legendzie oznacza tutaj „Transekt”.

Tabela 5.2 Zmierzone szerokości plaży w 14 punktach pomiarowych

Data	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14
15/12/1985	25	37	67	90	82	43	42	36	75	67	76	88	116	49
1/05/2008	84	87	100	106	90	53	38	48	36	37	51	35	45	32
11/03/2010	95	116	120	123	97	49	49	50	35	47	45	31	42	32
21/07/2010	88	117	121	119	96	51	55	49	37	43	46	30	40	35
24/04/2011	98	109	110	116	97	54	48	41	33	31	36	27	33	25
7/05/2011	102	112	120	118	99	49	53	46	38	35	36	25	33	25
1/05/2012	95	105	108	117	97	51	37	31	34	35	36	27	33	26
2/03/2013	103	107	104	119	94	49	45	31	27	22	27	26	34	24
4/05/2013	103	107	113	122	97	56	48	33	39	34	31	26	35	25
1/06/2013	102	112	120	124	98	58	46	32	37	31	32	29	36	27
16/08/2013	101	112	117	125	97	60	45	36	34	32	32	31	43	27
3/10/2013	101	111	123	126	102	62	45	44	35	33	32	34	43	26
31/03/2014	104	121	120	123	103	64	55	34	34	25	27	30	36	24
2/04/2014	103	116	117	120	102	60	55	33	31	24	25	26	34	23
1/06/2014	111	132	127	132	108	62	50	36	34	26	29	29	40	24
19/07/2014	107	126	124	133	112	66	53	37	32	30	33	31	40	24
26/10/2015	102	117	116	127	103	60	35	16	26	21	23	23	40	39
12/09/2016	105	125	127	134	114	60	48	28	31	30	21	28	43	17
25/02/2017	115	126	131	129	108	55	48	28	22	27	31	35	33	24
26/03/2017	119	128	131	135	106	57	48	24	24	30	31	33	35	16
12/05/2017	114	123	133	135	108	58	38	30	27	33	32	31	40	24
19/05/2017	119	132	137	140	115	60	39	31	32	40	36	34	32	24
30/08/2017	116	132	137	137	107	55	37	25	28	35	36	36	40	26
15/05/2018	130	132	137	133	102	60	45	36	31	37	36	38	40	24



Rysunek 5.7 Regresja liniowa przedstawiająca zmiany szerokości plaży. Nachylenie linii (3.4) wskazuje tempo zmian szerokości plaży w metrach na rok. „95% CI” zapewnia 95% przedział ufności wokół nachylenia.

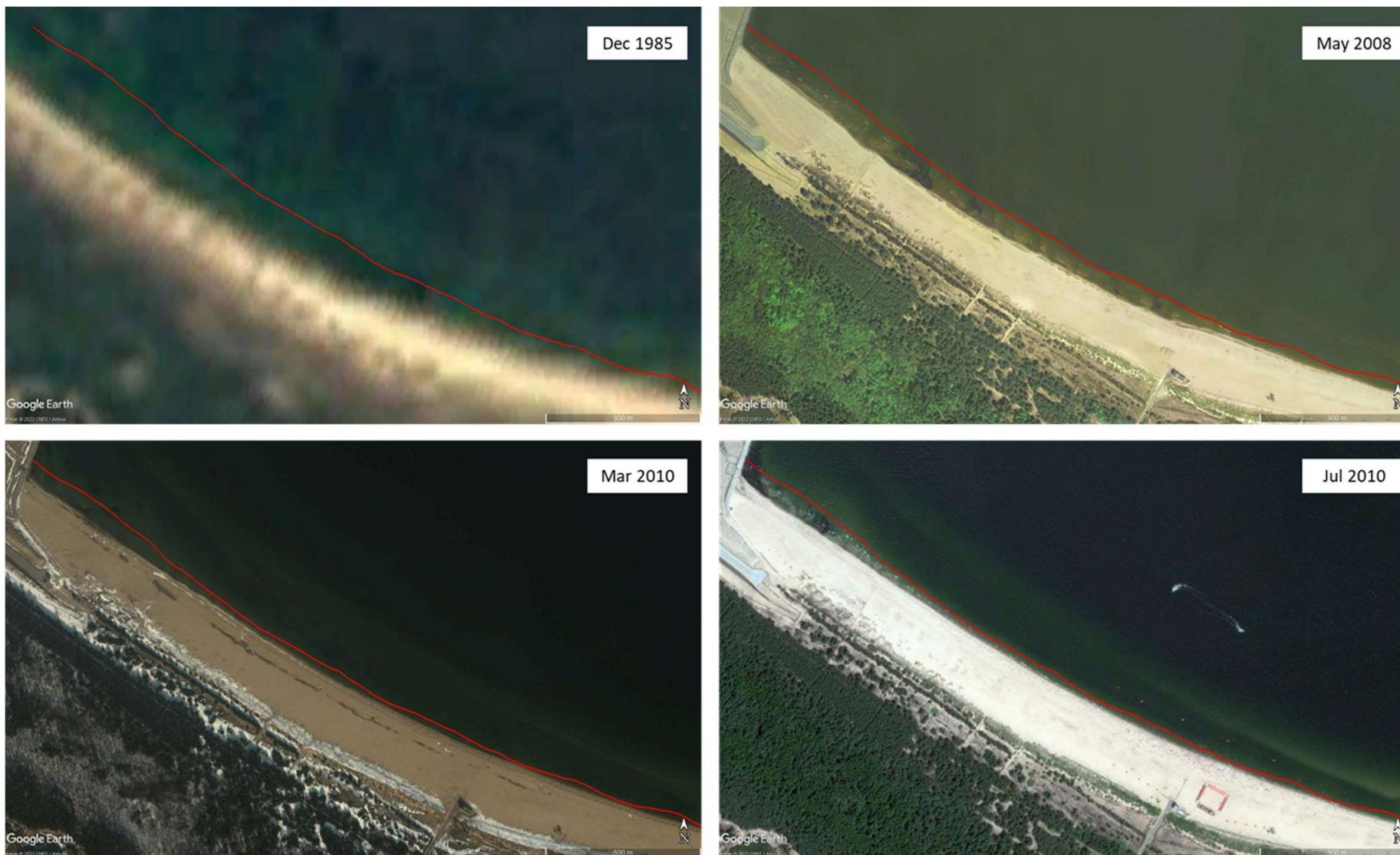
Tabela 5.3 Tempo erozji i akumulacji na każdym uwzględnionym transekcie

	Wynik (m/rok)	95% niżej	95% wyżej
Transekt 1	3.48	2.73	4.22
Transekt 2	3.28	2.19	4.38
Transekt 3	3.02	1.98	4.06
Transekt 4	2.68	2.04	3.33
Transekt 5	1.88	1.19	2.57
Transekt 6	0.94	0.24	1.64
Transekt 7*	-0.53	-1.54	0.48
Transekt 8	-2.36	-3.30	-1.43
Transekt 9	-1.13	-1.69	-0.57
Transekt 10	-0.73	-1.74	0.29
Transekt 11	-1.50	-2.46	-0.54
Transekt 12*	0.48	-0.14	1.10
Transekt 13*	-0.17	-0.84	0.50
Transekt 14	-0.89	-1.62	-0.16

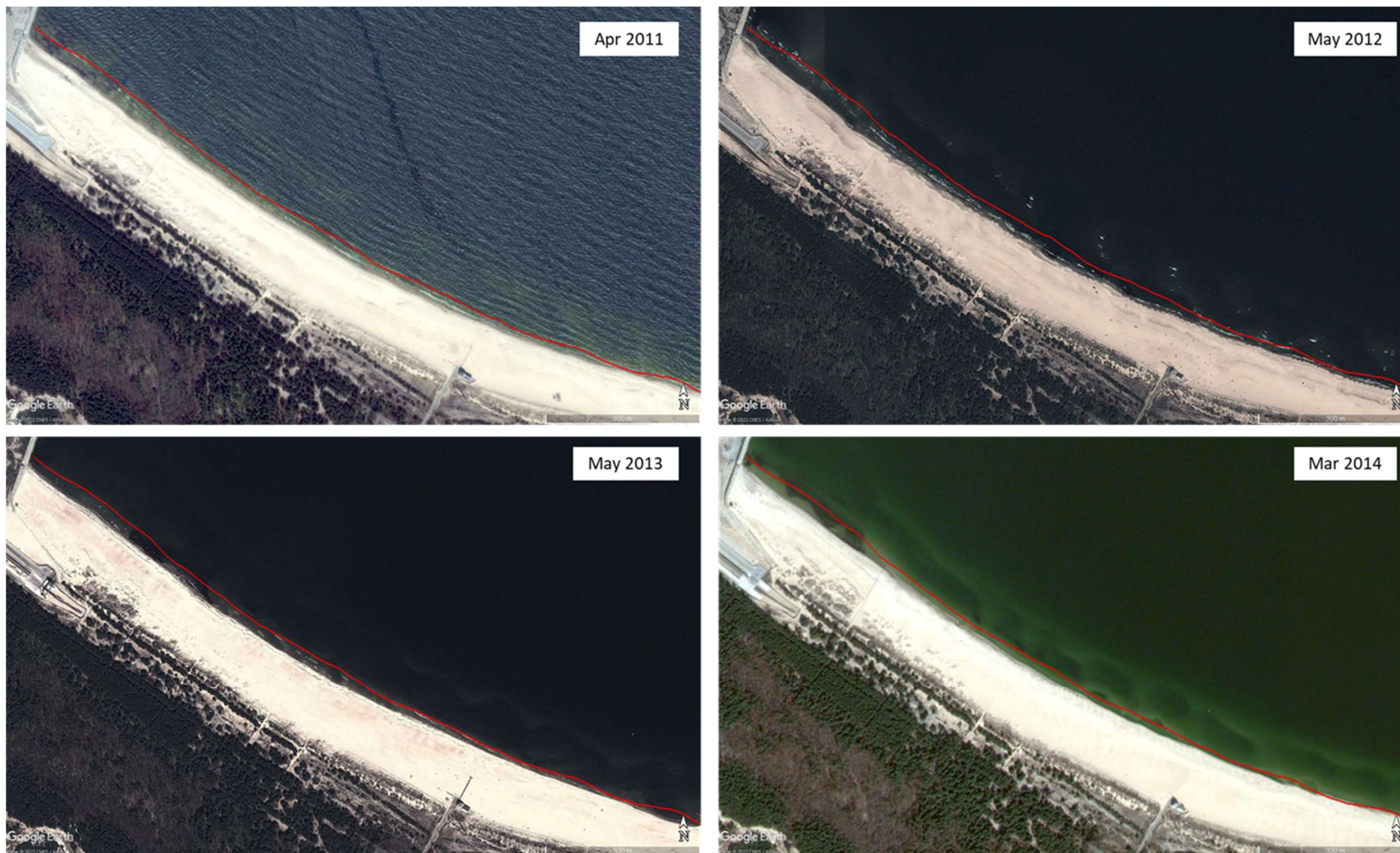
*Przedziały ufności ograniczają się do 0, więc prawdopodobnie brak trendu.



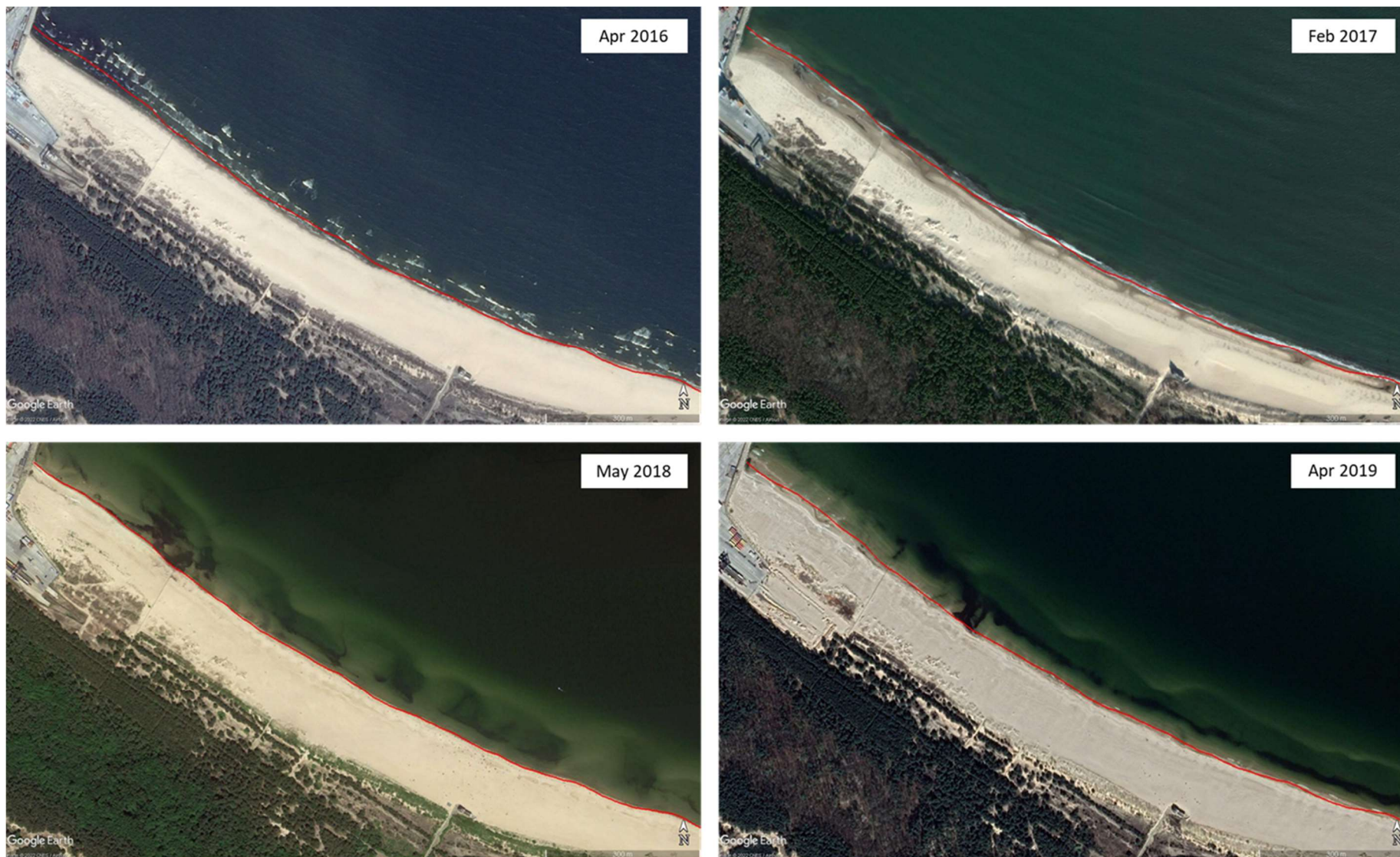
Rysunek 5.8 Ujście Martwej Wisły nie wykazało znaczącej akumulacji osadu na ścianie wschodniej



Rysunek 5.9 Ewolucja zachodniego krańca linii brzegowej plaży Stogi. Czerwona linia wskazuje linię brzegową w maju 2018 roku dla porównania.
 Źródło: Google Earth.



Rysunek 5.10 Ewolucja zachodniego krańca linii brzegowej plaży Stogi. Czerwona linia wskazuje linię brzegową w maju 2018 roku dla porównania.
 Źródło: Google Earth.

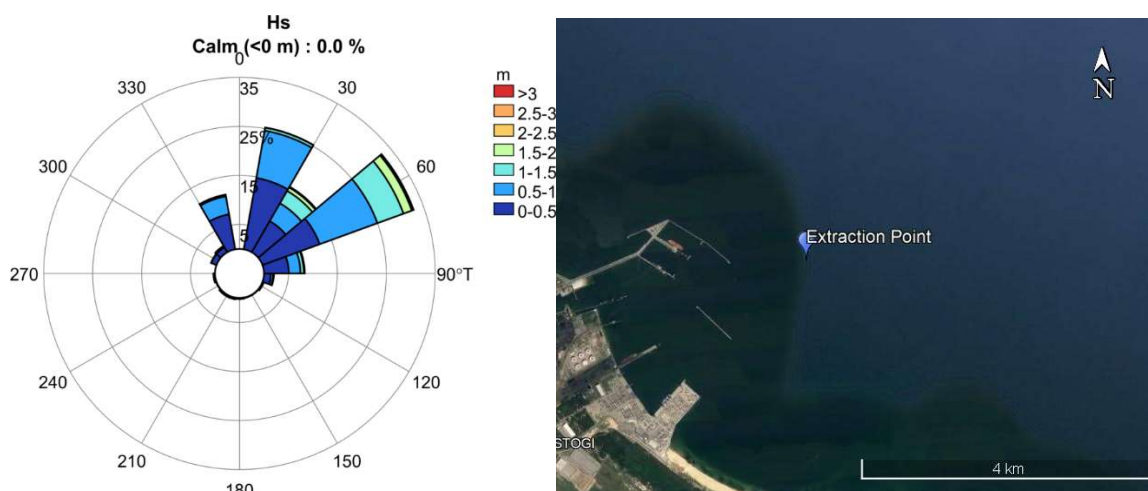


Rysunek 5.11 Ewolucja zachodniego krańca linii brzegowej plaży Stogi. Czerwona linia wskazuje linię brzegową w maju 2018 roku dla porównania.
 Źródło: Google Earth.

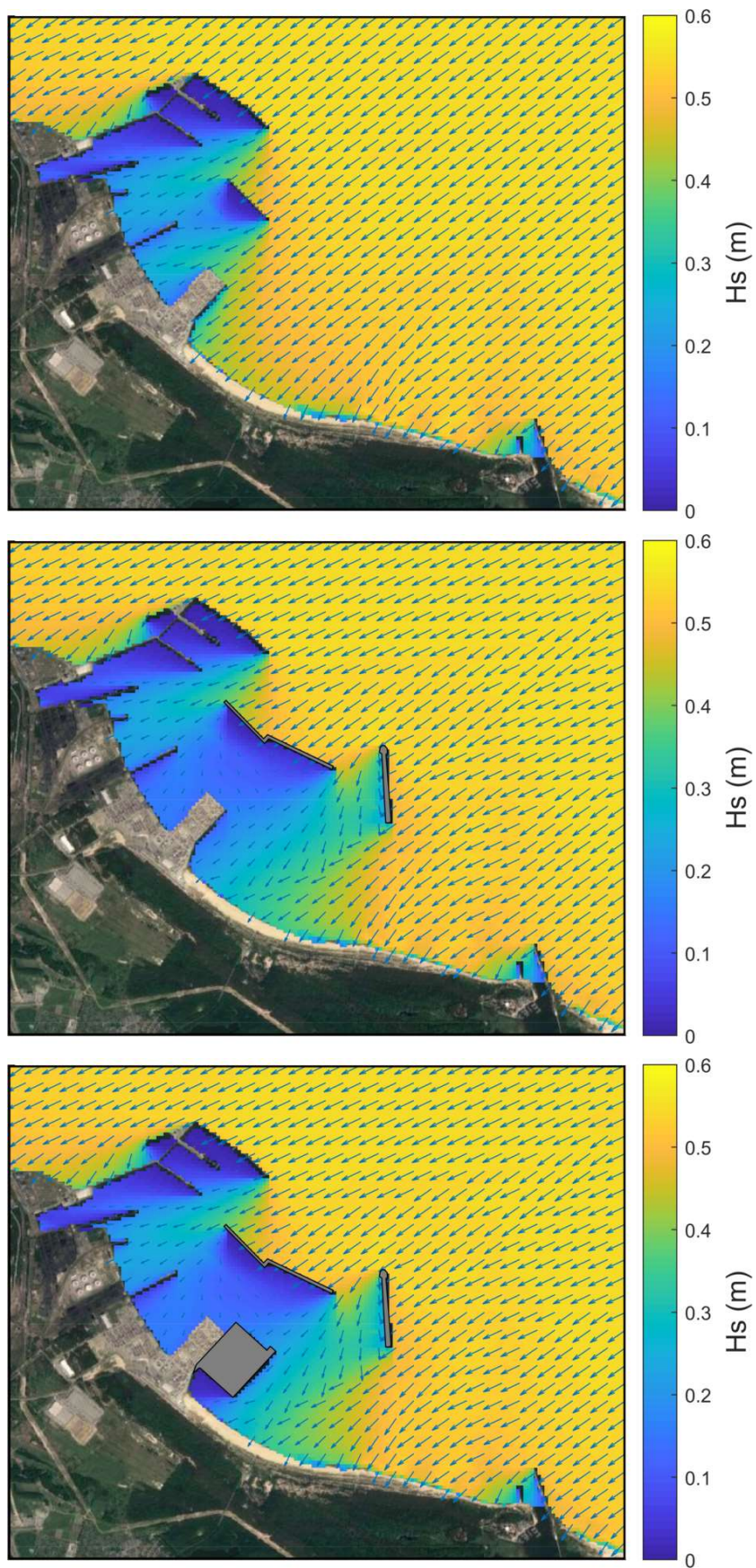
5.2.2 Długoterminowe modelowanie falowania

Rezultatem długoterminowego modelowania falowania jest 30-letnia ewidencja warunków falowania na badanym obszarze, stanowiąca kompleksowy opis zmienności warunków falowania w porcie. Podsumowanie falowania w zatoce w pobliżu portu przedstawiono na Rysunku 5.12. Ogólnie ujmując, fale płyną z kierunku NE, Mierzeja Wiślana. Wysokości fali znacznej są na ogół niższe niż 3 m, zazwyczaj utrzymując się w zakresie od 0,5 do 1 m.

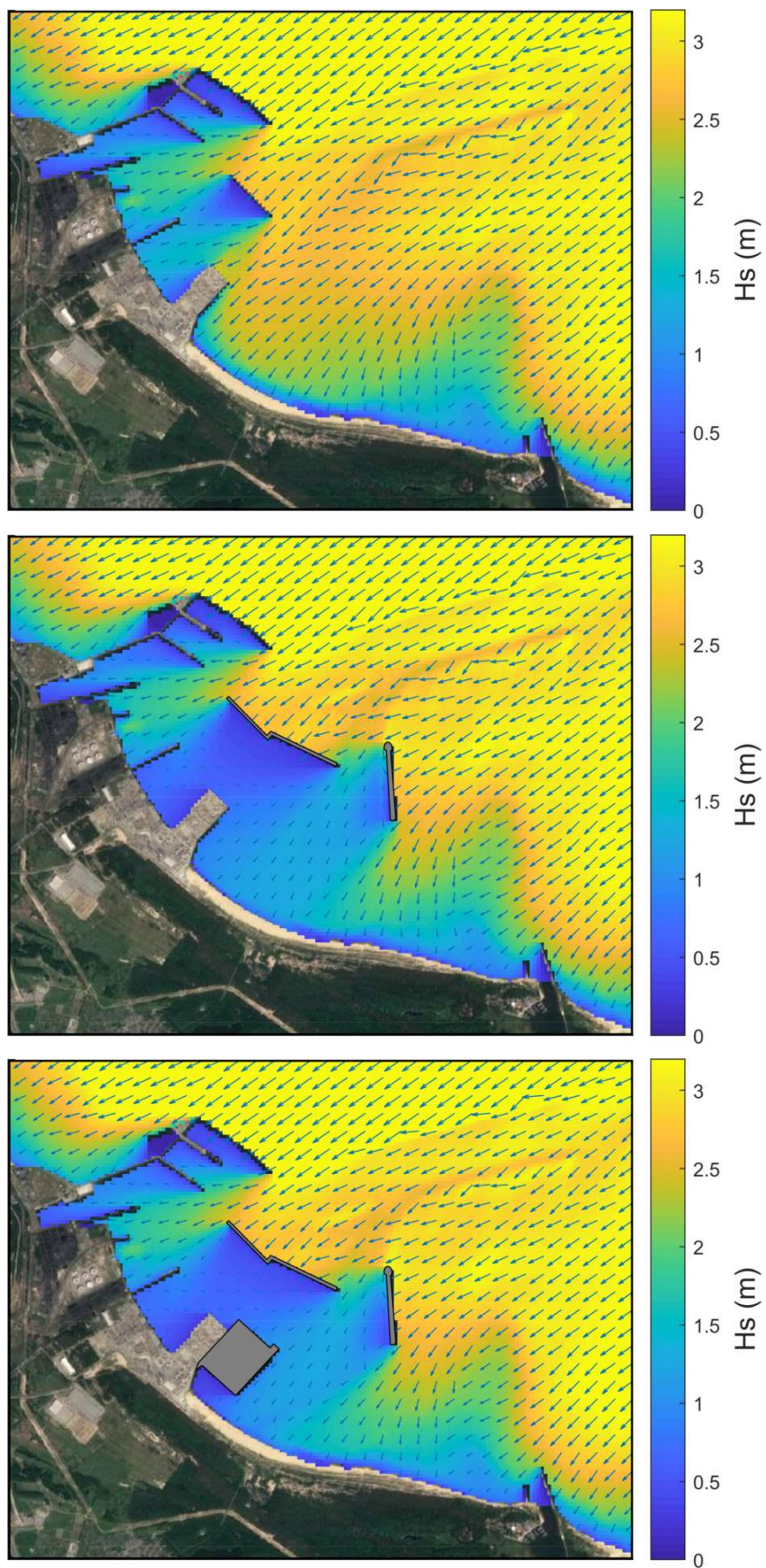
Poniżej przedstawiono zmienność lokalnej energii fal wokół portu przy umiarkowanym falowaniu na poziomie 0,5 m H_s z kierunku NE (Rysunek 5.13.) i dużym falowaniu 3 m H_s z kierunku NE (Rysunek 5.14.) dla wariantów *Przeszłego*, *Obecnego* i *Przyszłego*. Przy umiarkowanym falowaniu przedłużenia falochronów (wariant *Obecny*) zmniejszają energię fal docierających do zachodniej części plaży w znaczącej mierze, natomiast w części wschodniej falowanie pozostaje niezmienione. Budowa terminalu T3 (wariant *Przyszły*) prowadzi do dalszego zmniejszenia energii fal na zachodnim krańcu plaży. Ten sam efekt dostrzegalny jest w warunkach dużego falowania. W tym jednak przypadku pole falowania ulega w większym stopniu zmianom powodowanym przez interakcję fal z dnem zatoki, co obejmuje silne skupienie na wyniesionych obszarach batymetrycznych w głąb zatoki od wschodniego krańca plaży oraz refrakcji wokół krawędzi pogłębionych kanałów.



Rysunek 5.12 Róża falowania (po lewej) podsumowująca klimat falowy bezpośrednio na morzu przy Porcie Gdańsk (po prawej).



Rysunek 5.13 Znacząca wysokość fali dla umiarkowanych warunków fali 0,5 m NE dla scenariusza przeszłego (góra), teraźniejszego (środek) i przyszłego (dół).



Rysunek 5.14 Znacząca wysokość fali dla warunków dużej fali 3 m NE dla scenariusza przeszłego (górną), teraźniejszego (środek) i przyszłego (dół).

5.2.3 Modelowanie transportu osadów

Metodyka jednoliniowego modelowania transportu osadów daje oszacowanie rocznego strumienia osadów netto przez poszczególne transekty. Różnica pomiędzy strumieniem netto na transekcie a transektem sąsiednim daje szacunkową wielość anomalii strumienia osadów dla poszczególnych transektów (Dane wyjściowe z Genius pokazujące strumień netto na każdym transekcie (u góry) i anomalię strumienia na każdym transekcie (na dole)). Anomalia osadów określa liczbowo akumulację lub erozję netto osadów w danej lokalizacji. Jest to przydatne w celu szacowania kierunku przemieszczania się linii brzegowej, nie daje natomiast bezpośredniego oszacowania zmian linii brzegowej w poszczególnych lokalizacjach. Można nawiązać relację pomiędzy anomalią strumienia osadów a zmierzonym tempem zmian wybrzeża w poszczególnych lokalizacjach (punkt 5.2.1.). W sposób graficzny przedstawiono to na Rysunku 5.16. Relację tę można następnie wykorzystać do przewidywania wielkości zmian linii brzegowej dla innych scenariuszy w oparciu o modelowany roczny strumień osadów.

Zmiany linii brzegowej przedstawiają warianty *Przeszły*, *Teraźniejszy* i *Przyszły* na Rysunku 5.17. do Rysunku 5.19. dla okresów 10 i 20 po sytuacji wyjściowej z roku 2018.

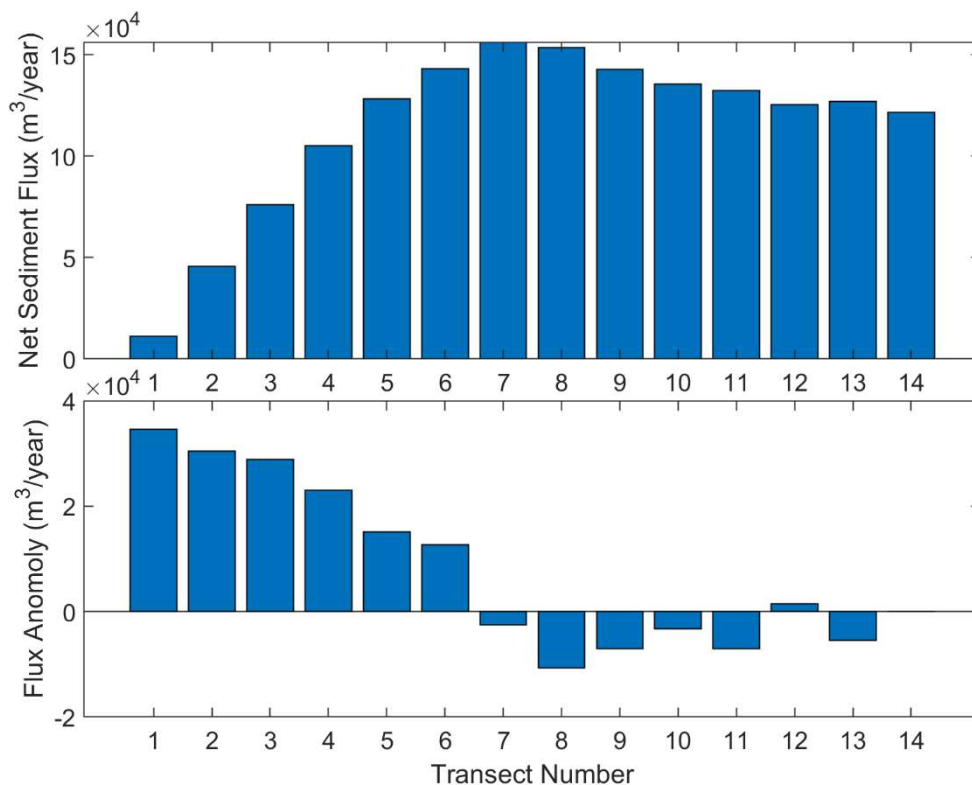
Zmiana wybrzeża w wariantcie *Przeszłym* wskazuje na akumulację na zachodnim krańcu plaży i mniej wyraźną, lecz również niepomijalną erozję w części środkowej i na wschód od środka plaży. Na wschodnim krańcu plaży linia brzegowa jest w miarę stabilna.

W przypadku wariantu *Teraźniejszego* widzimy erozję na zachodnim krańcu plaży. Obszar silnej akumulacji przesuwają się tu z zachodniego krańca plaży ku wschodowi, bliżej części środkowej. Na wschód od środkowego obszaru plaży wciąż widzimy tutaj tendencję do erozji. Podobnie jak w wariantcie *Przeszłym* nie stwierdza się tu erozji na wschodnim krańcu dziedziny modelu.

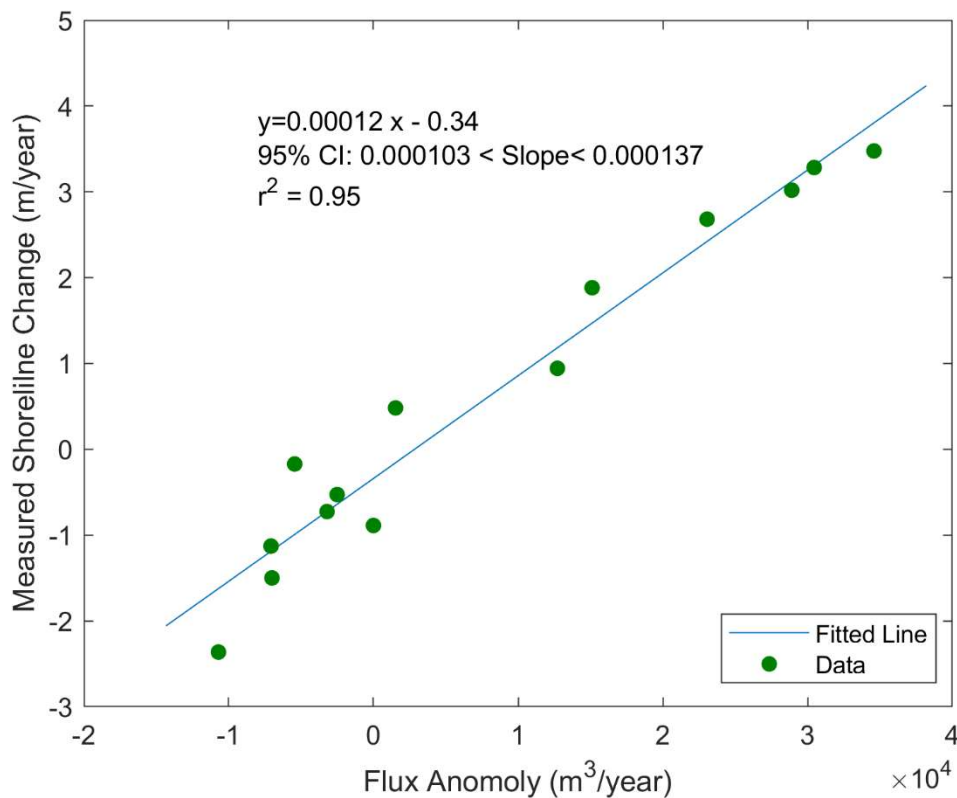
Zmiany linii brzegowej w wariantcie *Przyszłym* wyglądają bardzo podobnie jak w wariantcie *Obecnym*, jedynie z powrotem do charakterystyki akumulacji na zachodnim krańcu plaży w wyniku zacienienia falowania, powodowanego zajęciem obszaru przez terminal T3.

Przy obecności falochronów, bardzo niewielka ilość energii fal dociera do zachodniego krańca plaży Stogi i ulega ona dalszemu zmniejszeniu w wyniku postawienia terminalu T3. Oznacza to, że w strefie zacienienia terminalem T3 prawdopodobnie będzie miał miejsce bardzo mały ruch osadów wywołany falowaniem. Jak wspomniano w punkcie 5.1.4., w modelu nie uwzględniono transportu osadów przez wiatr, chociaż skutki działania wiatru prawdopodobnie będą prowadziły do dodatkowej akumulacji osadów w obszarze zacienienia przez T3. Obszary zajęte przez T1 i T3 zatrzymują będą energię wiatru z zachodu i północnego zachodu, która mogłaby w innym przypadku prowadzić do transportu osadów z tego obszaru w kierunku wschodnim.

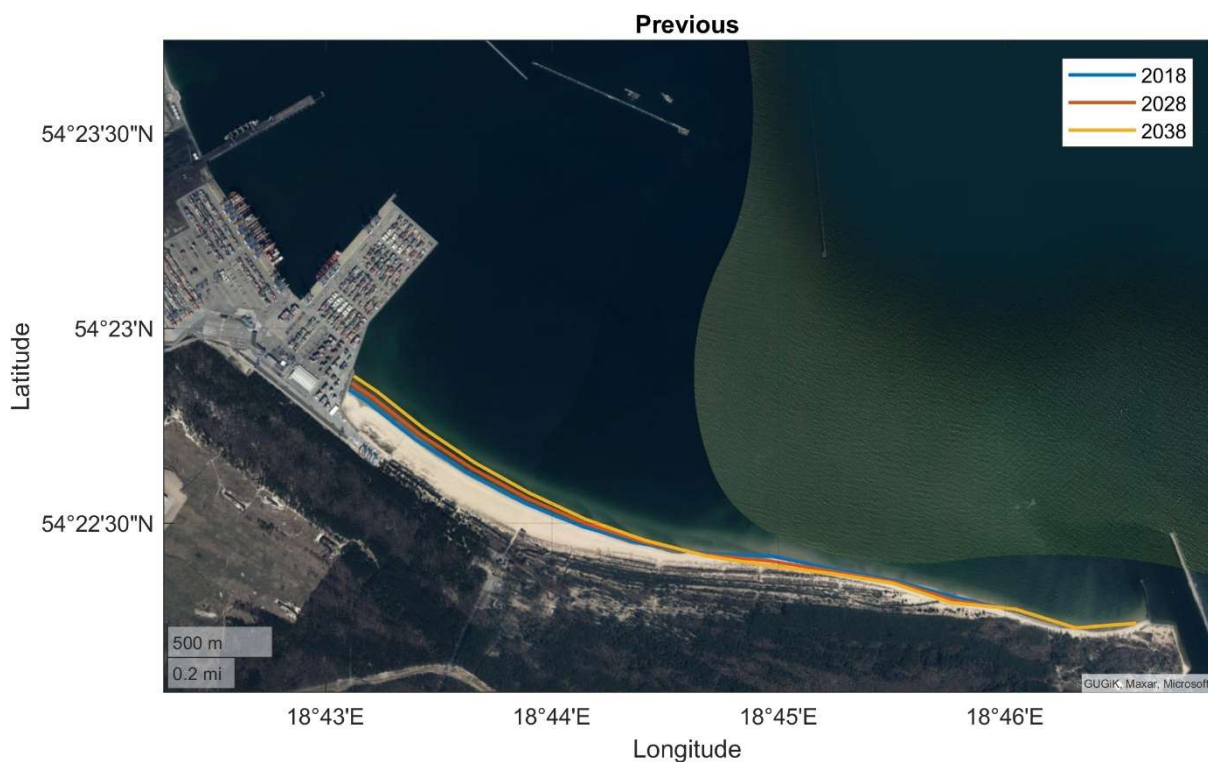
Wpływ zmian klimatu na wariant *Przyszły* przedstawiono na Rysunku 5.20. Zmniejszona energia fal, związana z przyszłymi zmianami klimatycznymi, prowadzi będzie do zmniejszenia tempa erozji i akumulacji na plaży.



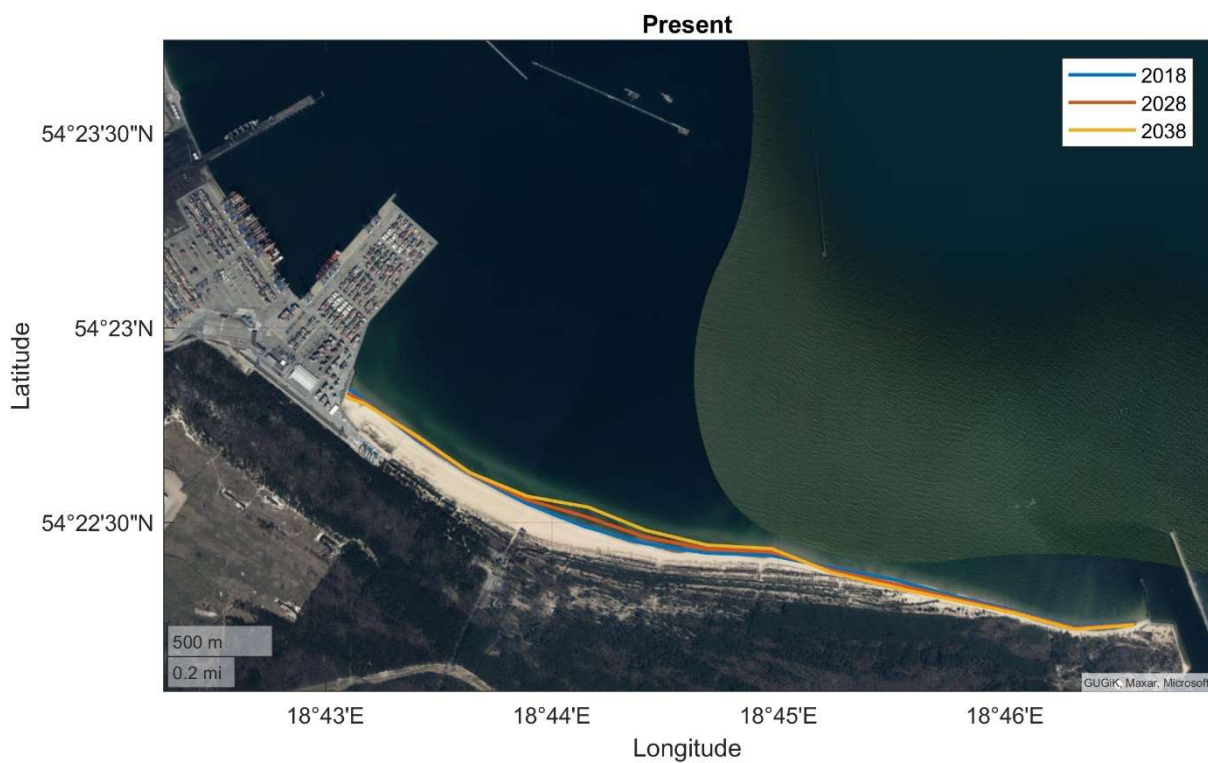
Rysunek 5.15 Dane wyjściowe z Genius pokazujące strumień netto na każdym transekcie (u góry) i anomalię strumienia na każdym transekcie (na dole).



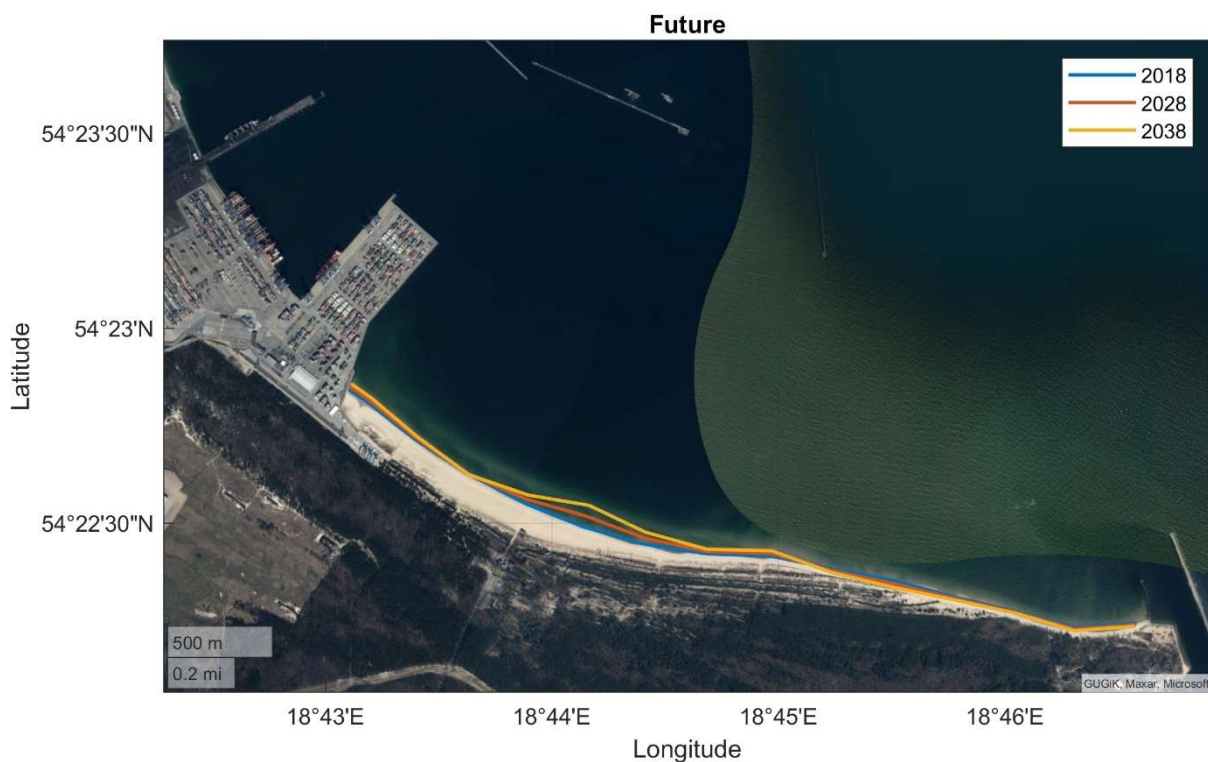
Rysunek 5.16 Związek między modelowaną anomalią przepływu osadów a zmianą szerokości plaży na podstawie analizy historycznej linii brzegowej.



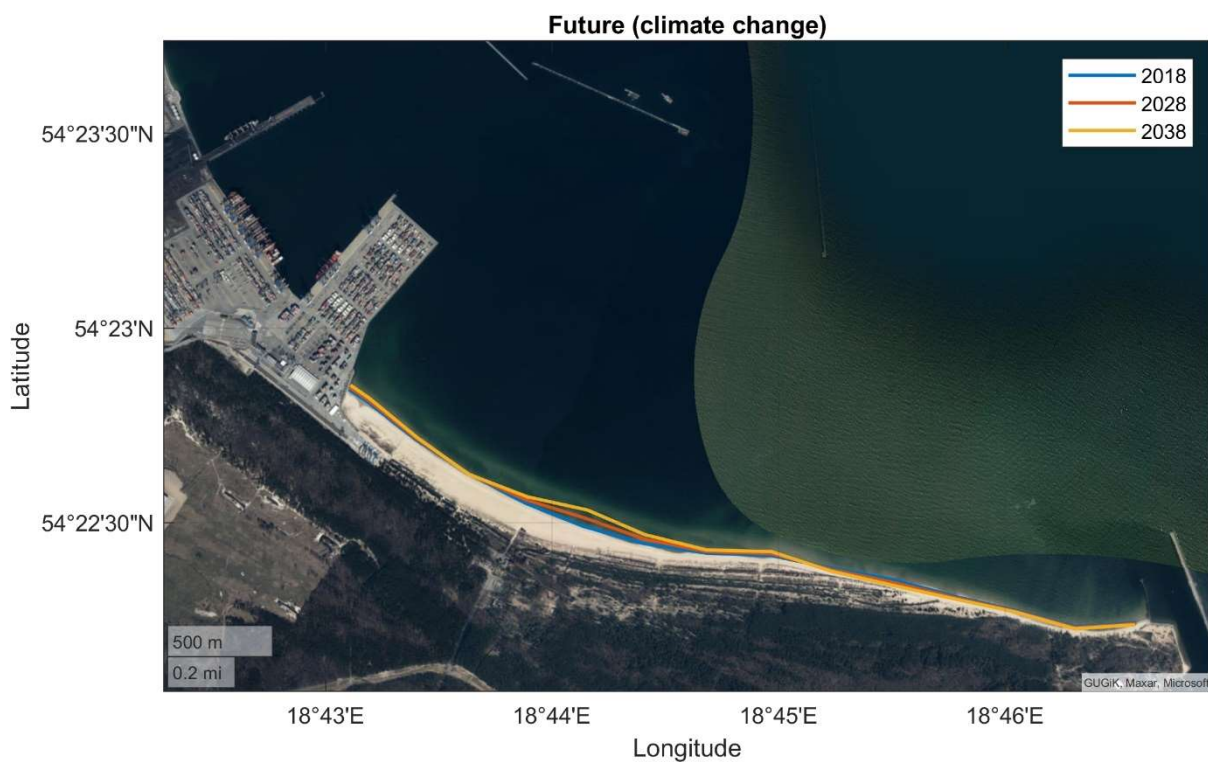
Rysunek 5.17 Przewidywana zmiana linii brzegowej dla scenariusza „Przeszłego” pokazująca ciągłą akumulację na zachodnim krańcu plaży i mniej wyraźną erozję na wschodzie.



Rysunek 5.18 Przewidywana zmiana linii brzegowej dla „obecnego” scenariusza



Rysunek 5.19 Przewidywana zmiana linii brzegowej dla „przyszłego” scenariusza



Rysunek 5.20 Przewidywana zmiana linii brzegowej dla „przyszłego” scenariusza uwzględniająca zmiany klimatu

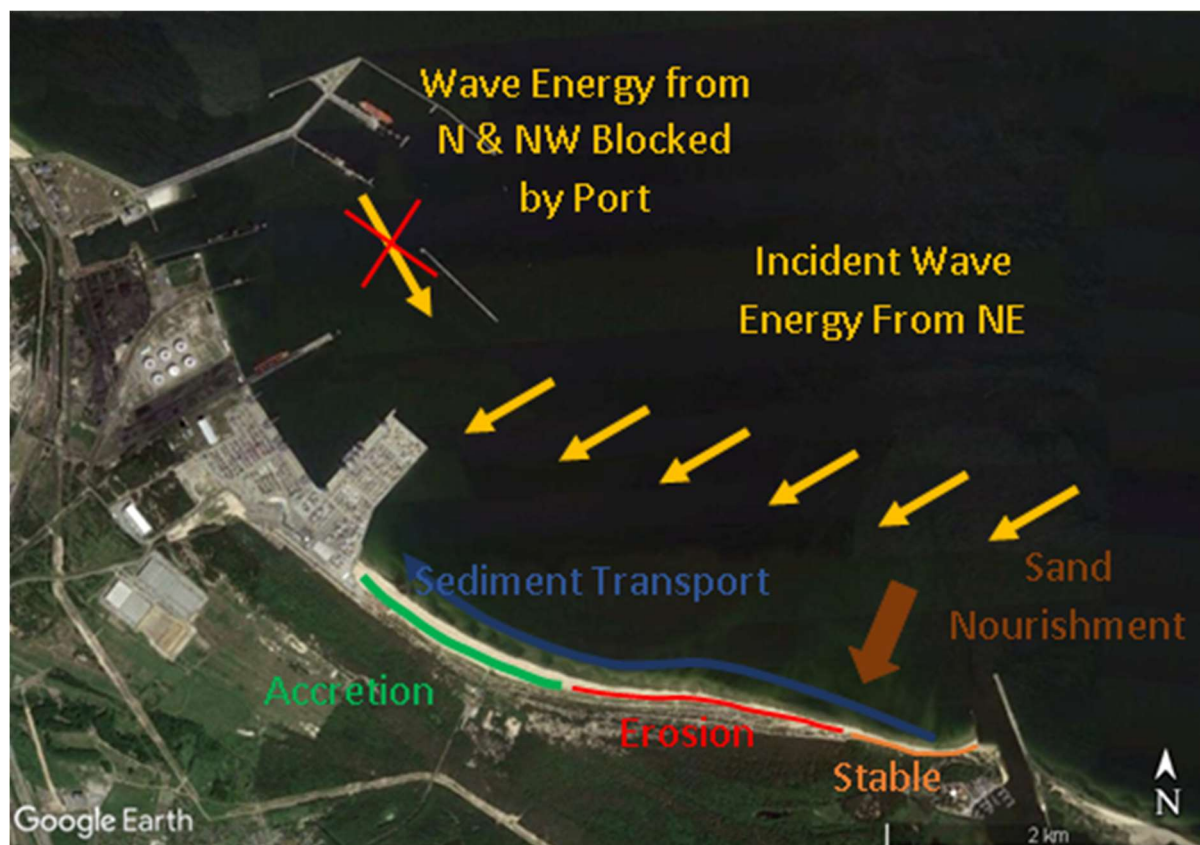
5.3 Podsumowanie

Budowa terminala T1 w 2005 roku doprowadziła do akumulacji na zachodnim krańcu plaży Stogi (przylegającym do T1) w tempie ok. 3,4 m rocznie w okresie 2008 – 2018. Tempo akumulacji maleje w miarę oddalania się na wschód od T1, zaś w części środkowej do części na wschód od środka plaży pojawia się pewna erozja (-1,2 m rocznie), natomiast wschodni kraniec plaży jest ogólnie stabilny. Tempo akumulacji na zachodnim krańcu plaży jest większe niż tempo erozji w części środkowej do części na wschód od środka plaży, co sugeruje, że na całej długości plaży mamy do czynienia z akumulacją netto. Pochodzenie tego osadu nie jest pewne, najprawdopodobniej jednak jest on nanoszony z głębi zatoki.

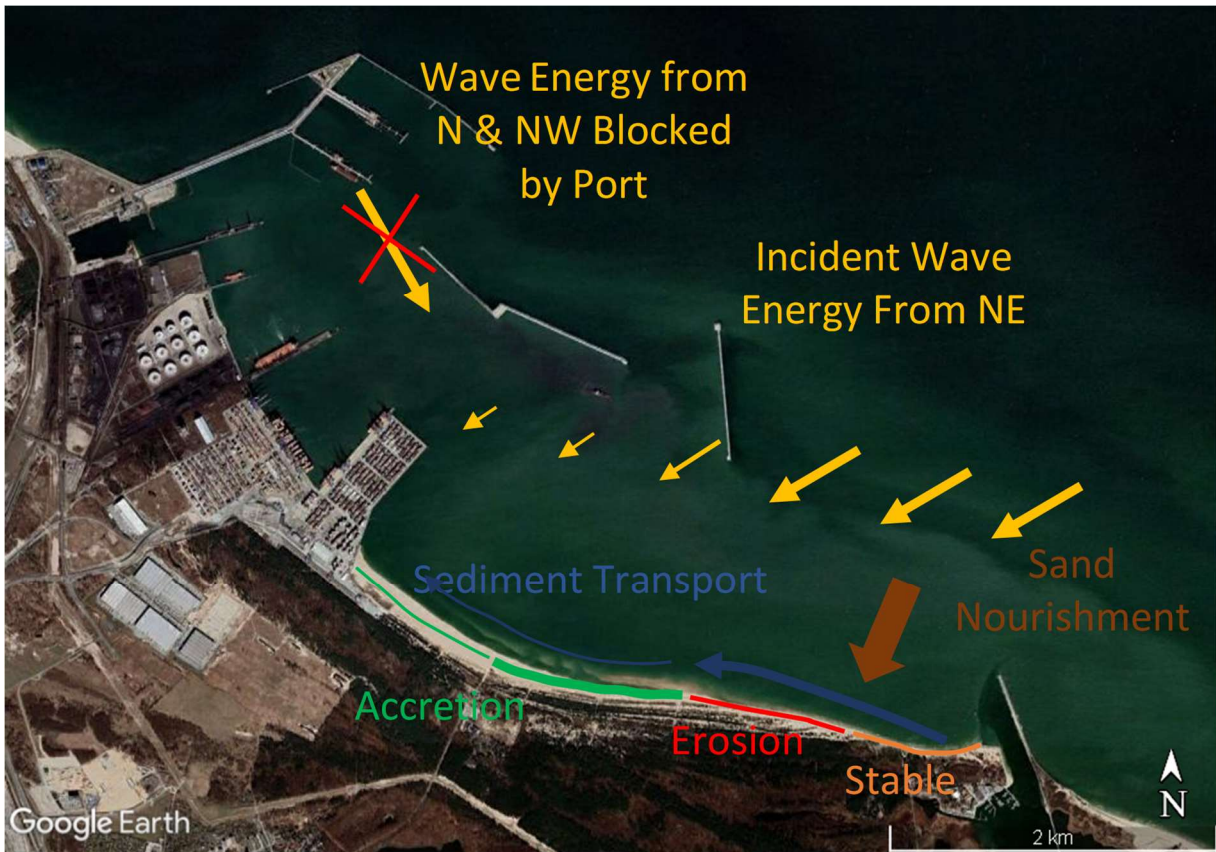
Wyniki modelowania wskazują, że falochrony zbudowane w roku 2020 prowadzić będą do zmian dynamiki transportu osadów na plaży Stogi. Spowodują one zmniejszenie akumulacji powodowanej przez falowanie na zachodnim krańcu plaży i prowadzić będą do tendencji akumulacyjnej wzdłuż centralnego obszaru plaży w tempie 2,6 m rocznie. Charakterystyka erozji i akumulacji po wschodniej stronie plaży nie ulegnie znaczącym zmianom.

Budowa terminalu T3 prowadzić będzie do dalszej akumulacji na wybrzeżu na zachodnim krańcu plaży Stogi (1,5 m rocznie), czemu sprzyjać będzie nanoszenie piasku przez wiatr. Zajęcie obszaru przez T3 nie wpłynie na charakterystykę transportu osadów na plaży na wschód od tego obszaru.

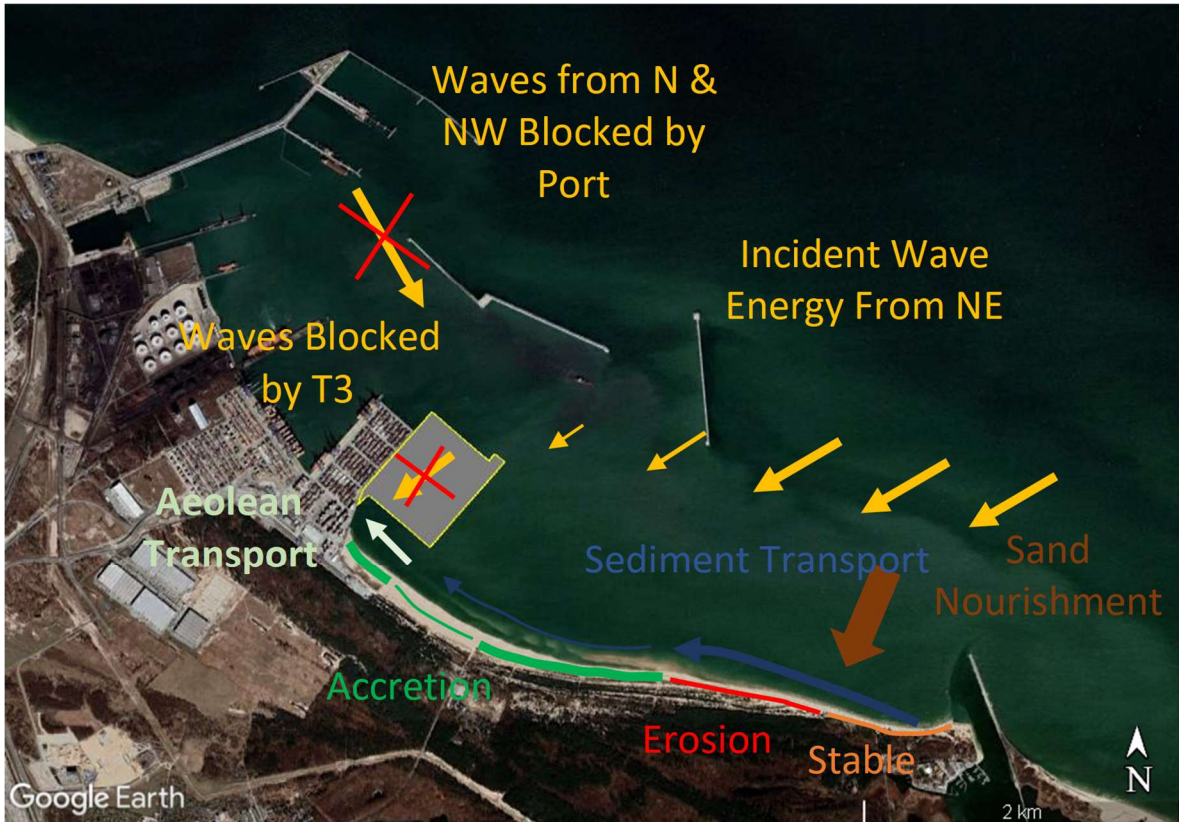
Wyniki dla trzech wariantów modelu przedstawiono schematycznie na Rysunku 5.21. do Rysunku 5.23.



Rysunek 5.21 Schematyczna ilustracja transportu osadów dla scenariusza przeszłego



Rysunek 5.22 Schematyczna ilustracja transportu osadów dla scenariusza teraźniejszego



Rysunek 5.23 Schematyczna ilustracja transportu osadów dla scenariusza przyszłego

6 Modelowanie jakości wód

Budowa terminalu T3 może prowadzić do potencjalnych problemów z jakością wody, wpływających na strefę przybrzeżną. Mogą one wynikać z zatrzymywania wody z Wisły lub stagnacji wód przybrzeżnych. W tej części przedstawiamy ocenę potencjalnych skutków budowy terminala T3 i falochronów na jakość wody na przylegających obszarach.

6.1 Metodyka

Wpływ na jakość wody przeanalizowano z użyciem metodyki modelowania numerycznego. Definicje wariantów są takie same jak te, które przyjęto do modelowania morfologii plaży (zob. punkt 5.1.).

6.1.1 Modelowanie wpływu rzecznoego

Wisła jest jedną z największych rzek wpływających do Bałtyku i znaczącym dostarczycielem pierwiastków biofilnych do środowiska morskiego (Rozdział 2). Budowa terminala T3 może prowadzić do zmian rozpraszania wypływu rzeki w pobliżu portu. Prezentowane w tym dokumencie modelowanie symuluje rozpraszanie wypływu rzeki z oraz bez terminala T3 i falochronów.

Oprogramowaniem do modelowania hydrodynamicznego, wykorzystanym w ramach tego projektu jest D-Flow Flexible Mesh (D-Flow FM) firmy Deltares, stanowiące część pakietu Delft3D FM Suite (Deltares, 2019). Ten model siatki elastycznej (Flexible Mesh - FM) oparty jest na nieustrukturyzowanych siatkach z komórkami o 3 do 6 bokach, umożliwiającymi tworzenie nieregularnych kształtów. Ten format siatki umożliwia manipulowanie kształtem i rozmiarem w oparciu o morfologię w interesujących obszarach, dzięki czemu nie ma konieczności stosowania wielu dziedzin modelu, a symulacje są bardziej dokładne i sprawniejsze.

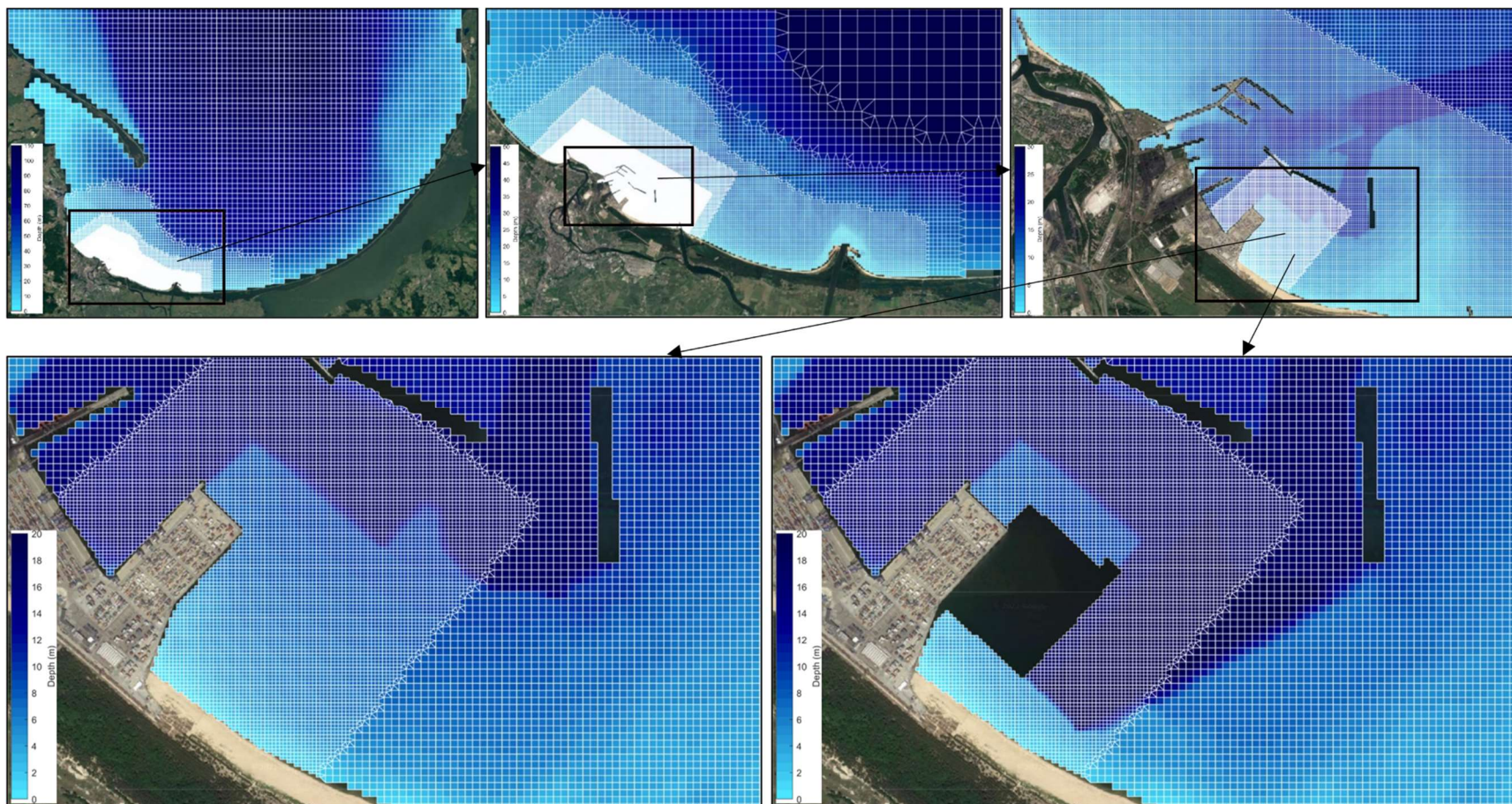
Przedstawiony model opracowany został trójwymiarowo przy użyciu pięciu warstw sigma o grubościach warstw 1%, 9%, 20%, 30% i 40%. Model oparto na wiatrach ECMWF (19,0 E, 54,5 N) i wpływie słodkiej wody z Wisły. Przepływy graniczne rzeki uzyskano z wodowskazu w Tczewie. Zasolenie tła i otwartej granicy ustalono na 35 psu, zaś zasolenie wody w rzece ustalono na 0 psu. Najcieńsze warstwy znajdują się na powierzchni wody i rejestrują one unoszący się na powierzchni wypływ rzeczny i wpływ wiatru na warstwę powierzchniową. W modelu nie uwzględniono temperatur, ponieważ gradienty wynikające z temperatur prawdopodobnie nie są ważnym czynnikiem wpływającym na prądy w pobliżu linii brzegowej. Pominięto również przemieszczenia powodowane pływami, ponieważ zakresy pływów w Bałtyku są pomijalne. Model przeprowadzono dla okresu 6 miesięcy od 1 stycznia do 1 sierpnia 2021 r., uwzględniając okresy umiarkowanego i dużego wypływu z Wisły.

Wyniki dla modelu ze scenariusza *Przyszłego* przeskalowano w celu uwzględnienia wynikającego ze zmian klimatu zmniejszenia wypływu z rzek do południowo-wschodniej części Bałtyku, sięgającego 18,25% (do roku 2081 lub 2100) (średnia RCP 2,6, 4,5, 6,0 i 8,5), jak opisano w zarysie w punkcie 3.4.3. (Šarauskienė i in., 2017). Wyniki z modelu przedstawiono w punkcie 6.2.1.

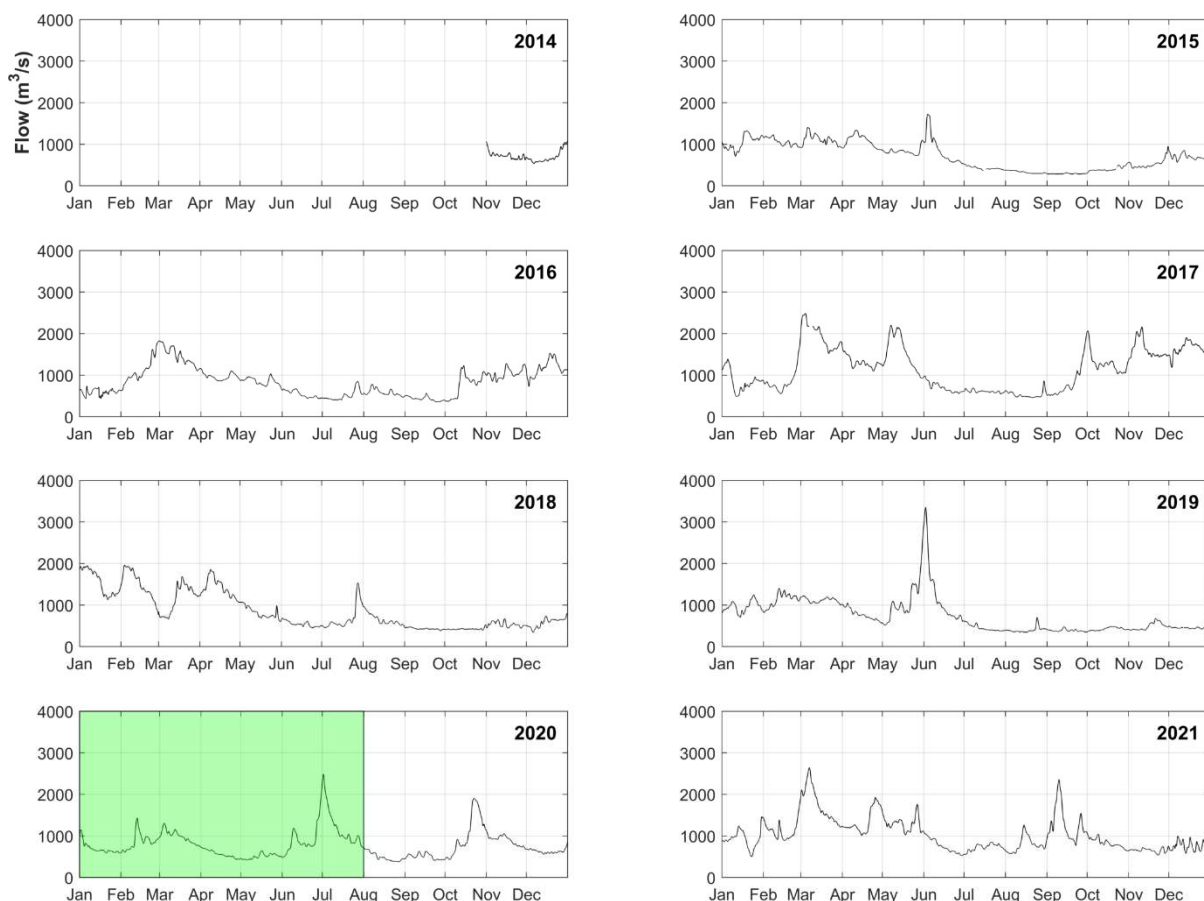
6.1.2 Wskaźnik ruchu wód

Potencjalną przyczyną pogorszenia jakości wody jest stagnacja obszaru zacienienia przez T3. Zajęcie obszaru przez T3 może prowadzić do zmniejszenia prędkości prądów w tym obszarze, co powodowałoby zmniejszenie tempa przepłukiwania. Oceny tej dokonano poprzez śledzenie znacznika konserwatywnego wprowadzonego w tym obszarze w ramach przeprowadzenia modelu dla wariantów *Obecnego* i *Przyszłego*. Model przeprowadzono przy użyciu 8 wariantów dla 4 kardynalnych (N, E, S, W) i 4 interkardynalnych (NE, SE, SW, NW) kierunków wiatru. Reprezentatywne prędkości wiatru oszacowano poprzez segmentację długookresowego zapisu wiatru i obliczenie średniej prędkości wiatru dla poszczególnych wariantów. Do zainicjowania modelu hydrodynamicznego użyto 2-dniowego okresu

rozbiegowego. Po nim wprowadzono do obszaru zacienienia przez T3 znacznik konserwatywny i pozostawiono go do rozproszenia w warunkach hydrodynamicznych. Jakość znacznika pozostającego w osłoniętym obszarze śledzono w ciągu tygodniowego przebiegu modelu dla poszczególnych warunków wiatrowych z zajęciem obszaru przez T3 i powiązanymi z nim pracami pogłębiarskimi i bez tych czynników. Wykresy porównawcze w sposób orientacyjny wyrażają liczbowo zmniejszenie tempa przepływania. Wyniki zastosowania modelu przedstawiono w punkcie 6.2.2.



Rysunek 6.1 Siatka batymetryczna użyta do modelu hydrodynamicznego, z powiększeniem do T1 oraz T3



Rysunek 6.2 Dane o przepływie rzeki z wodowskazu Tczew za lata 2014-2021. Zielony prostokąt oznacza okres symulowany przez model hydrodynamiczny.

6.1.3 Ograniczenia

Model hydrodynamiczny nie oblicza pól prądów wynikających z ogólnych gradientów temperatury i zasolenia. Choć zasolenie i temperatura są ważnymi czynnikami wpływającymi na prądy w Bałtyku, to najsilniejsze prądy w strefie przybrzeżnej prawdopodobnie wywoływane będą przez działanie wiatru.

Model hydrodynamiczny nie obejmuje prądów napędzanych przez fale. Wstępne badania przeprowadzone z zastosowaniem modelu Coupled Wave Model wykazały, że nie stanowią one silnych czynników napędzających prądy w miejscach innych niż przy samym brzegu.

Poziom morza z otwartą granicą ustalono na stałym poziomie 0 m (MSL), nie uwzględniając zmienności poziomu morza. Choć w Zatoce Gdańskiej pojawia się pewna zmienność poziomu morza, to mało prawdopodobne jest, aby w znaczącej mierze napędzała ona prądy, bowiem amplitudy pływów na tym obszarze są pomijalne.

6.2 Wyniki modelowania jakości wód

6.2.1 Modelowanie wpływu rzecznoego

Przebieg modelu hydrodynamicznego symulował okres umiarkowanego i dużego przepływu rzecznoego z Wisły w celu określenia śladu rozptywu słodkiej wody w środowisku morskim. Zasolenie według modelu zostało przeliczone na rozcieńczenie według następującego wzoru:

$$d = \frac{35}{35 - s}$$

Gdzie s oznacza zasolenie, a d rozcieńczenie.

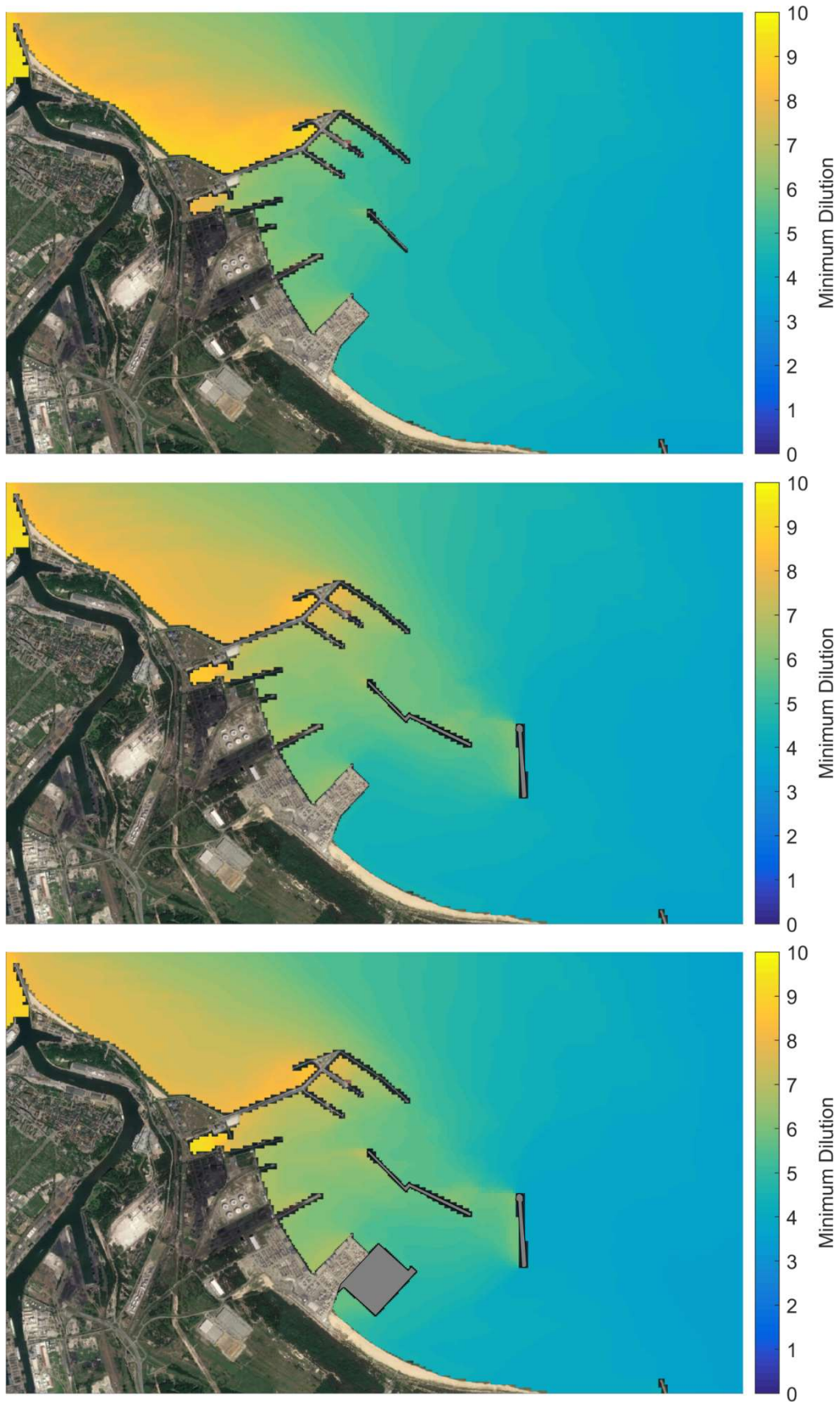
Minimalne wartości i mediany rozcieńczenia dla wariantów Przeszłego, Obecnego i Przyszłego przedstawiono odpowiednio na Rysunku 6.3. i 6.4. i w obszarze portu dla scenariusza (od góry) przeszłego, teraźniejszego i przyszłego. Wyniki wskazują, że rozptyw rzeczno ma wpływ na obszar portu z minimalnymi wartościami rozcieńczenia w modelu przeprowadzonym w wariantach Przeszłym wzrastającymi od 4- do 7-krotnie. Dodatkowe falochrony w wariantach Obecnym powodują ogólne zmniejszenie przenikania wody rzecznoej do wewnętrznego obszaru portu. W wariantach Przeszłym terminal T3 zmniejsza przenikanie w obszarze zacienienia T3, z minimalnymi wartościami rozcieńczenia wzrastającymi od 4-krotnie w wariantach Obecnym do 6-krotnie w wariantach Przeszłym. Mediana rozcieńczenia w obszarze zacienienia przez T3 wynosi około 20-krotność dla wszystkich wariantów. Ogólnie rzecz ujmując, nie pojawia się znacząca różnica w medianie rozcieńczenia pomiędzy tymi trzema wariantami. Biorąc pod uwagę zmniejszony wpływ rzeczno w wyniku przewidywanych zmian klimatu (2081-2100), rozcieńczenie w całej dziedzinie modelu jest ogólnie wyższe (Rysunek 6.5.). W obszarze zacienienia terminalem T3 mediana rozcieńczenia wzrasta do 27-krotności.

Szereg czasowy wyników modelu powierzchniowego uzyskanych dla zachodniego krańca plaży Stogi wykazuje zasolenie w trakcie całego przebiegu modelu (Rysunek 6.6.) w wariantach Przeszłym wartości zasolenia są ogólnie wyższe, bardziej wygładzone i wykazują mniejszą zmienność krótkoterminową niż w wariantach Przeszłym i Obecnym.

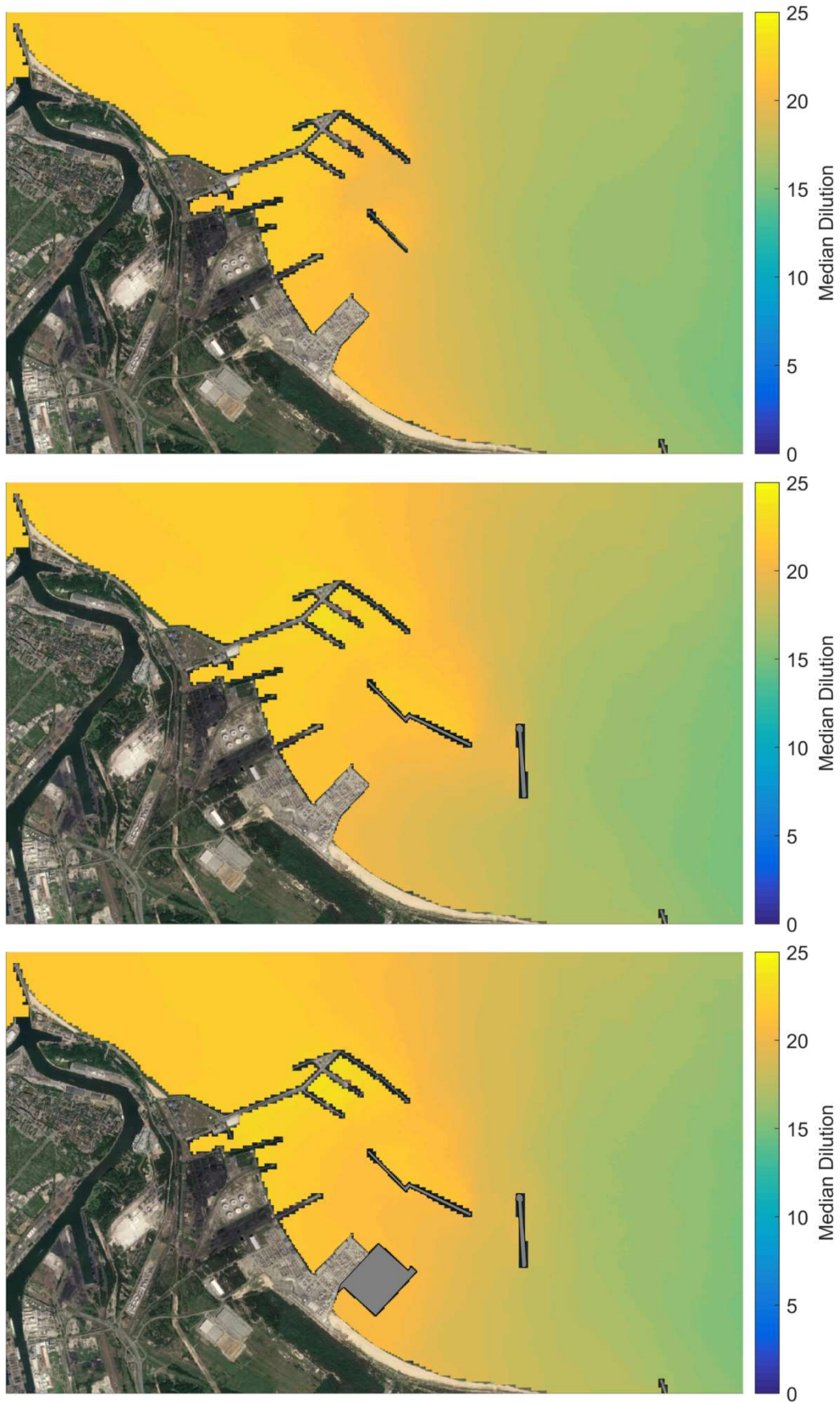
Prędkości prądów uśrednione rezydualną (uśrednioną wektorowo) głębokością przedstawiono w trzech wariantach na Rysunku 6.7. Wyniki wskazują na nieznaczne zmniejszenie prędkości prądów na zachodnim krańcu plaży Stogi, co można przewidywać że prowadzi do zmniejszonego napływu wody z rzeki do tego obszaru.

Prądy wytwarzane przez wypływ słodkiej wody z ujścia Wisły zasadniczo ograniczają się do samego ujścia rzeki i nie mają wpływu na obszar portu. Na Rysunku 6.8. przedstawiono uśrednione prądy powierzchniowe i głębokościowe w szczycie przepływu, co potwierdza powyższą tezę.

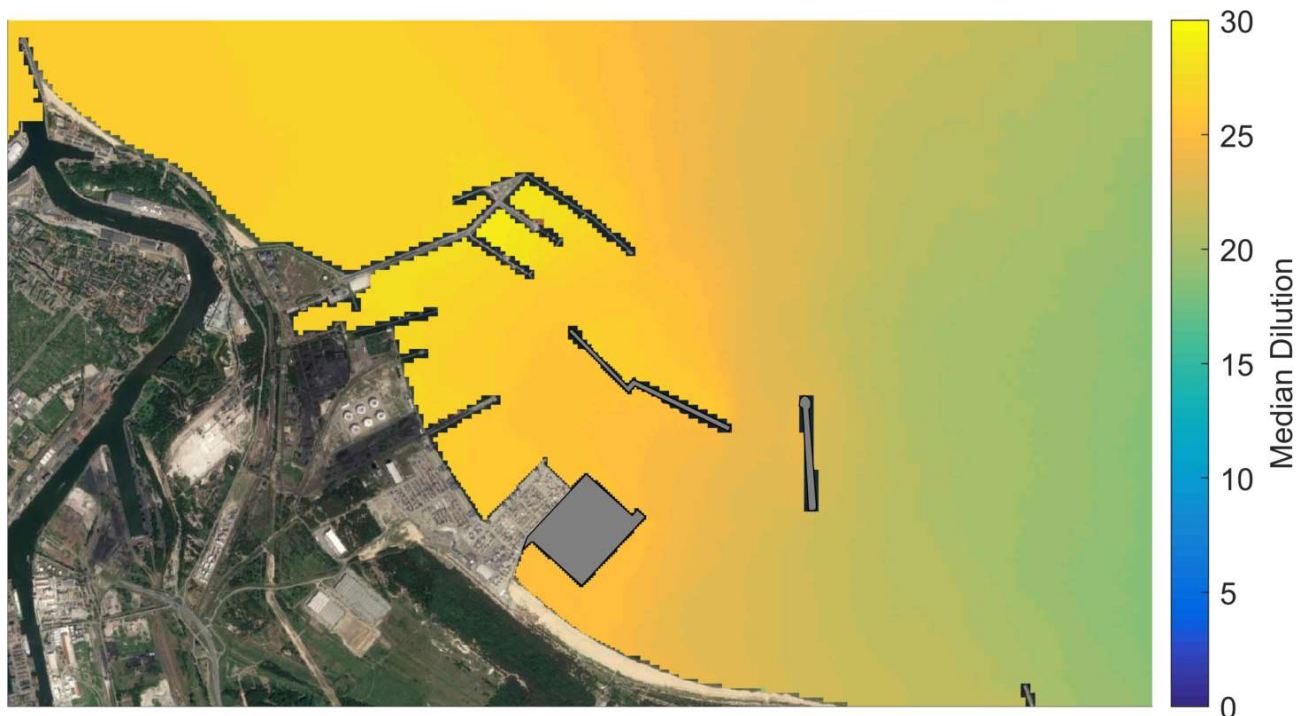
Ogólnie rzecz biorąc, wyniki wskazują, że budowa terminalu T3 zmniejszy przenikanie rozptywu Wisły na zachodnim krańcu plaży Stogi. Woda rzeczno prawdopodobnie będzie jednym z największych czynników wnoszących obciążenie bakteryjne do środowiska morskiego. Mało prawdopodobne jest, aby budowa T3 prowadziła do zwiększenia stężeń nanoszonych przez Wisłę bakterii lub zanieczyszczeń na zachodnim krańcu plaży Stogi.



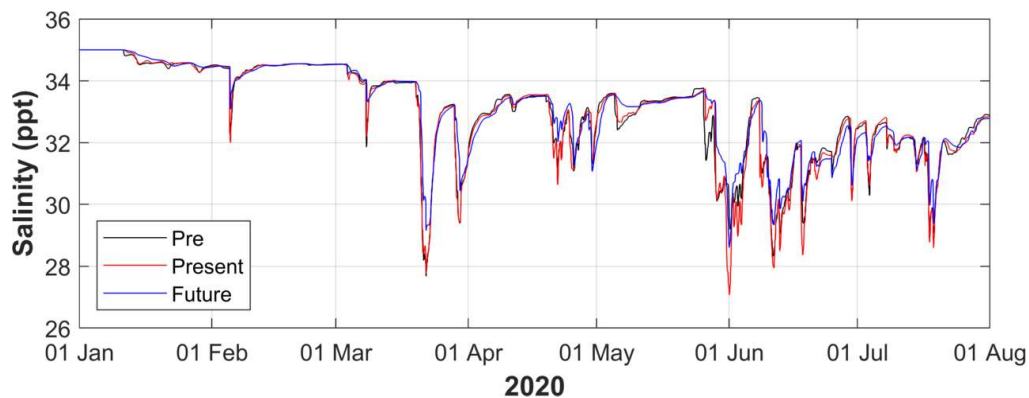
Rysunek 6.3 Minimalne rozcieńczenie warstwy wierzchniej w obszarze portu dla scenariusza (od góry) przeszłego, teraźniejszego i przyszłego



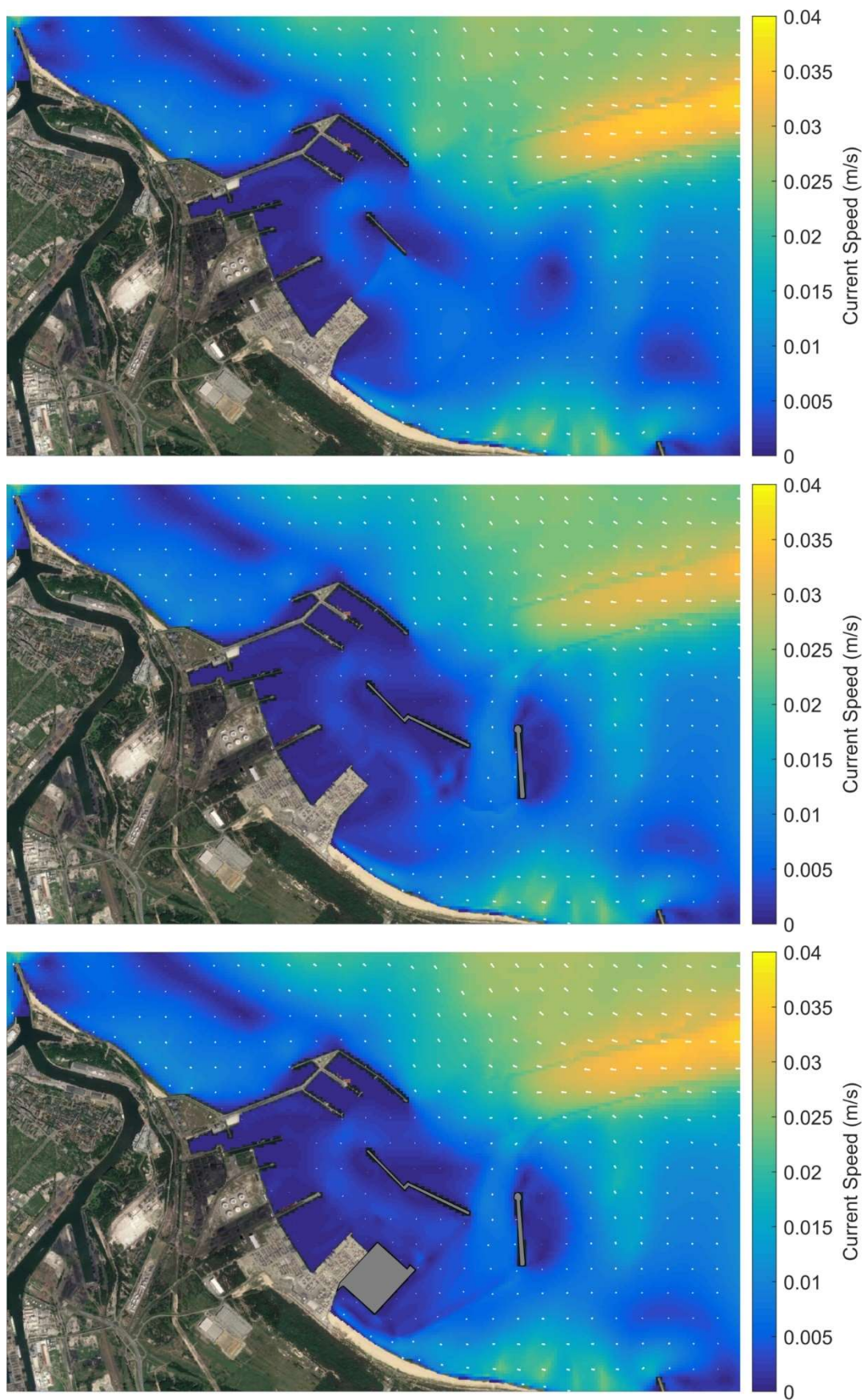
Rysunek 6.4 Mediana rozcieńczenia w obszarze portu dla scenariusza (od góry) przeszłego, teraźniejszego i przyszłego



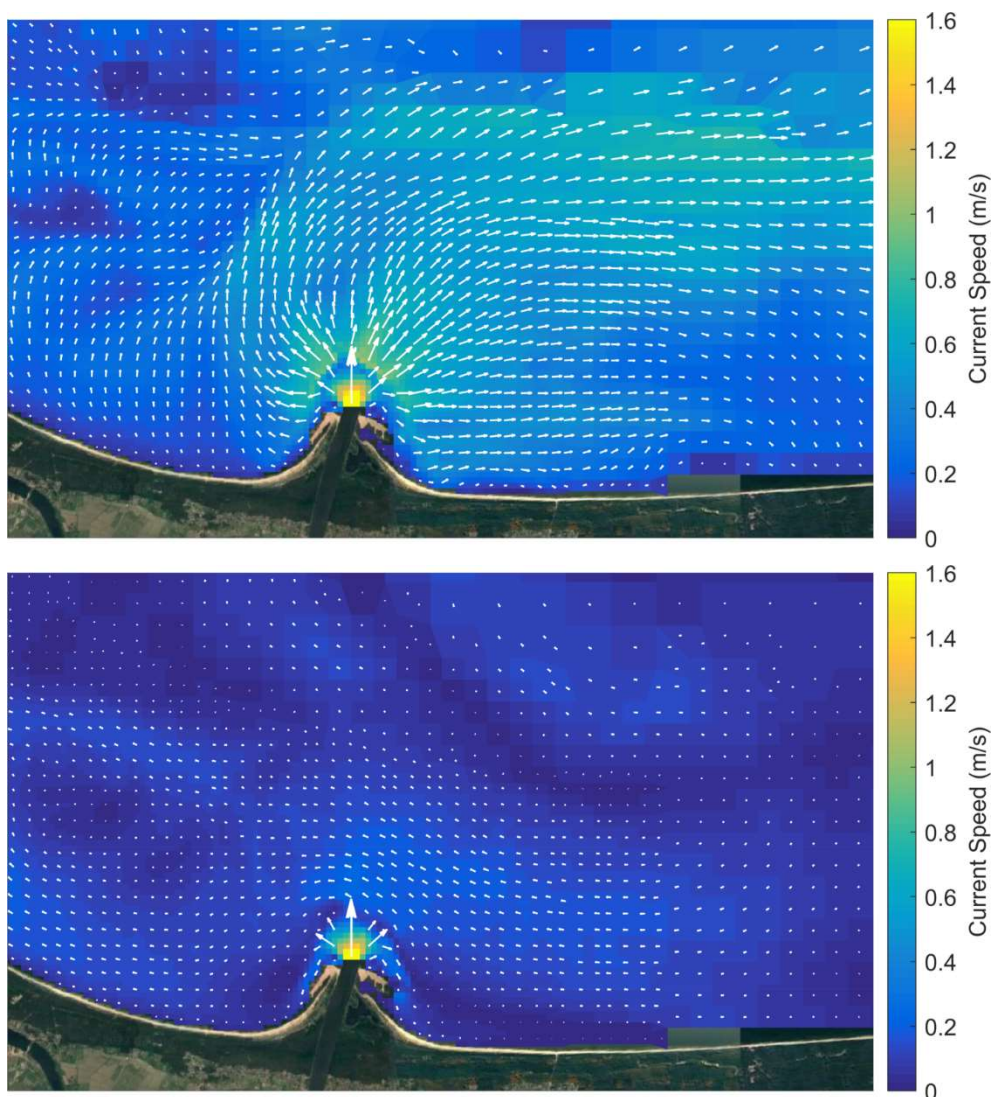
Rysunek 6.5 Mediana rozcieńczenia w obszarze portu dla scenariusza przeszłego przeskalowana dla przewidywanego zmniejszenia przepływu rzeki o 18.25% ze względu na skutki zmian klimatu w latach 2018-2100



Rysunek 6.6 Model zasolenia w obszarze zamkniętym między terminalem T3 a plażą Stogi.



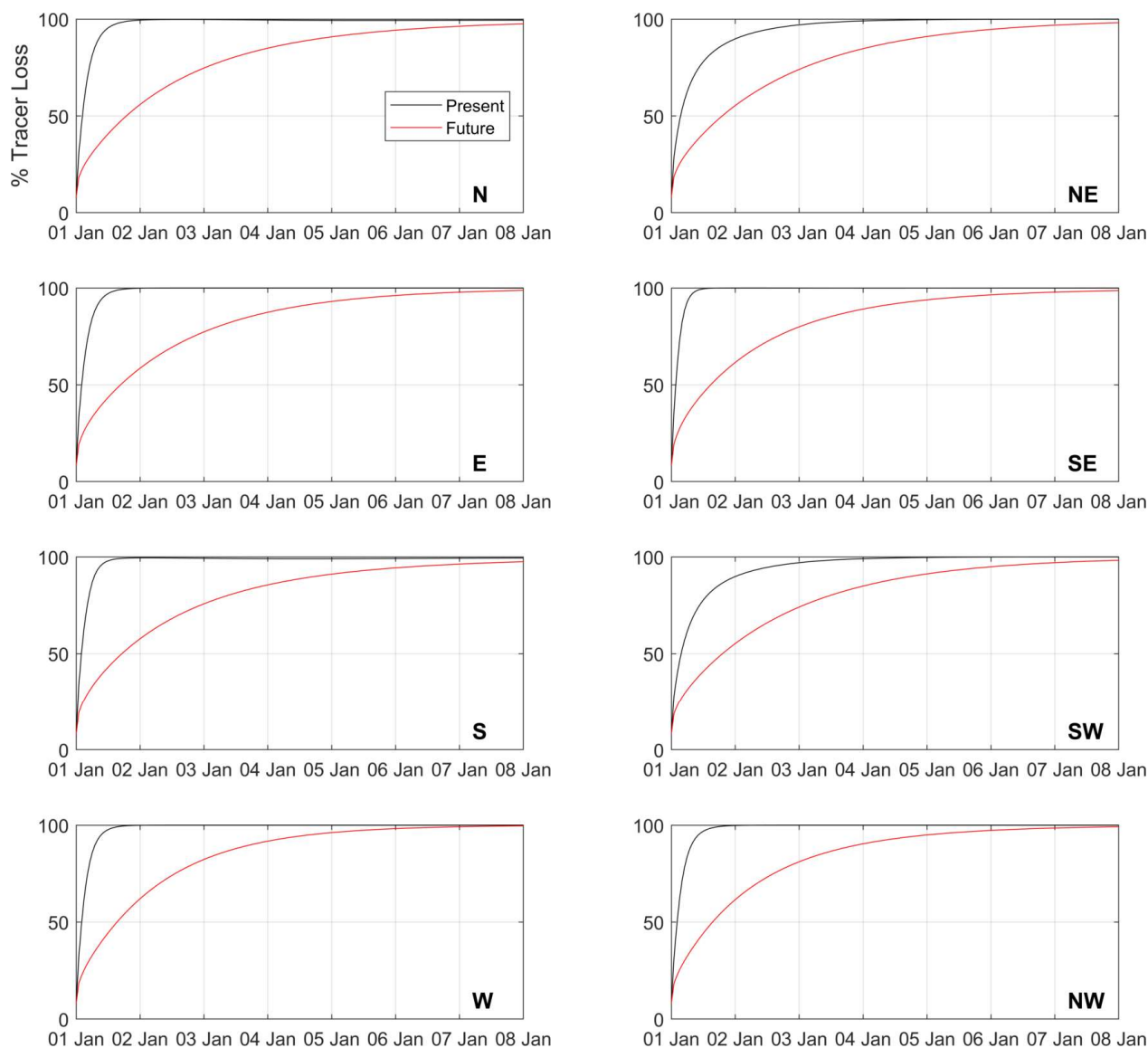
Rysunek 6.7 Uśredniona wartość rezydualna głębokości (uśrednione wektorowo) i bieżące prędkości dla scenariusza przeszłego (górną), teraźniejszego (środek) i przyszłego (dół).



Rysunek 6.8 Uśrednione prądy powierzchniowe (górne) i głębokościowe (dolne) u ujścia Wisły podczas szczytowego przepływu (2490 m³/s) w dniu 1 lipca 2020 r. 17:00.

6.2.2 Przepłukiwanie

Dla celów tego projektu przepłukiwanie definiuje się jako tempo w jakim znacznik konserwatywny zostaje zastąpiony otaczającą wodą w obszarze zacienienia przez T3. Szereg czasowy przepłukiwania na przestrzeni przebiegów modelu w obszarze zacienienia przez T3 przedstawiono na skali czasu na Rysunku 6.9., z terminalem T3 i bez niego. Na wykresach tych ilość pozostałego znacznika przedstawiono jako procentową wartość wprowadzonego obciążenia znacznikiem. Czas upływający do 80% i 95% przepłukiwania w poszczególnych wariantach przedstawiono w Tabeli 6.1. We wszystkich przypadkach przepłukiwanie najszybciej następuje po wprowadzeniu znacznika i wzrasta tangencjalnie do 100%. We wszystkich przypadkach przepłukiwanie następuje szybciej w wariantcie *Obecnym* niż w wariantcie *Przyszłym*. Średni czas przepłukiwania wynosi 0,31 dnia w wariantcie *Obecnym* do 2,25 dni w wariantcie *Przyszłym*. Średni czas przepłukiwania do 95% wynosi od 0,70 dnia w wariantcie *Obecnym* do 4,68 dni w wariantcie *Przyszłym*. W wariantcie *Przyszłym* najwydajniejsze przepłukiwanie następuje przy wiatrach SE, a najmniej wydajne przy wiatrach NE i SW. Prędkości prądów w stanie ustalonym i na uśrednionej głębokości przedstawiono dla każdego wariantu w 0. Ogólnie rzecz biorąc, po postawieniu terminalu T3, przepłukiwanie w osłoniętym obszarze pomiędzy terminalem T3 a plażą Stogi we wszystkich wariantach przepłukiwanie zmniejsza się średnio 7-krotnie.



Rysunek 6.9 Przepływ wód dla znacznika konserwatywnego w obszarze półzamkniętym T3 po i przed rozbudową T3

Tabela 6.1 Czas przepływania dla obszaru półzamkniętego T3 przed oraz po rozbudowie T3

Kierunek wiatru	80% przepływanie		95% przepływanie	
	teraźniejszość	przyszłość	teraźniejszość	przyszłość
N	0.25	2.46	0.50	5.33
NE	0.58	2.50	1.58	5.13
E	0.25	2.25	0.42	4.58
SE	0.17	2.04	0.29	4.38
S	0.21	2.38	0.38	5.29
SW	0.58	2.50	1.58	5.04
W	0.21	1.88	0.42	3.67
NW	0.25	1.96	0.46	4.04
średnia	0.31	2.25	0.70	4.68

6.3 Podsumowanie

Wyniki modelowania wskazują, że rozptyw słodkiej wody z Wisły rozprzestrzenia się rozlegle w południowej części Zatoki Gdańskiej i sięga Portu Gdańskiego szczególnie w warunkach wysokiego przepływu i przy wiatrach od wschodu. Napływ wody rzecznej do obszaru morskiego pomiędzy terminalem T3 i plażą Stogi ulega po budowie terminalu T3 zmniejszeniu w związku z wpływem terminalu na przebieg prądów. Woda z rzeki prawdopodobnie będzie jednym z najważniejszych źródeł obciążeń bakteryjnych w środowisku morskim. Mało prawdopodobne jest, aby budowa terminalu T3 spowodowała zwiększone stężenia bakterii lub zanieczyszczeń wprowadzanych z rzeki na zachodnim krańcu plaży Stogi.

Modelowanie wskazuje również, że na tym samym obszarze, z zastrzeżeniem pewnej zmienności obecnej charakterystyki w różnych warunkach wiatrowych, przepływanie na tym obszarze będzie po postawieniu terminalu T3 średnio 7-krotnie wolniejsze. O ile mniej prawdopodobne jest przedostawanie się wody z Wisły do obszaru pomiędzy terminalem T3 a plażą T3, to kiedy już naniesione wodą zanieczyszczenia się tam dostaną, średnio 7 razy dłużej będzie trwało ich usunięcie przez czynniki naturalne. W związku z tym istnieje duże prawdopodobieństwo, że na obszarze tym gromadzić się będą śmieci i odpady.

7 Spis źródeł

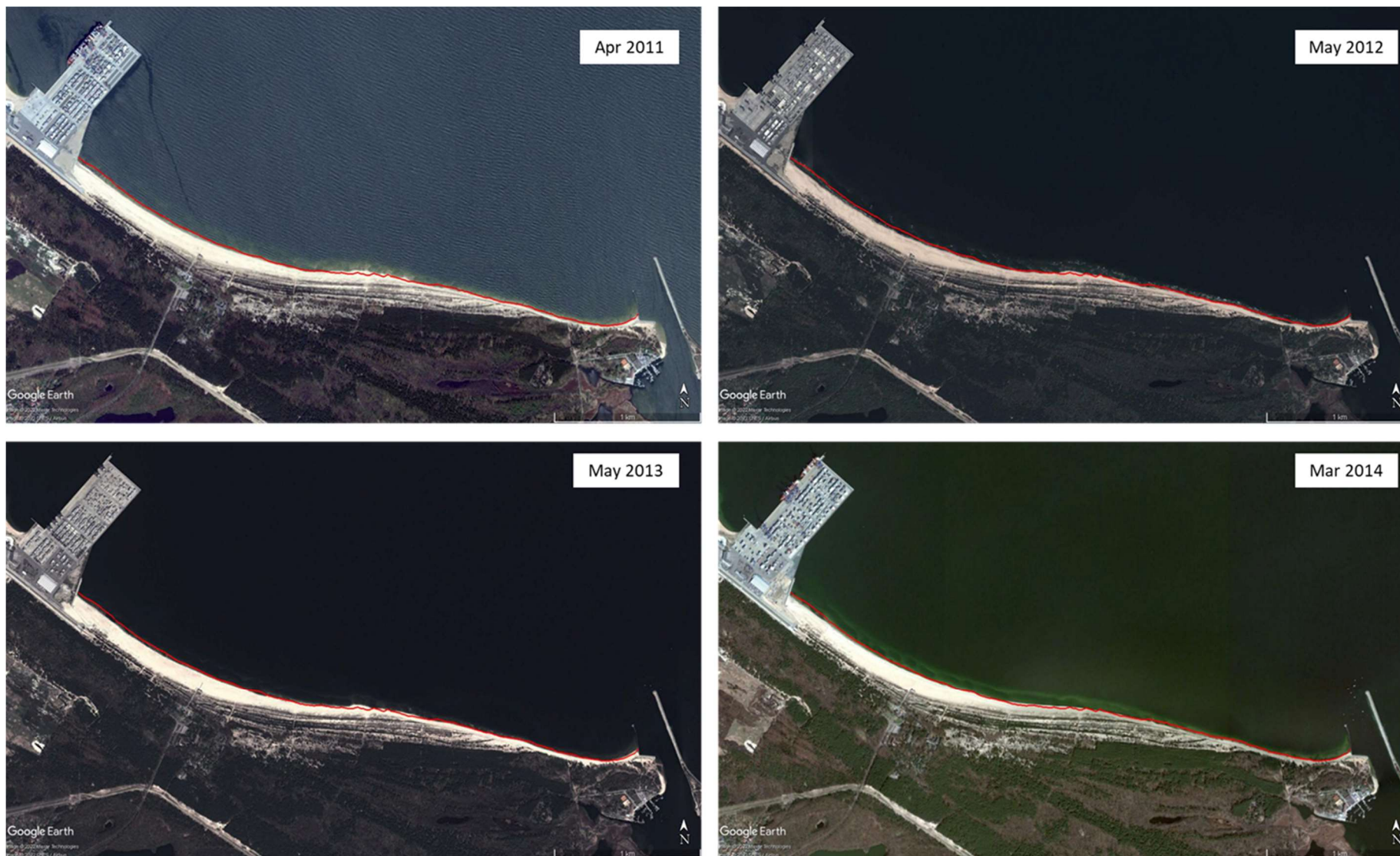
- Andruliewicz, E., & Witek, Z. (2002). Anthropogenic pressure and environmental effects on the Gulf of Gdańsk: recent management efforts. In *Baltic coastal ecosystems* (pp. 119-139). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Atkins (2014) Deepwater Container Terminal, Gdańsk, Poland Environmental and Social Impact Assessment (ESIA)
- Bonaduce, A., Staneva, J., Behrens, A., Bidlot, J. R., & Wilcke, R. A. I. (2019). Wave climate change in the North Sea and Baltic Sea. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(6), 166.
- Damrat, M., Zaborska, A., & Zajączkowski, M. (2013). Sedimentation from suspension and sediment accumulation rate in the River Vistula prodelta, Gulf of Gdańsk (Baltic Sea). *Oceanologia*, 55(4), 937-950.
- ED, (2019), Dredging conditions in ED for T3, RDOŚ-Gd WOO.420.125.2018.AT.11
- Hanson, H. and Kraus, N.C., 1989. GENESIS-Generalized model for simulating shoreline change. Vol. 1: Reference Manual and Users Guide. Tech. Rep. CERC-89-19, Coastal Engineering Research Center, U.S. Army Corps of Engineers, 247pp.
- HELCOM (2021a), Input of nutrients by the seven biggest rivers in the Baltic Sea region 1995-2017. *Baltic Sea Environment Proceedings No.178*.
- HELCOM, (2021b) Fact Sheet. *Baltic Sea Environment Proceedings n°180. HELCOM/Baltic Earth 2021*
- HELCOM (2018), HELCOM Thematic assessment of eutrophication 2011-2016. *Baltic Sea Environment Proceedings No. 156*.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R. J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., and Thépaut, J.-N.: (2020), The ERA5 global reanalysis, *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 146, 1999–2049, <https://doi.org/10.1002/qj.3803>, 2020.
- Holthuijsen, L.H., N. Booij, A.T.M.M. Kieftenburg, R.C. Ris., A.J. van der Westhuysen, and M. Zijlema (2004) SWAN Cycle III, Version 40.41, User manual.
- Inspectorate of Environmental Protection (2020). Evaluation of the condition of the Environment. Polish Marine Areas of the Baltic Sea Based on Monitoring Data from 2020.
- Jakobsson, M., Stranne, C., O'Regan, M., Greenwood, S. L., Gustafsson, B., Humborg, C., & Weidner, E. (2019). Bathymetric properties of the Baltic Sea. *Ocean Science*, 15(4), 905-924.
- Kowalewski, M. (2001). An operational hydrodynamic model of the Gulf of Gdańsk. Research works based on the ICM's UMPL numerical prediction system results.
- Majewski, W. (2018). Vistula river, its characteristics and management. *Int. J. Hydrol*, 2(4), 493-496.
- Pruszek, Z., Van Ninh, P., Szmytkiewicz, M., Hung, N. M., & Ostrowski, R. (2005). Hydrology and morphology of two river mouth regions (temperate Vistula Delta and subtropical Red River Delta). *Oceanologia*, 47(3).
- Royal HaskoningDHV (2020). Design Criteria Report. PC1063-RHD-ZZ-ZZ-RP-CO-001, S4/P01, 27 July 2020.
- Šarauskienė, D.; Akstinas, V.; Kriauciūnienė, J.; Jakimavičius, D.; Bukantis, A.; Kažys, J.; Povilaitis, A.; Ložys, L.; Kesminas, V.; Virbickas, T.; Pliuraitė, V. (2017). Projection of Lithuanian river runoff, temperature and their extremes under climate change. *Hydrology Research*, nh2017007–. doi:10.2166/nh.2017.007
- Sarker, Z., (2020), DCT Gdańsk – T3 Terminal Project Wave Modelling Studies, prepared by Royal HaskoningDHV for DCT Gdańsk.

- Weisse, R., Dailidienė, I., Hünicke, B., Kahma, K., Madsen, K., Omstedt, A., ... & Zorita, E. (2021). Sea level dynamics and coastal erosion in the Baltic Sea region. *Earth System Dynamics*, 12(3), 871-898.
- Witek, Z., Humborg, C., Savchuk, O., Grelowski, A., & Łysiak-Pastuszek, E. (2003). Nitrogen and phosphorus budgets of the Gulf of Gdańsk (Baltic Sea). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 57(1-2), 239-248.
- Zaborska, A., Siedlewicz, G., Szymczycha, B., Dzierzbicka-Głowacka, L., & Pazdro, K. (2019). Legacy and emerging pollutants in the Gulf of Gdańsk (southern Baltic Sea)—loads and distribution revisited. *Marine pollution bulletin*, 139, 238-255.

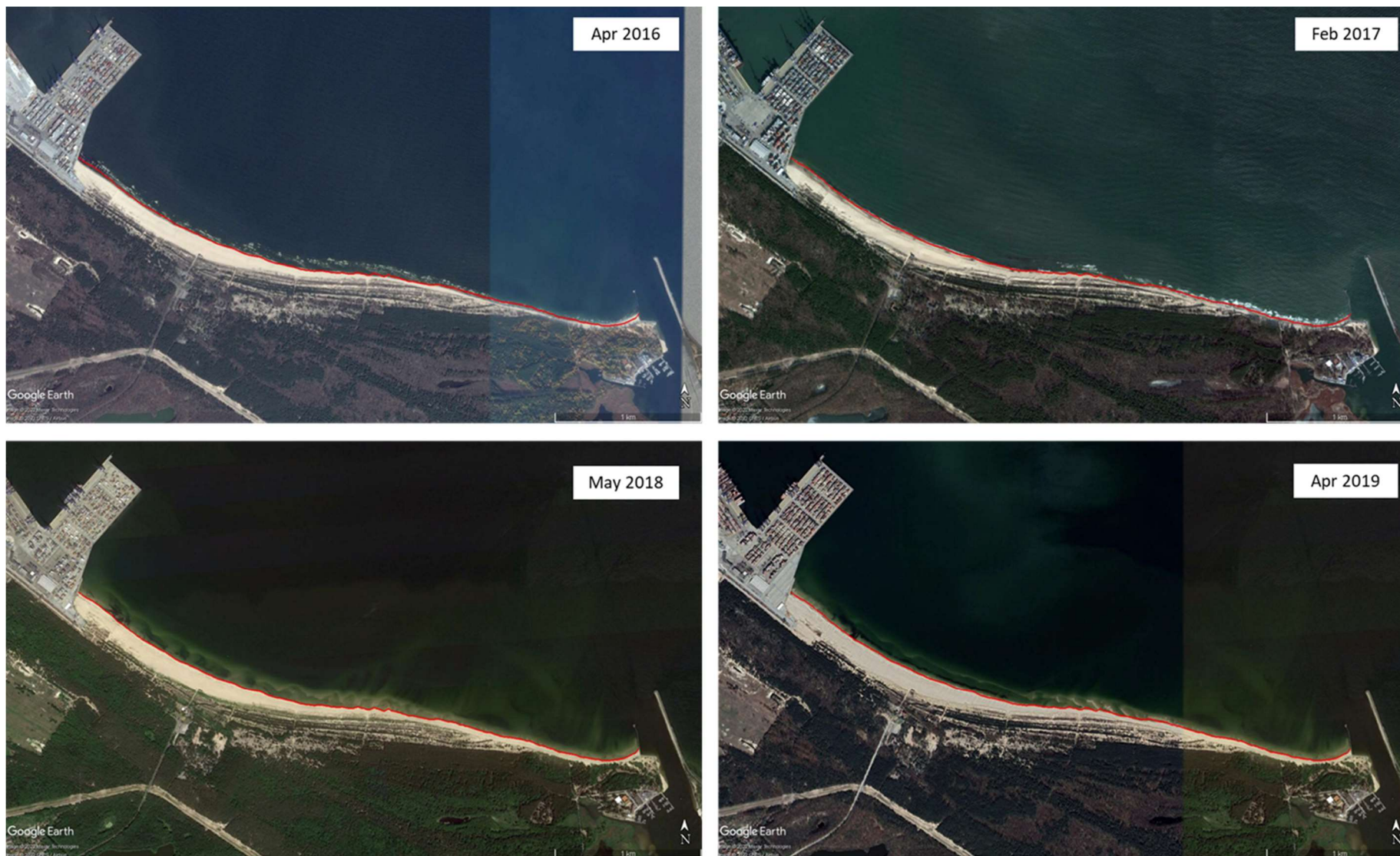
Załącznik A Dodatkowe zdjęcia satelitarne



Rysunek 7.1 Przewidywana zmiana linii brzegowej plaży Stogi. Czerwona linia wskazuje linię brzegową w maju 2018 roku dla porównania. Źródło: Google Earth.

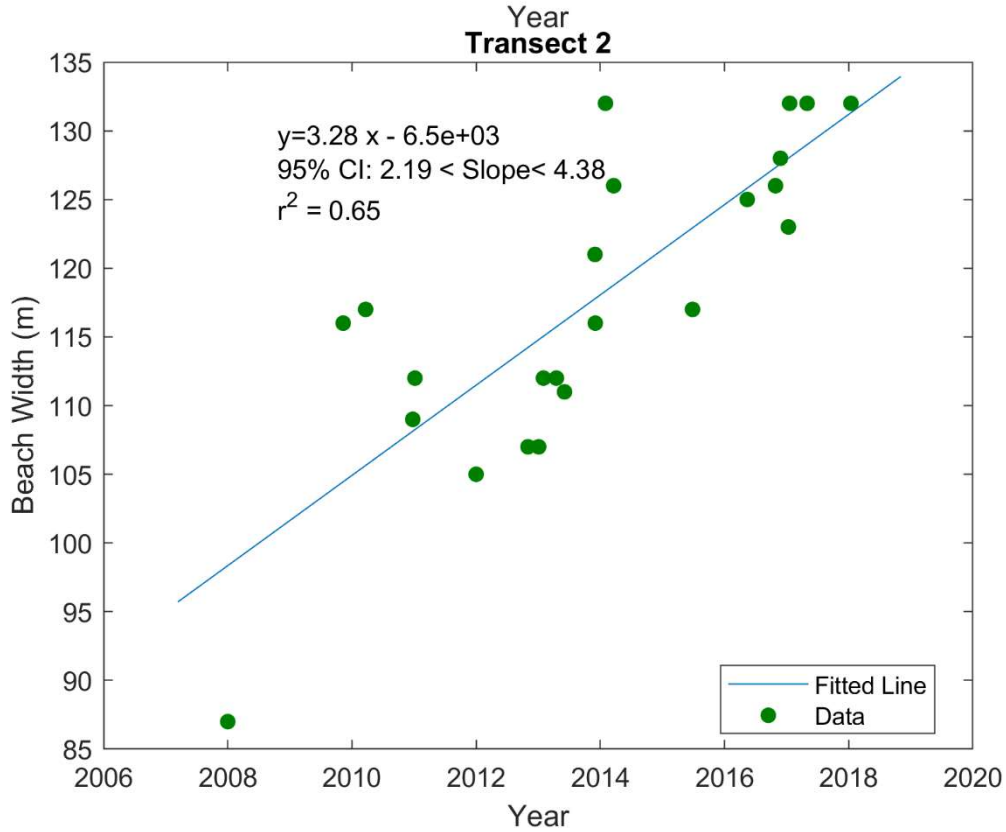
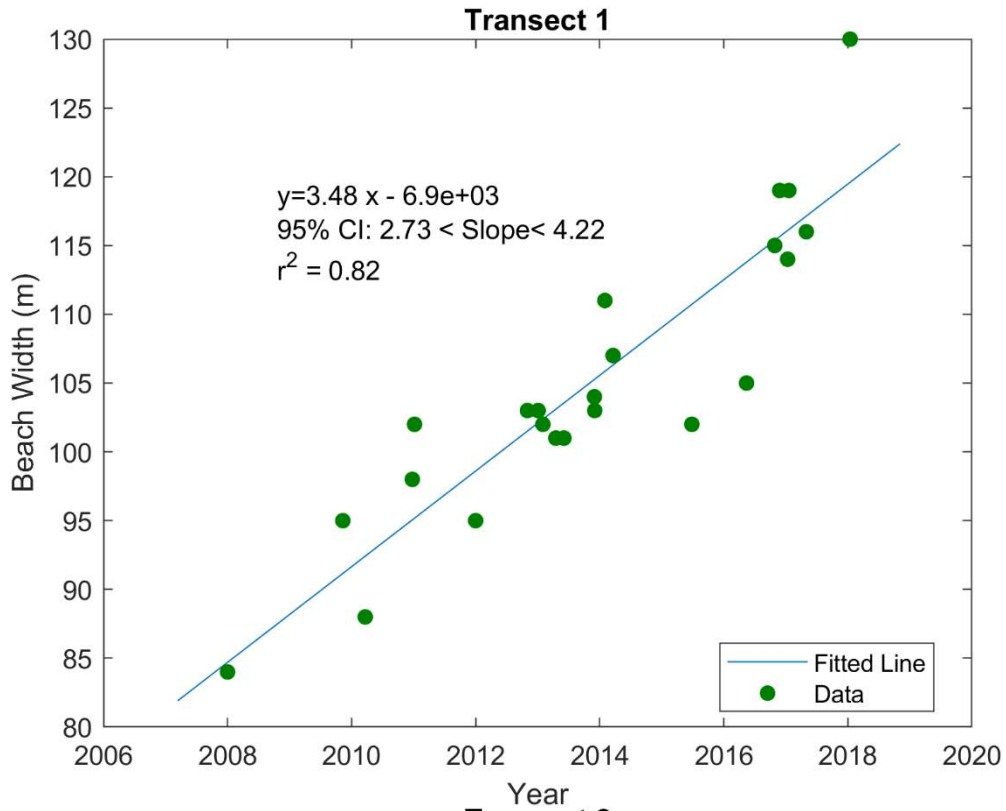


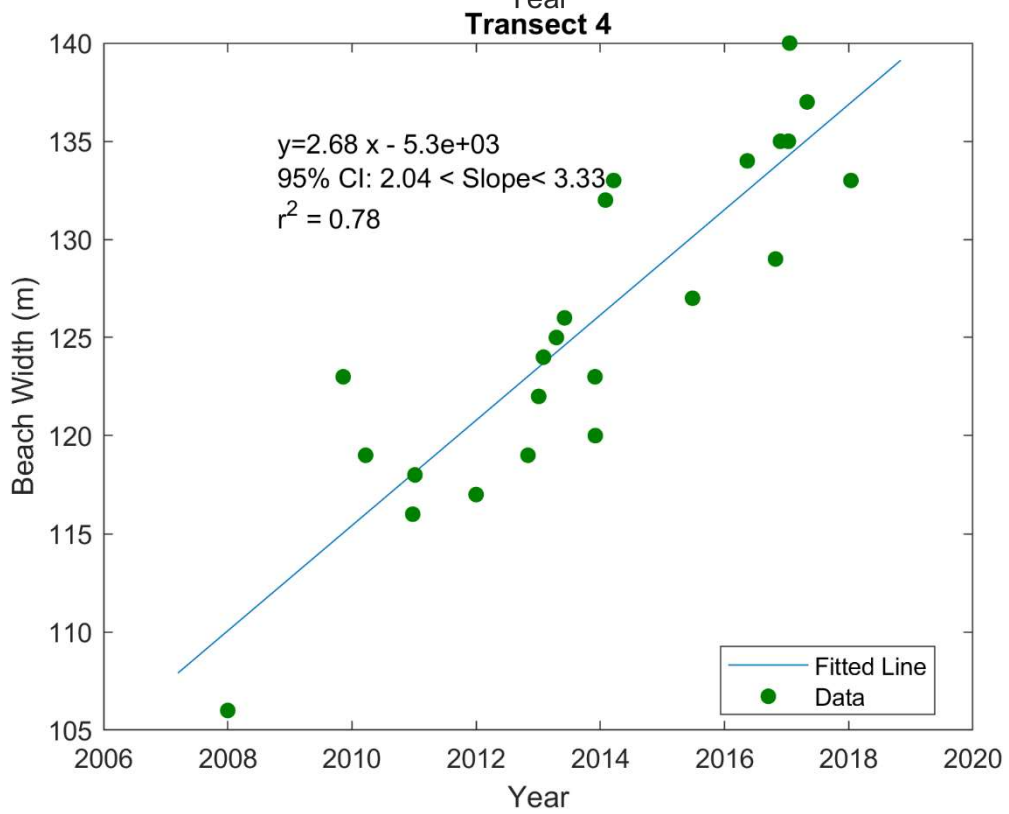
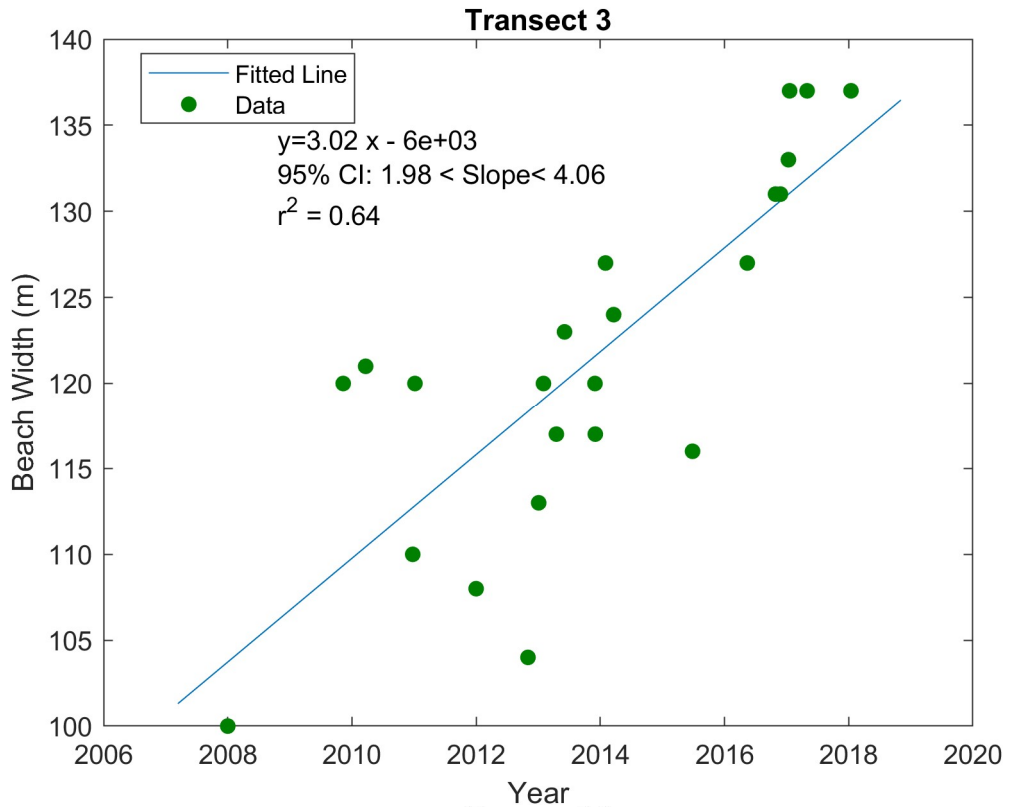
Rysunek 7.2 Przewidywana zmiana linii brzegowej plaży Stogi. Czerwona linia wskazuje linię brzegową w maju 2018 roku dla porównania. Źródło: Google Earth.

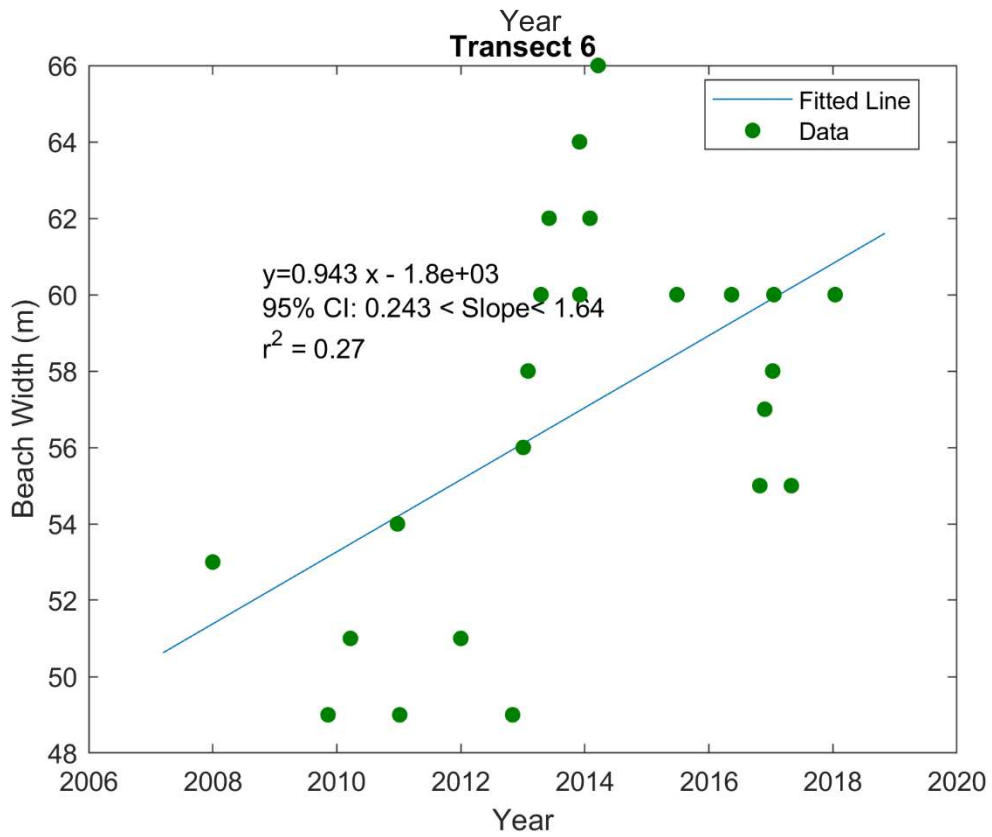
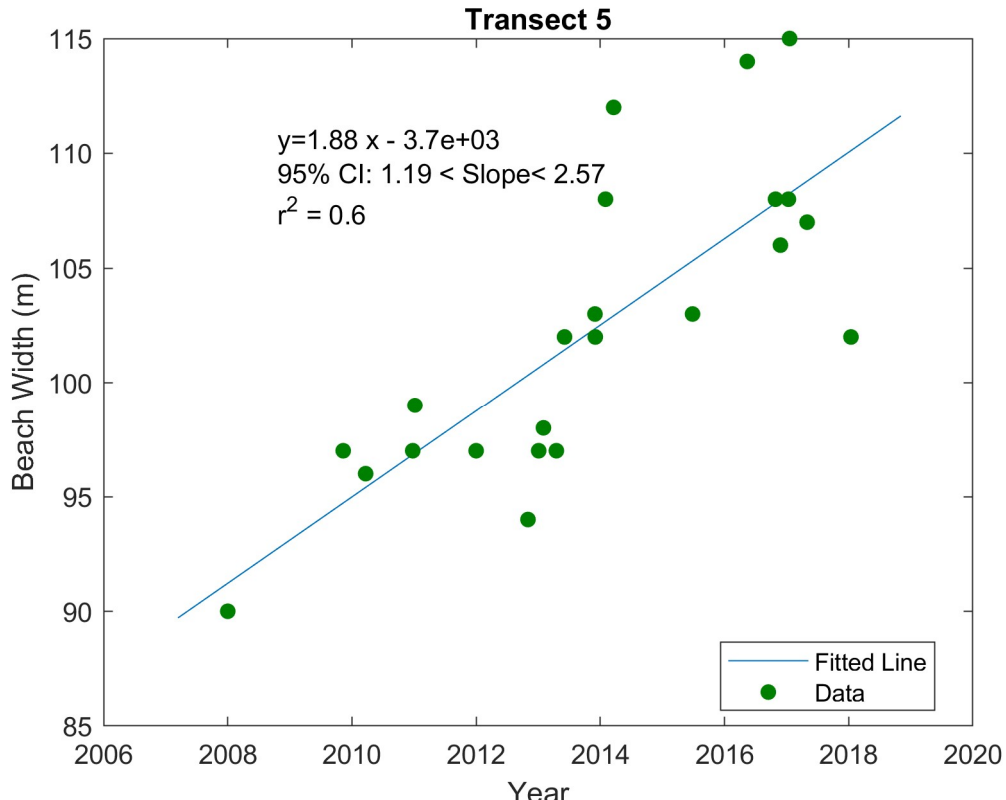


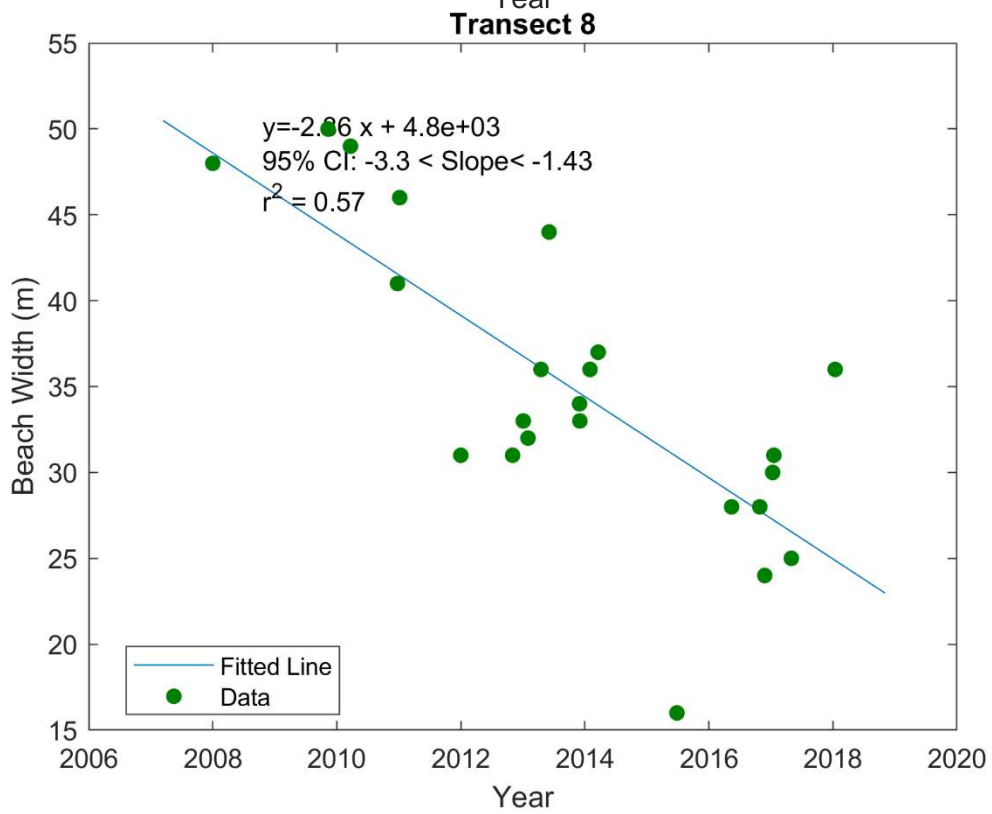
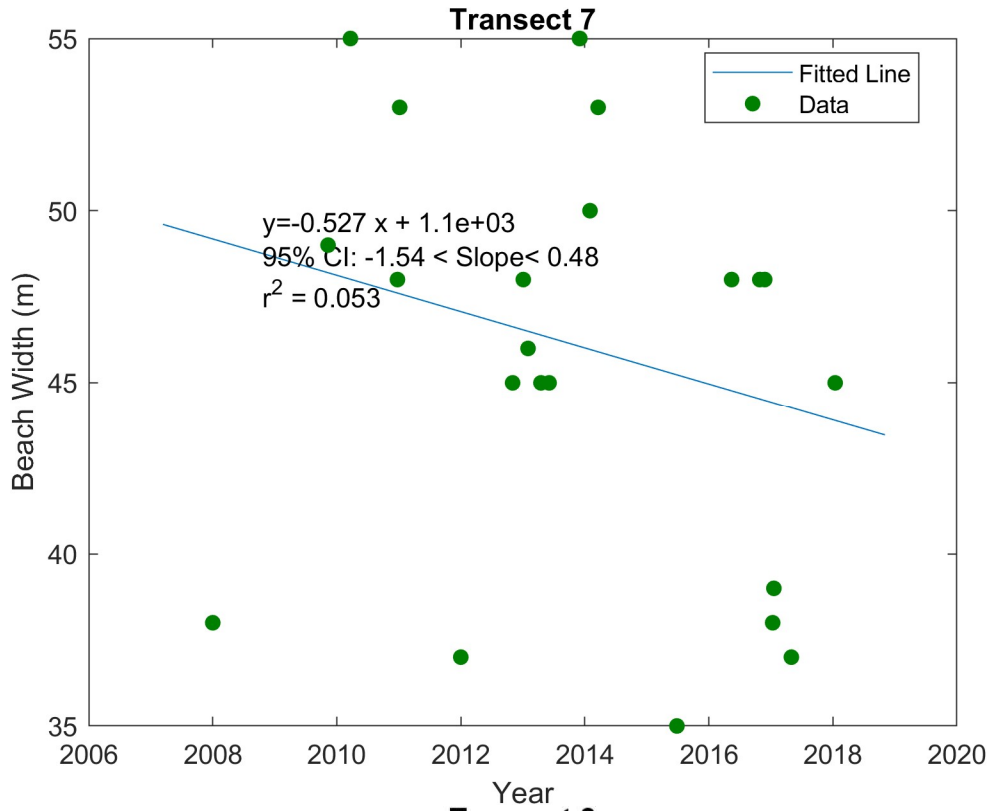
Rysunek 7.3 Przewidywana zmiana linii brzegowej plaży Stogi. Czerwona linia wskazuje linię brzegową w maju 2018 roku dla porównania. Źródło: Google Earth.

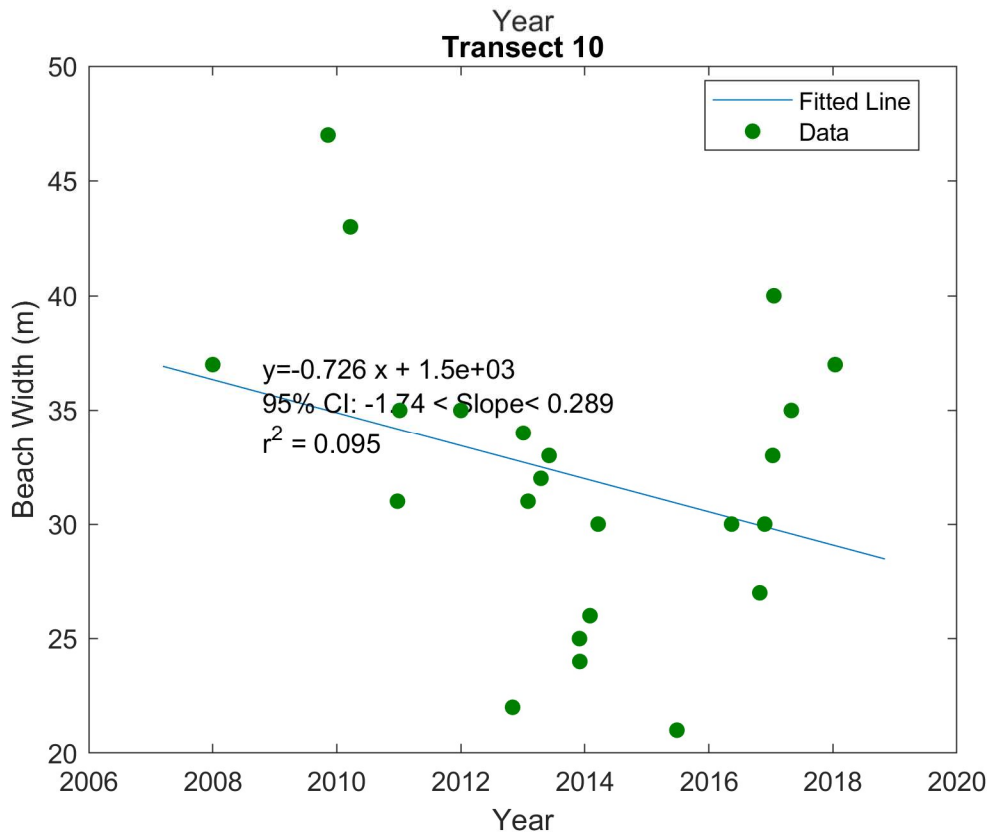
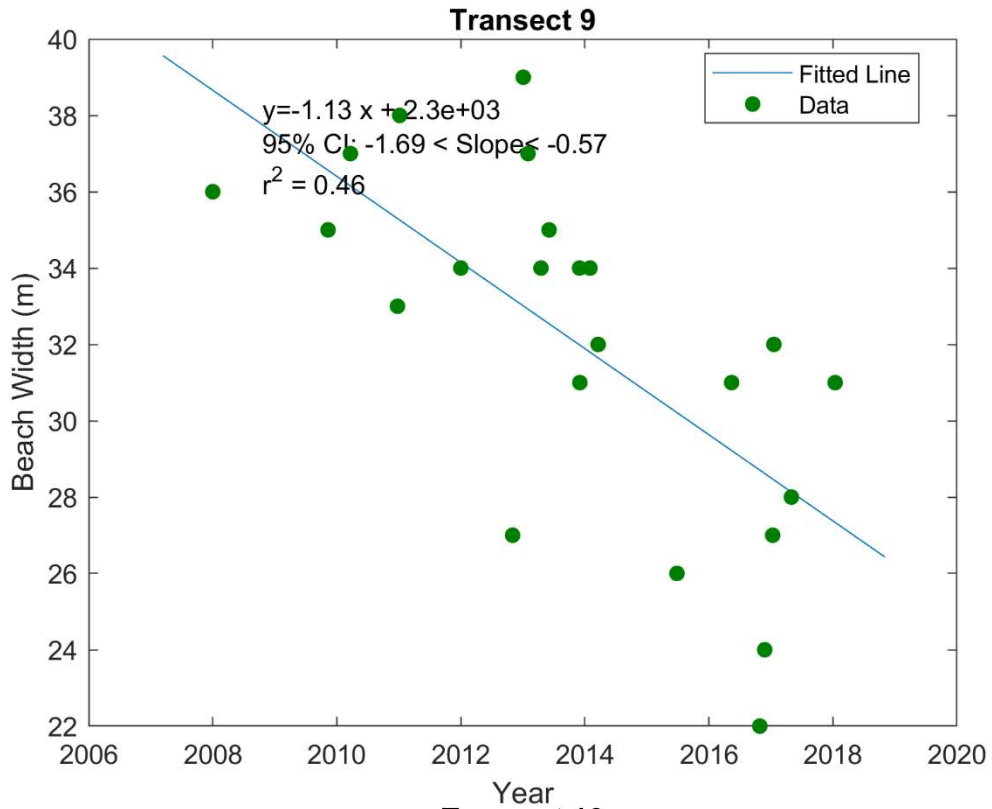
Załącznik B Ewolucja szerokości plaży Stogi

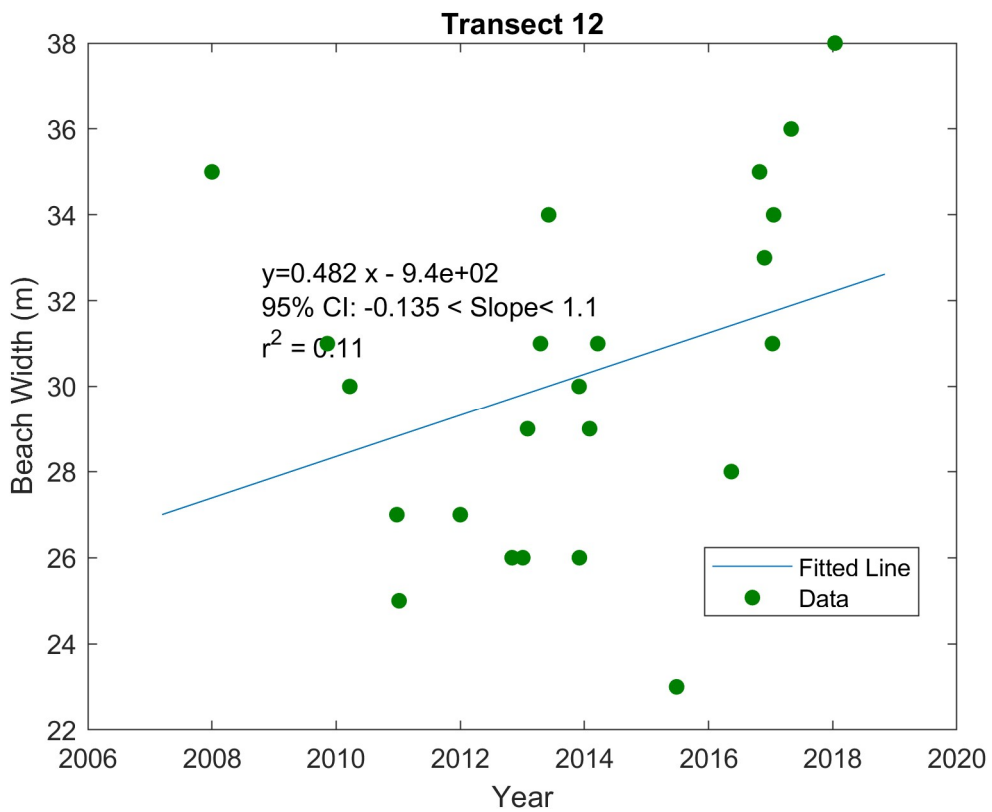
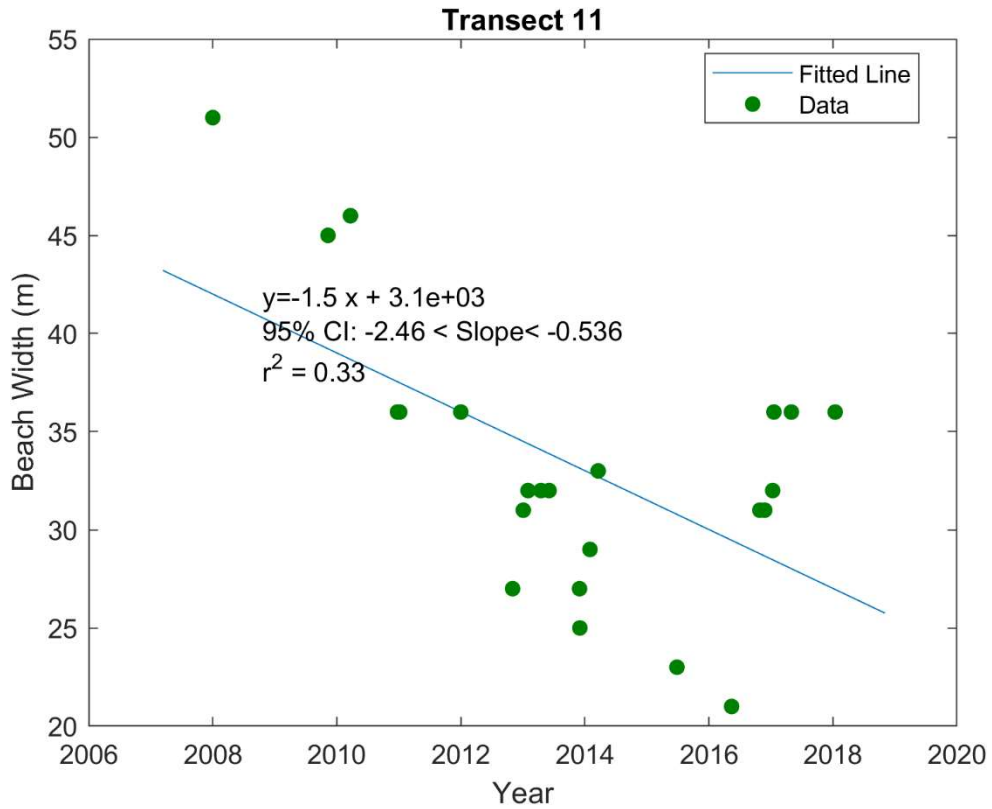


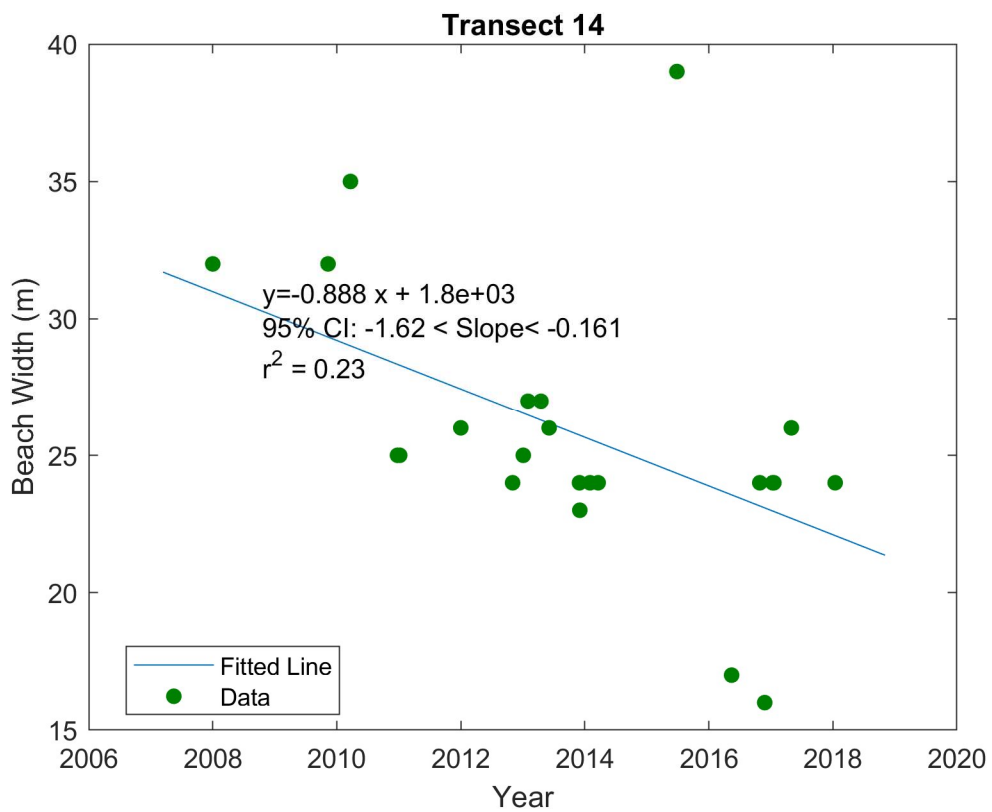
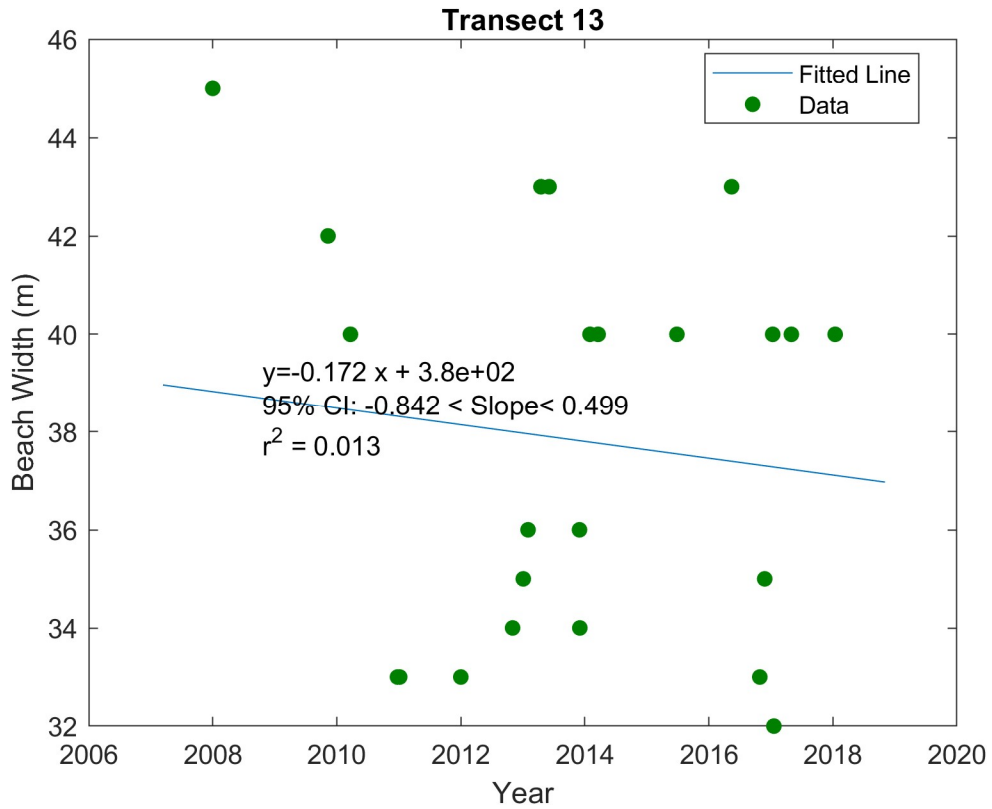










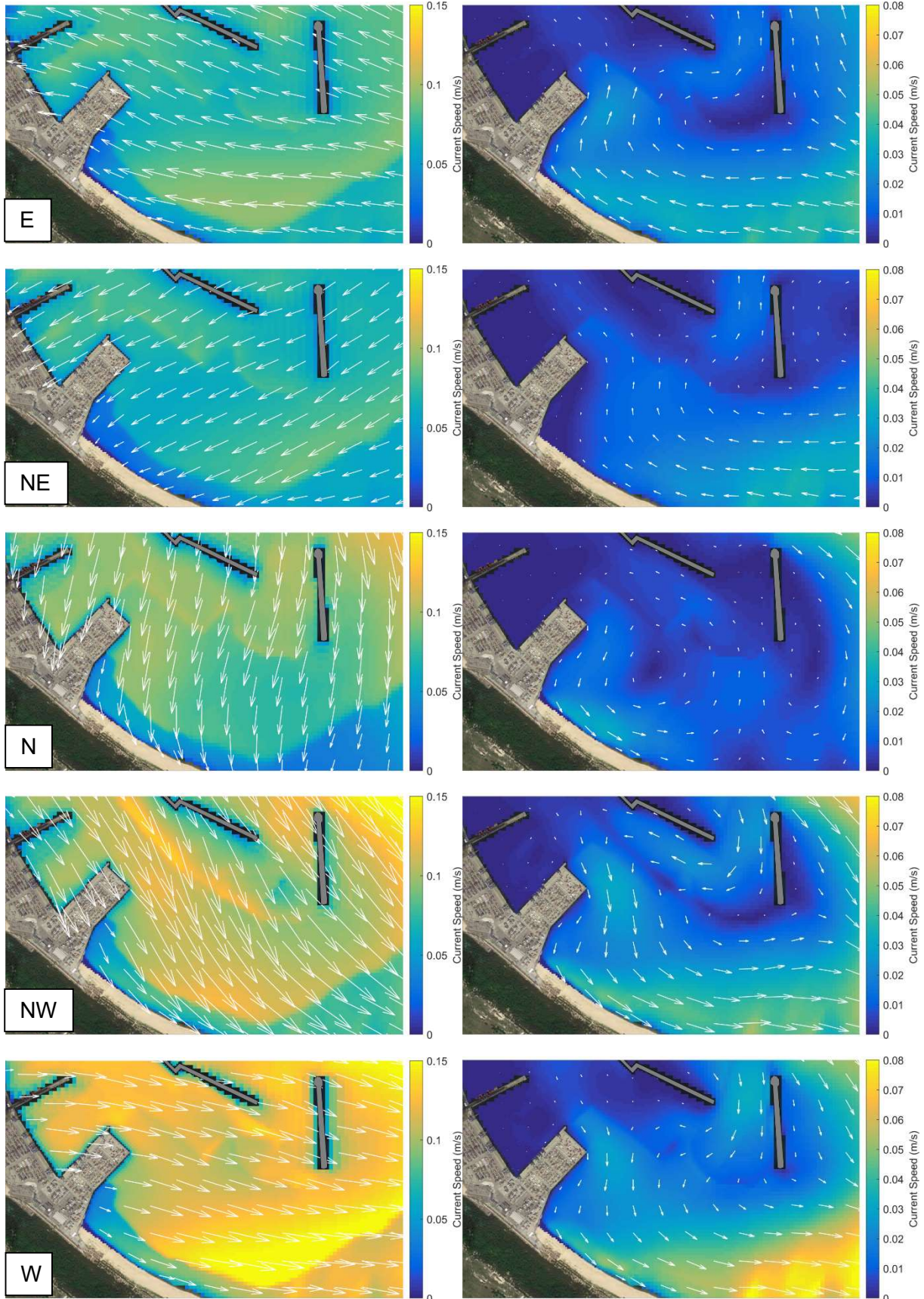


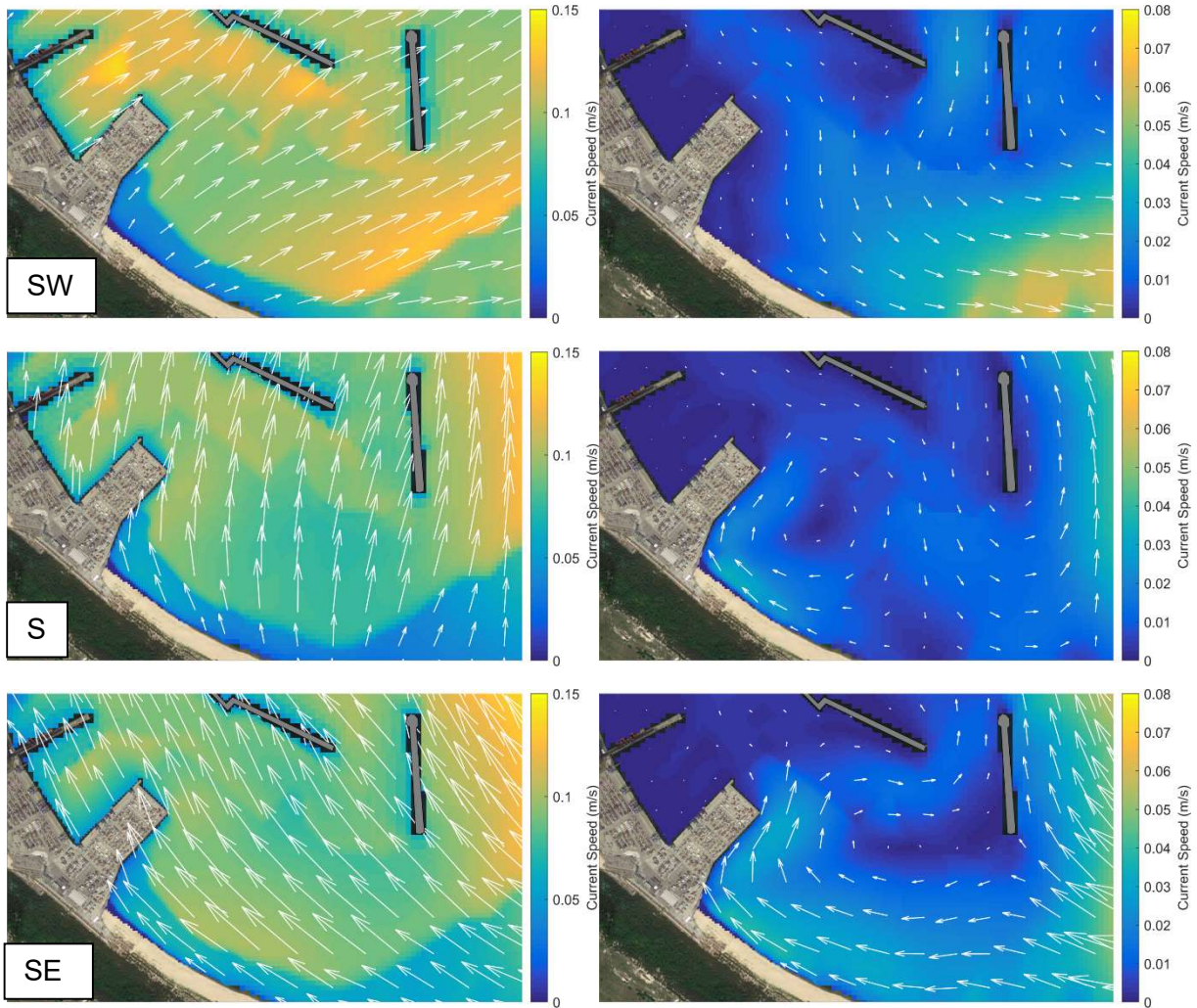
Załącznik C Prądy morskie w otoczeniu T3

Scenariusz terażniejszy

Warstwa powierzchniowa (top 1m)

Uśredniona głębokość





Scenariusz przyszły

Warstwa powierzchniowa (top 1m)

Uśredniona głębokość

