

## Bałtyk – Poznajmy Lepiej Nasze Piękne Morze

### Cześć 1. Wielkie Wlewy Bałtyckie

Morza od wieków dostarczają ludzkości wielu bogactw naturalnych oraz służą jako ważne szlaki komunikacyjne, umożliwiając rozwój cywilizacji. Na przestrzeni dziejów dostęp do Bałtyku był dla Polski źródłem wielu wymiernych korzyści. Dziś także Morze Bałtyckie jest dla Polski nieocenionym skarbem. Niezwykła uroda polskich plaż przyciąga co roku nad Bałtyk rzesze turystów (nie tylko z Polski!). Ale Bałtyk może być też uważany za tykająca bombę zegarowa. Badania naukowców wskazują, że jest to jeden z najbardziej zagrożonych akwenów morskich na świecie. Zagrożenie stanowią zanieczyszczenia, eutrofizacja, zbyt intensywna turystyka, rybołówstwo, ruch statków... Co tak naprawdę zagraża naszemu Bałtykowi? Czy jako społeczeństwo możemy coś w tej sprawie zrobić? Żeby przeciwdziałać negatywnym procesom trzeba pogłębiać wiedzę o Bałtyku i na bazie faktów naukowych opracować strategię ratowania naszego morza. W serii artykułów które przygotowaliśmy dla Ekonatury postaramy się przedstawić czytelnikom aktualny stan wiedzy o naszym morzu.

Jednym z procesów, które ma dramatycznie ważne znaczenie dla Bałtyku jest odnowa wód głębinowych. Proces ten jest mało przewidywalny i bardzo trudny do obserwacji oceanograficznych, ale ma kluczowe znaczenie dla organizmów żyjących w naszym morzu. Dlaczego?

Żeby to zrozumieć przyjrzyjmy się najpierw najważniejszym faktom hydrograficznym. Istotną cechą wód bałtyckich jest ich silne uwarstwienie gęstościowe. Wyróżnia się dwie zasadnicze warstwy (Figura 1). 1) Wody powierzchniowe o małym zasoleniu są dobrze wymieszane i natlenione. Ich temperatura waha się, w zależności od pory roku od 0°C do ponad 20°C. 2) Wody głębinowe o większym zasoleniu, charakteryzują się też mało zmienną temperaturą (4-6°C) i niskim natlenieniem. Tak więc woda powierzchniowa ma mniejszą gęstość, woda głębinowa większą. Te dwie podstawowe warstwy oddziela tzw. haloklina, czyli strefa przejściowa gdzie następuje gwałtowny wzrost zasolenia wody. Jest to jednocześnie strefa wzrostu gęstości wody, działająca jak bariera utrudniająca mieszanie się wód powierzchniowych z głębinowymi. Dlatego też wody głębinowe są gorzej natlenione. W największych głębiach bałtyckich dochodzi nawet do całkowitego zużycia tlenu i wytwarzania toksycznego dla zwierząt siarkowodoru. Ryby giną wtedy z powodu braku tlenu. Dlaczego wody bałtycka są tak silnie stratyfikowane? Dlaczego natlenienie wód głębinowych czasem się pogarsza a czasem polepsza?

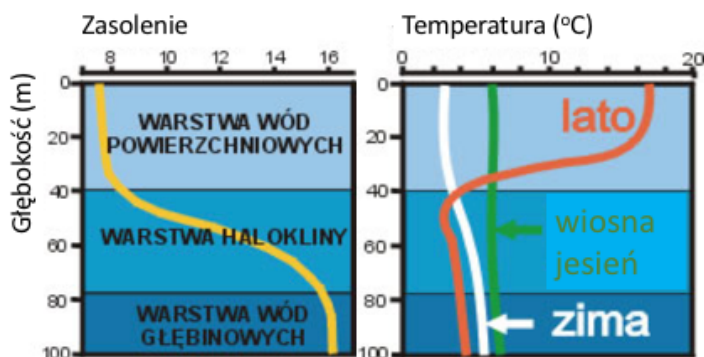


Figura 1. Pionowy profil a) zasolenia b) temperatury w Bałtyku.

Stratyfikacja gęstościowa jest ściśle związana z tym że Bałtyk jest morzem śródładowym, otoczonym przez kontynent europejski. Łączy się z sąsiednim Morzem Północnym wąskimi

cieśninami, które nazywane są zewnętrznymi (Kattegat i Skagerrak) i wewnętrznymi (Sund, Wielki Bałt i Mały Bałt). Wąskie cieśniny ograniczają napływ wody słonej z Morza Północnego do Bałtyku. Z drugiej strony do Bałtyku są dostarczane znaczne ilości wody słodkiej, głównie przez rzeki, ale także przez opady atmosferyczne (Figura 2). Ten dopływ wody słodkiej jest tylko w małym stopniu kompensowany przez parowanie. W rezultacie, duża ilość dopływającej wody słodkiej obniża zasolenie Bałtyku. Nadmiar wody powierzchniowej wypływa z Bałtyku do Morza Północnego. Natomiast napływ wody słonej z Morza Północnego jest na ogół stosunkowo mały. Gdyby tego napływu nie było, Bałtyk stałby się słodkim jeziorem.

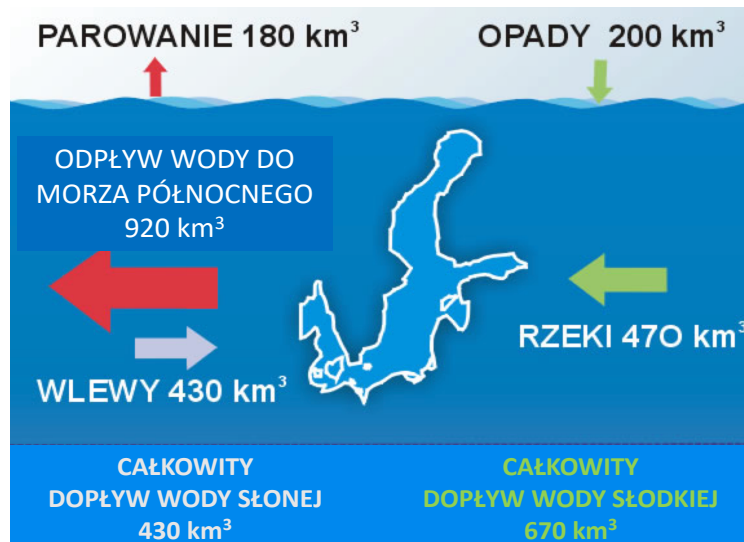


Figura 2. Średni bilans wodny Morza Bałtyckiego (na podstawie )

Ponieważ napływ wody słonej jest mniejszy niż napływ wody słodkiej, średnie zasolenie wód powierzchniowych w Bałtyku (7 do 8) jest około 5 razy mniejsze niż w oceanie (około 35) i maleje w miarę oddalania się od cieśnin duńskich, które są dla Bałtyku źródłem wody słonej (Figura 3).



Figura 3. Zasolenie wód powierzchniowych.

Napływająca z Morza Północnego woda jest bardziej słona i cięższa niż woda bałtycka, więc wpływając opada na dno i przesuwa się przy dnie (Figura 4.) Woda ta przed waniem się do Bałtyku znajdowała się na powierzchni Morza Północnego i dzięki kontaktowi z atmosferą jest

dobrze natleniona. Napływ wody słonej w małych ilościach odbywa się w sposób ciągły i naukowcy nazywają to zjawisko wlewem baroklinowym, Wlew baroklinowy jest wymuszany różnicą gęstości wód bałtyckich i Morza Północnego. Jednak ilości dostarczanej w ten sposób natlenionej wody słonej są nieznaczne. Powolne sączenie się słonych wód przez Cieśniny nie wystarcza dla utrzymania wód Morza Bałtyckiego w dobrej kondycji. W rezultacie badań oceanograficznych ustalono że istnieje dodatkowy ważny mechanizm dostarczający natlenioną słoną wodę do Bałtyku, tzw. Wielkie Wlewy Bałtyckie (ang. Major Baltic Inflows, MBI).



Figura 4. Wlew „nowej” słonej wody z Morza Północnego. Wlew taki przesuwa się przy dnie i wypiera „stara” słabo natleniona wodę przydenna.

Wielkie Wlewy Bałtyckie wymuszane są anomalia w różnicy poziomu powierzchni morza w rejonie granicznym między Morzem Północnym i Bałtykiem (w Kattegacie i Basenie Arkońskim). W sytuacji ‘normalnej’ średni poziom powierzchni Bałtyku znajduje się nieco powyżej poziomu Morza Północnego. Jest to związane z mniejszym zasoleniem Bałtyku i dużym dopływem wody z rzek. Jednak w czasie silnych wiatrów jesiennych i zimowych sytuacja ta sporadycznie może ulec zmianie. Żeby tak się stało, konieczna jest określona sekwencja wydarzeń. 1) W fazie wstępnej MBI długotrwałe wiatry wschodnie wypychają wodę powierzchniową z Bałtyku, co powoduje zmniejszenie jego objętości i obniżenie poziomu morza. 2) W fazie właściwej MBI następuje odwrócenie kierunku wiatru na zachodni, co intensyfikuje kompensacyjny napływ wody z Morza Północnego do Bałtyku przez Cieśniny Duńskie. Poziomu powierzchni Bałtyku wraca do normy a następnie może uzyskać stan wyższy niż normalny. Następnie słona i natleniona woda dostarczona podczas wlewu przemieszcza się jako woda przydenna i po upływie około 3-6 miesięcy dociera do Bałtyku środkowego. W trakcie tej adwekcji następuje stopniowe mieszanie „nowej” wody ze „starymi” wodami znajdującymi się w danym rejonie przed wlewem.

Wielkie Wlewy Bałtyckie są zjawiskiem nieregularnym, występującym średnio raz na 3-10 lat i dlatego niezmiernie trudnym do wychwycenia przez tradycyjne obserwacje oceanograficzne. Ponieważ efekty MBI mają spektakularne znaczenie dla ekosystemu Bałtyku, zjawisko to od lat przyciągało uwagę badaczy morza. Na podstawie analiz historycznych danych oceanograficznych z rejsów, stacji brzegowych rejestrujących poziom morza, oraz boi pomiarowych naukowcy niemieccy ustalili że w latach 1897-1997 wystąpiło około 96 takich wlewów ([www.io-warnemuende.de/major-baltic-inflow-statistics](http://www.io-warnemuende.de/major-baltic-inflow-statistics)). Ich częstotliwość, znacznie zmalała po roku 1980 i w rezultacie wody głębinowe Bałtyku przechodziły przez dłuższy okres stagnacji. Ostatnie Wielkie Wlewy Bałtyckie były zarejestrowane w latach 1993, 2003, 2011, 2014, 2015, 2016, 2020. Tradycyjnie, wlewy oraz adwekcja słonej wody oceanicznej były rejestrowane przez instrumenty oceanograficzne mierzące temperaturę i zasolenie wody ze statków w czasie rejsów oceanograficznych. Trasa przepływu słonej wody przydennej z zachodu na wschód była także obserwowana z polskiego statku oceanograficznego „Oceania” w ramach badań prowadzonych przez Instytut Oceanologii PAN w Sopocie. R/V ‘Oceania’ odbywa regularnie od lat cztery razy w roku rejsy badawcze na trasie prowadzącej przez główne głębie Bałtyku: od Głębi Gdańskiej przez Rynnę Słupską do Głębi Bornholmskiej i dalej, do

Basenu Arkońskiego ([www.iopan.pl/05\\_ZjawiskoSlonychWlewow.pdf](http://www.iopan.pl/05_ZjawiskoSlonychWlewow.pdf)). Mierzy się temperaturę, zasolenie i natlenienie wody morskiej, a umieszczony w dnie statku dopplerowski prądomierz akustyczny rejestruje prędkość i kierunek prądów morskich w całej kolumnie wody. Jednak przy pomocy statków trudno jest uzyskać pełen obraz sporadycznego wydarzenia jakim jest Wielki Wlew Bałtycki. Terminy zaplanowanych rejsów niekoniecznie zgadzają się z terminami wlewów ustalonymi przez naturę. Dlatego też w ostatnich kilkunastu latach naukowcy niemieccy, ustanowili dodatkowo sieć boi oceanograficznych które rejestrują parametry wody w sposób ciągły. Na podstawie tych wszystkich pomiarów uzyskano dość pełny obraz sekwencji wydarzeń składających się na kilka najnowszych Wielkich Wlewów Bałtyckich, prowadzących do okresowej odnowy wód Morza Bałtyckiego.

W ostatnich latach pojawiła się nowa szansa uzyskania pełnego obrazu Wielkich Wlewów Bałtyckich. Jest to związane z rewolucyjnym rozwojem metod satelitarnych do obserwacji Ziemi. Najprawdopodobniej to właśnie metody satelitarne przyczynia się do uzyskania lepszego zrozumienia roli Wielkich Wlewów Bałtyckich dla stanu Bałtyku. Pierwsza taka próbę podjęli ostatnio naukowcy z Instytutu Oceanologii PAN w Sopocie (*Remote Sens.* 2019, 11(8), 954; <https://doi.org/10.3390/rs11080954>). Dane satelitarne wykorzystane w tych badaniach to głównie pomiary altymetryczne. Pomiary te są wykonywane przy pomocy radarów satelitarnych (szczegóły dostępne na [www.altimetry.info](http://www.altimetry.info)). W uproszczeniu, altymetria polega na dokładnym określeniu odległości od satelity do powierzchni morza, na podstawie pomiaru czasu upływającego od emisji sygnału (fali elektromagnetycznej) przez radar do momentu powrotu fali rozproszonej przez obserwowaną powierzchnię. Znajomość tego czasu i prędkości fal elektromagnetycznych pozwala wyznaczyć odległość między satelitą a powierzchnią. Dodatkowo wykorzystywane są specjalne systemy lokacji (między innymi GPS) pozwalające na dokładne określenie bezwzględnej pozycji satelity w stosunku do powierzchni referencyjnej geoidy ziemskiej. Współcześnie, altymetria satelitarna pozwala na określenie zmian wysokości powierzchni morza z dokładnością do 1-2 cm. W swojej pracy zespół z IOPAN wykorzystał dane anomalii powierzchni morza (ang. Sea Level Anomalies, SLA) czyli dane określające jak bardzo w danej chwili poziom morza różni się od wartości średniej (z lat 1993-2012). Dane te były dostarczane przez agencję AVISO przez Centrum Copernicus (Copernicus Marine and Environment Monitoring Service, <http://marine.copernicus.eu>).

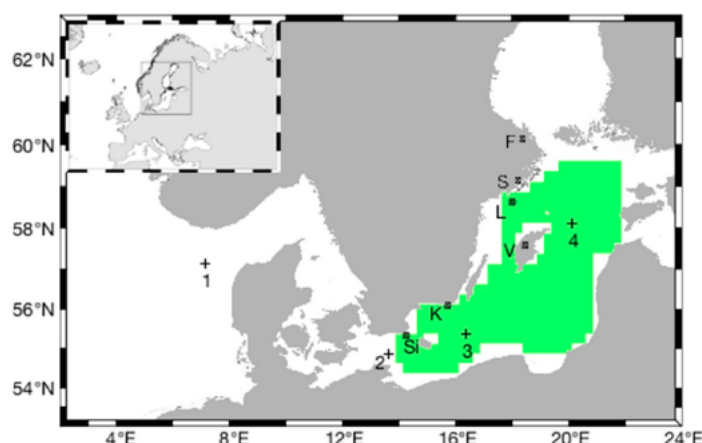


Figura 5. Mapa Bałtyku. Cyfry 1- 4 oznaczają pozycje przykładowych pixeli (punktów) na obrazach satelitarnych, natomiast kolor zielony oznacza rejon dla którego uśredniono przestrzennie wartości SLA dyskutowane w tekście. Ponadto zaznaczono stacje brzegowe monitorujące poziom powierzchni morza (Si = Simrishamn. K = Kungsholmsfort. V = Visby. L= Landsort Norra. S = Stockholm. F = Forsmark).

Dodatkowo w analizach wykorzystano dane meteorologiczne dostępne z European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF, <http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/>) oraz dane ze stacji brzegowych rejestrujących wysokość poziomu morza i przechowywane w szwedzkim instytucie SMHI (<http://opendata-catalog.smhi.se/explore>). Poniżej omówimy tylko najważniejsze wyniki naszych analiz.

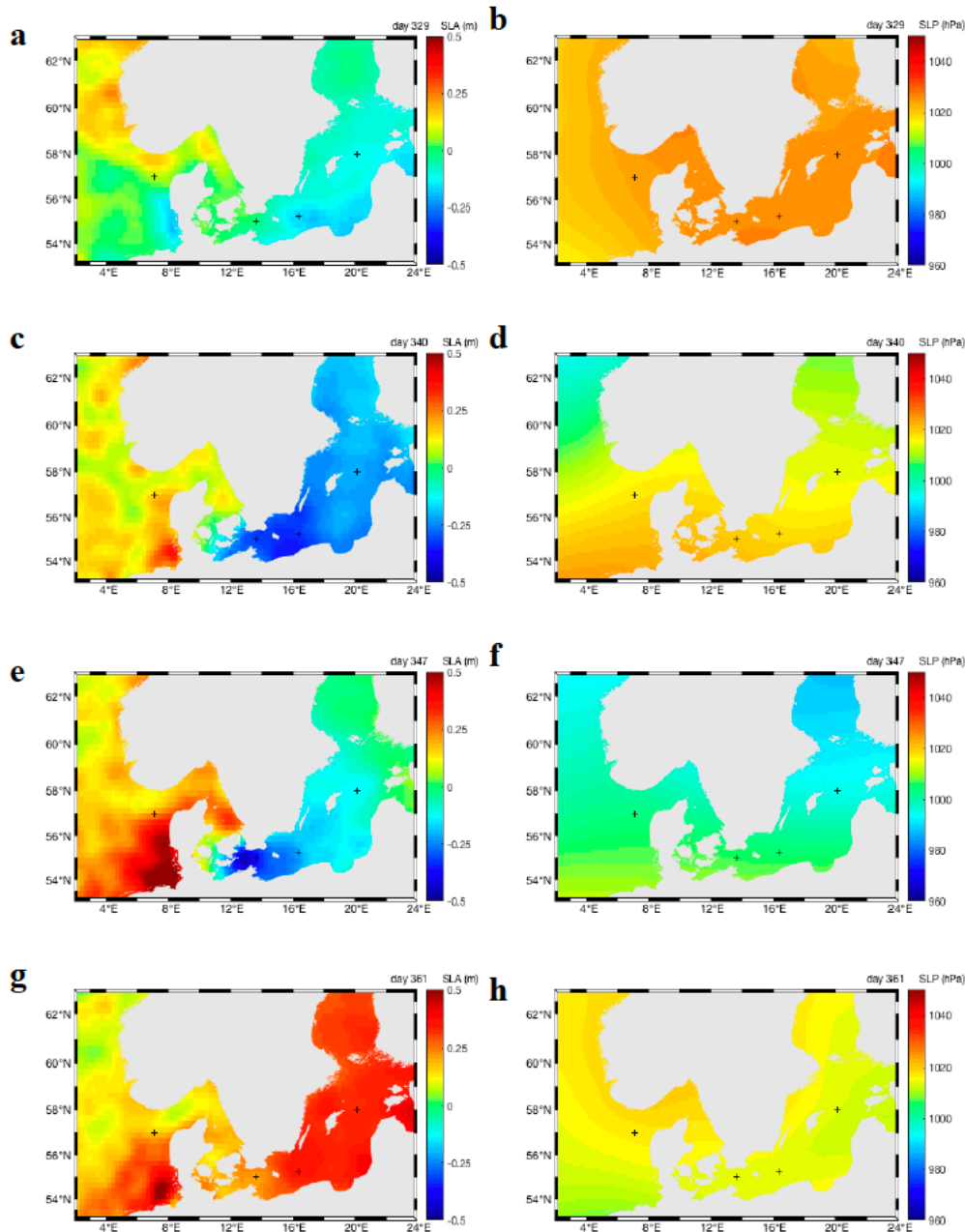


Figura 6. Mapy pokazujące zmienne w czasie kształty anomalii powierzchni morza (po lewej) oraz ciśnienie atmosferyczne na poziomie powierzchni morza (po prawej) podczas MBI z roku 2014. W prawym górnym rogu każdej mapy zaznaczono numer dnia w roku 2014. Krzyżyki oznaczają punkty 1- 4 z Figury 5. Figury a-d przedstawiają sytuacje tuż przed wlewem, gdy wiatry wschodnie oraz stosunkowo wysokie ciśnienie atmosferyczne powodowały wypływ wody z Bałtyku i obniżenie jego poziomu. Figury f-h pokazują fazę wlewu, gdy ciśnienie

atmosferyczne zmalało, wiatry zmieniły kierunek na zachodni i poziom morza w Bałtyku stopniowo wzrastał (jak widać na Figurze 7).

W pracy przeanalizowano dane dla lat 1993-2017. Prześlędzono jak zmieniały się warunki atmosferyczne oraz poziom powierzchni Bałtyku tuż przed oraz w trakcie każdego z Wielkich Wlewów Bałtyckich zidentyfikowanych na podstawie danych pomiarowych in situ. Dla przykładu pokazujemy w tym artykule wyniki naszych analiz dotyczące wlewu z roku 2014, który był jednym z największych opisanych dotąd wlewów. Figura 6 pokazuje rozkłady przestrzenne SLA oraz ciśnienia atmosferycznego na poziomie morza (SLP) tuż przed powstaniem wlewu, 25 listopada (dzień 329 roku 2014) oraz 5 grudnia (dzień 340). Dodatkowo Figura 7 pokazuje podobne dane jako serie czasowe dla wybranych punktów powierzchni morza (zaznaczonych na Figurze 5). Widać, że dnia 25 listopada obserwowano stosunkowo wysokie ciśnienie atmosferyczne a poziom morza kształtował się poniżej poziomu średniego i nadal się obniżał przez następne dni. W dniu 5 grudnia poziom powierzchni morza znajdował się znacznie poniżej wartości średniej.

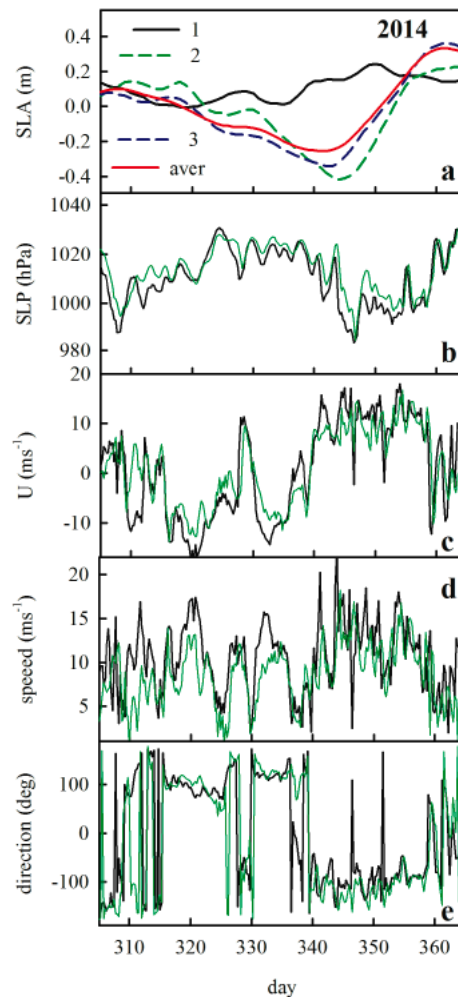


Figura 7. Zmiany w czasie a) anomalii poziomu morza (SLA) w punktach 1-3 oraz SLA uśrednionej na powierzchni zaznaczonej na Figurze 5; b) ciśnienie atmosferyczne (SLP) w punktach 1 i 2; c) składowa wektora prędkości wiatru w kierunku wschód- zachód (U); d) prędkość wiatru, e) kierunek wiatru. Dane dotyczą MBI z roku 2014, na osi poziomej oznaczono kolejne numery dnia z roku 2014.

Następnie ciśnienie atmosferyczne zmalało, zmienił się kierunek wiatru na zachodni i stopniowo wzrastał poziom morza osiągając w dniu 26 grudnia (dzień 361) znacznie większą wartość niż w okresie poprzedzającym wlew. Patrząc na Figurę 8 widzimy że dane satelitarne są zgodne z danymi ze stacji pomiarowych, jednak mapy pokazane na Figurze 6 pozwalają śledzić jak przebiegały zmiany powierzchni morza na dużej przestrzeni. Tego typu informacji nie można uzyskać z pomiarów punktowych ze statku czy też z boi pomiarowej.

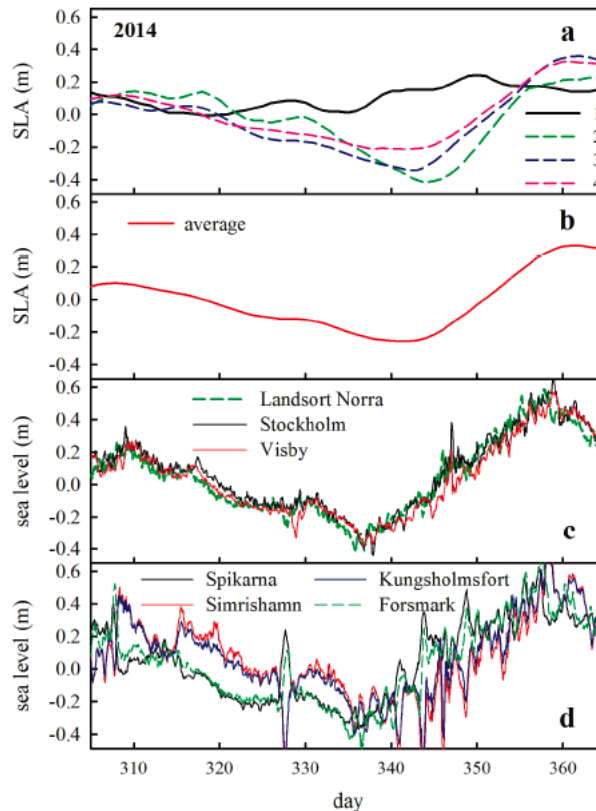


Figura 8. Serie czasowe porównujące zmiany w czasie a) anomalii poziomu morza (SLA) w punktach 1-4; b) SLA uśrednione na powierzchni zaznaczonej na Figurze 5; c) poziomu morza (sea level) zarejestrowanego na stacjach brzegowych w Landsort Norra, Stockholm, and Visby (d) w Simrishamn, Kungsholmsfort, Dane dotyczą MBI z roku 2014, na osi poziomej oznaczono kolejne numery dnia roku 2014.

Rezultaty badań opisane dokładnie w publikacji (*Remote Sens.* 2019, 11(8), 954; <https://doi.org/10.3390/rs11080954>) pokazują więcej przykładów MBI na przestrzeni ostatnich lat oraz ich szczegółowy przebieg. Podsumowując w skrócie te wyniki należy podkreślić że zastosowanie i rozwój altymetrii satelitarnej otwiera nowe możliwości monitorowania Wielkich Wlewnów Bałtyckich, gdyż dostarcza danych z dużych obszarów Morza Bałtyckiego i Północnego z dobrą rozdzielczością przestrzenną i czasową. Dane te pozwalają obliczyć zmiany objętości wód Bałtyku w czasie MBI. Nasze analizy potwierdziły że powstawanie wlewnów jest konsekwencją specyficznej sekwencji warunków meteorologicznych. Tuz przed wlewem w tzw. fazie wstępnej na ogół występowały wiatry wschodnie oraz wysokie ciśnienie atmosferyczne, po czym rozwijała się faza wlewu właściwego, gdy wiatr zmieniał kierunek na zachodni a ciśnienie atmosferyczne słabło. Jednak, pomimo że taka zmiana warunków atmosferycznych jest generalnie obserwowana, to widoczne są też wyraźne różnice w poszczególnych elementach tego scenariusza jeśli się porównuje sytuacje towarzyszące kolejnym MBI. Wykorzystując dane satelitarne pokazaliśmy też że zdarzenia MBI łączą się z

asynchroniczna zmiana poziomu morza w Bałtyku i Morzu Północnym. W fazie wstępnej następuje obniżenie poziomu w obu morzach, po czym w fazie wlewu właściwego najpierw zaczyna znacząco rosnać poziom Morza Północnego. Powstała w tym czasie różnica poziomów po obu stronach cieśnin duńskich generuje siłę ciśnienia hydrostatycznego, która wspólnie z wymuszaniem przez wiatr powoduje wzmożony transport wody słonej z Morza Północnego do Bałtyku. W innych sytuacjach (gdy nie ma MBI) na ogół poziom Morza Bałtyckiego oraz Północnego w pobliżu cieśnin zmienia się w sposób synchroniczny. Ponadto w analizowanym przedziale czasowym (1993-2017) zaobserwowaliśmy kilka przypadków podobnych do sekwencji wydarzeń charakterystycznej dla MBI, choć boje oceanograficzne MBI nie zarejestrowały. Prawdopodobnie mogły wtedy tworzyć się nieco mniejsze wlewy barotropowe, lub droga przemieszczania słonej wody z wlewu nie pokrywała się dokładnie z położeniem boi. Te mniejsze wlewy mogą też mieć istotne znaczenie dla odnowy wód bałtyckich.

W epoce zmian klimatu, gdy w związku z ogrzewaniem rośnie stratyfikacja termiczna Bałtyku wlewy wody z Morza Północnego, która w naszym morzu tonie i dociera do dużych głębokości mogą się okazać ratunkiem dla głębokiego Bałtyku. MBI w latach od 1980-2011 lat by znacznie rzadsze niż we wcześniejszych dziesięcioleciach, co bardzo niepokoiło badaczy morza. Na szczęście jak wskazują najnowsze dane, w ostatnich latach MBI znowu stały się częstsze. Jest też prawdopodobne, że słona woda napływa do nas również podczas mniejszych wlewów barotropowych, które umknęły dotąd uwadze oceanografów. Metody altymetrii satelitarnej ulegają ciągłym ulepszeniom. Ze względu na to że dane satelitarne okazały się bardzo przydatne w obserwacjach mórz i oceanów, agencje kosmiczne zwiększają liczbę tego typu misji kosmicznych, a więc już w najbliższej przyszłości uzyskamy dane dla Bałtyku z lepszą rozdzielczością czasową i przestrzenną. Będzie to miało ogromne znaczenie w postępie wiedzy na temat Wielkich Wlewów Bałtyckich, które są uważane za jedno z najważniejszych wydarzeń hydrologicznych dla tego rejonu, lecz wciąż jeszcze kryją w sobie dużo tajemnic.