



Kierunek studiów: Geoinformacja

Nr albumu: 455820

Mateusz Rydzik

**Ocena wpływu tworzenia nowych lądów na jakość
wód przy wykorzystaniu danych teledetekcyjnych**

*Assessment of the impact of land reclamation on water
quality using remote sensing data*

Praca magisterska napisana
w Instytucie Geoekologii i Geoinformacji
pod kierunkiem
dr. hab. Jakuba Nowosada

Streszczenie

Abstrakt

Tworzenie nowych lądów polega na sztucznym przekształcaniu obszarów wodnych w tereny lądowe. Procesy te wpływają na ekosystemy wodne, stanowiąc potencjalne zagrożenie dla występujących w nich organizmów. Wzrost liczby ludności, zamieszkującej wybrzeża może doprowadzić do nasilenia się procesów tworzenia nowych lądów. Celem pracy jest ocena potencjalnego wpływu procesów tworzenia nowych obszarów lądowych na jakość pobliskich wód. Do oceny jakości wód wykorzystane zostały wskaźniki spektralne, obliczone przy wykorzystaniu zdjęć satelitarnych. Wskaźniki te opisują zmiany dwóch parametrów jakości wód: stężeń chlorofilu a i zawiesiny. Badania przeprowadzono dla pięciu obszarów, na których powstały nowe lądy: Dubaj (Zjednoczone Emiraty Arabskie), Lagos (Nigeria), Limon (Kostaryka), Singapur i Szanghaj (Chiny). Wskaźniki spektralne wykryły znaczące zmiany jakości wód na obszarach badań w trakcie tworzenia nowych lądów. Konstrukcja nowych lądów doprowadziła do spadku stężenia chlorofilu a w Dubaju, Limon i Singapurze. Wzrost stężenia chlorofilu a odnotowano w Lagos i Szanghaju. Podczas trwania budowy nowych obszarów lądowych, w Dubaju, Limon i Szanghaju zaobserwowano wzrost stężenia zawiesiny w wodzie. W Lagos i Singapurze wykryto długookresowy spadek stężenia zawiesiny.

Słowa kluczowe: (wskaźniki spektralne, obrazy satelitarne, jakość wód, tworzenie lądów)

Abstract

Land reclamation involves the artificial transformation of water areas into land areas. These processes affect water ecosystems, posing potential threats to the organisms living within them. The increase in coastal population may lead to an intensification of land

reclamation processes. The aim of this study is to assess the potential impact of land reclamation processes on the quality of nearby waters. Spectral indices, calculated using satellite images, were used to assess water quality. These indices describe changes in two water quality parameters: chlorophyll-a concentration and suspended matter concentration. The study was conducted in five areas where new lands have been created: Dubai (United Arab Emirates), Lagos (Nigeria), Limon (Costa Rica), Singapore, and Shanghai (China). Spectral indices detected significant changes in water quality in the study areas during the land reclamation. The construction of new lands led to a decrease in chlorophyll-a concentration in Dubai, Limon, and Singapore. An increase in chlorophyll-a concentration was observed in Lagos and Shanghai. During the construction of new land areas, an increase in suspended matter concentration in the water was observed in Dubai, Limon, and Shanghai. In Lagos and Singapore, a long-term decrease in suspended matter concentration was detected.

Keywords: (spectral indices, satellite images, water quality, land reclamation)

Spis treści

Streszczenie	3
1 Wprowadzenie	7
2 Przegląd literatury	11
3 Metody	15
3.1 Wybór obszarów badań	16
3.2 Pozyskiwanie zdjęć satelitarnych	17
3.3 Obliczanie wskaźników spektralnych	20
4 Obszary badań	25
4.1 Dubaj, Zjednoczone Emiraty Arabskie	27
4.2 Lagos, Nigeria	28
4.3 Limon, Kostaryka	29
4.4 Singapur	30
4.5 Szanghaj, Chiny	31
5 Materiały	33
6 Wyniki	35
6.1 Dubaj, Zjednoczone Emiraty Arabskie	36
6.2 Lagos, Nigeria	40
6.3 Limon, Kostaryka	43
6.4 Singapur	47
6.5 Szanghaj, Chiny	50
7 Podsumowanie	55
Bibliografia	61

Rozdział 1

Wprowadzenie

Wzrost liczby ludności jest zjawiskiem, które znacząco wpływa na wiele aspektów społeczno-gospodarczych. Wymusza ono utworzenie nowych obszarów mieszkanych, zwiększenia produkcji żywności oraz pozostałych dóbr, usprawnienie infrastruktury transportowej i wszystkich innych elementów pośrednich. Każda z tych czynności oddziaływała w różnych stopniach na środowisko przyrodnicze (Cropper et al., 1994).

Jednym z elementów środowiska szczególnie narażonym na negatywne zjawiska związane ze wzrostem populacji jest środowisko wodne. Ponad połowa ludności na świecie zamieszkuje obszary przybrzeżne (Seto et al., 2011). Jednocześnie wykazywany jest trend migracji ludności do miast znajdujących się na wybrzeżu (Hugo, 2011), który może przyczynić się do zwiększenia udziału populacji zamieszkującej miasta nadmorskie w ogólnej sumie populacji na świecie (McGranahan et al., 2007). Oznacza to, że wszystkie czynności służące przygotowaniu miast do przyjęcia nowych mieszkańców będą wpływać również na morza i oceany.

Do metod dostosowywania miast do nowych mieszkańców można zaliczyć przekształcanie istniejących form wykorzystania terenu na obszary mieszkane lub usługowe. Może to w pewnym momencie spowodować brak dostępnych obszarów lądowych do osiedlenia w nadmorskich miastach. Jedną z alternatyw pozyskiwania nowych lądów może być proces tworzenia nowych lądów.

Jednym z krajów, zaliczanych do pionierów pozyskiwania nowych lądów, jest Holandia, na obszarze której już w 1533 roku przekształcono jezioro w nowe tereny do zagospodarowania (Ven, 1993). Operacja ta nie została jednak podyktowana zapotrzebowaniem na nowe tereny, a wymuszona przez ciągłe rozrastanie się jeziora i zalewanie pobliskich miejscowości. Proces tworzenia nowego lądu polegał na wypompowaniu wody z jeziora do wybudowanej wokół niego sieci kanałów, i odprowadzenia jej do jeziora Zuiderzee. Dna zbiorników, nazywanych polderami, wykorzystywane były przede wszystkim do rolnictwa. W celu konserwacji nowo pozyskanych terenów, ziemie podzielone zostały sieciami kanałów, ułatwiających odprowadzanie wody poza poldery. Rowy te jednocześnie wykorzystano jako granice działek, dzieląc nowy ląd na siatkę parceli o charakterystycznych, regularnych kształtach (Hoeksema, 2007). Wraz z upływem lat, procesy tworzenia nowych lądów w Holandii były stale rozwijane. Punktem kulminacyjnym była seria konstrukcji nowych prowincji w XX wieku, których rezultatem było pozyskanie dla Holandii lądów o łącznej powierzchni 1650 kilometrów kwadratowych. Stanowił to wzrost powierzchni kraju o 5% (Hoeksema, 2007).

Współcześnie, stosowane są inne metody konstrukcji terenów lądowych. Oprócz polderów, stosowane są techniki usypywania materiału na dnie zbiornika do momentu wydobycia się go ponad powierzchnię wody. Najczęściej stosowanym materiałem jest piasek, często mieszany z większymi skałami czy cementem (Martín-Antón et al., 2016). Piasek może być usypywany przy wybrzeżu, poszerzając go wgłąb morza. Innym rozwiązaniem jest usypywanie materiału z dala od lądu, tworząc sztuczne wyspy. Oprócz tworzenia nowych stref mieszkalnych, nowe lądy tworzone są do: rozbudowy portów i lotnisk, pozyskiwania terenów rolniczych czy tworzenia nowych stref wojskowych (Martín-Antón et al., 2016). Procesy te są szczególnie widoczne w megamiasbach, czyli ogromnych miastach o populacji przekraczającej osiem milionów mieszkańców (Wenzel et al., 2007). W 16 wybranych megamiasbach przez ostatnie 40 lat utworzono 1249 kilometrów kwadratowych nowych lądów (Sengupta et al., 2018). Aż 587 kilometrów kwadratowych nowych ziem z tej sumy utworzono w Szanghaju, które w tym okresie powiększyło swoją powierzchnię o 6,5% (Sengupta et al., 2018). Biorąc pod uwagę prognozy wzrostu liczby ludności zamieszkującej wybrzeża, możliwe jest przypuszczenie

o zwiększeniu natężenia tworzenia nowych lądów. Procesy te mogą okazać się jedyną możliwą decyzją dla obszarów, które mają ograniczoną ilość dostępnych obszarów. Ograniczenie obszarów można rozumieć jako fizyczny brak terenów, albo jako restrykcje, nałożone w ramach programów ochrony środowiska. Powoduje to powstawanie wielu pytań odnośnie bezpieczeństwa tych procesów w kontekście ochrony środowiska. Współczesne metody tworzenia nowych lądów wymagają pozyskania dużej ilości piasku, najczęściej z dna zbiorników wodnych lub istniejących wysp. Konieczne jest ustalenie relacji między procesami tworzenia nowych lądów a ich wpływem na środowisko. W tej pracy, nacisk został położony na jeden z aspektów jakości wody.

Jakość wód badana jest przeważnie na podstawie trzech grup parametrów: fizycznych, chemicznych i biologicznych (Summers, 2020). Do fizycznych parametrów przynależą takie właściwości jak temperatura, kolor, smak wody, czy występowanie zawiesiny (Summers, 2020). Chemiczne parametry badają występowanie metali ciężkich, substancji toksycznych lub sam odczyn wody (Summers, 2020). Do biologicznych parametrów zalicza się występowanie bakterii, alg, oraz wirusów (Summers, 2020). Podstawowym sposobem badania jakości wód jest wykonywanie pomiarów w terenie. Jest to jednak proces kosztowny oraz czasochłonny, wymagający ręcznego pobierania próbek na obszarze badań i ich transportu do laboratorium (Glasgow et al., 2004). Manualne pomiary coraz częściej są zastępowane przez mierniki, które automatycznie albo poprzez zdalne wywołanie dokonują pomiarów. Taka automatyzacja umożliwia prowadzenie ciągłego monitoringu stanu wód, bez konieczności fizycznego przebywania nad zbiornikiem (Glasgow et al., 2004). Dodatkowym źródłem cennych informacji o stanie jakości wód są zdjęcia satelitarne. Pozwalają one na ocenę wybranych parametrów, w szczególności fizycznych. Dużą zaletą zdjęć satelitarnych jest także ich rozdzielcość przestrzenna. Zdjęcie jest w stanie dostarczyć informacji dla większego obszaru badań niż pojedyncze pomiary punktowe.

Mając na uwadze potencjalny wzrost zapotrzebowania na tereny w miastach nadmorskich, konieczne jest zbadanie wpływu konstrukcji nowych ziem na środowisko. Celem pracy było zbadanie potencjalnego wpływu tworzenia nowych lądów na zmiany jakości pobliskich wód. Wybranych zostało pięć obszarów badań, na terenie których dokonano

ROZDZIAŁ 1. WPROWADZENIE

konstrukcji nowych lądów w przeciągu ostatnich 30 lat. Stan wód był badany w trzech etapach: przed, w trakcie i po zakończeniu prac konstrukcyjnych. Jakości wód zostały porównane między obszarami badań, w celu wykrycia potencjalnych przestrzennych lub czasowych trendów. Do wykonania oceny jakości wód korzystano dane teledetekcyjne w postaci zdjęć satelitarnych, przy pomocy których obliczono wskaźniki spektralne.

Rozdział 2

Przegląd literatury

Badania odnośnie wpływu konstrukcji lądów na jakość wód są istotne przez stale rosnącą liczbę ludności, w szczególności w obszarach na wybrzeżach (McGranahan et al., 2007). Nowe lądy znajdują zastosowania w poszerzaniu granic przybrzeżnych miast, dostarczając tereny pod strefy mieszkalne i przemysłowe (Wang et al., 2014). Ocena wpływu konstrukcji nowych lądów na stan jakości wód jest tematem wielu badań, których wyniki wykorzystano w tej pracy. Jakość wody rozumiana jest jako opis charakterystyki wody, określających jej przydatność do wykorzystywania w wielu dziedzinach. Jakość wody jest oceniana na podstawie fizycznych, chemicznych i biologicznych parametrów (Tyagi et al., 2013).

Zaletą danych teledetekcyjnych w ocenie jakości wód jest zasięg, którym obejmują ciągły obszar badań (Gholizadeh et al., 2016). Pozwala to na obserwacje przestrzennego rozkładu stanu wód, w przeciwieństwie do punktowych pomiarów w terenie, które dostarczają informacje jedynie o stanie konkretnego punktu w przestrzeni. Wykorzystanie zdjęć satelitarnych jako danych teledetekcyjnych ogranicza jednak liczbę właściwości wody, jaką można ocenić. Pozwalają one głównie na badanie fizycznych właściwości wód, takich jak ich kolor czy mętność (Glasgow et al., 2004). Stacje pomiarowe w terenie pozwalają na pozyskanie większej ilości informacji, opisujących chemiczne i biologiczne

właściwości wody (Summers, 2020). Znaczna liczba badań zbiorników wodnych przy wykorzystaniu danych teledetekcyjnych skupia się na ocenie występowania chlorofilu a oraz stężenia zawieszonego materiału (Gholizadeh et al., 2016).

Zespół Zhang et al. (2017) prowadził badania na obszarze zatoki Jiaozhou w Chinach. Wybrzeże tej zatoki ulegało przekształceniom, będących wynikiem wielu prac konstrukcji nowych lądów. Część z nowych terenów wykorzystano do rozwoju przemysłu. Wraz ze wzrostem natężenia konstrukcji nowych lądów, odnotowano wzrost stężenia nieorganicznego azotu, rozpuszczonego w wodach zatoki Jiaozhou. W ramach tej pracy, zdecydowano się zbadać wpływ wybranych czynników na zmiany stężenia nieorganicznego azotu w zatoce Jiaozhou, które mogła doprowadzić do zmian jakości wody. Do oceny jakości wód, zespół pozyskał zbiory danych pochodzące z pomiarów w terenie. Dane te opisują właściwości wody, których zmiany w stężeniu występujące w wodzie mogą świadczyć o potencjalnym pogorszeniu lub polepszeniu jakości wód. Do zbioru danych, oprócz stężenia azotu odprowadzanego przez rzeki do zbiornika, zaliczono również informacje o: stężeniu chlorofilu a, zasadowości i temperaturze wody, zasoleniu czy ilości rozpuszczonego tlenu. Dane następnie podzielono na dwie grupy: czynniki wpływu antropogenicznego (przedostawanie się azotu i innych związków do zbiorników wodnych bezpośrednio przez strefy przemysłowe, lub odprowadzone do rzek uchodzących w zatoce) oraz przyrodnicze czynniki strefy przybrzeżnej (stężenie chlorofilu a i zawiesiny w wodzie, temperatura i zasolenie wody, oraz zjawiska przyrodnicze). W pracy wykorzystano metody statystyczne, między innymi regresję liniową, analizę czynnikową oraz numeryczne modele jakości wód, do zbadania wpływu poszczególnych elementów zbioru danych na zmiany stężenia rozpuszczonego azotu w zatoce. Praca wskazała, że głównymi czynnikami pogorszenia jakości wód w zatoce Jiaozhou był wzrost stężenia nieorganicznego azotu odprowadzanego przez rzeki do zatoki, oraz jednoczesne zmniejszanie powierzchni zbiornika wodnego. Tworzenie nowych lądów w zatoce skutkowało przekształcaniem powierzchni zatoki Jiaozhou między innymi w obszary przemysłowe, które zwiększały stężenie nieorganicznego azotu w wodach zatoki. Autorzy wskazali na konieczność wprowadzenia programów uzdatniania wody z rzek, czy przenoszenia stref przemysłowych z dala od wybrzeża w celu poprawienia jakości wód w zbiorniku.

Praca Hao et al. (2021) skupia się na określeniu wpływu konstrukcji nowych terenów w mieście Ningbo na stan jakości wód w zatoce Hangzhou w Chinach. Do oceny jakości wód wybrano cztery metale ciężkie: miedź, ołów, cynk i kadm. Wzrost stężenia tych metali w wodzie został utożsamiony z pogorszeniem jakości wody. Dane pozyskano z próbek, pobranych w trzech okresach: przed rozpoczęciem prac (2007 rok), tuż po zakończeniu prac (2016 rok) i dłuższy czas po zakończeniu prac (2018 rok). Próbkowanie stężenia metali ciężkich w trzech oddzielnych etapach pozwoliło na ocenę wpływu tworzenia nowych lądów na stan jakości wód, porównując ilość metali ciężkich po zakończeniu prac z ilością przed rozpoczęciem prac. Badania wskazały na najwyższe wartości trzech z czterech metali ciężkich w 2016 roku, czyli tuż po zakończeniu prac. Jedynym metalem ciężkim, którego ilość była większa przed rozpoczęciem prac niż tuż po zakończeniu prac był kadm. Największy wzrost tuż po zakończeniu prac, w porównaniu do stanu przed rozpoczęciem prac, odnotowały miedź oraz cynk. Obserwując stężenia metali ciężkich w 2018 roku, czyli dwa lata po zakończeniu prac, zauważać można spadek ich stężenia do stanu przed rozpoczęciem prac. W przypadku ołowi, stężenie metali wykryte w zbiorniku było mniejsze w 2018 roku niż w 2007 roku. Trend spadku stężenia metali po zakończeniu prac nie został odnotowany dla kadmu, którego stężenie w wodzie wzrosło dwa lata po zakończeniu prac. Wyniki badań wskazują na wpływ tworzenia nowych lądów na stan jakości wody. Tuż po zakończeniu prac, stężenie metali ciężkich w wodach było większa niż przed rozpoczęciem prac. Wraz z upływem czasu po zakończeniu prac, stężenie metali w wodzie stopniowo malało.

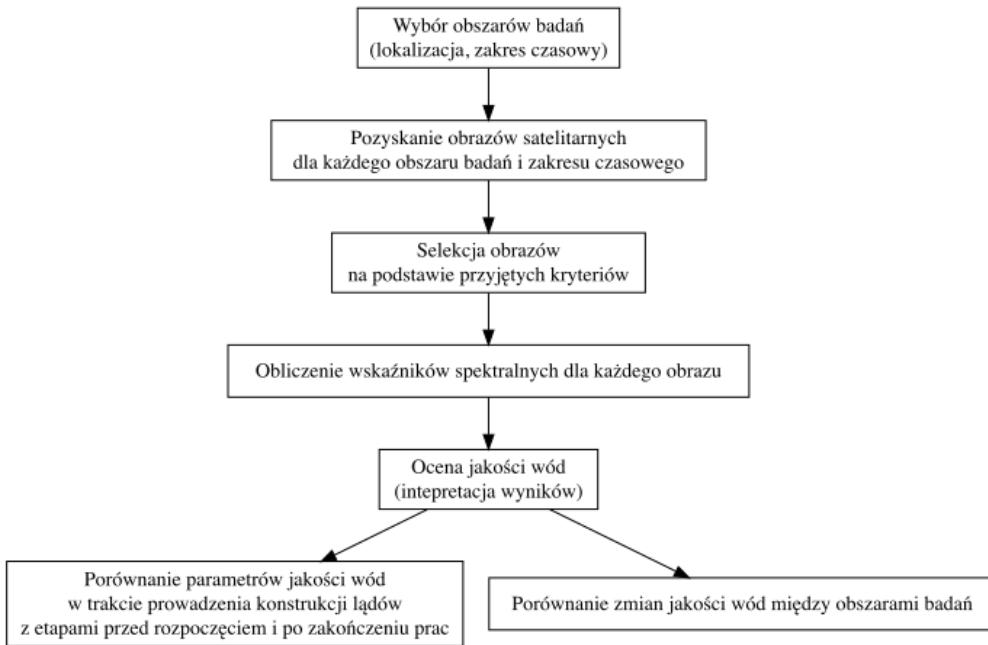
Praca Wang et al. (2023) skupiona jest na badaniu wpływu budowy lotniska w Hongkongu na jakość pobliskich wód. Jako, że Hongkong dysponuje ograniczoną ilością terenu, lotnisko zdecydowano się zbudować na nowo utworzonym lądzie. Do oceny jakości wód autorzy wykorzystali zdjęcia satelitarne Landsat oraz dane, pochodzące z monitoringu terenowego. Jakość wód została oceniona głównie przy pomocy parametrów stężenia zawiesiny i nieorganicznego azotu w wodzie. Po wstępny przetworzeniu zdjęć satelitarnych, wartości poszczególnych kanałów zestawiono z danymi terenowymi. Pozwoliło to na wybór kanałów widzialnych i bliskiej podczerwieni, na podstawie których obliczono algorytm estymacji parametrów jakości wody. Algorytmy wykorzystano do stworzenia

modeli, pozwalających na oszacowanie stężenia zawiesiny i nieorganicznego azotu na podstawie obrazów satelitarnych. Modele te były trenowane na podstawie danych terytorialnych. Badania wykazały wzrost stężenia zawiesiny i nieorganicznego azotu w pobliżu nowego lądu, na którym znajdowało się lotnisko. Autorzy potwierdzili wpływ tworzenia nowego lądu, a w szczególności jego wykorzystywania, na stan jakości wód.

Rozdział 3

Metody

Rozdział ten podzielony jest na podrozdziały, odpowiadające każdemu z trzech głównych etapów prac: wybór obszarów badań, pozyskiwanie danych teledetekcyjnych w postaci zdjęć satelitarnych, oraz obliczanie wskaźników spektralnych i interpretacja wyników. Rycina 3.1 przedstawia schemat prac i wykonywanych kroków. Wszystkie etapy pozyskiwania danych, ich przetwarzania oraz prezentowania wyników zostały przeprowadzone przy wykorzystaniu języka programowania **R** (R Core Team, 2024). Podrozdziały zawierają odniesienia do wykorzystywanych pakietów R, ułatwiających i automatyzujących poszczególne etapy prac.



Rycina 3.1: Schemat działań, wykonywanych w ramach pracy.

3.1 Wybór obszarów badań

Obszary badań obejmowały przybrzeżne tereny lądowe oraz przylegające zbiorniki wodne. Jako obszar badań rozumiane są granice przestrzenne, wyznaczone przez cztery pary współrzędnych. Zostały one wybrane na podstawie przeglądu literatury i artykułów oraz wcześniejszej wiedzy autora.

Obszar badań musiał spełniać postawione wymagania, żeby został wybrany. Najważniejszym warunkiem był rok rozpoczęcia prac. Jako, iż praca bazuje na zdjęciach satelitarnych ze zbiorów Microsoft Planetary Computer, obszar badań musiał obejmować nowy ląd, którego konstrukcję rozpoczęto po 1982 roku (Source et al., 2022). Dodatkowo, w celu porównania stanu jakości wód w trakcie trwania prac ze stanem przed rozpoczęciem prac i po zakończeniu, konieczne jest uwzględnienie w badaniach również przedziału czasowego przed i po okresie prowadzenia prac. W ramach pracy przedział ten ustalono na minimum dwa lata przed i po zakończeniu prac. Oznacza to, że wybrany obszar badań musiał obejmować konstrukcję nowego lądu, która rozpoczęła się najwcześniej w 1984 roku. Taki sam warunek postawiono dla roku zakończenia prac. Prace na wybranym obszarze badań mogły zakończyć się najpóźniej w 2020 roku, co pozwoliłoby uwzględnić

dodatkowe dwa – trzy lata do porównania wartości po zakończeniu prac. Dodatkowym warunkiem była powierzchnia nowo utworzonego lądu. Przy wyborze obszarów badań do pracy skupiono się na projektach, których zmiany w przebiegu konstrukcji byłyby widoczne z poziomu obrazów satelitarnych. Wyklucza to mniejsze projekty, których zmiany nie byłybyauważalne na zdjęciach satelitarnych Landsat o rozdzielczości przestrzennej 30 metrów.

Z prac naukowych pozyskano informacje o lokalizacji obszaru, lat prowadzenia prac oraz wykorzystaniu nowego lądu. Część publikacji opisujących konstrukcje nowych lądów do okresu prowadzenia prac zaliczyła również etapy przygotowawcze (badanie w terenie, pozyskiwanie zgód itd.) oraz działania po zakończeniu prac (tworzenie infrastruktury na nowym lądzie, konstrukcja budowli). W takim przypadku, wykorzystano serie czasowe obrazów satelitarnych w celu określenia konkretnego roku rozpoczęcia i zakończenia prac.

3.2 Pozyskiwanie zdjęć satelitarnych

Zdjęcia satelitarne pozyskano przy wykorzystaniu pakietu **rsi** dla języka **R** (Mahoney, 2024). Pakiet ten jest zbiorem narzędzi, umożliwiającym przede wszystkim na pozyskiwanie zdjęć satelitarnych oraz obliczanie wskaźników spektralnych udostępnionych w ramach katalogu Awesome Spectral Indices (Montero et al., 2023). Połączenie łatwego dostępu do zbiorów danych teledetekcyjnych i ciągle poszerzającego się katalogu wskaźników znaczco ułatwia przeprowadzanie analiz zmian przestrzennych i czasowych badanych wartości na podstawie wskaźników spektralnych.

rsi posiada wiele dedykowanych metod do pozyskiwania konkretnych danych, udostępnianych w ramach Microsoft Planetary Computer (Source et al., 2022). Jedną z nich jest funkcja do pozyskiwania zdjęć satelitarnych z programów Landsat. Użytkownik, oprócz podania wymaganych informacji takich jak zasięg przestrzenny oraz zakres czasowy, dla którego chce pozyskać dane, otrzymuje możliwość wprowadzenia dodatkowych konfiguracji. Możliwy jest:

- wybór konkretnych satelit, z których pozyskać dane,

- wybór złączenia wszystkich dostępnych zdjęć w jeden obraz kompozytowy lub pobrania zdjęć osobno,
- możliwość zamaskowania niepotrzebnych danych przy pomocy kanału oceny jakości.

Fragment kodu w języku **R** przedstawia przykład sposobu pozyskania zdjęć satelitarnych przy wykorzystaniu pakietu **rsi**. W tym przypadku, korzystając z metody `get_landsat_imagery()`, możliwe jest pozyskanie obrazów Landsat. Trzema wymaganymi argumentami, koniecznymi do wywołania funkcji, są:

- zasięg przestrzenny, dla którego zostaną pobrane zdjęcia (zmienna `aoi`),
- początkowa data, od której chcemy pozyskać zdjęcia (parametr `start_date`),
- końcowa data, do której chcemy pobrać obrazy (parametr `end_date`).

```
rsi::get_landsat_imagery(  
  aoi,  
  start_date="27-04-2000",  
  end_date="04-04-2006",  
  platforms=c("landsat-5", "landsat-7"),  
  composite_function=NULL,  
  output_filename="img/satimg.tif")
```

`rsi::get_landsat_imagery` posiada również opcjonalne argumenty, pozwalające na dalszą konfigurację pobrania obrazów. W przykładzie wykorzystano dodatkowe trzy: `platforms`, `composite_function` i `output_filename`. `platforms` pozwala na wybranie satelit, z których chcemy pozyskać zdjęcia. W tym przypadku, obrazy zostaną pozyskane z Landsat 5 i 7. `composite_function` odpowiada za kontrolę procesu tworzenia obrazu kompozytowego. Domyślnie, **rsi** ze wszystkich pobranych zdjęć tworzy jeden obraz kompozytowy, którego komórki rastra są medianą wartości ze wszystkich pozyskanych obrazów. W przypadku ustawienia tego parametru na `NULL`, zamiast obliczenia kompozytu, wszystkie wybrane obrazy zostaną zapisane do osobnych plików. Lokalizacja,

w której zostaną one zapisane jest wskazywana przez argument `output_filename`. W przypadku ustawienia argumentu `composite_function` na `NULL`, do nazwy plików zostaną dołączone sufisze z datą pozyskania zdjęcia, co umożliwi rozróżnienie plików od siebie.

W przypadku tej pracy, przy pobieraniu danych został wykorzystany dodatkowy argument, służący do maskowania niepotrzebnych komórek. Zdjęcia satelitarne ze zbioru Landsat, oprócz kanałów spektralnych zawierających ilości odbitego promieniowania, posiadają również dodatkowe informacje. Jednym z takich metadanych jest kanał oceny jakości (*quality assessment band*). Przypisuje on każdej komórce rastra wartość, odpowiadającą konkretnej klasie jakości danej komórki. Kanał oceny jakości rozróżnia klasy, dzielące komórki na obszary o małym, niskim i dużym zachmurzeniu, oraz na obszary lądowe czy wodne. Klasy te zostały wykorzystane do wyboru jedynie takich komórek w zdjęciach satelitarnych, które zaklasyfikowane zostały do zbiorników wodnych bez pokrycia chmurami. Wszystkim innym komórkom, zaklasyfikowanym jako obszary lądowe lub obszary pokryte chmurami, zostały przypisane braki wartości. Taki proces zapewniał obliczanie wskaźników spektralnych jedynie na obszarach wodnych, wykluczając z dalszych analiz obszary lądowe oraz powierzchnie zasłonięte chmurami.

Po pobraniu obrazów, zawierających jedynie dane o zbiornikach wodnych, została wykonywana selekcja zdjęć. Wybierane zostały zdjęcia, których stosunek liczby komórek bez wartości do wszystkich komórek obrazu jest mniejszy od ustalonego progu. Wartość progowa była porównywana z procentowym udziałem komórek bez wartości w całości obrazu. Jeżeli komórek bez wartości było mniej niż ustalono w progu, zdjęcie zostało wybierane. Próg ten różnił się dla każdego obszaru i był zależny od udziału powierzchni obszarów lądowych w całości obszaru badań. Jako, że podczas pobierania obrazów zachowywane zostały jedynie komórki dla obszarów wodnych bez pokrycia chmurami, wszystkim innym obszarom (lądowym albo zachmurzonym) przypisany został brak wartości. Dla obszarów badań, w których udział powierzchni lądowych był wysoki, wartość progowa również była podwyższana. Pozwalało to na uwzględnienie w pracy obrazów satelitarnych, które w porównaniu do innych obszarów badań zawierały mniejszą liczbę komórek wypełnionych wartościami. W swoim obszarze badań jednak liczba ta była

satysfakcjonująca. Dla obszarów zdominowanych przez zbiorniki wodne, próg udziału komórek bez wartości był zmniejszany. Umożliwiło to wybór jedynie obrazów, które zawierały dużą liczbę komórek wypełnionych wartościami.

Operacje na danych rastrowych wykonywano przy wykorzystaniu pakietu **terra** (Hijmans, 2024). Do tych operacji zaliczyć można: selekcję obrazów satelitarnych na podstawie ilości dostępnych danych, przygotowywanie danych do analizy, próbkowanie obrazów wzdłuż profilu, obliczanie statystyk dla całego obrazu. Pakiety **dplyr** (Wickham et al., 2023), **lubridate** (Spinu et al., 2023) i **reshape2** (Wickham, 2020) zostały użyte do przetwarzania danych.

3.3 Obliczanie wskaźników spektralnych

Główna metodą wykorzystywania zdjęć satelitarnych w badaniu jakości wody jest analiza informacji o ilości odbitego promieniowania od powierzchni wody (Gholizadeh et al., 2016). Służą one przeważnie do oceny fizycznych parametrów stanu wód, takich jak występowanie chlorofilu a czy mętność wody (Gholizadeh et al., 2016). Żeby wyszczególnić sygnały wskazujące na występowanie parametrów jakości wody, zdjęcia satelitarne przetwarzane są przy pomocy wskaźników spektralnych (Bijeesh et al., 2019). Wskaźnik spektralny może przyjmować formę relacji między dwoma kanałami, lub formuły wykorzystującej większą liczbę kanałów. Algorytm stosuje się dla każdej komórki rastra, obliczając dla niej wartość wskaźnika na podstawie wartości wybranych kanałów dla tej komórki.

Sam wybór kanałów do wskaźników zależy od właściwości spektralnych obiektu badań (Bijeesh et al., 2019). Do oceny jakości wód, najczęściej wykorzystywanymi kanałami we wskaźnikach spektralnych są kanały widzialne (czerwony, zielony, niebieski) i kanał bliskiej podczerwieni. W ramach pracy, skupiono się na wykrywaniu występowania chlorofilu a oraz zawiesiny w zbiornikach wodnych.

Jednym z wykorzystanych wskaźników w pracy jest wskaźnik zakwitu glonów powierzchniowych (*Surface Algal Bloom Index*, nazywanym dalej w pracy SABI), opracowanym

przez Fahada Alawadi. Powstał on w celu oszacowania stężenia chlorofilu a pod powierzchnią i tuż przy powierzchni zbiorników wodnych. Algorytm SABI przyjmuje formułę:

$$SABI = \frac{k_p - k_c}{k_n + k_z}$$

, gdzie:

- k_p – kanał bliskiej podczerwieni,
- k_c – kanał czerwony,
- k_n – kanał niebieski,
- k_z – kanał zielony.

Głównym atutem SABI jest wykorzystanie czterech kanałów do obliczenia wskaźnika. Kanał bliskiej podczerwieni ułatwia odróżnienie glonów od zbiornika wodnego. Połączenie kanałów o krótkich falach (zielonych i niebieskich) umożliwia wykrywanie stężenia chlorofilu a pod powierzchnią wody (Alawadi, 2010). Dodatnie wartości SABI są interpretowane jako wskaźnik obecności chlorofilu a w aktywnie fotosyntetyzujących glonach. Ujemne wartości wskazują natomiast na brak aktywności fotosyntetycznej glonów, co może wynikać z braku chlorofilu a lub z ich głębszego położenia pod powierzchnią wody (Alawadi, 2010).

Kolejnym wskaźnikiem, służącym do estymacji chlorofilu a w zbiornikach wodnych jest wskaźnik wysokości linii fluorescencyjnej (*Fluorescence Line Height*), zaproponowanym między innymi przez Richarda Becka. Autorzy opracowali dwa wskaźniki, bazujące na korzystaniu z informacji o odbitym promieniowaniu w zakresach kanału czerwonego i zielonego, z dodatkowym wykorzystaniem kanału niebieskiego lub bliskiej podczerwieni (Beck et al. (2016)). W pracy wykorzystano pierwszy wskaźnik, który będzie nazywany dalej FLH Blue. Algorytm FLH Blue oparty jest na wzorze:

$$FLHBlue = k_z - (k_c + (k_n - k_c))$$

, gdzie:

- k_z – kanał zielony.
- k_c – kanał czerwony,
- k_p – kanał niebieski.

Wyższe wartości wskaźnika FLH Blue wskazują na większe stężenie chlorofilu a. Wykorzystanie dwóch wskaźników do estymacji chlorofilu a o dwóch różnych formułach może posłużyć do zaobserwowania większej liczby potencjalnych zmian i trendów, niż przy przeprowadzeniu analizy z użyciem jednego wskaźnika.

W przypadku oceny mętności wody, wykorzystano dwa wskaźniki bazujące na relacjach między dwoma kanałami. Wskaźnik opracowany przez Davida Bowersa w 2006 roku (nazywany dalej Bow06) bazuje na relacji między kanałami czerwonym i zielonym (Bowers et al., 2006). Drugi wskaźnik, zaproponowany przez Jonathana Chipmana w 2009 roku (nazywany dalej Chip09), ponownie wykorzystuje kanał zielony, jednak bada jego związek z kanałem bliskiej podczerwieni (Chipman et al., 2009).

Algorytmy obydwu wskaźników mają następujące formuły:

$$Bow06 = \frac{k_c}{k_z}$$

$$Chip09 = \frac{k_p}{k_z}$$

, gdzie:

- k_z – kanał zielony.
- k_p – kanał bliskiej podczerwieni,
- k_c – kanał czerwony

Wykorzystanie dwóch wskaźników, bazujących na różnych relacjach może pozwolić na wykrycie większej ilości potencjalnych zmian przestrzennych czy anomalii, które byłyby niewidoczne przy wykorzystaniu jedynie jednego wskaźnika lub jednego kanału spektralnego. Wykorzystanie wskaźnika Bow06 popierane jest założeniem, że relacje między dwoma kanałami widzialnymi są mniej podatne na niepoprawne korekcje atmosferyczne (Bowers et al., 2006). Chipman et al. (2009) wskazują natomiast na zależność między

stosunkiem odbicia promieniowania elektromagnetycznego w kanałach bliskiej podczerwieni i zieleni, a stężeniem zawiesiny w zbiorniku wodnym. Dla obydwu wskaźników, wyższe wartości utożsamiane są z większym stężeniem zawiesiny i wzrostem mętności wody.

Wskaźniki spektralne zostały obliczone przy wykorzystaniu pakietu **waterquality** (Johansen et al., 2023). Pakiet ten posiada zbiór wyselekcjonowanych wskaźników spektralnych, służących do oceny jakości wód. Pakiet **waterquality** dla każdego wskaźnika zawiera informacje o: wzorze do obliczenia algorytmu, wykorzystywanych kanałach spektralnych dla poszczególnych satelitów oraz cytowanie prac naukowych, w których zaproponowano dany wskaźnik. W przypadku zdjęć satelitarnych Landsat, **waterquality** dostarcza wskaźniki jedynie dla danych z satelity Landsat 8. W ramach pracy przygotowano wzory dla zdjęć z Landsat 5 i 7.

Wszystkie rycininy w pracy zostały wygenerowane z użyciem pakietów **ggplot2** (Wickham et al., 2024) i **patchwork** (Pedersen, 2024). Niektóre z rycin, posiadające podział obserwacji na etapy prac i pory roku, mogą nie zawierać wszystkich pór roku. Wynika to z braku obserwacji w danej porze roku. Palety barw, wykorzystane na rycinach, pozyskano z pakietu **RColorBrewer** (Neuwirth, 2022). Do generowania tabel z wynikami, wykorzystano pakiety **knitr** (Xie, 2024) i **kableExtra** (Zhu, 2024).

Na średnich wartościach wskaźników przeprowadzono testy Kruskala-Wallisa. Pozwoliło to na ocenę istotności statystycznych zmian wartości pomiędzy etapami prac: przed, w trakcie i po zakończeniu tworzenia nowego lądu. Testy przeprowadzono, wykorzystując wbudowaną funkcję w **R** o nazwie **kruskal.test()**.

Rozdział 4

Obszary badań

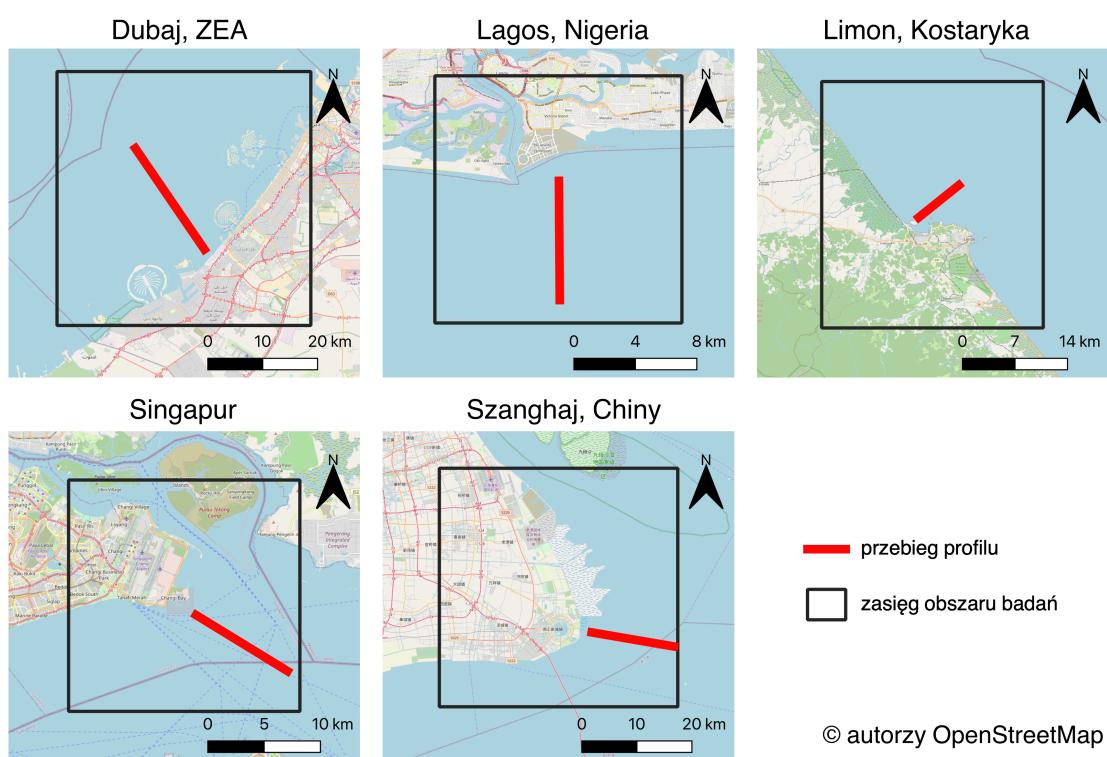
Badania przeprowadzono na pięciu obszarach, położonych na trzech kontynentach. Rycina 4.1 przedstawia położenie przestrzenne obszarów badań. Tabela 4.1 zawiera podstawowe informacje dla każdego obszaru. Obszary obejmują projekty, które prowadzono na przestrzeni 23 lat. Najwcześniejszy projekt miał miejsce w Singapurze, który rozpoczęto w 1995 roku. Najnowsze prace, w Kostaryce i Nigerii, zakończono w 2018 roku. Obszary badań różnią się także całkowitą pozyskaną powierzchnią lądową i jej wykorzystaniem. Najmniejszy teren pozyskano w Kostaryce i wykorzystano go do otworzenia terminalu kontenerowego. Projekt w Szanghaju cechował się największą pozyskaną powierzchnią lądową, którą użyto do otwarcia nowej dzielnicy miasta. Rycina 4.2 przedstawia zasięg przestrzenny każdego z obszarów badań, dla których badano zmiany jakości wód. Rycina zawiera także przebieg profili, wzduż których badano potencjalne zmiany jakości wody wraz ze zmianą głębokości.

Tabela 4.1: Podstawowe informacje o obszarach badań, okresach prowadzenia prac, wielkościach pozyskanych powierzchni i ich wykorzystaniu.

obszar badań	początek prac	zakończenie prac	nowa powierzchnia	wykorzystanie
Dubaj, ZEA	2002	2010	20 km ²	turystyka
Lagos, Nigeria	2009	2018	9 km ²	obszar mieszkalno-usługowy
Limon, Kostaryka	2015	2018	0.4 km ²	terminal kontenerowy
Singapur	1995	2003	30 km ²	lotnisko
Szanghaj, Chiny	2003	2005	296 km ²	obszar mieszkalno-usługowy



Rycina 4.1: Lokalizacja obszarów badań.



Rycina 4.2: Zasięg przestrzenny obszarów badań i przebieg profili.

4.1 Dubaj, Zjednoczone Emiraty Arabskie

Na początku XX wieku rozpoczęto konstrukcję sztucznych wysp na wybrzeżu Dubaju. Wynikało to ze wzrostu gospodarczego miasta w tym okresie (Gibling, 2013). Nowe wyspy miały pełnić funkcje turystyczne, będąc podłożem pod kompleksy hoteli, kurortów i atrakcji. Do tych wysp zaliczyć można: Palm Jebel Ali, Palm Jumeirah, The World Islands (Rycina 4.3). Łączna powierzchnia wysp wynosi 20 kilometrów kwadratowych. Mimo iż większość wysp udało się ukończyć, ich dalszy rozwój został zahamowany w 2008 roku na skutek kryzysu ekonomicznego (Gupta, 2015). W ramach pracy, badania na obszarze Dubaju przeprowadzono w okresie od 2000 do 2012 roku.



Rycina 4.3: Hotel Atlantis, jeden z atrakcji Dubaju, znajduje się na sztucznej wyspie Palm Jumeirah. (Źródło: ckilger/flickr)

4.2 Lagos, Nigeria

Lagos zmagał się z problemem wypłukiwania wybrzeża i wdzierania się Zatoki Gwinejskiej wgłąb lądu. Rozwiążaniem problemu miał być projekt Eko Atlantic, rozpoczęty w 2009 roku. Polegał on na konstrukcji nowego lądu na wybrzeżu Lagosu. Pozwoliło to na odzyskanie 9 kilometrów kwadratowych utraconej ziemi przez Nigerię, oraz jednoczesną konstrukcję pasa umocnień (Van Bentum et al., 2012). Mimo, iż konstrukcję nowego lądu dla Eko Atlantic zakończono w 2018 roku, obszar ten nie jest dalej zamieszkały. Cały czas mają miejsce prace nad budową infrastruktury, budynków mieszkalnych i innych niezbędnych obiektów do funkcjonowania Eko Atlantic. Eko Atlantic ma pełnić rolę nowego miasta oraz centrum biznesowego, w którym mogłoby mieszkać 250 tysięcy mieszkańców (Omotosho, 2013). W ramach pracy, badania na obszarze Lagos przeprowadzono od 2007 do 2020 roku (Rycina 4.4).



Rycina 4.4: Eko Atlantic w 2020 roku na tle Lagosu. (Źródło: South Energyx Nigeria Limited (SENL))

4.3 Limon, Kostaryka

Limon jest drugim największym miastem Kostaryki, pełniącym jednocześnie rolę głównego portu morskiego kraju na Oceanie Atlantyckim. Kostaryka posiada mocną pozycję na rynku eksportowym, będąc liderem na świecie w ilości eksportowanych ananasów, oraz zajmując czwarte miejsce w ilości eksportowanych bananów (Notteboom et al., 2022). W celu rozwoju gospodarki kraju i umocnienia pozycji na rynku Ameryki Łacińskiej, w 2015 roku rozpoczęto pracę nad budową nowego terminalu kontenerowego. Terminal miał powstać na nowo utworzonej sztucznej wyspie obok miasta. Prace ukończono w 2019 roku, oddając do użytku terminal kontenerowy Moin o powierzchni 0.4 kilometra kwadratowego (Rycina 4.5). W przyszłości planowane są dalsze etapy rozbudowy terminalu, pozwalające na obsługę większych kontenerowców i większej ilości towarów. Wykorzystanie nowego terenu jest przemysłowe, służące jedynie obsłudze terminalu portowego. W ramach pracy, badania na obszarze Limon przeprowadzono w okresie od 2014 do 2020 roku.



Rycina 4.5: Terminal kontenerowy Moin, Kostaryka, otwarty w 2019 roku. (Źródło: APM Terminals)

4.4 Singapur

Lotnisko Changi w Singapurze zostało otwarte w 1981 i pozwalało na obsługę 12 milionów pasażerów rocznie (Phang, 2003). W 1993 roku rozpoczęto w Singapurze Changi East Reclamation Project. Projekt ten obejmował rozbudowę lotniska Changi o dodatkowe 30 kilometrów kwadratowych powierzchni (Rycina 4.6). Nowy ląd wykorzystano do rozbudowy infrastruktury lotniska oraz do zbudowania nowych obiektów: baz powietrznych i morskich, oraz muzeum marynarki wojennej kraju (Arulrajah et al., 2009). W 2003 roku, w którym zakończono projekt, lotnisko Changi w Singapurze było w stanie obsłużyć rocznie 28 milionów pasażerów (Phang, 2003). W ramach pracy, badania na obszarze Singapuru przeprowadzono w okresie od 1991 do 2005 roku.



Rycina 4.6: Utworzony ląd w Singapurze, na którym znajdują się lotnisko Changi (lewo) i baza powietrzna Changi (prawo). (Źródło: Pulkitsangal/Wikipedia)

4.5 Szanghaj, Chiny

Szanghaj jest miastem o stale rosnącej liczbie ludności. Od 1990 do 2000 roku, populacja Szanghaju wzrosła z 8,6 do 14,2 milionów osób (DESA, [n.d.](#)). W celu zapewnienia miejsca zamieszkania dla stale przybywającej ludności, rozpoczęto pracę nad rozbudową istniejących dzielnic Szanghaju. Jednym z takich projektów było stworzenie Nanhui New City, nowej dzielnicy Szanghaju w jej wschodniej części, nad zatoką Hangzhou. Założeniem dzielnicy było stworzenie ośrodka, które nie będzie jedynie częścią Szanghaju, a nowoczesnym miastem nadmorskim (Shi et al., [2016](#)). Prace nad konstrukcją Nanhui New City rozpoczęto w 2003 roku, planując zakończenie w 2020 roku. Celem lokalnego rządu było stworzenie dzielnicy o powierzchni 296 kilometrów kwadratowych, którą po zakończeniu prac mogłoby zamieszkiwać 800 tysięcy osób (Rycina 4.7). Mimo, iż prace w Nanhui New City trwały do 2020 roku, nowy ląd został zbudowany już w 2006 roku, a w 2010 roku dzielnicę zamieszkiwało blisko 200 tysięcy osób (Shi et al., [2016](#)). W ramach



Rycina 4.7: Nanhui New City od strony zatoki Hangzhou, rok 2018. źródło: MNXANL/Wikipedia

pracy, badania na obszarze Szanghaju przeprowadzono w zakresie czasowym od 2000 do 2009 roku.

Rozdział 5

Materiały

Do oceny stanu jakości wód, wykorzystano dane teledetekcyjne w postaci obrazów satelitarnych. Tabela 5.1 zawiera szczegóły odnośnie pozyskanych zdjęć. Wszystkie obrazy pochodzą z drugiego poziomu programu Landsat Collection 2. W zależności od lat prowadzonych badań, zdjęcia pochodzą z satelit Landsat 5, 7 lub 8. Obrazy pozyskano z katalogu Planetary Computer od firmy Microsoft (Source et al., [2022](#)). Wszystkie zdjęcia mają rozdzielcość przestrzenną 30 metrów.

Z pozyskanych zdjęć satelitarnych, do obliczenia wskaźników spektralnych, wykorzystano kanały widzialne (czerwony, zielony, niebieski) i bliskiej podczerwieni. Wykorzystany został również kanał oceny jakości poszczególnych pikseli do wyboru jedynie obszarów zaklasyfikowanych jako zbiorniki wodne bez pokrycia chmurami.

Tabela 5.1 zawiera również informacje o liczbie dostępnych zdjęć dla obszarów badań, pozyskanych z Planetary Computer. W przypadku Dubaju, Lagosu oraz Szanghaju, obszary badań były wystarczająco duże, że ich obszar dla pojedynczych dni pokrywały dwa zdjęcia satelitarne. Spowodowało to wzrost ilości dostępnych obrazów dla tych obszarów. Dla Dubaju i Lagosu jednak, dwa zdjęcia dla tych samych dni pokrywały się tak mocno, że dodatkowy obraz nie dostarczał nowych informacji do obszaru badań. Ze wszystkich dostępnych zdjęć dla badanych obszarów wybrano jedynie te, dla których procentowy udział ilości pikseli bez wartości w całym obrazie nie przekroczył wartości progowej. Wartość progowa zmieniała się dla każdego z obszarów, w zależności od ilości

Tabela 5.1: Informacje o wykorzystanych danych oraz długości profilu. W tabeli podano lata, dla których pozyskano obrazy satelitarne. Zawarto także ilość dostępnych zdjęć, oraz ile z nich zostało wykorzystane w badaniach. Umieszczono również informacje o rodzaju satelity, które wykonały zdjęcia. W tabeli zawarto również długość profilu w metrach, wzduż którego próbkiowano wartości wskaźników spektralnych oraz głębokości zbiornika.

obszar badań	satelita	okres badań	liczba dostępnych zdjęć	liczba wybranych zdjęć	długość profilu
Dubaj, ZEA	Landsat 7	2002 - 2012	410	45	22149 m
Lagos, Nigeria	Landsat 7 i 8	2007 - 2020	465	51	7654 m
Limon, Kostaryka	Landsat 8	2014 - 2020	316	27	6853 m
Singapur	Landsat 5 i 7	1993 - 2005	337	46	9479 m
Szanghaj, Chiny	Landsat 7	2000 - 2008	759	39	15134 m

obszarów lądowych znajdujących się w obszarze badań. Piksele klasyfikowane jako ląd były wykluczane z analizy, w wyniku czego przy dużym udziale lądu należało zwiększyć wartość progową braku wartości. Oprócz lądów, chmury również wpływały na brak wartości na obrazie satelitarnym. Przy dużym zachmurzeniu, liczba dostępnych pikseli dla zbiorników wodnych malała, co skutkowało zmniejszeniem przydatności takiego zdjęcia do badań.

Oprócz zdjęć satelitarnych, w pracy wykorzystano również dane o głębokości zbiorników wodnych ze zbioru GEBCO_2023 Grid (GEBCO Bathymetric Compilation Group 2023, 2023). Każda komórka rastra zawiera informacje o głębokości w metrach. Dane o batymetrii zostały wykorzystane do zbadania zmian wartości wskaźników jakości wód wzduż profilów, biegących od nowych lądów wgłęb zbiorników wodnych. Pozwoliło to na ocenę zmiany jakości wód wraz ze zwiększaniem odległości od lądu oraz wraz ze zwiększaniem głębokości.

Rozdział 6

Wyniki

Rozdział ten poświęcony jest analizie wartości wskaźników spektralnych i próbie odpowiedzi na pytanie, czy tworzenie nowych lądów wpływa na jakość wód? Wskaźniki spektralne zostały obliczone dla każdego obrazu satelitarnego, wybranego według podanego kryterium (Rozdział 3 zawiera dokładny opis tego procesu). Obserwacja zmian stanu jakości wód polegała na zestawieniu wartości poszczególnych wskaźników z okresu trwania prac nad tworzeniem nowych lądów, z wartościami tych samych wskaźników przed rozpoczęciem prac. Dodatkowo, wartości wskaźników obliczonych na obrazach z etapu trwania prac i przed ich rozpoczęciem zestawiono także z obrazami wykonanymi po zakończeniu prac, w celu obserwacji możliwych długofalowych efektów tworzenia nowych lądów na stan jakości wód. Rozdział ten podzielony jest na podrozdziały, poświęcone każdemu obszarowi badań z osobna.

Wzrost wartości wszystkich wskaźników interpretowany jest jako wzrost intensywności obserwowanego zjawiska. Oznacza to, że wzrost wartości wskaźników Bow06 i Chip09 jest interpretowany jako wzrost stężenia zawiesiny w wodzie. Wzrost stężenia zawiesiny wskazuje na zwiększenie mętności wody. Zjawisko te interpretowane jest jako negatywne, pogarszające stan jakości wód.

W przypadku chlorofilu a, w pracy nie zawarto opinii o negatywnym czy pozytywnym wpływie zmian tego parametru na jakość wód. Zarówno wzrost stężenia chlorofilu a jak i jego spadek może być utożsamiany z pogorszeniem stanu wód (Dembowska, 2021).

Wzrost stężenia chlorofilu a wskazuje na wzrost biomasy fitoplanktonu, co prowadzi do przekwitu glonów. Odnotowanie spadku stężenia chlorofilu a może świadczyć o zaniku fitoplanktonu, co prowadzi do ograniczenia dostępności pokarmu dla organizmów wodnych. W pracy skupiono się na obserwacji zmian stężenia chlorofilu a między etapami prac. Wielkość tych zmian może być sygnałem potencjalnego wpływu tworzenia nowych lądów na stan jakości wód.

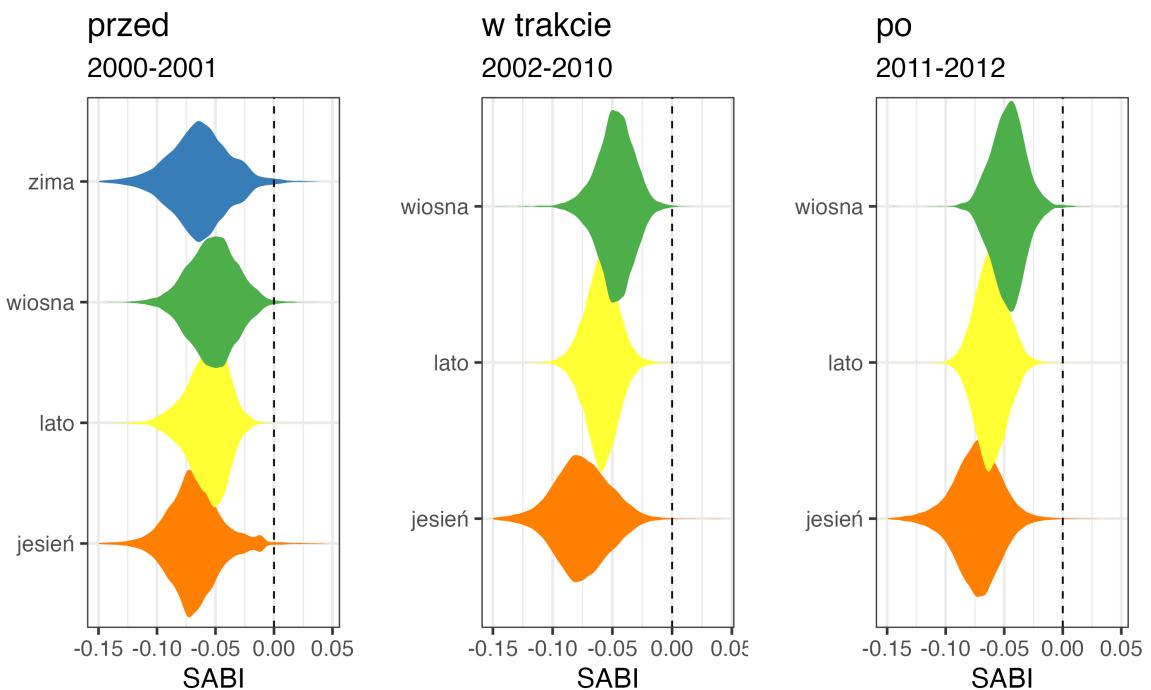
Podrozdziały zawierają wybrane ryciny, przedstawiające wpływ procesów tworzenia nowych lądów na jakość wód. Pozostałe ryciny, utworzone w ramach pracy, zostały umieszczone w rozdziale z załącznikami.

6.1 Dubaj, Zjednoczone Emiraty Arabskie

Obserwując zmiany wartości parametrów jakości wody, odnotowano wpływ tworzenia nowych lądów na jakość wód w Dubaju. Tabela 6.1 przedstawia średnie wartości poszczególnych wskaźników dla każdego z etapów pracy. Średnia wartość wskaźnika SABI była niższa w etapie trwania prac niż w okresie przed rozpoczęciem prac. Wskazuje to na zmniejszenie stężenia chlorofilu a na obszarze badań po rozpoczęciu prac. Drugi wskaźnik wykrywający chlorofil a, FLH Blue, odnotował natomiast wzrost średnich wartości po rozpoczęciu prac. Średnie wartości wskaźnika SABI po zakończeniu prac były jeszcze niższe niż podczas trwania prac. Może to świadczyć o długofalowych skutkach konstrukcji nowych lądów na jakość wód. Biorąc pod uwagę przeznaczenie nowego lądu,

Tabela 6.1: Średnie wartości wskaźników jakości wody dla Dubaju z podziałem na dwie grupy parametrów jakości wód (chlorofil a i zawiesina) oraz na trzy etapy prac (przed, w trakcie i po zakończeniu). W tabeli zawarto również p-value z testu Kruskala-Wallisa, sprawdzającego istotność statystyczną zmian średnich wartości wskaźników między etapami prac.

	przed (2000-2001)	w trakcie (2002-2010)	po (2011-2012)	p-value
chlorofil a				
SABI	-0.059	-0.061	-0.067	0.098
FLH Blue	0.006	0.007	0.007	0.106
zawiesina				
Bow06	0.705	0.764	0.712	0.153
Chip09	0.577	0.635	0.568	0.170

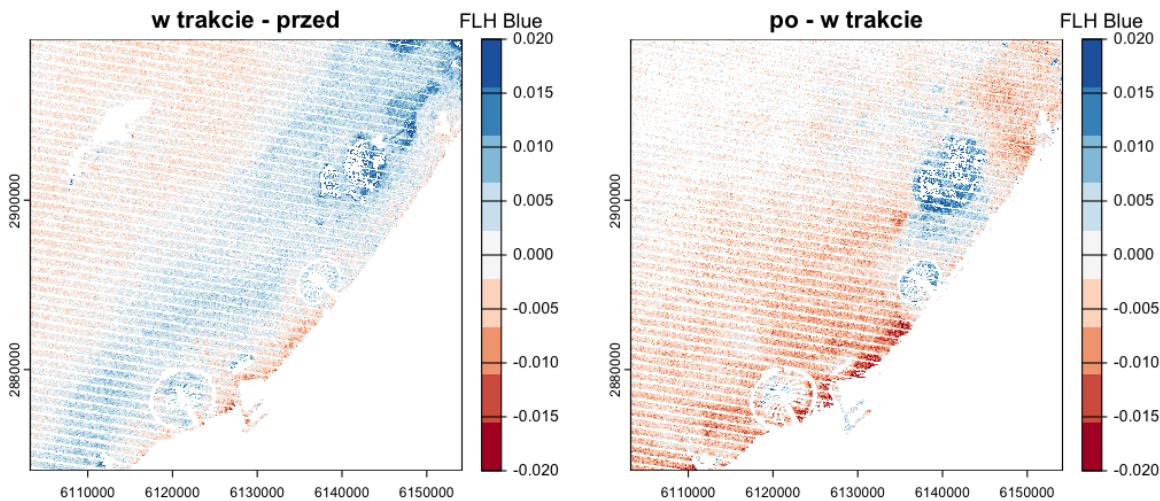


Rycina 6.1: Rozkład stężeń chlorofilu a dla Dubaju na przykładzie wskaźnika SABI, z podziałem na trzy etapy prac: przed rozpoczęciem, w trakcie i po zakończeniu prac, oraz na cztery pory roku.

można przypuszczać o wpływie ruchu turystycznego na dalszą degradację pobliskich wód.

Obydwa wskaźniki wykrywające zawiesinę w wodzie wskazują na wzrost stężenia zawesiny podczas trwania prac tworzenia nowego lądu, w porównaniu do stanu przed rozpoczęciem budowy. Proces tworzenia nowych lądów w Dubaju poskutkował zwiększeniem mętności wody i pogorszeniem stanu jakości pobliskich wód. Po zakończeniu prac, średnie wartości wskaźników badających występowanie zawesiny zmalały do poziomu bliskiemu stanu przed rozpoczęciem prac.

Oprócz zmian średnich wartości parametrów jakości wód, zmianom uległy również rozkłady wartości. Rycina 6.1 przedstawia rozkłady wartości chlorofilu a w wodzie, bazując na wskaźniku SABI. Wskaźniki obliczone podczas trwania prac wykazują mniejsze rozproszenie wokół średniej niż wskaźniki obliczone przed rozpoczęciem prac. Jest to widoczne szczególnie na wskaźnikach obliczonych przy pomocy zdjęć, pochodzących z letniego sezonu. Oznacza to, że proces tworzenia nowych lądów wpłynął na jakość

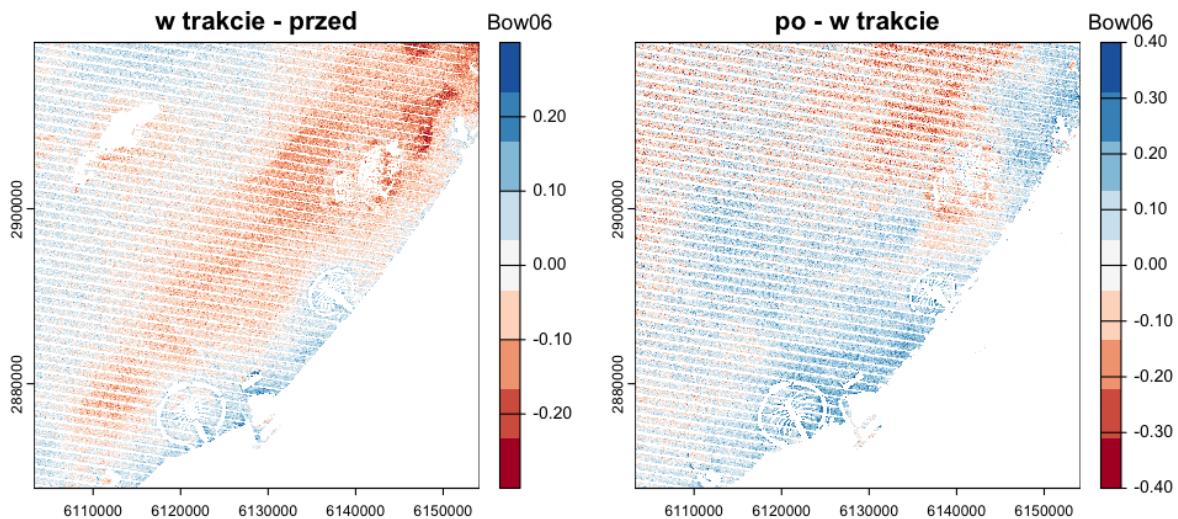


Rycina 6.2: Mapy różnic występowania chlorofilu a dla Dubaju, z wykorzystaniem wskaźnika FLH Blue. Rycina po lewej przedstawia różnice między wskaźnikami, obliczonymi w trakcie trwania i przed rozpoczęciem prac (sierpień 2007 i 2000). Rycina po prawej przedstawia różnice między wskaźnikami, obliczonymi po zakończeniu prac i w trakcie ich trwania (listopad 2011 i 2002).

wód i sprawił, że na obszarze badań w Dubaju stężenie chlorofilu a stało się bardziej jednorodne. Przy jednoczesnym spadku stężenia chlorofilu a wskazuje to na wpływ procesów lądotwórczych na jakość wód, przez które chlorofil a w wodzie jest mniej na całym obszarze badań, a nie jedynie przy nowym terenie lądowym.

Rycina 6.2 ukazuje zmiany w występowaniu chlorofilu a między wybranymi etapami prac. Lewa rycina przedstawia różnice wartości między wskaźnikami obliczonymi w trakcie prowadzenia prac a wskaźnikami obliczonymi przed rozpoczęciem prac. Wartości dodatnie świadczą o wzroście ilości chlorofilu a podczas trwania prac w porównaniu do stanu przed rozpoczęciem, a wartości ujemne wskazują na spadek ilości chlorofilu a wraz z rozpoczęciem prac. Na mapie widoczny jest spadek stężenia chlorofilu a na południu obszaru badań, czyli tuż przy wybrzeżu i nowym lądzie. Rycina po prawej stronie przedstawia różnice między stężeniem chlorofilu a po zakończeniu prac a stężeniem wykrytym w trakcie. Większość obszaru badań wskazuje na ujemne wartości, co oznacza spadek stężenia chlorofilu a po zakończeniu prac.

Rycina 6.3 bada podobne różnice między wybranymi etapami prac, jednak pod kątem obecności zawiesiny w wodzie. Lewa mapa wskazuje na najwyższy wzrost mątności wody przy wybrzeżu, w miejscu prowadzenia prac. Oznacza to, że konstrukcja nowych



Rycina 6.3: Mapy różnic występowania zawiesiny dla Dubaju, z wykorzystaniem wskaźnika Bow06. Rycina po lewej przedstawia różnice między wskaźnikami, obliczonymi w trakcie trwania i przed rozpoczęciem prac (sierpień 2007 i 2000). Rycina po prawej przedstawia różnice między wskaźnikami, obliczonymi po zakończeniu prac i w trakcie ich trwania (listopad 2011 i 2002).

lądów przyczyniła się do zwiększenia mątności wody przy wybrzeżu Dubaju. Stężenie zawiesiny spadło natomiast wraz z oddalaniem się od wybrzeża. Dla drugiej mapy, obszar wzrostu stężenia zawiesiny poszerzył się, w porównaniu do pierwszej rycin. Świadczy to o negatywnym skutku tworzenia nowych lądu, który spowodował spadek jakości wody na większym obszarze niż prowadzono prace.

Zmiany średnich wartości chlorofilu a w Dubaju były najmniejsze spośród wszystkich obszarów badań, co może zostać odebrane jako niski wpływ tworzenia nowego lądu na stan jakości wód. Odnotowane zostały natomiast zmiany w rozkładzie wartości stężeń chlorofilu a. Podczas trwania prac, wartości stężenia chlorofilu a były bardziej jednorodne niż przed rozpoczęciem konstrukcji nowego lądu. Zauważono również największy spadek stężenia chlorofilu a w pobliżu miejsca tworzenia nowego lądu, w porównaniu do pozostałego obszaru badań. Dodatkowo, zaobserwowano zwiększenie stężenia zawiesiny w wodzie podczas etapu konstrukcji lądu względem stanu przed pracami. Wzrost mątności wody mógł wpływać negatywnie na stan jakości wód w Dubaju. Proces konstrukcji nowego lądu albo jego forma użytkowania mogły przyczynić się do dalszej degradacji jakości wód w Dubaju. Potwierdzenie ciągłej degradacji wymagałoby dalszej obserwacji zmian

parametrów jakości wód po zakończeniu prac. Zmiany średnich wartości wskaźników między etapami prac nie wykazały istotności statystycznej.

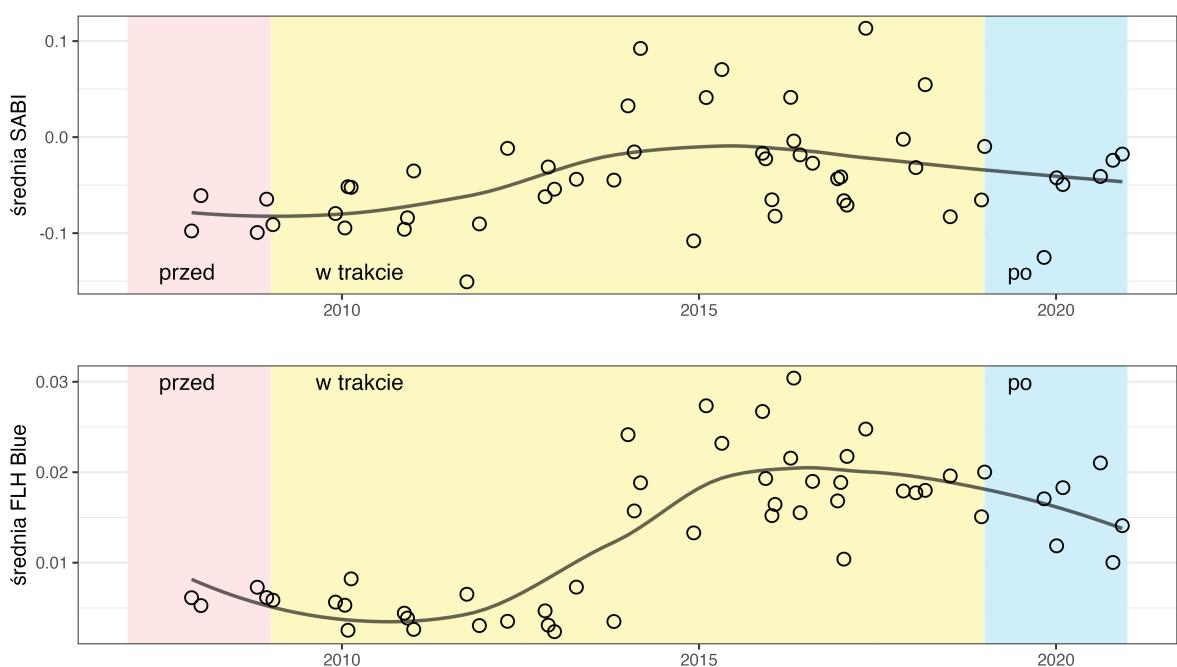
6.2 Lagos, Nigeria

Tabela 6.2 zawiera informacje o średnich wartościach wskaźników opisujących jakość wód w Lagos. Zauważalny jest wpływ procesów tworzenia nowych lądów na stan jakości wód. Stężenie chlorofilu a na obszarze badań w Lagos było wyższe podczas prowadzenia prac, niż przed ich rozpoczęciem. Po rozpoczęciu prac, zanotowano wzrost stężenia chlorofilu a w porównaniu do stężenia chlorofilu a przed rozpoczęciem konstrukcji. Obserwując zmiany mętności wody, ilość zawiesiny w trakcie konstrukcji lądu zmalała, w porównaniu do stanu przed prowadzeniem prac. Dodatkowo, po zakończeniu prac stężenie zawiesiny kontynuowało spadek, a ilość chlorofilu a w wodzie zmniejszyła się (w przypadku wskaźnika FLH Blue).

Rycina 6.4 przedstawia zmiany średnich wartości wskaźników badających występowanie chlorofilu a wraz z upływem czasu. Wskaźniki różnią się dynamiką zmian stężenia chlorofilu a w Lagos. Wskaźnik SABI odnotował stały wzrost stężenia chlorofilu a od początku rozpoczęcia prac do 2016 roku. Po tym roku, ilość chlorofilu a w wodzie nieznacznie zmalała do poziomu, który utrzymał się po zakończeniu prac. Wskaźnik FLH Blue przedstawia bardziej gwałtowną zmianę stężenia. Ilość chlorofilu a w zbiorniku wodnym była stale niska od rozpoczęcia prac do połowy okresu trwania konstrukcji. Pod koniec 2013

Tabela 6.2: Średnie wartości wskaźników jakości wody dla Lagos z podziałem na dwie grupy parametrów jakości wód (chlorofil a i zawiesina) oraz na trzy etapy prac (przed, w trakcie i po zakończeniu). W tabeli zawarto również p-value z testu Kruskala-Wallisa, sprawdzającego istotność statystyczną zmian średnich wartości wskaźników między etapami prac.

	przed (2007-2008)	w trakcie (2009-2018)	po (2019-2020)	p-value
chlorofil a				
SABI	-0.081	-0.035	-0.044	0.132
FLH Blue	0.006	0.014	0.016	0.199
zawiesina				
Bow06	0.836	0.694	0.560	0.169
Chip09	0.665	0.631	0.509	0.582

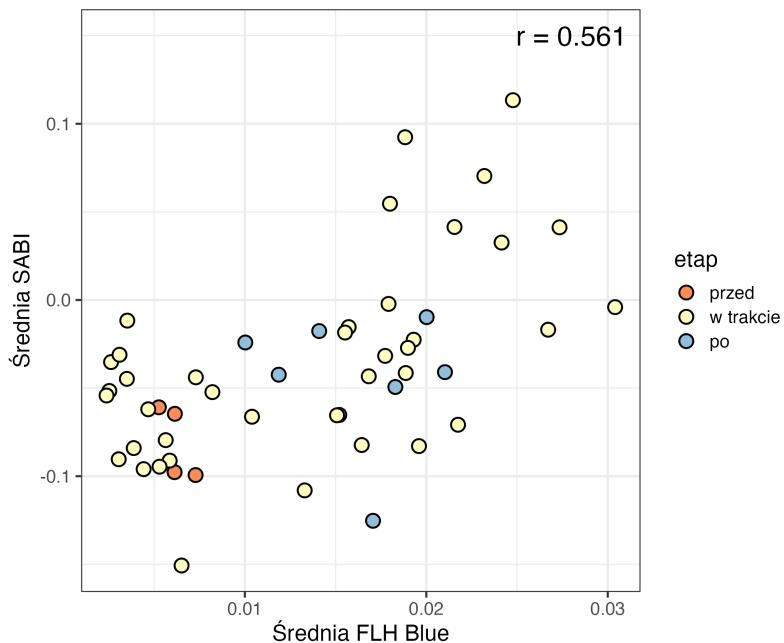


Rycina 6.4: Rozkład średnich wartości stężenia chlorofilu a dla Lagos. Każda kropka reprezentuje pojedynczy obraz satelitarny, dla którego obliczono wskaźniki. Obserwacje podzielono ze względu na etap prowadzonych prac: przed, w trakcie i po zakończeniu. Czarna linia jest wygładzoną linią trendów.

roku stężenie chlorofilu a drastycznie wzrosło. Wzrost ten pokrywa się z momentem zwiększenia intensywności prac, podczas których utworzono większość lądu. Wysoki poziom chlorofilu a utrzymywał się do 2016 roku, po którym zaczął stopniowo maleć również w etapie po zakończeniu prac.

Same średnie wartości dla obydwu wskaźników chlorofilu a wykazały dodatnią korelację (Rycina 6.5). Wraz ze wzrostem stężenia chlorofilu a według wskaźnika SABI, wzrastało stężenie chlorofilu a obliczonego przez wskaźnik FLH Blue. Oznacza to, że obydwa wskaźniki są spójne w ocenie stężenia chlorofilu a dla obszaru badań w Lagos.

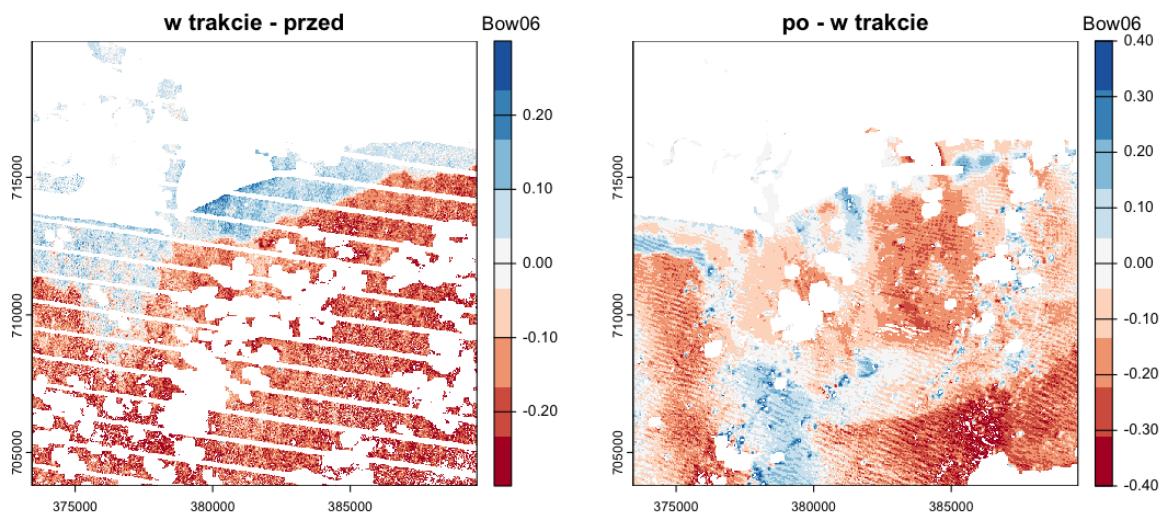
Rycina 6.6 przedstawia zmiany w rozkładzie przestrzennym zawiesiny w wodzie w Lagos. Lewa rycina przedstawia, w jaki sposób zmieniła się mętność wody podczas prowadzenia prac w porównaniu do etapu przed rozpoczęciem prac. Dodatnie wartości znajdują się na północy obszaru, czyli przy wybrzeżu i miejscu konstrukcji nowego lądu. Oznacza to, że w wyniku prowadzenia prac nad stworzeniem nowego lądu, mętność wody wzrosła przy wybrzeżu, co jest równoznaczne z obniżeniem jakości wód dla tego obszaru. W wodach



Rycina 6.5: Korelacja między średnimi wartościami wskaźników SABI i FLH Blue dla Lagos. Każda kropka reprezentuje pojedynczy obraz satelitarny, dla którego obliczono wskaźniki. Obserwacje podzielono ze względu na etap prowadzonych prac: przed, w trakcie i po zakończeniu.

położonych dalej od wybrzeża, stężenie zawiesiny było niższe niż przed rozpoczęciem pracy. Prawa rycina zestawia stężenie zawiesiny po zakończeniu prac z okresem ich prowadzenia. Dla obszaru badań w Lagos przeważają ujemne wartości, co oznacza zmniejszenie mątności wody po skończeniu konstrukcji lądu.

Zmiany stężenia chlorofilu a w Lagos były znacznie większe, w porównaniu do zmian w Dubaju. Najwyższe stężenia chlorofili a zostały odnotowane w trakcie prowadzenia prac konstrukcyjnych. Nie wykazano jednak istotności statystycznej zmian wartości wskaźników między etapami prac. Stężenie zawiesiny w wodzie w trakcie budowy lądu było mniejsze niż przed rozpoczęciem prac, i stale malało po zakończeniu prac. Podczas trwania prac, największa degradacja wody w postaci zwiększenia mątności miała miejsce tuż przy wybrzeżu, w pobliżu konstrukcji nowego lądu. Pozostały obszar był jednak niedotknięty pogorszeniem stanu wód. Raport Ltd (2012), odnośnie konstrukcji Eko Atlantic, uwzględnił możliwość degradacji jakości wód, między innymi w wyniku zwiększenia stężenia zawiesiny. W ramach pracy zaobserwowano jednak odwrotną właściwość, gdzie po rozpoczęciu prac stężenie zawiesiny w wodzie zmalało.



Rycina 6.6: Mapy różnic występowania zawiesiny dla Lagos, z wykorzystaniem wskaźnika Bow06.

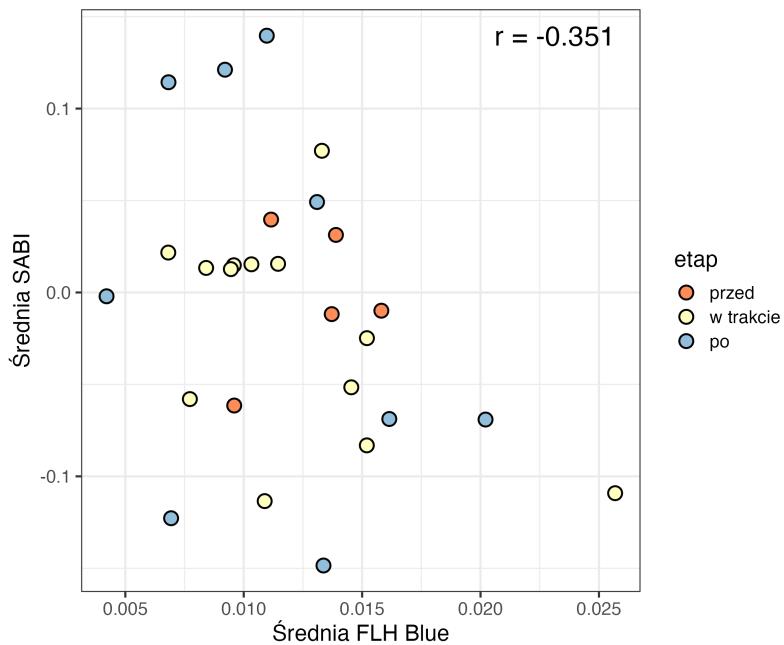
Rycina po lewej przedstawia różnice między wskaźnikami, obliczonymi w trakcie trwania i przed rozpoczęciem prac (grudzień 2015 i 2008). Rycina po prawej przedstawia różnice między wskaźnikami, obliczonymi po zakończeniu prac i w trakcie ich trwania (sierpień 2020 i 2016).

6.3 Limon, Kostaryka

Tabela 6.3 zawiera informacje o średnich wartościach parametrów jakości wód dla Limon. Stężenie chlorofilu a po rozpoczęciu prac zmniejszyło się. Po zakończeniu prac, wskaźnik SABI wykazał wzrost chlorofilu a do najwyższych wartości spośród wszystkich etapów. Wskaźnik FLH Blue od rozpoczęcia prac odnotował ciągły spadek stężenia chlorofilu a w wodzie. W przypadku mętności wody, rozpoczęcie prac nad nowym lądem zwiększyło stężenie zawiesiny w wodzie. Według wskaźnika Bow06, po zakończeniu prac mętność

Tabela 6.3: Średnie wartości wskaźników jakości wody dla Limon, z podziałem na dwie grupy parametrów jakości wód (chlorofil a i zawiesina) oraz na trzy etapy prac (przed, w trakcie i po zakończeniu). W tabeli zawarto również p-value z testu Kruskala-Wallisa, sprawdzającego istotność statystyczną zmian średnich wartości wskaźników między etapami prac.

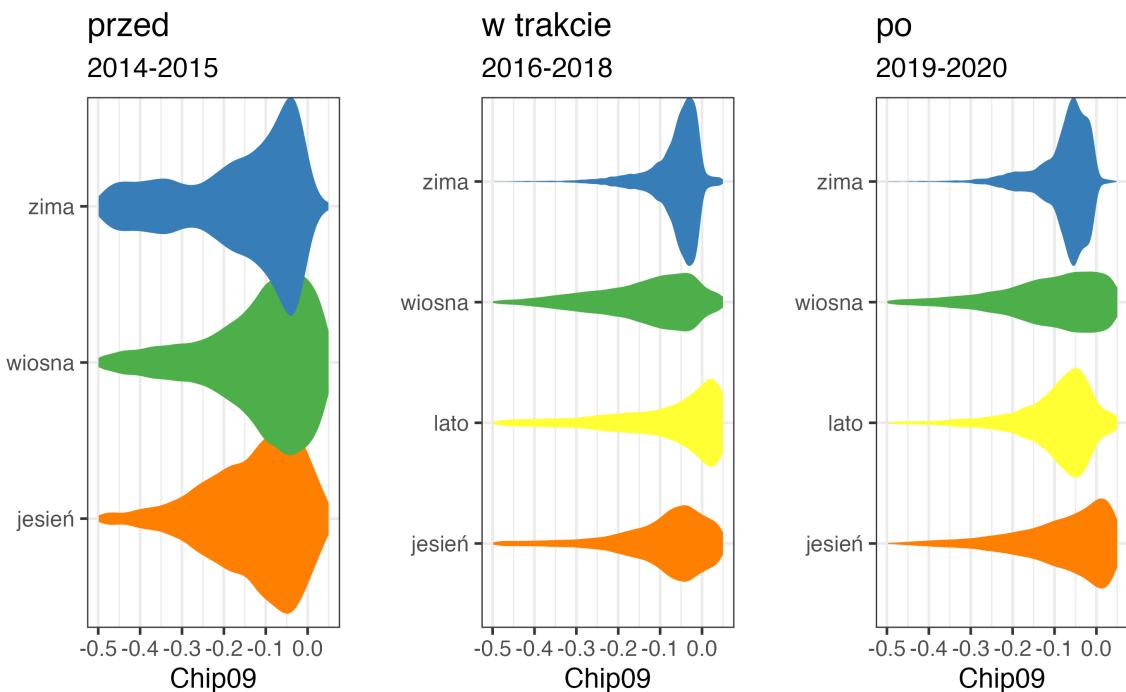
	przed (2014-2015)	w trakcie (2016-2018)	po (2019-2020)	p-value
chlorofil a				
SABI	-0.002	-0.021	0.001	0.858
FLH Blue	0.013	0.012	0.011	0.539
zawiesina				
Bow06	-0.134	-0.103	-0.120	0.542
Chip09	-0.141	-0.110	-0.103	0.637



Rycina 6.7: Korelacja między średnimi wartościami wskaźników badających stężenie chlorofilu a dla Limon. Każda kropka reprezentuje pojedynczy obraz satelitarny, dla którego obliczono wskaźniki. Obserwacje podzielono ze względu na etap prowadzonych prac: przed, w trakcie i po zakończeniu.

wody ponownie zmniejszyła się. Chip09 wykazuje natomiast dalszą degradację jakości wód.

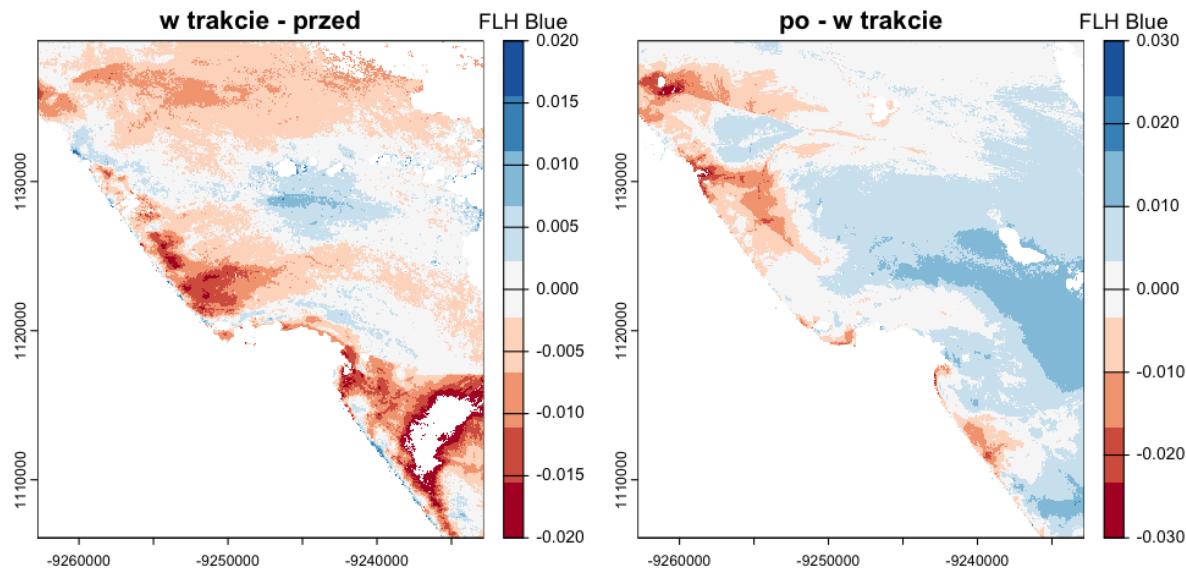
Rycina 6.7 przedstawia korelację między wartościami wskaźników badających stężenia chlorofilu a. W przeciwieństwie do korelacji wskaźników chlorofilu a w Lagos, w Limon odnotowano ujemną korelację. Jest ona równocześnie słabsza. Wykazuje ona zależność, według której wraz ze wzrostem odnotowanego stężenia chlorofilu a przez wskaźnik SABI, maleje stężenie chlorofilu a według wskaźnika FLH Blue. Tabela 6.3 pokazuje zależność, gdzie obydwa wskaźniki wykazują przeciwnie trendy zmian stężenia chlorofilu a. Różnica w zmianach między dwoma wskaźnikami może wynikać z formuł obydwu wskaźników. Wskaźnik SABI jest stosunkiem między kanałami barw widzialnych i bliskiej podczerwieni. Wzór wskaźnika FLH Blue jest natomiast różnicą między kanałami widzialnymi. Wykorzystanie kanału bliskiej podczerwieni SABI mogło mieć wpływ na różnice w zmianach wartości chlorofilu a według tego wskaźnika, a zmianami wskaźnika FLH Blue.



Rycina 6.8: Rozkład wartości stężenia zawiesiny dla Limon na przykładzie wskaźnika Chip09, z podziałem na trzy etapy prac: przed rozpoczęciem, w trakcie i po zakończeniu prac, oraz na cztery pory roku.

Rycina 6.8 obrazuje różnice w rozkładach stężenia zawiesiny, w zależności od etapu prac i pory roku. Wartości z etapu trwania konstrukcji lądu cechują się większą jednorodnością, w porównaniu do rozkładu wartości z etapu przed rozpoczęciem prac. Większość wartości stężenia zawiesiny podczas trwania prac skupiona była wokół najwyższych wartości. Oznacza to, że konstrukcja nowych lądów zmniejszyła różnorodność stężenia zawiesiny na obszarze badań w Limon, grupując wartości wokół średniej, wyższej niż przed rozpoczęciem prac. Rozkład wartości po zakończeniu prac jest podobny do tego z okresu trwania prac. Można wnioskować, że konstrukcja lądów zaburzyła rozkład stężenia zawiesiny w skali badanego zakresu czasowego, ograniczając stężenia zawiesiny do wartości zbliżonych do średniej.

Rycina 6.9 przedstawia różnice w stężeniach chlorofilu a dla poszczególnych etapów prac. Lewa rycina skupia się na obserwacji zmian stężenia chlorofilu a w wodzie po rozpoczęciu prac, w porównaniu do stanu przed. Wartości ujemne, tożsame ze spadkiem stężenia chlorofilu a, dominują w pasie biegącym od północnego zachodu do południowego wschodu. Pokrywa się on z pasem wybrzeża Limon. Taki sam trend zaobserwowano



Rycina 6.9: Mapy różnic stężeń chlorofilu a dla Limon, z wykorzystaniem wskaźnika FLH Blue.

Rycina po lewej przedstawia różnice między wskaźnikami, obliczonymi w trakcie trwania i przed rozpoczęciem prac (maj 2018 i 2014). Rycina po prawej przedstawia różnice między wskaźnikami, obliczonymi po zakończeniu prac i w trakcie ich trwania (grudzień 2020 i 2016).

na prawej rycinie, porównującą stan wód po zakończeniu prac. Ujemne wartości na tej rycinie wskazują, że stężenie chlorofilu a było jeszcze mniejsze niż w trakcie konstrukcji lądów. Zbiorniki wodne położone dalej od wybrzeża zanotowały wzrost stężenia chlorofilu a.

Na obszarze badań w Limon odnotowano największą zmianę stężeń chlorofilu a po rozpoczęciu prac konstrukcji nowego lądu. Jednocześnie, testy wykazują najmniejszą istotność statystyczną spośród wszystkich obszarów badań. Wynika to z liczby wykorzystanych danych, która dla Limon była najmniejsza spośród wszystkich obszarów badań. Potwierdzenie istotności zmian jakości wód między etapami prac wymaga pozyskania większej liczby danych. W trakcie trwania prac, stężenie zawiesiny również było największe. Zmiany obydwu parametrów sygnalizują o znaczącym wpływie konstrukcji nowych lądów na jakość wód w Limon.

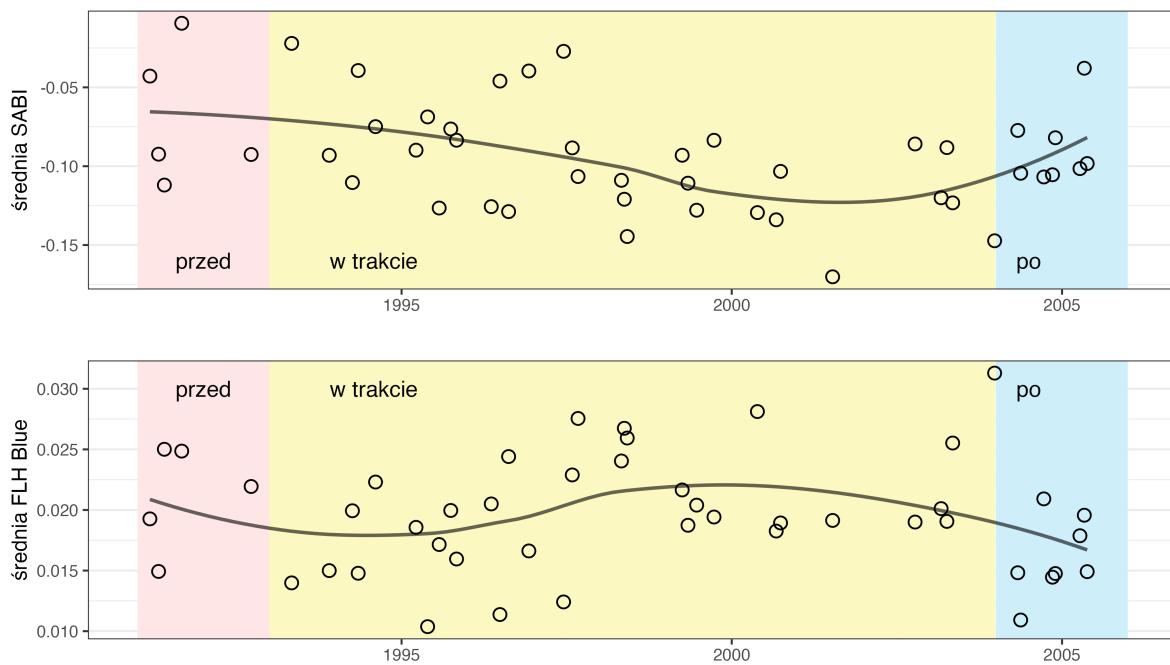
Tabela 6.4: Średnie wartości wskaźników jakości wody dla Singapuru z podziałem na dwie grupy parametrów jakości wód (chlorofil a i zawiesina) oraz na trzy etapy prac (przed, w trakcie i po zakończeniu). W tabeli zawarto również p-value z testu Kruskala-Wallisa, sprawdzającego istotność statystyczną zmian średnich wartości wskaźników między etapami prac.

	przed (1991-1992)	w trakcie (1993-2003)	po (2004-2005)	p-value
chlorofil a				
SABI	-0.070	-0.098	-0.089	0.309
FLH Blue	0.021	0.020	0.016	0.053
zawiesina				
Bow06	0.553	0.532	0.475	0.202
Chip09	0.410	0.334	0.290	0.432

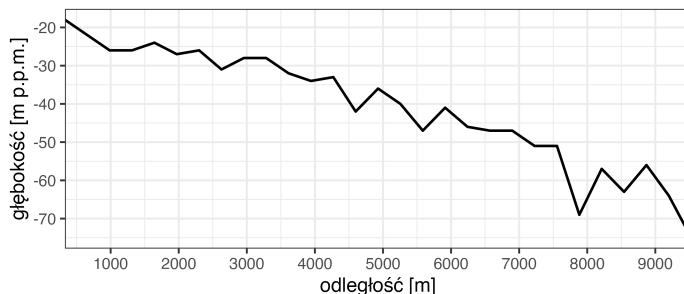
6.4 Singapur

Tabela 6.4 wskazuje na zmiany wartości parametrów jakości wód w trakcie trwania prac tworzenia nowych lądów. Wskaźniki badające wartości stężenia chlorofili a wykryły spadek wartości w etapie prowadzenia prac, porównując je do stanu przed rozpoczęciem prac. Wskaźniki spektralne różnią się od siebie natomiast średnimi wartościami chlorofili a po zakończeniu prac. Według SABI, stężenie chlorofili a wzrosło po zakończeniu konstrukcji nowych lądów. Wskaźnik FLH Blue wskazuje natomiast na kontynuację zaniku chlorofili a, rozpoczętą w etapie prowadzenia prac. Stężenie zawiesiny w wodzie dla obszaru badań w Singapurze uległo zmniejszeniu wraz z upływem lat. Dla obydwu wskaźników, średnie wartości zawiesiny były najwyższe przed rozpoczęciem prac, a najniższe – po ich zakończeniu. Wskazuje to na potencjalny wpływ konstrukcji nowych lądów na zmniejszenie mętności wody.

Rycina 6.10 przedstawia zmiany średnich wartości stężeń chlorofili a w Singapurze. Największe spadki średnich wartości stężenia chlorofili odnotowano podczas prowadzenia prac konstrukcyjnych. Dodatkowo, widoczne są różnice między wskaźnikami w zmianach średnich wartości w czasie. SABI przedstawia trend zmniejszania się stężenia chlorofili a w wodzie przez większość okresu trwania prac. Wskaźnik FLH Blue natomiast przez pierwszą połowę etapu konstrukcji lądu odnotowywał wzrost stężenia chlorofili a. W 1997 roku stężenie chlorofili a zaczęło maleć aż do momentu zakończenia prac, gdzie osiągnęło najniższy poziom.

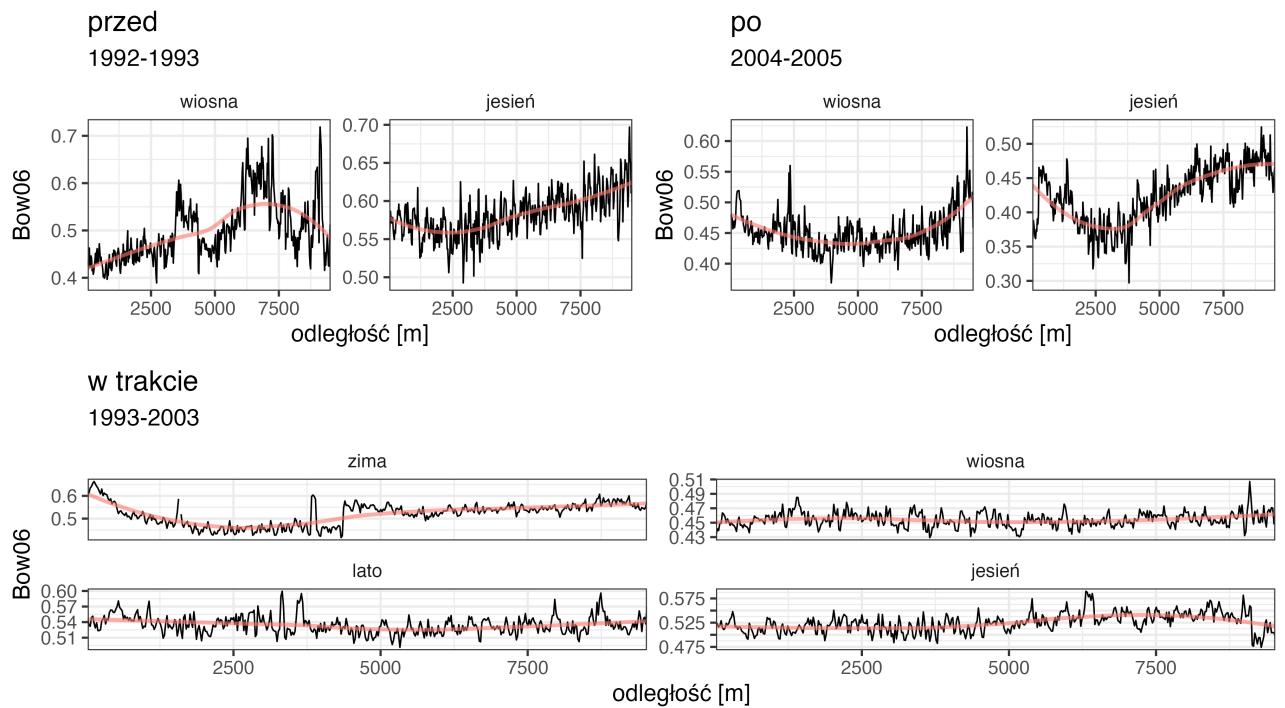


Rycina 6.10: Rozkład średnich wartości stężenia chlorofilu a dla Singapuru. Każda kropka reprezentuje pojedynczy obraz satelitarny, dla którego obliczono wskaźniki. Obserwacje podzielono ze względu na etap prowadzonych prac: przed, w trakcie i po zakończeniu. Czarna linia jest wygładzoną linią trendów.



Rycina 6.11: Zmiany głębokości zbiornika wodnego wzduż profilu dla Singapuru.

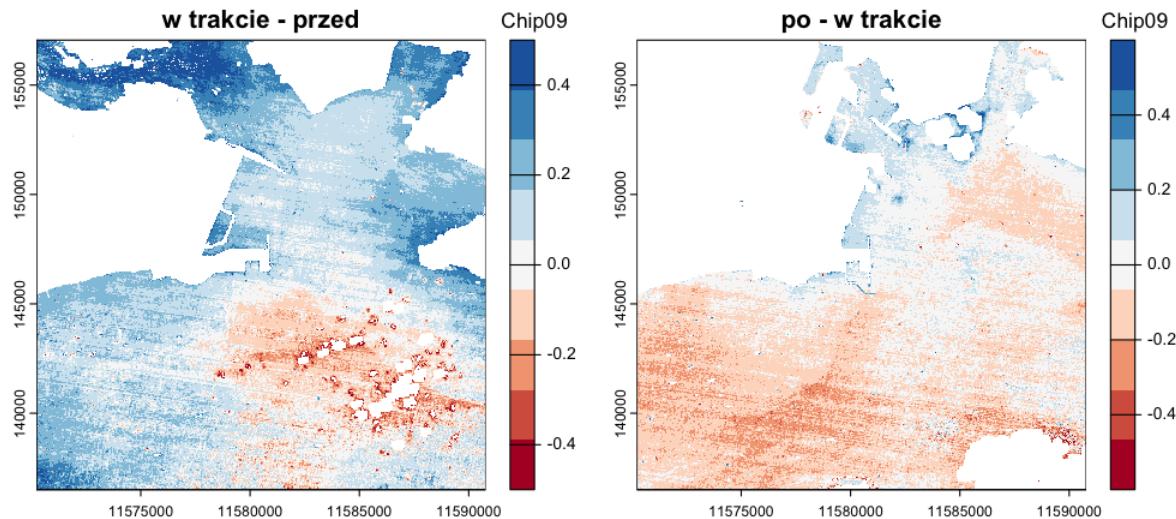
Rycina 6.12 przedstawia zmiany w stężeniu zawiesiny w wodzie wzduż profilu. Rycina 6.11 pokazuje, że dynamika zmian wartości zawiesiny wraz z odległością pokrywa się ze zmianą głębokości. Przy odległości 2500 metrów, dno zbiornika zaczyna stawać się głębsze, schodząc od 25 do 70 metrów głębokości na końcu profilu. Wpływ zmian głębokości na stężenie zawiesiny jest widoczny na obserwacjach z przed i po zakończeniu prac. Wraz z oddalaniem się od brzegu, stężenie zawiesiny zaczyna wzrastać. Trend ten natomiast nie jest widoczny dla obserwacji z etapu przeprowadzania konstrukcji nowego



Rycina 6.12: Zmiany wartości stężenia zawiesiny a wzdłuż profilu dla Singapuru, na podstawie wskaźnika Bow06. Rycina składa się z trzech paneli: zmiany wartości dla obrazów przed rozpoczęciem prac, w trakcie trwania prac i po zakończeniu prac. Każdy z paneli podzielony jest na poszczególne pory roku. Czerwona linia jest wygładzoną linią trendów.

iądu. Zmiany stężenia zawiesiny w wodzie podczas trwania prac są bardziej zróżnicowane i nie wykazują powiązania ze zmianą głębokości zbiornika wodnego. Wskazuje to na potencjalny wpływ tworzenia nowych lądów na powstawanie zaburzeń w rozkładzie przestrzennym stężeń zawiesiny.

Rycina 6.13 przedstawia różnice w stężeniu zawiesiny między wybranymi etapami prac. Lewa rycina porównuje mętność wody w trakcie prowadzenia prac ze stanem przed ich rozpoczęciem. Większości obszaru przypisane zostały dodatnie wartości. Utożsamiane są one ze wzrostem stężenia zawiesiny w wodzie. Oznacza to, że rozpoczęcie prac tworzenia nowych lądów w Singapurze wpłynęło na zwiększenie mętności wody na większości obszaru badań. Prawa rycina porównuje stężenie zawiesiny w zbiorniku wodnym po zakończeniu prac, ze stanem wody w trakcie prowadzenia prac. Na tej rycinie przeważają wartości ujemne, oznaczające zmniejszenie mętności wody. Wzrost stężenia zawiesiny



Rycina 6.13: Mapy różnic stężenia zawiesiny dla Singapuru, z wykorzystaniem wskaźnika Chip09.

Rycina po lewej przedstawia różnice między wskaźnikami, obliczonymi w trakcie trwania i przed rozpoczęciem prac (kwiecień 1999 i 1991). Rycina po prawej przedstawia różnice między wskaźnikami, obliczonymi po zakończeniu prac i w trakcie ich trwania (listopad 2004 i 1995).

po zakończeniu prac w Singapurze odnotowano jedynie na północnym obszarze, na którym powstał nowy ląd.

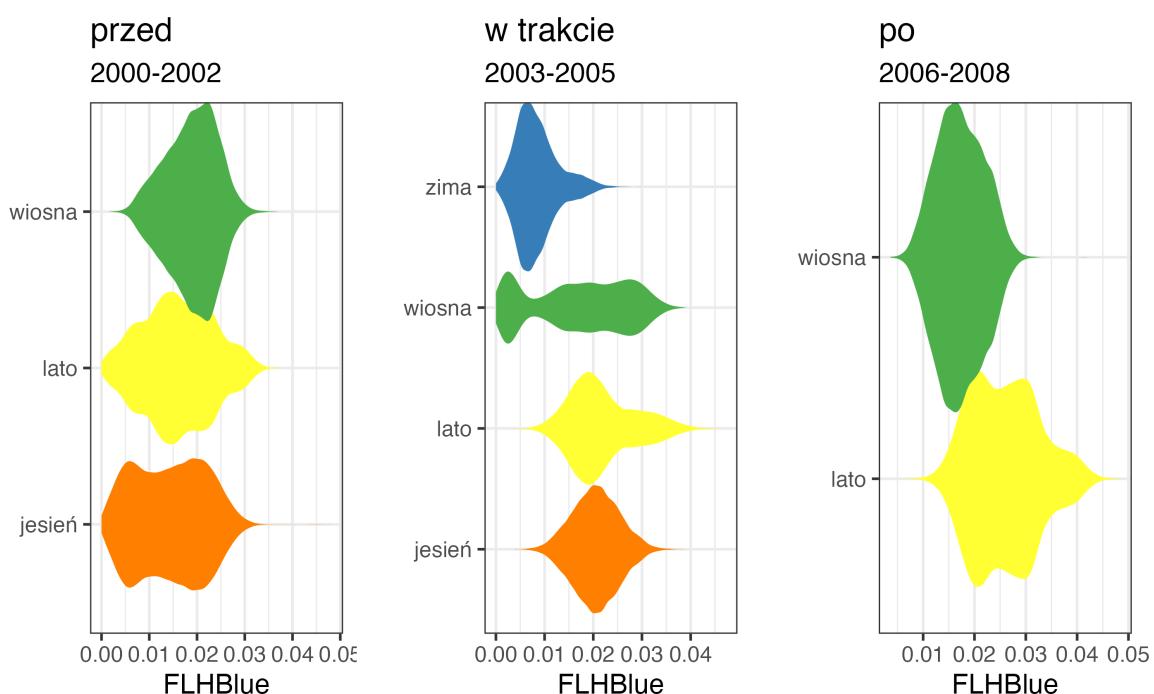
Test Kruskala-Wallisa wskazał zmiany średnich wartości wskaźnika FLH Blue między etapami prac jako istotne statystycznie. Wskaźnik ten odnotował spadek stężenia chlorofilu a po rozpoczęciu konstrukcji lądu w Singapurze. Wraz z rozpoczęciem konstrukcji nowych lądów, stężenie zawiesiny również zmniejszało się. Najniższe wartości stężenia zawiesiny zostały odnotowane po zakończeniu prac. Zmiany te można uznać jako pozytywny sygnał poprawy jakości wód. Procesy tworzenia nowych lądów miały jednak negatywny wpływ na rozkład przestrzenny stężenia zawiesiny. Uległ on rozproszeniu, i w przeciwieństwie do pozostałych etapów prac, podczas tworzenia nowych lądów nie wykryto zależności między zmianą głębokości a zmianą stężenia zawiesiny.

6.5 Szanghaj, Chiny

Tabela 6.5 przedstawia zmiany średnich wartości stężeń parametrów oceny jakości wód. Wraz z upływem lat, stężenie chlorofilu a w zbiornikach wodnym na obszarze badań w Szanghaju stale wzrastało. Trend ten jest widoczny na obydwu wskaźnikach. Podobne

Tabela 6.5: Średnie wartości wskaźników jakości wody dla Szanghaju z podziałem na dwie grupy parametrów jakości wód (chlorofil a i zawiesina) oraz na trzy etapy prac (przed, w trakcie i po zakończeniu). W tabeli zawarto również p-value z testu Kruskala-Wallisa, sprawdzającego istotność statystyczną zmian średnich wartości wskaźników między etapami prac.

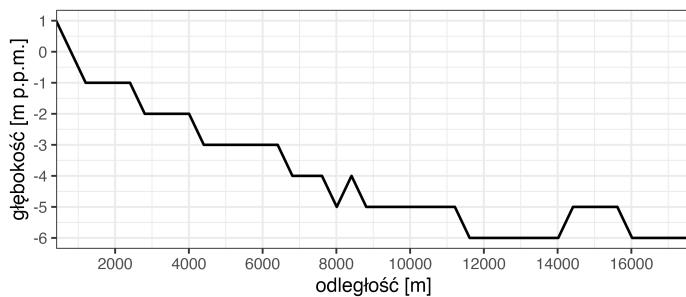
	przed (2000-2002)	w trakcie (2003-2005)	po (2006-2008)	p-value
chlorofil a				
SABI	-0.313	-0.289	-0.281	0.178
FLH Blue	0.015	0.018	0.023	0.028
zawiesina				
Bow06	0.965	0.972	0.967	0.985
Chip09	0.471	0.496	0.507	0.258



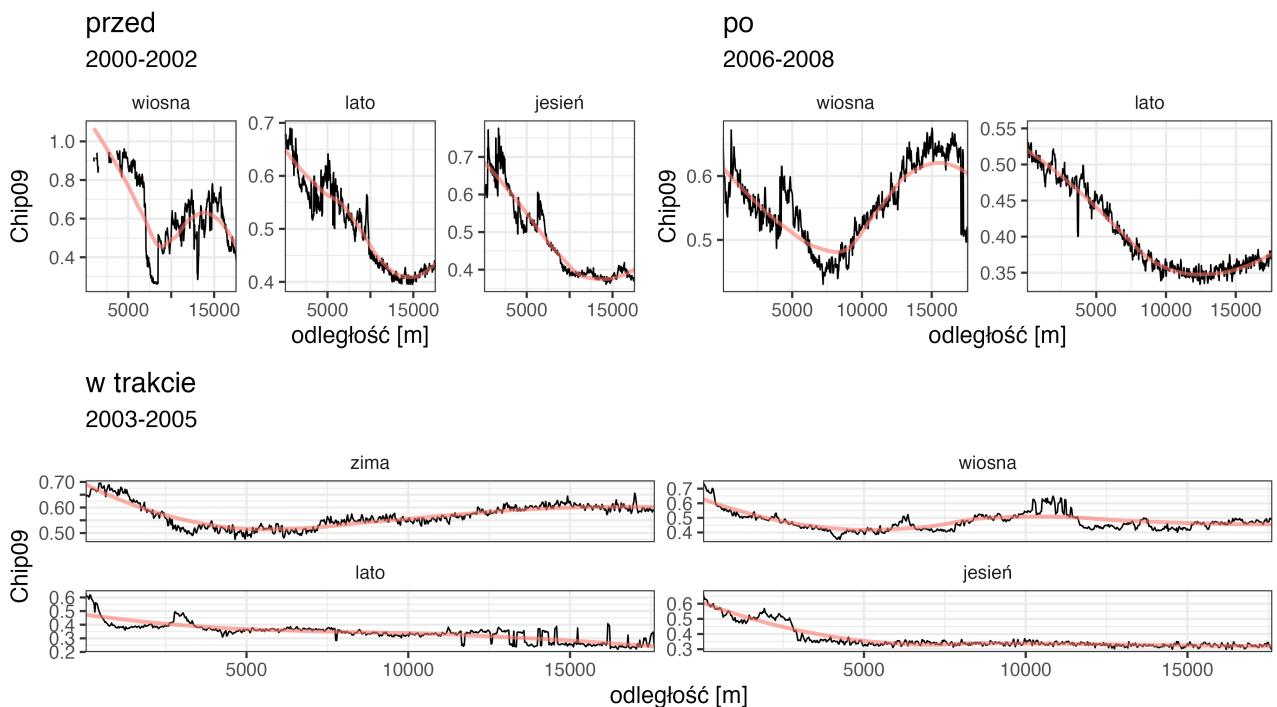
Rycina 6.14: Rozkład wartości stężenia chlorofilu a dla Szanghaju według wskaźnika FLH Blue, z podziałem na trzy etapy prac: przed rozpoczęciem, w trakcie i po zakończeniu prac, oraz na cztery pory roku.

zmiany zaobserwowano dla stężenia zawiesiny. Mętność wody wzrosła po rozpoczęciu prac, i po ich zakończeniu ponownie wzrosła według wskaźnika Chip09, lub spadła według wskaźnika Bow06. Stężenie chlorofilu a cechowało się większymi zmianami wartości, w porównaniu do wartości wskaźników opisujących mętność wody.

Rycina 6.14 przedstawia zmiany w rozkładach średnich wartości stężenia chlorofilu a w Szanghaju. Etap tworzenia nowych lądów wyróżnia się większym rozkładem wartości w

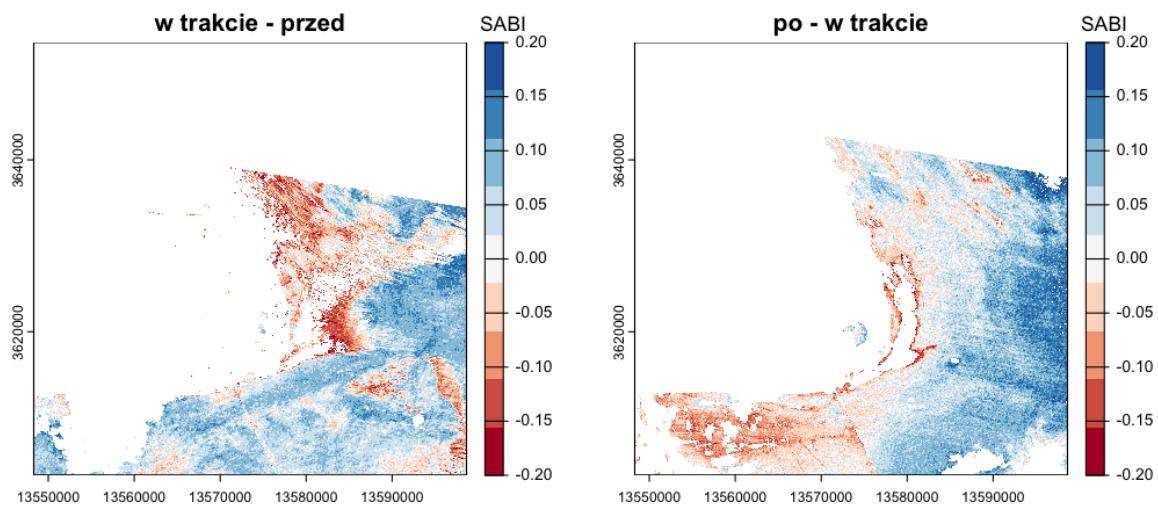


Rycina 6.15: Zmiany głębokości zbiornika wodnego wzdłuż profilu dla Szanghaju.



Rycina 6.16: Zmiany wartości stężenia zawiesiny wzdłuż profilu dla Szanghaju, przy wykorzystaniu wskaźnika Chip09. Rycina składa się z trzech paneli: zmiany wartości dla obrazów przed rozpoczęciem prac, w trakcie trwania prac i po zakończeniu prac. Każdy z paneli podzielony jest na poszczególne pory roku. Czerwona linia jest wygładzoną linią trendów.

porównaniu do pozostałych okresów. Wartości w trakcie prowadzenia prac cechowały się większą różnorodnością od wartości z pozostałych etapów, co jest szczególnie widoczne dla wiosny. Rozkład średnich wartości wiosną podczas prowadzenia prac znacząco różni się od rozkładu wartości wiosną przed i po zakończeniu prac. Świadczy to o wpływie konstrukcji nowych lądów na zwiększenie różnorodności stężenia chlorofilu a na obszarze badań w Szanghaju.



Rycina 6.17: Mapy różnic stężeń chlorofilu a dla Szanghaju. Rycina po lewej przedstawia różnice między wskaźnikami, obliczonymi w trakcie trwania i przed rozpoczęciem prac (maj 2005 i 2001). Rycina po prawej przedstawia różnice między wskaźnikami, obliczonymi po zakończeniu prac i w trakcie ich trwania (sierpień 2008 i 2004).

Rycina 6.15 pokazuje, że zbiornik wodny na obszarze badań w Szanghaju osiąga maksymalną głębokość sześciu metrów. Rycina 6.16 przedstawia, iż mimo małej różnicy głębokości, zmiany stężenia zawiesiny w wodzie wykazują zależność ze zmianą głębokości wzdłuż profilu. Zależność ta jest widoczna przed rozpoczęciem prac tworzenia nowych lądów. Wraz z osiągnięciem odległości 2500 metrów wzdłuż profilu, stężenie zawiesiny zaczyna maleć. Szczególnym przypadkiem jest wiosna, podczas której na odległości 8000 metrów stężenie zawiesiny zaczyna rosnąć. Trend ten jest również widoczny podczas trwania prac i po ich zakończeniu. Zmiany stężenia zawiesiny wiosną po zakończeniu prac są jednak większe niż przed ich rozpoczęciem. Może to oznaczać potencjalny wpływ tworzenia nowych lądów na powstanie zaburzeń w rozkładzie przestrzennym stężeń zawiesiny, zwłaszcza na obszarach położonych dalej od lądu.

Rycina 6.17 przedstawia różnice w stężeniach chlorofilu a na obszarze badań w Szanghaju. Lewa rycina pokazuje zmiany w występowaniu chlorofilu a w trakcie trwania prac, zestawiając ich wartości ze stanem przed rozpoczęciem prac. Wartości ujemne odpowiadają spadkowi stężenia chlorofilu a wraz z rozpoczęciem prac tworzenia nowego lądu. Odnotowane spadki stężenia chlorofilu a widoczne są na całym obszarze badań, jednak największe zaobserwowano przy północno-zachodniej części obszaru, na północ od

strefy konstrukcji nowego lądu. Prawa rycina pokazuje, w jaki sposób zakończenie prac tworzenia nowych lądów wpłynęło na zmiany jakości wód. Wartości dodatnie oznaczają wzrost stężenia chlorofilu a. Wartości ujemne odpowiadają dalszemu spadkowi stężenia chlorofilu a. Najniższe wartości odnotowano wzdłuż wybrzeża Szanghaju. Wskazuje to na długofalowe skutki konstrukcji nowych lądów na jakość pobliskich wód. Wraz z oddalaniem się od wybrzeża, stężenie chlorofilu a wzrasta. Wskazuje to na potencjalny wpływ tworzenia nowych lądów na zmiany przestrzenne jakości wód.

Zmiany wartości wskaźnika FLH Blue, wskazujące na wzrost stężenia chlorofilu a w Szanghaju po rozpoczęciu prac tworzenia nowych lądów, wykazują istotność statystyczną. Spadek stężenia chlorofilu a odnotowano jedynie w strefie przybrzeżnej. Zmiany stężenia zawiesiny wskazują na pogorszenie jakości wód, ponieważ po rozpoczęciu tworzenia nowych lądów mętność wody stale wzrastała. Odnotowano także zaburzenia w rozkładzie przestrzennym stężeń zawiesiny. Zmiany stężenia zawiesiny w wodzie dla obszaru badań w Szanghaju były jednak najmniejszymi odnotowanymi zmianami, spośród wszystkich obszarów badań. Dodatkowo, mętność wody przed rozpoczęciem prac na obszarze badań w Szanghaju była najwyższa spośród wszystkich obszarów. Wskazuje to na potencjalnie niski wpływ tworzenia nowych lądów na zmiany parametru jakości wód, jakim jest mętność wody.

Rozdział 7

Podsumowanie

Wyniki przeprowadzonych badań wskazały na wpływ tworzenia nowych lądów na stan jakości wód na każdym z obszarów. Konstrukcja nowych lądów wpłynęła na spadek stężenia chlorofilu a w Dubaju, Limon i Singapurze. Największą różnicę zaobserwowano w Limon. W Dubaju i Singapurze, stężenie chlorofilu było jeszcze niższe po zakończeniu prac. Może to wynikać ze sposobu wykorzystania nowych lądów na obydwu obszarach badań. Praca Zhang et al. (2017) wykazała podobną zależność, gdzie największy udział w degradacji jakości wód miały zakłady przemysłowe, powstałe na nowych terenach lądowych. W Singapurze, nowy ląd posłużył rozbudowie lotniska i bazy marynarki wojennej kraju. Nowe tereny w Dubaju zostały wykorzystane natomiast pod rozbudowę infrastruktury turystycznej, tworząc fundamenty pod nowe hotele i atrakcje turystyczne.

W Lagos i Szanghaju, wraz z rozpoczęciem tworzenia nowych lądów, zanotowano wzrost stężenia chlorofilu a. Wzrost ten utrzymał się po zakończeniu prac. Obydwa obszary łączy sposób wykorzystania nowych lądów, które zostały przeznaczone pod strefy mieszkalne. Praca Zhang et al. (2017) proponowała rozwiązanie problemu, gdzie uzdatnianie wody miało posłużyć się poprawie jakości wód po stworzeniu nowych lądów. Wskazuje to na pośredni wpływ tworzenia nowych lądów na jakość wód, wynikające z wprowadzenia regulacji i programów ochrony w celu poprawy jakości wód.

Wpływ tworzenia nowego lądu na wzrost stężenia zawiesiny odnotowano w Dubaju, Limon i Szanghaju. Dla tych samych obszarów, stężenie zawiesiny po zakończeniu prac

konstrukcyjnych zmalało. Wskazuje to tymczasowy wzrost mętności wody, spowodowany trwaniem prac nad tworzeniem nowych lądów. Oznacza to, że w tych trzech obszarach, tworzenie nowych lądów ma negatywny wpływ na jakość wód, zwiększając ich mętność. Spowodowane to może być długim okresem trwania prac. W Dubaju, Limon i Szanghaju, tworzenie nowego lądu trwało krócej, w porównaniu do długości prac w Lagos i Singapurze. Wykorzystane techniki, które przysłużyły się do przyspieszenia prac, mogły jednocześnie przyczynić się do większej degradacji jakości wody.

Na obszarach badań w Lagos i Singapurze odnotowano spadek mętności wody po rozpoczęciu prac nad konstrukcją nowych terenów. W obydwu miejscach, stężenie zawiesiny dalej zmniejszało się po zakończeniu prac. Może to świadczyć o małym wpływie tworzenia nowych lądów na zmiany mętności wody i stanu jakości wód dla tych obszarów. Zmiany mętności w czasie na tych obszarach badań świadczą o występowaniu innego czynnika, przyczyniającego się do spadku stężenia zawiesiny w wodzie. Do potwierdzenia tej tezy konieczna jest dodatkowa analiza, obejmująca szerszy zakres czasowy niż uwzględniony w tej pracy.

Wyniki tej pracy wskazują na zgodność z wynikami prac, przytoczonymi w przeglądzie literatury. Praca Hao et al. (2021) wskazuje na największe zmiany w parametrach jakości wód w okresie tworzenia nowych lądów. Stężenie metali ciężkich tuż po zakończeniu prac było większe, niż przed rozpoczęciem budowy. Taką samą zależność odnotowano w tej pracy. Wraz z rozpoczęciem konstrukcji nowych lądów, odnotowane zostały zmiany w wartościach parametrów jakości wód. Praca Wang et al. (2023) również dochodzi do podobnych wniosków. Konstrukcja nowych lądów pod budowę lotniska przyczyniła się do zwiększenia mętności wody i zwiększenia stężenia nieorganicznego azotu w wodzie.

Użycie czterech wskaźników, opisujących dwa parametry, dało wgląd na szeroki zakres stanu jakości wód. Spośród wszystkich wykorzystanych wskaźników, FLH Blue badający stężenie chlorofilu a przysłużył się dwukrotnie do wykazania istotności statystycznej między średnimi wartościami stężenia chlorofilu a a poszczególnymi etapami prac. Wskazuje to na potencjał tego wskaźnika w dalszych badaniach jakości wód. W badaniach wykryto, że wzrost liczby obserwacji koreluje ze wzrostem istotności statystycznej. Zwiększenie zakresu czasowego, albo zastosowanie innej metody wyboru obrazów

satelitarnych może w przyszłych badaniach zwiększyć liczbę obserwacji i przysłużyć się do zwiększenia jakości wyników.

Dodanie do zakresu czasowego badań dodatkowych lat przed rozpoczęciem i po zakończeniu prac dostarczyło duży zasób informacji. Porównanie wartości parametrów jakości wód z fazy tworzenia lądów z wartościami przed rozpoczęciem prac pozwoliło zaobserwować bezpośrednie zmiany, wywołane pracami. Analiza stężeń chlorofilu a i zawiesiny po zakończeniu prac umożliwiło wykrycie potencjalnych długofalowych skutków tworzenia lądu na zmiany jakości wód. W kolejnych badaniach, metoda ta może zostać usprawniona. Etapy przed i po zakończeniu prac obejmowały osobno od dwóch do trzech lat. Okres trwania prac nad tworzeniem lądów natomiast potrafił zajmować od dwóch do nawet dziesięciu lat. Prowadziło to do powstania niezbalansowanych grup, w których większość obserwacji należała do etapu trwania prac. Rozszerzenie zakresu czasowego dla etapów przed rozpoczęciem i po zakończeniu tworzenia nowego lądu pozwoliłoby również wykryć długookresowe zmiany w jakościach wód i odseparować je od zmian wywołanych przez procesy tworzenia lądów. Dostarczyłoby to jeszcze dokładniejsze wyniki wpływu tworzenia nowych lądów na stan wód.

Wybrane obszary badań dostarczyły dużą ilość informacji i przysłużyły się do odkrycia potencjalnych zależności. Dużym walorem była ich różnorodność w wykorzystaniu nowego lądu. Pozwoliło to odkryć zależności, występujące między osobnymi obszarami o podobnych rodzajach zastosowań nowego terenu. Wybór obszarów z różnych części świata i zakresów czasowych również okazał się przydatny do zaobserwowania różnic we wpływach tworzenia nowych lądów na stan jakości wód.

W wyniku ograniczeń, w pracy zrezygnowano z kilku ulepszeń, mogących przyczynić się do pozyskania lepszej jakości wyników. Jeden z potencjalnych usprawnień w ramach pracy dotyczył oceny jakości wody. W ramach pracy, zmiany jakości wód były oceniane poprzez porównywanie zmian parametrów w czasie, oraz porównując je między obszarami badań. Wszystkie obszary badań obejmowały tereny, na których przeprowadzane były konstrukcje nowych lądów. W celu zwiększenia dokładności wyników, ocenę zmian jakości wód powinno się także przeprowadzić na obszarach, na których nie miały miejsca prace tworzenia nowych lądów. Pozwoliłoby to na sprawdzenie, czy zmiany jakości

wód faktycznie wynikały z tworzenia nowych lądów, czy były wynikiem regionalnych zmian jakości wód. Dodatkowe obszary badań powinny być jak najbardziej zbliżone do wybranych obszarów. Podobieństwo polegałoby na podobnym ukształtowaniu dna zbiornika wodnego i terenu na wybrzeżu, podobnym wykorzystaniu terenu wybrzeżnego, czy podobnych parametrach pogody. Wprowadzenie takiego ulepszenia wymagałoby zaproponowania metody, służącej do odnajdywania bliźniaczych terenów dla wybranego obszaru badań. Metoda ta, po zapoznaniu się z właściwościami obszaru badań na którym utworzono nowy ląd, powinna odnaleźć inny obszar o podobnych parametrach, na którym nie wykonywano prac tworzenia nowych lądów. Opracowanie tej metody okazało się zbyt czasochłonne i nie zostało uwzględnione w tej pracy.

Oprócz dodatkowych obszarów badań, wykorzystanie dodatkowych parametrów jakości wód również mogłoby skutkować wykonaniem dokładniejszych badań. W pracy wykorzystano obrazy satelitarne oraz dane o batymetrii. Pozwoliło to na ocenę zmian fizycznych parametrów wodnych (chlorofil a, mętność wody), możliwych do obserwacji z poziomu obrazów satelitarnych. Dodatkowe źródła danych pozwoliłyby na badanie zmian biologicznych i chemicznych parametrów jakości wód w trakcie tworzenia nowych lądów. Do takich parametrów należą między innymi temperatura wody, zasolenie, zasadowość, stężenie nieorganicznego azotu czy metali ciężkich.

Inne ulepszenie dotyczyłoby zmiany metody pozyskiwania zdjęć satelitarnych. Metoda wykorzystana w tej pracy pozwoliła na pozyskanie dużego zbioru obrazów. Jednak większość z tych zdjęć nie była przydatna do wykorzystania w dalszej analizie. Wynikało to ze sposobu maskowania danych, niebędących zbiornikami wodnymi. Wykorzystanie kanału QA pozwoliło na wybór komórek rastrowych przypisanych do klasy zbiorników wodnych bez pokrycia chmurami. Skutkowało to powstawaniem wielu luk i przerw w obrazach satelitarnych, co ograniczało możliwości przeprowadzania analiz przestrzennych. Możliwym rozwiązaniem tego problemu jest zaproponowanie lepszej metody maskowania obszarów niebędących zbiornikami wodnymi. Metoda ta mogłaby być rozwinięciem stosowania kanału QA i polegać na wyborze dodatkowych klas. Podejście to nie rozwiąże jednak problemu z występowaniem zachmurzeń, które wyklucza z analizy obszary będące zakryte

chmurami. Alternatywnym rozwiązaniem jest stosowanie kompozytów. Zamiast pracować na zdjęciach satelitarnych z pojedynczych dni, można utworzyć z kilku zdjęć jeden obraz, będący całkowicie wypełniony informacjami. Potencjalne podejście polegałoby na grupowaniu zdjęć według miesięcy. Dla każdego miesiąca wyliczany byłby jeden obraz kompozytowy. Wartości komórek obrazu kompozytowego mogłyby być medianą wszystkich dostępnych wartości komórek z pojedynczych zdjęć. Takie rozwiązanie umożliwiłoby pozyskanie obrazu w całości wypełnionego danymi. Wadą tej metody jest fakt, że obraz kompozytowy nie jest odzwierciedleniem obszaru w konkretnym momencie, a mozaiką informacji, złączoną z wielu różnych obrazów. Może to spowodować powstanie wzorców przestrzennych, nie mających odzwierciedlenia w rzeczywistości i prowadzących do nieprawdziwych wniosków. Między innymi z tego powodu w pracy zdecydowano się korzystać z pojedynczych obrazów satelitarnych.

Bibliografia

- Alawadi, F (2010). Detection of surface algal blooms using the newly developed algorithm surface algal bloom index (SABI). In: *Remote sensing of the ocean, sea ice, and large water regions 2010*. Vol. 7825. SPIE, pp.45–58.
- Arulrajah, A, MW Bo, J Chu, and H Nikraz (2009). Instrumentation at Changi land reclamation project, Singapore. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering* **162**(1), 33–40.
- Beck, R, S Zhan, H Liu, S Tong, B Yang, M Xu, Z Ye, Y Huang, S Shu, Q Wu, et al. (2016). Comparison of satellite reflectance algorithms for estimating chlorophyll-a in a temperate reservoir using coincident hyperspectral aircraft imagery and dense coincident surface observations. *Remote Sensing of Environment* **178**, 15–30.
- Bijeesh, T and K Narasimhamurthy (2019). A comparative study of spectral indices for surface water delineation using Landsat 8 Images. In: *2019 International Conference on Data Science and Communication (IconDSC)*. IEEE, pp.1–5.
- Bowers, D and C Binding (2006). The optical properties of mineral suspended particles: A review and synthesis. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **67**(1-2), 219–230.
- Chipman, JW, L Olmanson, and A Gitelson (2009). *Remote sensing methods for lake management: A guide for resource managers and decision-makers*. Developed by the North American Lake Management Society in collaboration with Dartmouth College, University of Minnesota, and University of Nebraska for the United States Environmental Protection Agency.
- Cropper, M and C Griffiths (1994). The interaction of population growth and environmental quality. *The American Economic Review* **84**(2), 250–254.

- Dembowska, EA (2021). The Use of Phytoplankton in the Assessment of Water Quality in the Lower Section of Poland's Largest River. *Water* **13**(23), 3471.
- DESA, U (n.d.). *United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division*. 2022. *World Population Prospects 2022: Summary of Results*. Tech. rep. UN DESA/POP/2022/TR.
- GEBCO Bathymetric Compilation Group 2023 (2023). *The GEBCO_2023 Grid - a continuous terrain model of the global oceans and land*. en. https://www.bodc.ac.uk/data/published_data_library/catalogue/10.5285/f98b053b-0cbc-6c23-e053-6c86abc0af7b/.
- Gholizadeh, MH, AM Melesse, and L Reddi (2016). A comprehensive review on water quality parameters estimation using remote sensing techniques. *Sensors* **16**(8), 1298.
- Gibling, C (2013). Construction process and post-construction impacts of the Palm Jumeirah in Dubai, United Arab Emirates. *Proto-Type* **1**.
- Glasgow, HB, JM Burkholder, RE Reed, AJ Lewitus, and JE Kleinman (2004). Real-time remote monitoring of water quality: a review of current applications, and advancements in sensor, telemetry, and computing technologies. *Journal of experimental marine biology and ecology* **300**(1-2), 409–448.
- Gupta, P (2015). Futures, fakes and discourses of the gigantic and miniature in 'The World'islands, Dubai. *Island Studies Journal* **10**(2), 181–196.
- Hao, Z and H Xu (2021). Effects of sea reclamation project on heavy metal concentrations in seawater-a case study in Qixingtu. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 647. 1. IOP Publishing, pp.012217.
- Hijmans, RJ (2024). *terra: Spatial Data Analysis*. R package version 1.7-71. <https://rspatial.org/>.
- Hoeksema, RJ (2007). Three stages in the history of land reclamation in the Netherlands. *Irrigation and Drainage: The Journal of the International Commission on Irrigation and Drainage* **56**(S1), S113–S126.
- Hugo, G (2011). Future demographic change and its interactions with migration and climate change. *Global Environmental Change* **21**, S21–S33.

- Johansen, R, J Nowosad, M Reif, and E Emery (2023). *waterquality: Satellite Derived Water Quality Detection Algorithms*. R package version 1.0.0. <https://github.com/RAJohansen/waterquality>.
- Ltd, SEN (2012). *Environmental and Social Impact Assessment of the Eko Atlantic Shoreline Protection and Reclamation Project: A Summary*. Accessed on: June 2024. South Energyx Nigeria Ltd.
- Mahoney, M (2024). *rsi: Efficiently Retrieve and Process Satellite Imagery*. R package version 0.2.0, <https://permian-global-research.github.io/rsi/>. <https://github.com/Permian-Global-Research/rsi>.
- Martín-Antón, M, V Negro, JM del Campo, JS López-Gutiérrez, and MD Esteban (2016). Review of coastal land reclamation situation in the world. *Journal of Coastal Research* (75), 667–671.
- McGranahan, G, D Balk, and B Anderson (2007). The rising tide: assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones. *Environment and urbanization* **19**(1), 17–37.
- Montero, D, C Aybar, MD Mahecha, F Martinuzzi, M S"ochting, and S Wieneke (2023). A standardized catalogue of spectral indices to advance the use of remote sensing in Earth system research. *Scientific Data* **10**(1), 197.
- Neuwirth, E (2022). *RColorBrewer: ColorBrewer Palettes*. R package version 1.1-3. <https://CRAN.R-project.org/package=RColorBrewer>.
- Notteboom, T, A Pallis, and JP Rodrigue (2022). *Port economics, management and policy*. Routledge.
- Omotosho, J (2013). *New Cities and Real Estate Markets-A focus on the Eko Atlantic City Project*. Tech. rep. African Real Estate Society (AfRES).
- Pedersen, TL (2024). *patchwork: The Composer of Plots*. R package version 1.2.0, <https://github.com/thomasp85/patchwork>. <https://patchwork.data-imaginist.com>.
- Phang, SY (2003). Strategic development of airport and rail infrastructure: the case of Singapore. *Transport Policy* **10**(1), 27–33.
- R Core Team (2024). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.

- Sengupta, D, R Chen, and ME Meadows (2018). Building beyond land: An overview of coastal land reclamation in 16 global megacities. *Applied geography* **90**, 229–238.
- Seto, KC, M Fragkias, B Güneralp, and MK Reilly (2011). A meta-analysis of global urban land expansion. *PloS one* **6**(8), e23777.
- Shi, Y and Y Chen (2016). New city planning and construction in Shanghai: retrospective and prospective. *International Journal of Urban Sciences* **20**(1), 49–72.
- Source, MO, M McFarland, R Emanuele, D Morris, and T Augspurger (2022). *microsoft/PlanetaryComputer: October 2022*. Version 2022.10.28. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7261897>.
- Spinu, V, G Grolemund, and H Wickham (2023). *lubridate: Make Dealing with Dates a Little Easier*. R package version 1.9.3, <https://github.com/tidyverse/lubridate>. <https://lubridate.tidyverse.org>.
- Summers, JK (2020). *Water Quality: Science, Assessments and Policy*. BoD–Books on Demand.
- Tyagi, S, B Sharma, P Singh, and R Dobhal (2013). Water quality assessment in terms of water quality index. *American Journal of water resources* **1**(3), 34–38.
- Van Bentum, K, C Hoyng, M van Ledden, AP Luijendijk, and M Stive (2012). The Lagos coast–Investigation of the long-term morphological impact of the Eko Atlantic City project. In: *NCK-Days 2012: Crossing borders in coastal research*. University of Twente.
- Ven, Gvd (1993). *Man-made lowlands: history of water management and land reclamation in the Netherlands*.
- Wang, W, H Liu, Y Li, and J Su (2014). Development and management of land reclamation in China. *Ocean & Coastal Management* **102**, 415–425.
- Wang, Z, Z Mao, L Zhang, X Zhang, D Yuan, Y Li, Z Wu, H Huang, and Q Zhu (2023). Observations of the Impacts of Hong Kong International Airport on Water Quality from 1986 to 2022 Using Landsat Satellite. *Remote Sensing* **15**(12), 3146.
- Wenzel, F, F Bendimerad, and R Sinha (2007). Megacities–megarisks. *Natural Hazards* **42**, 481–491.
- Wickham, H (2020). *reshape2: Flexibly Reshape Data: A Reboot of the Reshape Package*. R package version 1.4.4. <https://github.com/hadley/reshape>.

- Wickham, H, W Chang, L Henry, TL Pedersen, K Takahashi, C Wilke, K Woo, H Yutani, D Dunnington, and T van den Brand (2024). *ggplot2: Create Elegant Data Visualisations Using the Grammar of Graphics*. R package version 3.5.1, <https://github.com/tidyverse/ggplot2>. <https://ggplot2.tidyverse.org>.
- Wickham, H, R François, L Henry, K Müller, and D Vaughan (2023). *dplyr: A Grammar of Data Manipulation*. R package version 1.1.4. <https://dplyr.tidyverse.org>.
- Xie, Y (2024). *knitr: A General-Purpose Package for Dynamic Report Generation in R*. R package version 1.46. <https://yihui.org/knitr/>.
- Zhang, P, Y Su, Sk Liang, Kq Li, Yb Li, and Xl Wang (2017). Assessment of long-term water quality variation affected by high-intensity land-based inputs and land reclamation in Jiaozhou Bay, China. *Ecological Indicators* **75**, 210–219.
- Zhu, H (2024). *kableExtra: Construct Complex Table with kable and Pipe Syntax*. R package version 1.4.0, <https://github.com/haozhu233/kableExtra>. <http://haozhu233.github.io/kableExtra/>.