

Zakwaszenie Oceanów - Morze Bałtyckie

Raport

Anu Vehmaa i Marko Reinikainen



Zakwaszenie Oceanów - Morze Bałtyckie

Raport Anu Vehmaa i Marko Reinikainen

Raport został zrecenzowany przez Dr. Karola Kulińskiego – Instytut Oceanologii Polskiej Akademii Nauk

Tłumaczenie z języka angielskiego: Polski Klub Ekologiczny, Okręg Pomorski

O autorach

Anu Vehmaa napisała pracę doktorską na Uniwersytecie Åbo Akademi w Finlandii, dotyczącą reakcji zooplanktonu na zakwaszenie oceanu i inne zmiany środowiskowe w Morzu Bałtyckim. Uzyskała również tytuł magistra Inżynierii Wodnej i Środowiskowej na Uniwersytecie Aalto w Finlandii. Obecnie pracuje jako niezależny badacz. Marko Reinikainen jest dyrektorem zarządzającym w AirClim. Ma tytuł doktora biologii na Uniwersytecie Åbo Akademi i jest profesorem nadzwyczajnym na tym samym uniwersytecie. Ma za sobą długą karierę naukową w dziedzinie biologii środowiskowej Morza Bałtyckiego i innych środowisk wodnych. Wcześniej był dyrektorem morskiej stacji terenowej w Finlandii.

Ilustracja na okładce: Lars-Erik Håkansson (Lehån).

Układ graficzny: Sven Ängermark/Monoclick

Konsultant językowy (j.angielski): Malcolm Berry, Seven G Translations, UK

ISBN: 978-91-984717-2-4

Opublikowany w kwietniu 2021 r. przez Sekretariat ds. Zanieczyszczeń Powietrza i Klimatu (AirClim).

Redaktorzy: Marko Reinikainen i Reinhold Pape (AirClim).

Adres: AirClim, Första Långgatan 18, 413 28 Göteborg, Szwecja

Telefon: +46(0)31 711 45 15

Strona internetowa: www.airclim.org.

Sekretariat jest wspólnym przedsięwzięciem organizacji Friends of the Earth Sweden, Nature and Youth Sweden, Swedish Society for Nature Conservation oraz World Wide Fund for Nature Sweden.

Raport został napisany w ramach projektu BALSAM (Baltic Sea Acidification Mitigation), finansowanego przez Instytut Szwedzki, we współpracy z Ecoaction (Ukraina), Friends of the Baltic (Rosja), Polskim Klubem Ekologicznym, Okręg Pomorski (Polska) oraz Novia University of Applied Sciences (Finlandia).

Raport jest również dostępny w formacie .pdf na stronie: www.airclim.org.



Spis treści

Wstęp – Czym jest Zakwaszenie Oceanów?	4
Morze Bałtyckie – Wyjątkowy przypadek pod wieloma względami.....	5
Wpływ na ekosystem Morza Bałtyckiego	9
Łagodzenie skutków i adaptacja	13
Monitorowanie wskaźników zakwaszenia.....	16
Aktualny stan zakwaszenia w Morzu Bałtyckim	18
Uwagi końcowe.....	21
Podziękowania.....	21
Literatura	21

Wstęp – Czym jest Zakwaszenie Oceanów?

Zmiana klimatu - spowodowana działalnością człowieka - jest dziś powszechnie znanym zagrożeniem. Spalanie paliw kopalnych uwalnia do atmosfery węgiel, który znajdował się pod ziemią przez miliony lat. Ponadto zmiany w sposobie użytkowania gruntów wpływają na obieg węgla w przyrodzie. Stale rosnące stężenie **dwutlenku węgla (CO₂)** w atmosferze powoduje globalne ocieplenie, jednak znaczna jego część jest pochłaniana przez powierzchnię oceanów

Od czasu rewolucji przemysłowej około 30% dodatkowego CO₂ z atmosfery trafiało do oceanów. Ten efekt buforowy łagodził zmiany klimatyczne, ale nie pozostaje bez konsekwencji dla życia pod wodą.

Rozpuszczanie CO₂ w wodach powierzchniowych powoduje przesunięcie równowagi kwasowo-zasadowej wody morskiej w procesie zwanym **zakwaszaniem oceanu**.

W rezultacie wzrasta stężenie CO₂ i wodorowęglanów (HCO₃⁻) w wodzie. Zwiększa się również stężenie jonów wodorowych (H⁺), co można rozpoznać po spadku pH. Zmniejsza się natomiast stężenie jonów węglanowych (CO₃²⁻).

Zakwaszenie oceanu jest kontrolowane przez **całkowitą zasadowość** - zdolność buforowania - wody. Zasadowość wód naturalnych określana jest jako nadwyżka zasad nad kwasami, a więc zdolność wody do neutralizacji dodatku kwasów (np. wzrostu CO₂). Im wyższa zasadowość wody, tym mniejsze zmiany pH, gdy rozpuszcza się w niej CO₂, a im niższa zasadowość wody, tym większe zmiany pH.

pH powierzchniowych wód morskich wynosi około 8, co oznacza, że jest lekko zasadowe (pH > 7). Proces zakwaszenia oceanu powoduje zmianę pH w kierunku obojętnym (pH = 7). W erze przemysłowej pH powierzchni spadło o 0,1 w skali pH. Przewiduje się, że w zależności od przyszłych emisji CO₂ do atmosfery i zastosowanego modelu, pH powierzchni oceanu spadnie do 8,05 - 7,75 pod koniec XXI wieku. Chociaż zmiany w skali pH wydają się niewielkie, odpowiadają one wzrostowi kwasowości oceanicznej (H⁺) nawet o 200%.

Zmiany warunków życia mają wpływ na funkcjonowanie organizmów. Szczególnie zagrożone są rośliny i zwierzęta wapieniące, ponieważ spadek pH **pogarsza warunki wapienia**. Zredukowany stan nasycenia (Ω) węglanu wapnia (CaCO₃) jego form mineralnych, aragonitu i kalcytu, może mieć negatywny wpływ na stopień zwapienia kilku taksonów organizmów morskich. Naukowcy zaobserwowali na przykład postępującą degradację struktur koralowców i wapienia planktonu, a także coraz cieńsze muszle małży i ostryg. Stan nasycenia wyraża termodynamiczną tendencję CaCO₃ do tworzenia lub rozpuszczenia. Wartość stanu nasycenia powyżej jednego ($\Omega > 1$) odnosi się do przesylenia, a wartości poniżej jednego ($\Omega < 1$) do warunków niedosycenia. Rozpuszczanie egzoszkieletu niektórych gatunków małży i ślimaków następuje, gdy stan nasycenia wynosi znacznie poniżej jednego ($\Omega \ll 1$). Chociaż zjawisko to rzadko ma miejsce na powierzchni oceanów to jest ono bardziej powszechne na obszarach upwellingu przybrzeżnego w umiarkowanym klimacie. Upwelling sprawia, że niedotlenione wody głębinowe o wysokim stężeniu CO₂ podnoszą się ku powierzchni, co obniża stan nasycenia i tworzy warunki mniej przyjazne dla organizmów zależnych od CaCO₃.

Zakwaszenie może także wywołać inne koszty utrzymania fizjologicznego, co może

mieć odzwierciedlenie zwłaszcza w rozwoju i przetrwaniu na wczesnych etapach życia. Ponadto może zmieniać zachowanie i uczenie się ryb poprzez upośledzenie ich mechanizmów czuciowych, słuchu, węchu i wzroku. Chociaż zakwaszenie może mieć negatywny wpływ na niektóre gatunki, inne mogą na tym skorzystać. Potencjalne korzyści odniosą między innymi makroglony ze względu na lepszą dostępność węgla. W każdym razie, zakwaszenie oceanu zmienia sieć pokarmową i, ostatecznie, procesy życiowe i funkcje ekosystemu w szerszym zakresie.

Morze Bałtyckie – Wyjątkowy przypadek pod wieloma względami

Morze Bałtyckie jest szczególnie podatne na zakwaszenie oceanów ze względu na niską całkowitą zasadowość. Niska alkaliczność w połączeniu z wysoką produkcją pierwotną i oddychaniem oraz wynikającą z tego wysoką remineralizacją materii organicznej są przyczyną znacznych wahań dobowych i sezonowych pH wód powierzchniowych.

Morze Bałtyckie (Rys. 1) jest jednym z największych słonawych zbiorników wodnych na świecie. Ma powierzchnię 420 000 km², jego średnia głębokość to zaledwie 54 m, a jedna trzecia jego powierzchni ma mniej niż 30 m głębokości. Mała objętość i powolny przepływ wody sprawiają, że morze jest szczególnie narażone na presję spowodowaną przez 85 milionów ludzi żyjących w jego zlewni. Morze Bałtyckie charakteryzuje się silnymi gradientami zasolenia i temperatury. Obszary najbardziej wysunięte na północ są prawie słodkowodne (zasolenie <3), a zimą pokryte lodem. Na południu klimat jest łagodniejszy, a zasolenie jest bliższe wodzie morskiej (~15 w cieśninie Kattegat). Oprócz gradientów zasolenia i temperatury z północy na południe, stałe pionowe uwarstwienie ogranicza pionowy ruch wody w większości części morza.

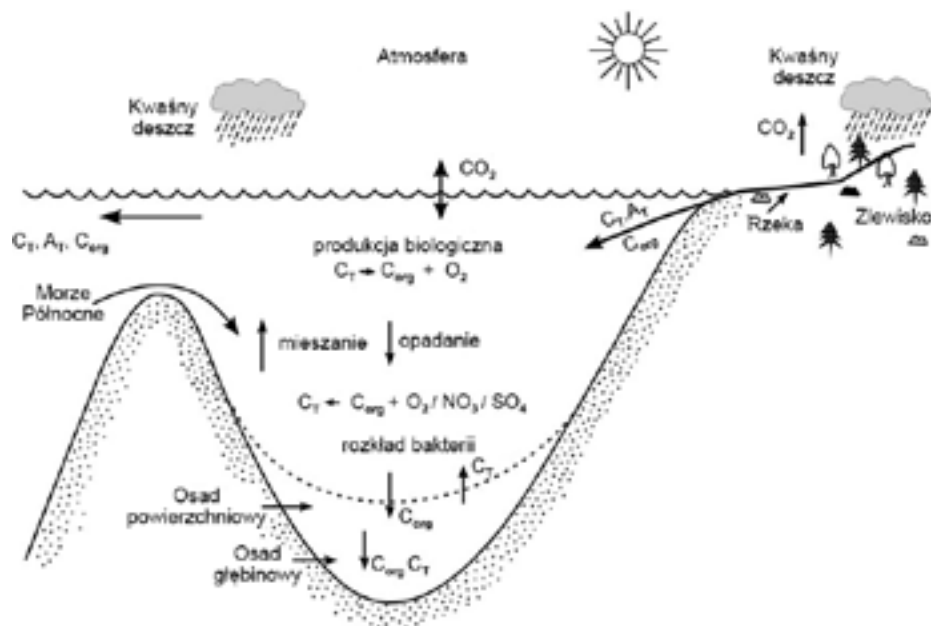
Bałtyk jest uważany za szczególnie podatny na zakwaszenie, ponieważ jego zasadowość jest niższa niż w oceanach. Ze względu na ogólnie niską całkowitą zasadowość, wysoką produkcję pierwotną i wynikającą z tego wysoką remineralizację, pH wód powierzchniowych jest mniej stabilne niż w oceanach. W okresie wegetacji CO₂ jest pochłaniany na drodze intensywnej fotosyntezy, co w ciągu dnia podnosi pH. Jednak w nocy i na obszarach poniżej strefy eufotycznej oddychanie uwalnia CO₂ z powrotem do wody, obniżając w ten sposób pH. Dzielne wahania pH wody morskiej mogą sięgać lokalnie nawet 1,2 w skali pH (w pasie Fucus, Wahl i wsp. 2018), przy czym najbardziej intensywne wahania występują w pobliżu makroglonów i trawy morskiej, a także podczas zakwitów fitoplanktonu. Zimą produkcja pierwotna jest obniżona z powodu niskiej temperatury i braku światła, podczas gdy remineralizacja materii organicznej wytwarza CO₂ i obniża pH w wodach głębinowych. W wyniku procesów mieszania woda wzbogacona w CO₂ wypływa na powierzchnię i jest przyczyną niższych wartości pH wód powierzchniowych zimą.

Zwiększone stężenie CO₂ w atmosferze i wynikające z niego zakwaszenie nie jest jedynym czynnikiem wpływającym na przyszły bilans pH wód powierzchniowych Morza Bałtyckiego, jednak przy całkowitej zasadowości (patrz ramka informacyjna) jest ono zdecydowanie najbardziej znaczące. Postępująca eutrofizacja spowodowana napływem składników odżywczych nie powstrzyma zakwaszenia, ale wzmocni sezonowe wahania poprzez zwiększenie produkcji i mineralizacji. Zmiany

temperatury i zasolenia będą miały niewielki wpływ na równowagę pH. Ponadto kwaśne opady i wzrost rzeczno-transportu rozpuszczonej materii organicznej będą miały marginalny wpływ na zakwaszenie, pomimo że nawet 20-30% rozpuszczonego węgla organicznego dostającego się do Morza Bałtyckiego jest biodostępna i może być respirowana, co powoduje uwalnianie CO₂. Co więcej, mineralizacja rozpuszczonego węgla organicznego w węgiel nieorganiczny może zwiększyć zakwaszenie obszarów przybrzeżnych, a efekt zakwaszenia oceanów nasilać się będzie na obszarach przybrzeżnych dotkniętych wypieraniem wód głębinowych wzbogaconych w CO₂. Podczas gdy zmiany atmosferycznego CO₂ mają odzwierciedlenie w pH wód powierzchniowych w skali miesiąca, to czas reakcji na zmiany zasadowości i spływu wód obejmuje dziesięciolecia ze względu na długi okres wymiany wody.



Rysunek 1. Obszar zlewiska, zlewnie i siedem największych rzek uchodzących do Morza Bałtyckiego. (Dane: HELCOM; CCM River and Catchment Database © European Commission - JRC, 2007; Vogt, J.V. et al. (2007): A pan-European River and Catchment Database. European Commission - JRC, Luxembourg, (EUR 22920 EN) 120 pp.)



Rysunek 2. Schemat obiegu węgla w Morzu Bałtyckim: C_{org} węgiel organiczny; C_T całkowity węgiel nieorganiczny; A_T całkowita zasadowość; CO_2 dwutlenek węgla; O_2 tlen; NO_3 azotany; SO_4 siarczany (Omstedt, A., Humborg, C., Pempkowiak, J. Perttilä, M., Rutgersson, A., Schneider, B., Smith, B. (2014) Biogeochemical Control of the Coupled CO_2 - O_2 System of the Baltic Sea: A Review of the Results of Baltic-C. *AMBIO* 43, 49–59. (<https://doi.org/10.1007/s13280-013-0485-4>))

Całkowita zasadowość, pojemność buforowa - Morza Bałtyckiego

W przeciwieństwie do oceanów, w których zasadowość jest względnie stała, całkowita zasadowość Morza Bałtyckiego zmienia się w zależności od obszaru, kontrolowanego głównie przez całkowitą zasadowość wpływających rzek i wód Morza Północnego. Całkowita zasadowość wód rzecznych zależy z kolei od warunków atmosferycznych i składu podłoża skalnego w zlewni (Rys. 2). W północnych częściach Bałtyku podłoże jest zbudowane z granitu, który podczas wietrzenia wytwarza mniej zasadowości niż wapień. Podłoże obszarów południowych składa się z gliny, wapienia i piaskowca, które z kolei powodują wyższą zasadowość. Dlatego woda rzeczna na południu ma wyższą zasadowość niż na północy. Ponadto dopływająca woda morska z Morza Północnego o dużym zasoleniu ma wysoką zasadowość, co skutkuje dodatnią liniową zależnością między zasoleniem, a zasadowością w Zatoce Fińskiej i Zatoce Botnickiej. Zatoka Ryska stanowi wyjątek, ponieważ ze względu na wapienną skałę macierzystą, napływające tam wody rzeczne mają nawet wyższą zasadowość niż otwarte wody oceaniczne. Bałtyk Właściwy jest obszarem mieszania się wód wpływających, co powoduje, że liniowa zależność między zasoleniem, a zasadowością jest mniej wyraźna.

Zwiększające się stężenie atmosferycznego CO_2 wzmagają wietrzenie gleby, podnosząc tym samym alkalizację wody rzecznej wpływającej do morza. Zarówno wzrost stężenia CO_2 w atmosferze, jak i ocieplenie klimatu mają pozytywny wpływ na wzrost roślin lądowych i oddychanie gleby, a wynikający z tego wzrost stężenia CO_2 w glebie przyspiesza wietrzenie mineralne.

Przewiduje się, że zmiany klimatyczne spowodują intensyfikację opadów, zwłaszcza w północnych obszarach zlewni Morza Bałtyckiego, podczas gdy południowe regiony staną się bardziej suche. Chociaż coraz obfitsze opady deszczu rozcieńczają zasadowość napływającej wody rzecznej, ogólny efekt jest dodatni, strumień zasadowości wzrasta z

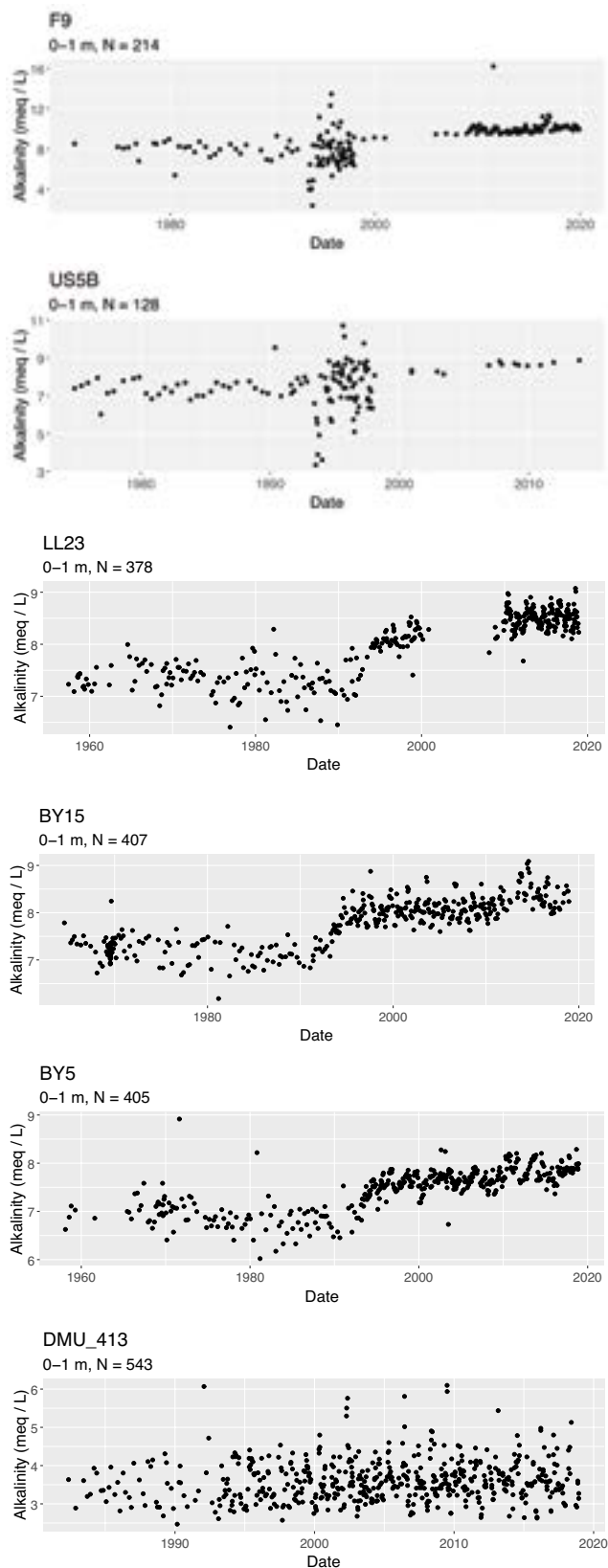
powodu zwiększonego wypływu.

Innym zewnętrznym źródłem całkowitej zasadowości jest podmorski wypływ wód gruntowych. Podobnie jak w przypadku wód rzecznych, zasadowość wód podziemnych zależy w pewnym stopniu od właściwości geologicznych zlewni. Znaczenie wypływu wód gruntowych dla całkowitej alkalizacji jest nadal nieznane, jednak prawdopodobnie ma przynajmniej znaczenie lokalne. Wewnętrzne procesy wytwarzania całkowitej zasadowości także zwiększają zdolność buforową w przybrzeżnych wodach oceanicznych. Produkcja pierwotna, mineralizacja tlenowa (w tym nityfikacja), denitryfikacja oraz redukcja siarczanów i utlenianie - wszystko to wpływa na całkowitą zasadowość. Produkcja pierwotna i mineralizacja tlenowa zwiększają zasadowość w kolumnie wody, natomiast w osadach powierzchniowych ją obniżają. Denitryfikacja, zarówno w kolumnie wody, jak i w osadach, ma pozytywny wpływ na zasadowość. Efekt netto redukcji siarczanów / utleniania siarczków na zasadowość jest również pozytywny, jeśli siarka jest trwale osadzona w postaci np. pirytu. Jednak efekt ten jest mniejszy niż efekt denitryfikacji. Zwiększona sedymentacja i mineralizacja cząstek stałych spowodowana eutrofizacją zmniejsza stężenie tlenu w kolumnie wody i zwiększa wytwarzanie zasadowości w osadach. Całkowita zasadowość wody powierzchniowej wzrosła w Morzu Bałtyckim w ostatnich dziesięcioleciach (Rys. 3). W celu wyjaśnienia tych tendencji wskazano zarówno czynniki wewnętrzne, jak i zewnętrzne. Według niemieckich badaczy zaobserwowane tempo zmian było najwyższe w nisko zasolonych regionach północnych i stopniowo malało wraz ze wzrostem zasolenia w kierunku południowym. Naukowcy obliczyli, że wzrost całkowitej zasadowości skompensował prawie połowę wywołanego przez CO_2 zakwaszenia

w środkowej części Morza Bałtyckiego i prawie 100% w Zatoce Botnickiej. Niemniej jednak ostrzegają, że rosnąca zasadowość nie powinna być interpretowana jako ochrona przed przyszłym zakwaszeniem wywołanym przez CO_2 .



Rysunek 3. Szeregi czasowe wód powierzchniowych (0-1 m) całkowitej zasadowości znormalizowanej do zasolenia 35 w Morzu Bałtyckim. Wykresy pokazują tendencje wzrostowe w ciągu ostatnich kilku dekad. Dane zebrane przed 1995 rokiem zawierają większe niepewności w porównaniu z obecnymi ze względu na mniejszą dokładność pomiarów (Dane: HELCOM, ICES Dataset on Ocean Hydrography, The International Council for the Exploration of the Sea, Copenhagen. 2014)



Wpływ na ekosystem Morza Bałtyckiego

Zakwaszenie oceanów to kolejne obciążenie na długiej liście, z którą musi się zmierzyć ekosystem Morza Bałtyckiego. Informacje o skutkach zakwaszenia gromadzą się powoli. Nic dziwnego, że efekty są w dużym stopniu zależne od innych stresorów środowiskowych, z powodu interakcji, na przykład z eutrofizacją. Dotychczasowe badania wykazywały, że zakwaszenie wpływa negatywnie np. na larwy omułka jadalnego (*Mytilus edulis*), małża bentosowego (*Limecola*), heterotroficzny bakterioplankton i larwy dorsza zachodniego Bałtyku.

Ze względu na niskie zasolenie i młody wiek geologiczny w ekosystemie Morza Bałtyckiego występuje niewielka liczba gatunków. Jednak, w takich warunkach różnorodność biologiczna jest większa niż można by się spodziewać ze względu na unikatowe gradienty zasolenia i zróżnicowane siedliska.

Wpływ zakwaszenia oceanów na organizmy żywe badano głównie na poziomie gatunków, podczas gdy dowody na reakcje zespołów populacji zaczęto gromadzić dopiero w ostatnich latach. Kierunek i skala wpływu zakwaszenia jest również w dużej mierze zależna od czynników, takich jak ocieplenie, zmiany zasolenia, światło i eutrofizacja. W tej części podsumowano wpływ zakwaszenia oceanów na zespoły organizmów Morza Bałtyckiego wykorzystując współczesne wyniki badań naukowych nad gatunkami kluczowymi/fundamentalnymi.

Strefa przybrzeżna

Strefa przybrzeżna jest bardziej niestabilnym siedliskiem niż obszary pelagiczne lub bentosowe. Podlega ona zmianom sezonowym, działaniu fal, a także jest pod większym wpływem działalności człowieka. Dlatego obszary przybrzeżne są szczególnie wrażliwe na zmiany środowiska wywołane działalnością antropogeniczną. Jednocześnie najbardziej zróżnicowane zespoły populacji występują w strefie przybrzeżnej.

Morszczyń pęcherzykowaty

Makroglony, brunatnice, morszczyń (*Fucus vesiculosus*, *F. radicans*) należą do gatunków fundamentowych zbiorowisk litoralnych. Na skalistych brzegach wieloletnie morszczyń pęcherzykowate zapewniają siedlisko i pokarm dla licznych gatunków przez cały rok. Brunatnice bałtyckie są wrażliwe na eutrofizację, stąd ich występowanie w ostatnich dziesięcioleciach zmniejszyło się. Oczekuje się jednak, że makroglony odniosą korzyści z zakwaszenia oceanu, ponieważ zwiększona dostępność CO₂ może zaspokoić zapotrzebowanie na węgiel podczas fotosyntezy i zaoszczędzić energię, gdyż mechanizmy koncentracji węgla mogą zostać wyregulowane.

Wpływ zakwaszenia oceanów na populacje morszczyń pęcherzykowatego badano w połączeniu z innymi zmiennymi środowiskowymi. W rezultacie, zgodnie z wynikami badań przeprowadzonych na populacjach z południowego Bałtyku (Fiord Kiloński) i północnego Bałtyku (Zatoka Fińska), efekty wydają się niewielkie. Zakwaszenie oceanów może mieć nieco pozytywny wpływ na wzrost w postaci zwiększonej dostępności i magazynowania węgla, ale reakcja ta zależy od pory roku

i długości dnia i jest niewielka w porównaniu z innymi skutkami środowiskowymi, takimi jak nasłonecznienie i ocieplenie.

Niezależnie od tego, przyszłość wydaje się być wyzwaniem dla brudnicy. Szkodliwe okazują się zwłaszcza letnie upały. Ocieplenie klimatu, zmniejszające się zasolenie i eutrofizacja wybrzeża sprzyjają szybkiemu wzrostowi nitkowatych zielenic, epifitów i fitoplanktonu ponad morskoczynem¹. W związku z tym funkcje ekosystemu, które wypełniają te wieloletnie gatunki, są zagrożone. Działania lokalne lub regionalne, takie jak złagodzenie przełowienia i eutrofizacji, mogą osłabić postępującą utratę morskoczynu.

Omułek jadalny

Omułek jadalny (zespół *Mytilus edulis trossulus*) to kluczowy gatunek w ekosystemie Morza Bałtyckiego. Jest skutecznym filtratorem, który w trakcie procesu filtracji przenosi składniki odżywcze i materię organiczną z pelagialu do bentosu. W związku z tym jest ważnym łącznikiem między tymi dwoma siedliskami. Ponadto pełni rolę inżyniera ekosystemu, tworząc złożone struktury dla wielu organizmów i jest głównym źródłem pożywienia dla kilku gatunków ryb i ptaków.

Małże uzależnione od swoich ochronnych skorup i jako organizmy wapienne są szczególnie narażone na zakwaszenie oceanów. Według ostatnich badań przeprowadzonych na populacjach bałtyckich, bentosowe stadium życia jest w stanie zrekompenzować koszty zakwaszenia pod warunkiem wystarczającej ilości pokarmu. Stadia larwalne mają mniej szczęścia ze względu na wysoki stopień zwapnienia podczas formowania pierwszej skorupy larwalnej i ograniczoną energię dostarczoną przez jajo. Zwapnienie jest energetycznie kosztowne, a koszty rosną wraz ze spadkiem zasolenia. Ostatnio zasugerowano, że zmniejszony wzrost i wynikający z niego mały rozmiar omułka w Morzu Bałtyckim jest konsekwencją wysokich kosztów zwapnienia, a nie stresu osmotycznego związanego z niskim zasoleniem. Przewidywane zakwaszenie, skutkujące obniżeniem stanu nasycenia CaCO_3 , oraz odsalanie wody morskiej mogą zatem w przyszłości stanowić poważne ograniczenia dla omułka jadalnego.

Populacje w Morzu Bałtyckim przystosowały się do zmiennych warunków pH i niskiej zasadowości. We wspólnym eksperymencie laboratoryjnym badano rozwój larw populacji Morza Północnego i populacji bałtyckiej pochodzącej z siedliska wzbogaconego w CO_2 (Fiord Kiloński) w warunkach podwyższonego CO_2 . Obie populacje wykazywały upośledzony rozwój larw, ale efekt był mniej poważny dla populacji bałtyckiej: redukcja długości muszli była mniejsza, a współczynnik przeżycia wyższy przy podwyższonym poziomie CO_2 w porównaniu z warunkami kontrolnymi. Zmienne środowiska, takie jak Fiord Kiloński, ułatwiają utrzymanie dużej różnorodności genetycznej, co uwidocznilo się w wielopokoleniowym doświadczeniu porównującym rodziny omułków wrażliwe i tolerujące CO_2 . Eksperyment wykazał dziedziczne wydajności zwapnienia w rozwoju wczesnym larw. W związku z tym te bałtyckie małże mogą wykazywać potencjał adaptacyjny do skutków zakwaszenia oceanu. Ponadto, omułek jadalny może zwiększyć tempo wapnienia w zakwaszonych warunkach poprzez osiedlenie się w gęstym siedlisku makroglonów lub trawy

morskiej, które mogą stanowić czasowe schronienie przed stresem związanym z zakwaszeniem. W warunkach doświadczalnych *M. edulis* był w stanie utrzymać większość swojej aktywności wapniowej, przenosząc ją na dzień, kiedy to aktywność fotosyntetyczna morskichy zwiększała średnie pH siedliska.

Otwarta toń wodna

Ekosystemy planktonu

Zbiorowiska planktonu stanowią podstawę produktywności pelagicznej. Produkcja pierwotna wytwarzana przez fitoplankton i bakterie przekazywana jest dalej przez żerujący zooplankton i pętle mikrobiologiczne na użytek ryb jedzących plankton, a ostatecznie ryb drapieżnych, ssaków i ptaków morskich.

Wydaje się, że istnieje duża zmienność tolerancji na zakwaszenie oceanów pomiędzy gatunkami fitoplanktonu i w ich obrębie, co utrudnia wyciąganie jakichkolwiek ogólnych wniosków. Eksperymenty w mezokosmosie w zachodniej części Morza Bałtyckiego (Fiord Kiloński) i w północnej części Morza Bałtyckiego (Zatoka Fińska) oraz w mikrokosmosie Bałtyku Właściwego (laboratorium Askö) wykazały, że na poziomie ekosystemu występują pewne ogólne zmiany. Po pierwsze, zakwaszenie oceanu ma pozytywny wpływ na produkcję pierwotną, mierzoną jako biomasa fitoplanktonu lub stężenie chlorofilu *a*. Zwiększona produkcja występuje u rzadszych i mniejszych gatunków pikosize, podczas gdy gatunki dominujące wydają się pozostawać bez zmian. Po drugie, zakwaszenie ma coraz większy wpływ na wielkość komórek zarówno fitoplanktonu, jak i sinic. Po trzecie, negatywny wpływ mają bakterie heterotroficzne. Wpływowi zakwaszenia oceanu na fitoplankton przeciwstawia się jeszcze silniejszy efekt ocieplenia, który zmniejsza produkcję pierwotną i wielkość komórek. Z drugiej strony, ocieplenie i zakwaszenie wydają się mieć synergiczny wpływ na dynamikę społeczności bakterii, które są również wrażliwe na zmiany zasolenia i rozpuszczonego węgla organicznego.

Ze względu na ważną rolę w systemach morskich, widłonogi z rzędu Calanoida są najczęściej analizowanym taksonem zooplanktonowym w badaniach nad zakwaszeniem oceanów. W Morzu Bałtyckim został zbadany sukces reprodukcyjny gatunków *Acartia sp.* i *Eurytemora affinis*. *Eurytemora* wydaje się być bardziej tolerancyjna na zakwaszenie, prawdopodobnie z powodu większej ekspozycji i adaptacji do szerszych zmian pH, dzięki silniejszej migracji pionowej w ciągu dnia w wieku dorosłym. *Acartia* wydaje się być zdolna do radzenia sobie z zakwaszeniem częściowo poprzez zmianę rozmiaru i dostosowanie potomstwa do środowiska. Ta zdolność może złagodzić krótkoterminowe negatywne skutki zakwaszenia i dać czas na adaptację genetyczną, co jest potencjalną strategią adaptacyjną dla gatunków o krótkim czasie generacji w ramach zachodzących zmian środowiskowych.

Ekosystemy planktonowe są złożone. Prowadząc doświadczenia należy uwzględnić, iż pory roku, interakcje troficzne i region geograficzny, mają wpływ na wyniki badań nad zakwaszeniem, gdy wykorzystywane są naturalne zbiorowiska planktonu. Ponadto, nawet różne cechy funkcjonalne w obrębie jednego gatunku mogą wykazywać przeciwne reakcje. Na przykład, w doświadczeniu w mezokosmosie

testującym wpływ pomiędzy globalnym ociepleniem z końca wieku, a efektem zakwaszenia oceanu na widłonoga *A. tonsa*, zakwaszenie zwiększyło śmiertelność w wyższej temperaturze, ale zmniejszyło ją w niższej, natomiast zakwaszenie, być może zaskakująco, miało pozytywny wpływ na rozmiar i wzrost.

Wciąż brakuje dowodów, ale jest prawdopodobne, że przejście do mniejszych rozmiarów fitoplanktonu i rosnące znaczenie pętli mikrobiologicznych będzie sprzyjać zooplanktonowi pasożytniczemu, który jest w stanie konsumować bakterie. Ten wzrost regeneracyjnej produkcji pierwotnej zmniejszy transfer energii do wyższych poziomów troficznych, oraz przepływ materii organicznej, która zasila ekosystem bentosowy. Dlatego też funkcje, które zapewnia ekosystem pelagiczny, są zagrożone.

Ekosystemy bentosowe

Zbiorowiska bentosowe Morza Bałtyckiego są ubogie gatunkowo, dlatego ich funkcjonalność zależy od kilku gatunków kluczowych. Zbiorowiska te są szczególnie narażone na zakwaszenie, ponieważ wiele gatunków bentosowych to organizmy wapniejące. Co więcej, już teraz cierpią one z powodu szeroko rozprzestrzenionej hipoksji/anoksji oraz związanego z tym niskiego stanu nasycenia CaCO_3 .

Małż *Limecola balthica* (dawniej znany jako *Macoma balthica*) jest gatunkiem licznie występującym na obszarach miękkiego dna Morza Bałtyckiego i jest jednym z dominujących gatunków w ubogim gatunkowo północnym Bałtyku. *Limecola* jest bioturbatorem. Zagrzebując się w osadach, zwiększa natlenienie ich warstw i recykling materii organicznej, wpływając na ogólne funkcjonowanie ekosystemu bentosowego. Zakwaszenie oceanu ma negatywny wpływ na *Limecola*. Eksperymenty z wykorzystaniem populacji z Zatoki Fińskiej wykazały, że nawet niewielki spadek pH spowalnia tempo wzrostu swobodnie pływających larw, a także opóźnia ich rozwój i zmniejsza przeżywalność. Wolniejszy wzrost i rozwój larw oraz związane z tym opóźnienie osiedlania się zwiększają narażenie na drapieżnictwo poprzez wydłużenie okresu funkcjonowania w planktonie. Po osiedleniu się w osadach, młode i dorosłe osobniki *Limecola* narażone są na prawdopodobne warunki niskiej zawartości tlenu i towarzyszące temu obniżone pH. Według eksperymentów przeprowadzonych w Zatoce Fińskiej i Gdańskiej, są one mniej wrażliwe na niższe pH niż stadia larwalne. Jednakże, utrzymanie podstawowego metabolizmu, regulacja wewnętrznej równowagi pH lub zmiany w ich zachowaniu przy zagrzebywaniu się mogą mieć negatywny wpływ na ich budżet energetyczny co może mieć wpływ na sukces reprodukcyjny i ogólny rozwój populacji.

Nawet jeśli sezonowe wahania pH wody morskiej mogą ułatwiać ewolucyjną adaptację do zakwaszenia, larwy *Limecola* z Morza Bałtyckiego (Zatoka Fińska) wydają się być bardziej podatne na połączony stres związany z ociepleniem i zakwaszeniem niż larwy pochodzące z populacji w Zatoce Biskajskiej lub południowej części Morza Północnego. A zatem bałtyckie populacje tego kluczowego gatunku bentosowego są zagrożone z powodu sumarycznego stresu związanego z zakwaszeniem, hipoksją i ociepleniem.

Ryby pelagiczne

Wpływ zakwaszenia oceanu na populacje ryb w Morzu Bałtyckim nie został jeszcze w pełni zbadany. Jednym z niewielu gatunków, który zyskał uwagę jest dorsz atlantycki (*Gadus morhua*). Dorsz jest głównym drapieżnikiem w pelagicznych sieciach pokarmowych. Żerując na rybach planktonożernych, szprotach i śledziach, zapewnia wysoką liczebność zooplanktonu, który z kolei ogranicza zakwity fitoplanktonu poprzez intensywne żerowanie. Tak więc zmiany w populacji dorsza mogą mieć kaskadowy wpływ na cały ekosystem.

Podobnie jak w przypadku wielu innych komercyjnych zasobów rybnych na świecie, liczebność dwóch odrębnych zasobów dorsza (wschodniego i zachodniego) w Morzu Bałtyckim drastycznie spadła w ostatnich dziesięcioleciach. Oprócz przełowienia, dorsz ucierpiał z powodu niedotlenienia związanego z eutrofizacją i zmniejszonego zasolenia. W chwili obecnej, szczególnie stan zasobów dorsza wschodnio bałtyckiego jest zły. Ryby te cechuje niskie tempo wzrostu, znajdują się w niekorzystnych warunkach i posiadają wysoki współczynnik śmiertelności. Przyczyny takiego stanu rzeczy są niejasne.

Zasoby dorsza wschodniego Bałtyku mogą być mniej wrażliwe na zakwaszenie oceanu niż zasoby zachodnie. Doświadczenia laboratoryjne z wykorzystaniem prognozowanych parametrów zakwaszania pod koniec wieku i później nie wykazały żadnego wpływu na zachowanie plemników, wylęganie ikry, rozwój larw czy wielkość otolitu larwalnego dorsza wschodniego. Jednakże doświadczenie zastosowane w odniesieniu do dorsza zachodniego wykazało podwojenie śmiertelności larwalnej przy zakwaszeniu pod koniec XX stulecia w porównaniu z obecnymi stężeniami CO₂. Wzrost śmiertelności larw mógłby doprowadzić do znacznego spadku liczebności populacji. Potrzeba więcej badań, aby potwierdzić te wyniki. Ponadto ważne byłoby poznanie reakcji na zakwaszenie oceanu dwóch najważniejszych gatunków będących ofiarami dorsza - śledzia bałtyckiego i szprotka.

Łagodzenie skutków i adaptacja

Głównym środkiem przeciwdziałającym zakwaszeniu oceanów jest ograniczenie uwalniania CO₂. Tymczasem odporność ekosystemów na zakwaszenie można poprawić poprzez działania, które zachowają bioróżnorodność, uwalniając ekosystemy od innych czynników stresogennych. Ponieważ nasza wiedza na temat wpływu zakwaszenia na ekosystem Morza Bałtyckiego jest niedostateczna, niezbędne są dalsze badania, zanim adaptacja do zakwaszenia będzie mogła zostać uwzględniona w bardziej szczegółowych planach zarządzania.

W perspektywie globalnej, zakwaszenie oceanów jest uznawane za istotne wyzwanie. Na przykład, jest ono uwzględnione w Agendzie Zrównoważonego Rozwoju 2030 Organizacji Narodów Zjednoczonych i związanych z nią Celów Zrównoważonego Rozwoju (SDG). SDG 14, "Życie pod wodą", ma za zadanie wzmocnić ochronę i zrównoważone wykorzystanie oceanów, mórz i zasobów morskich. W szczególności,

w ramach tego SDG, cel 14.3 wskazuje konieczność zminimalizowania i zajęcia się skutkami zakwaszenia oceanów, między innymi poprzez wzmocnioną współpracę naukową na wszystkich szczeblach. Powiązany z tym wskaźnik 14.3.1 wymaga pomiaru średniej kwasowości morza (pH) w uzgodnionym zbiorze reprezentatywnych stacji poboru próbek.

W ostatecznym ujęciu, łagodzenie skutków zakwaszenia oceanów w ramach realizacji celu SDG 14.3 wymaga ograniczenia uwalniania CO₂ pochodzącego ze spalania paliw kopalnych. Obecnie łagodzenie skutków jest w dużej mierze realizowane w ramach tych samych porozumień globalnych, które dotyczą gazów cieplarnianych w ogóle, np. Porozumienie paryskie. Na poziomie krajowym powinno się to przełożyć na wdrożenie odpowiednich krajowych środków zaradczych.

W przypadku członków UE wymagana jest również pełna harmonizacja przepisów krajowych z odpowiednimi dyrektywami UE i innymi instrumentami regulacyjnymi, w tym z planowanymi działaniami związanymi np. z Europejskim Zielonym Ładem (European Green Deal).

W odniesieniu do systemu zarządzania, zakwaszenie oceanów musi być również rozpatrywane oddzielnie: „Problemy związane z OA [zakwaszeniem oceanów] i niezbędne im rozwiązania są wyjątkowe i nie mogą być łączone z tradycyjnymi działaniami i środkami dotyczącymi zmian klimatu” (artykuł Galdies i wsp. z 2020). Konieczne jest podejście, uwzględniające ten problem w szczególny sposób, między innymi dlatego, że rozkład geograficzny zakwaszenia jest bardzo zróżnicowany (co omówiono we wcześniejszych rozdziałach), a także ze względu na potrzebę zastosowania środków adaptacyjnych, które uwzględniają nieuniknione zakwaszenie oceanów.

Działania adaptacyjne oceanów można odnaleźć w sferze ochrony lub odtwarzania różnorodności biologicznej. Tego rodzaju środki mogą poprawić ogólną odporność na niekorzystne warunki, a działania mające na celu zmniejszenie ogólnej presji antropogenicznej na różnorodność biologiczną mogą w perspektywie krótkoterminowej zwiększyć również odporność na zakwaszenie oceanów.

Teoretycznie istnieje już kilka instrumentów służących ochronie ekosystemów morskich w Europie, uwzględniających także Morze Bałtyckie. Na przykład Dyrektywa Ramowa w Sprawie Strategii Morskiej (MSFD)² mogłaby zachęcić państwa członkowskie UE do skoordynowanego podejścia do ochrony mórz, a szczególnie do zajęcia się problemem zakwaszenia oceanów. Bałtycki Plan Działań HELCOM skupia się na określaniu ram dla Morza Bałtyckiego, obejmując również kraje spoza UE. Morskie obszary chronione (MPA)³ HELCOM to już istniejąca sieć obszarów, których celem jest ich pełna ochrona, w tym zachowanie różnorodności biologicznej.

Włączenie danego obszaru do tych MPA nie gwarantuje automatycznie określonego poziomu ochrony, ponieważ wdrożenie jej wymaga wprowadzenia krajowego prawodawstwa. Niemniej jednak MPA stanowią podstawę spójnej ochrony różnorodności biologicznej, która może również zwiększyć odporność na zakwaszenie oceanów. Inicjatywy lokalnych podmiotów, w tym gmin, a nawet prywatnych właścicieli nieruchomości można znaleźć w tych MPA. Niektóre z nich oparte są

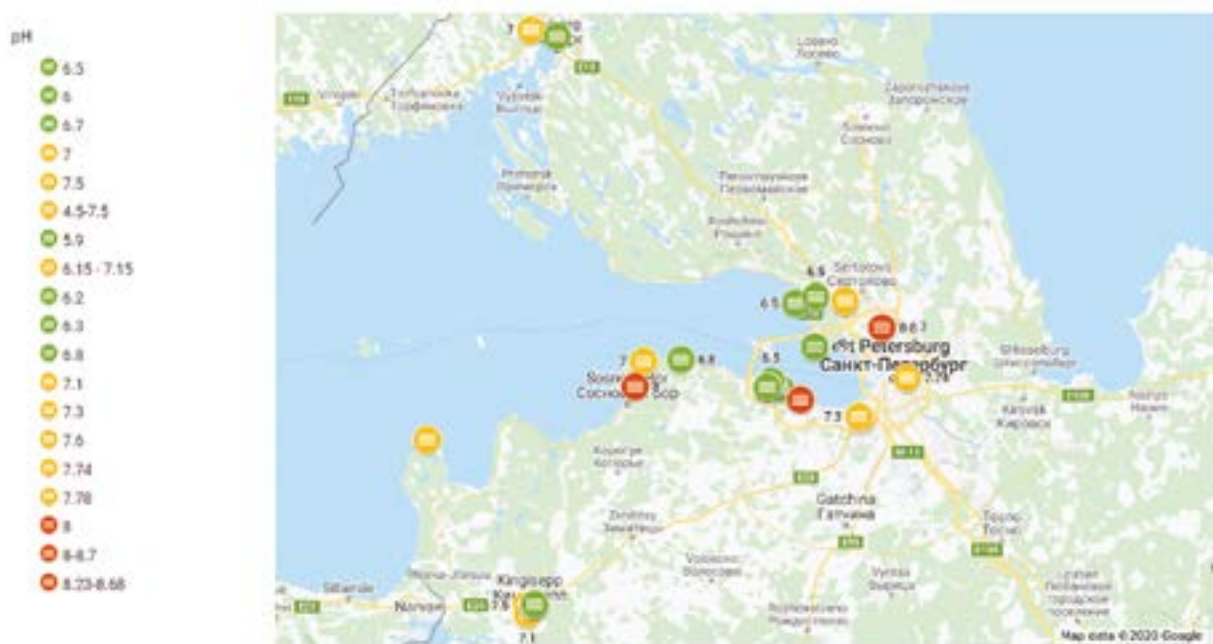
na inicjatywach regionalnych, w celu dołączenia do "Światowej Sieci Rezerwatów Biosfery" UNESCO i innych programów międzynarodowych.

Niemniej jednak, nawet jeśli istnieją instrumenty pozwalające zaspokoić potrzeby w zakresie łagodzenia skutków, dostosowania i ochrony, zarówno w całej UE, jak i konkretnie w odniesieniu do Morza Bałtyckiego, wydaje się, że brakuje środków, które byłyby wyraźnie ukierunkowane na zakwaszenie mórz i oceanów.

Wracając do powyższego cytatu Galdiesy i współpracowników, dotyczącego traktowania zakwaszenia oceanów jako odrębnego zjawiska, a nie "w pakiecie" z (innymi) środkami przeciwdziałania zmianom klimatu, autorzy stwierdzili, że "działania na poziomie UE pozostają nadal niezrozumiałe i nieskoordynowane", nawet jeśli zakwaszenie oceanów jest uwzględnione w nadrzędnych dokumentach politycznych, takich jak SDGs. W odniesieniu do dyrektywy ramowej w sprawie strategii morskiej (MSFD) i jej krajowych wdrożeń, autorzy wskazali, że "...polityki na szczeblu krajowym rzadko kładą nacisk na zasadniczy element dyrektywy ramowej w sprawie strategii morskiej (MSFD)", oraz że MSFD nie zawierają kryteriów monitorowania, które dotyczą konkretnie zakwaszenia oceanów.

Nie jest to kwestia marginalna. Przeciwdziałanie zmianom klimatycznym i OA wymaga ograniczenia emisji CO₂. Skutki wzrostu temperatury oraz zakwaszenia nie są takie same (choć występują jednocześnie i mogą wzajemnie na siebie oddziaływać).

Jak zaznaczyliśmy wcześniej, ochrona ekosystemów przed innymi czynnikami stresogennymi w Morzu Bałtyckim może zapewnić synergę również w odniesieniu



Rysunek 4. Jakość wody w rzekach i na obszarach przybrzeżnych regionu Sankt Petersburga jest od kilku lat monitorowana przez obserwatorów społecznych organizacji pozarządowej Friends of the Baltic w ramach programu River Watch realizowanego przez Coalition Clean Baltic. W latach 2016-2020 grupy River Watch, w tym m.in. dzieci szkolne, monitorowały pH (na podstawie raportu BALSAM Country Report of Russia).

do zakwaszenia. Niemniej jednak działania ochronne, które uwzględniają w specjalny sposób zakwaszenie oceanu, mogą dostarczyć rozwiązań bezpośrednio dostosowanych do potrzeb, takich jak odpowiednio rozmieszczone MPA. Chociaż brakuje badań dotyczących wyznaczania takich obszarów ochrony, istnieją pewne przesłanki dotyczące skutecznych rozwiązań. Na przykład, ochrona skupisk makrofitów (makroalg i trawy morskiej) może stanowić tymczasowe schronienie dla organizmów wapniejących. Takie lokalne lub regionalne przedsięwzięcia nie powinny oczywiście być podejmowane w pojedynkę, ale raczej równoległe z innymi działaniami, takimi jak łagodzenie przełowienia i eutrofizacji, aby zminimalizować postępujące zanikanie morskich pęcherzykowatych i innych makrofitów, przy jednoczesnym uwzględnieniu potrzeby zwiększenia odporności na zakwaszenie.

Oprócz wskazywania na potrzebę podjęcia przez decydentów działań w zakresie nauk ścisłych i zarządzania w odniesieniu do problemu zakwaszenia w Morzu Bałtyckim, uważamy, że ważne jest również znalezienie sposobów skutecznego informowania o tym problemie opinii publicznej, w tym również młodego pokolenia. W oddzielnych publikacjach w ramach tego projektu, na swoim przykładzie, podkreśliśmy zaangażowanie dzieci szkolnych w naukę obywatelską poprzez ich udział w pomiarach pH (Rys. 4).

Monitorowanie wskaźników zakwaszenia

Jakość wody w Morzu Bałtyckim jest systematycznie monitorowana od czterech dekad, mimo to monitoring wskaźników zakwaszenia jest wciąż niekompletny. Właściwe metody monitoringu i wskaźniki, jak również odpowiednie sezonowe pobieranie próbek mają kluczowe znaczenie dla zrozumienia procesu zakwaszania oceanów.

Ze względu na złożoność kompleksu CO₂ Morza Bałtyckiego, rzetelny monitoring zakwaszenia musi być zarówno przestrzennie, jak i czasowo regularny, a także oparty na bardzo dokładnych i precyzyjnych pomiarach. Ponadto, SDG 14 i związany z nim wskaźnik 14.3.1 wymaga pomiaru średniej kwasowości morza (pH) w uzgodnionym zestawie reprezentatywnych stacji poboru.

Skoordynowany monitoring pH wody Morza Bałtyckiego rozpoczął się w 1979 roku, jednak niektóre dane są dostępne od 1891 roku. Obecnie monitoring koordynowany jest przez Komisję Ochrony Środowiska Morskiego Bałtyku - znaną również jako Komisja Helsińska (HELCOM) oraz program HELCOM COMBINE. Cele programu to: 1) identyfikacja i ilościowe określenie skutków zrzutów/działań antropogenicznych w Morzu Bałtyckim w kontekście naturalnych zmian w systemie oraz 2) identyfikacja i ilościowe określenie zmian w środowisku w wyniku działań regulacyjnych. Odpowiedzialność za monitorowanie podobszarów Morza Bałtyckiego jest podzielona między państwa nadbrzeżne i instytucje państwowe.

Bałtyk Właściwy: Estonia (Estoński Instytut Morski), Finlandia (Fiński Instytut Ochrony Środowiska), Niemcy (Federalny Instytut Badawczy Obszarów Wiejskich, Leśnictwa i Rybołówstwa), Łotwa (Łotewski Instytut Ekologii Wody), Litwa (Centrum Badań Morskich), Polska (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej), Szwecja (Szwedzka Agencja Gospodarki Morskiej i Wodnej) i Rosja (Państwowy

Instytut Oceanograficzny).

Zatoka Botnicka: Finlandia i Szwecja

Zatoka Fińska: Estonia, Finlandia i Rosja

Zatoka Ryska: Estonia i Łotwa

Zatoka Gdańska: Polska i Rosja

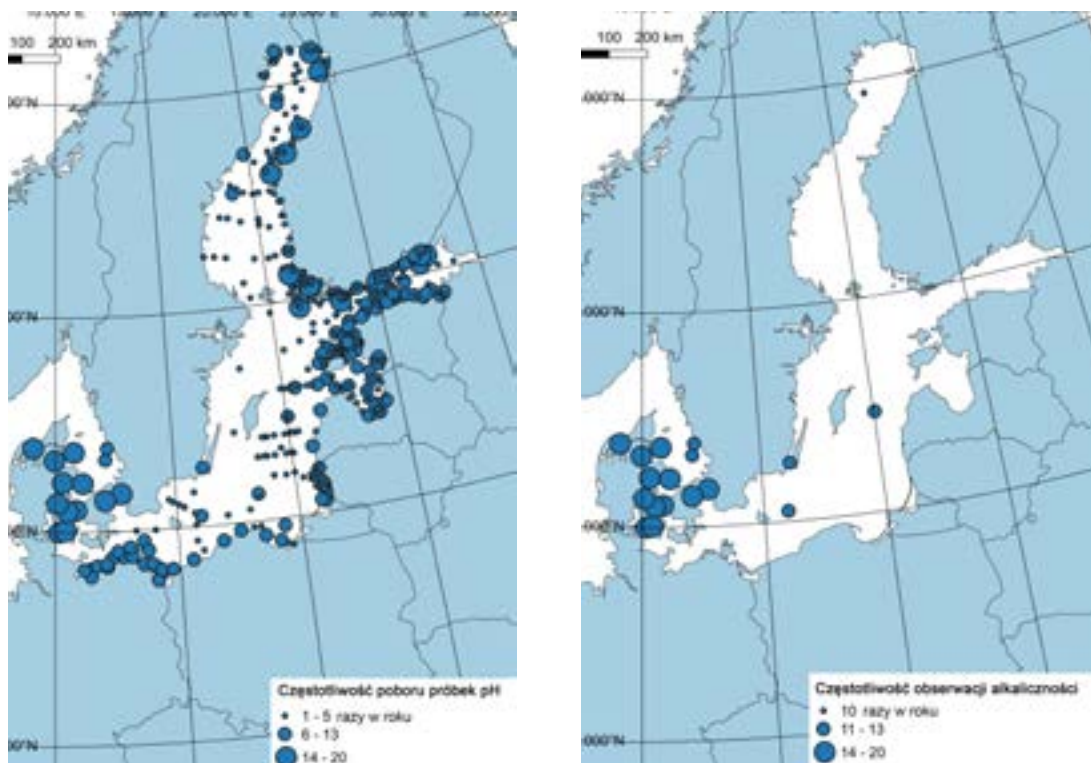
Dźwina i Kattegat: Dania (Duńskie Centrum Środowiska i Energii) i Szwecja

Wielki Bełt: Dania

Zatoka Kilońska i Zatoka Meklemburska: Niemcy

Dane z monitoringu są dostępne dla wszystkich i mogą być pobierane za pomocą bazy danych HELCOM (<https://helcom.fi/baltic-sea-trends/data-maps/databases/>) lub ICES (<https://www.ices.dk/data/dataset-collections/Pages/HELCOM.aspx>).

Podczas badania systemu buforowego węglanowego wody morskiej można zmierzyć cztery zmienne (całkowita zasadowość, pH, rozpuszczony węgiel organiczny, ciśnienie parcjalne CO₂). Jeśli dwie zmienne zostaną dokładnie określone, teoretycznie możliwe jest obliczenie pozostałych. Jednak obliczenia te nie uwzględniają wysokich stężeń substancji humusowych i innego węgla organicznego rozpuszczonego w Morzu Bałtyckim w związku z czym mogą prowadzić do błędnych wartości zasadowości całkowitej. Parametr pH jest uwzględniony w programie monitoringu COMBINE jako parametr główny, co oznacza, że jest on mierzony regularnie (Rys.5). Dla parametrów zasadowość ogólna (Rys. 5) i pCO₂ na chwilę obecną prowadzony jest



Rysunek 5. Stacje pomiarowe objęte programem HELCOM COMBINE oraz częstotliwość poboru próbek pH i zasadowości ogólnej. (Dane: HELCOM)

tylko częściowy monitoring krajowy. Trwa opracowywanie bardziej kompleksowego monitoringu zakwaszenia, który zostanie wprowadzony do 2024 roku.

Oprócz programu monitoringu COMBINE, kraje nadbałtyckie prowadzą monitoring jakości wody na swoich wodach terytorialnych (patrz BALSAM Country Report of Russia). Dane te mogą być pomocne przy ocenie stanu systemu buforów węglanowych poza siecią monitoringu COMBINE.

Monitorowanie pH oparte jest na detekcji potencjometrycznej lub spektrofotometrycznej. Detekcja potencjometryczna (skala pH NBS) jest szerzej stosowana, ponieważ jest szybka i prosta, a także nie wymaga zaawansowanego i kosztownego sprzętu. Detekcja spektrofotometryczna jest dokładniejsza i bardziej precyzyjna, ale sprzęt do niej jest droższy. Temperatura jest mierzona i rejestrowana jednocześnie z pH. Alkaliczność ogólna jest oznaczana przez miareczkowanie potencjometryczne. Próbkę do pomiarów pH i zasadowości ogólnej pobiera się na głębokościach 1, 5, 10, 15, 20, 25 (tylko Kattgat i Morze Bełtów), 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 125, 150, 175, 200, 225, 250, 300 i 400 metrów; jak najbliżej dna.

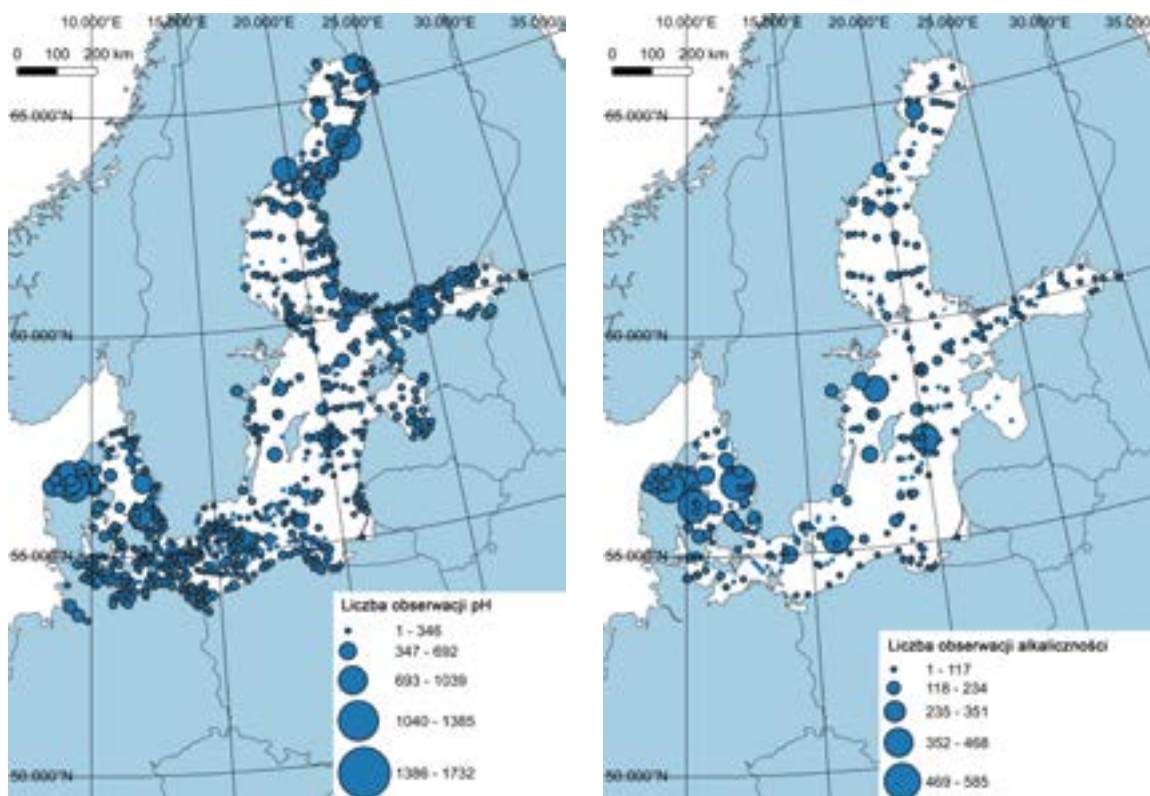
Aktualny stan zakwaszenia w Morzu Bałtyckim

Tendencje spadkowe pH są już obserwowane sezonowo w niektórych częściach Morza Bałtyckiego. Jednakże jakość danych długoterminowych jest częściowo wątpliwa, co utrudnia ustalenie trendów. Badania modelowe przewidują, że sezonowe fluktuacje pH wód powierzchniowych będą się dalej nasilać, a głównym czynnikiem wyznaczającym wielkość i kierunek przyszłych trendów pH jest atmosferyczne stężenie CO₂.

pH wody Morza Bałtyckiego monitorowane jest już od kilku ostatnich dekad, a najobszerniejsze zestawy danych obejmują ponad tysiąc obserwacji (Rys. 6). Niemniej jednak, nie jest łatwo wyznaczyć znaczące trendy zakwaszenia oceanu, ponieważ pomiar pH wody Morza Bałtyckiego jest trudny, a jakość danych jest częściowo dyskusyjna. Harmonogramy monitoringu, stosowane urządzenia i dokładność pomiarów zmieniały się na przestrzeni lat, co dodatkowo komplikuje analizy. Ponadto, zarówno wahania sezonowe i roczne, jak i zjawiska upwellingu mogą maskować trendy długoterminowe (Rys. 7), a wzrost alkaliczności całkowitej (Rys. 3) kompensuje częściowo zakwaszenie wywołane przez CO₂.

Oprócz zakwaszenia spowodowanego wzrostem stężenia CO₂ w atmosferze, długoterminowe dane z monitoringu pH ujawniają również zmiany w produkcji pierwotnej. Na przykład, pobieranie CO₂ i wynikający z tego wzrost maksymalnego pH jest widoczny w wodach powierzchniowych podczas sezonu produkcyjnego w obszarach bogatych w składniki odżywcze. W zimie pH wody powierzchniowej jest bardziej stabilne i najniższe, dlatego łatwiej jest obserwować długoterminowe trendy na podstawie danych zimowych.

Pomimo trudności w wykrywaniu długoterminowych trendów pH, istnieje kilka badań informujących o znaczących zmianach w Zatoce Fińskiej (m.in. stacja monitoringowa LL7). W okresie zimowym pH wód powierzchniowych i głębinowych uległo tam znacznemu obniżeniu w latach 1972-2009 i 1979-2015

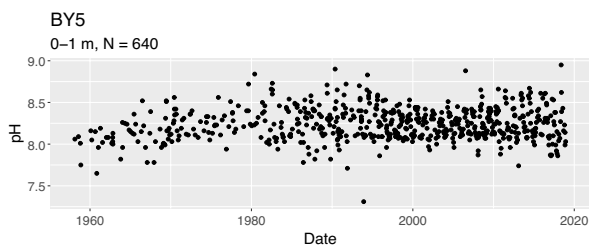
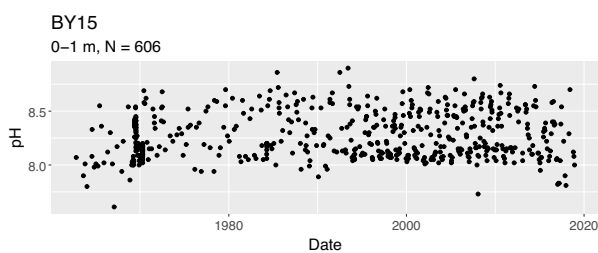
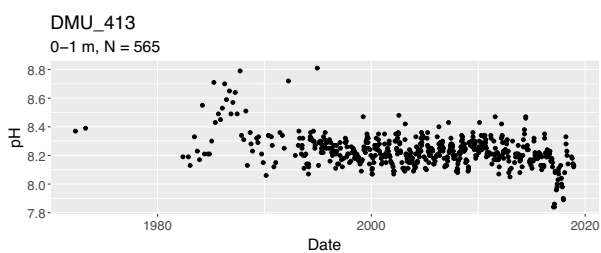
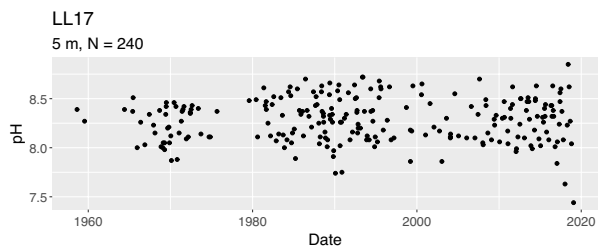
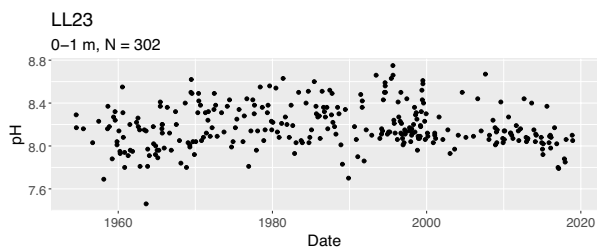
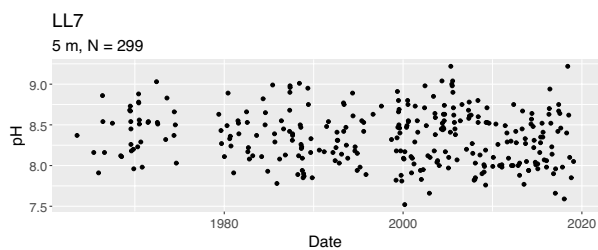
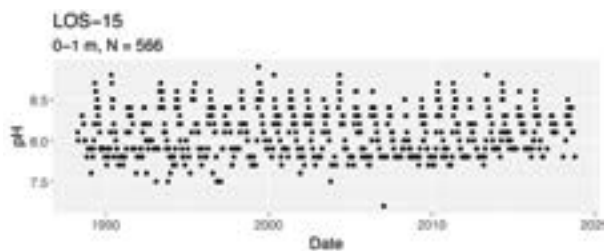
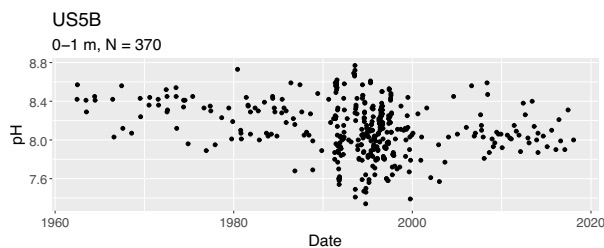


Rysunek 6. Liczba obserwacji pH i zasadowości ogólnej wód powierzchniowych w Bałtyku. (Dane: HELCOM, ICES Dataset on Ocean Hydrography, The International Council for the Exploration of the Sea, Copenhagen. 2014)

(Almén i współpracownicy 2017). Spadek ten był ostrzejszy w wodach głębokich (0,008 jednostek / rok) niż w powierzchniowych (0,003 - 0,006 jednostek / rok), prawdopodobnie z powodu zwiększonego rozkładu i produkcji CO₂ spowodowanego eutrofizacją. Ostatnie badania modelowania przewidują te same zjawiska: zmiany klimatyczne i rosnące ładunki składników odżywczych wpłyną na zakwaszenie głównie poprzez modyfikację cykli sezonowych (maksimum letnie i minimum zimowe) oraz warunków w wodach głębokich. Zgodnie z tymi badaniami, głównym czynnikiem kontrolującym wielkość i kierunek przyszłych trendów pH jest jednak atmosferyczne stężenie CO₂.

Stan nasycenia CaCO₃ będzie się zmniejszał wraz z obniżającym się pH, co może upośledzać wapnienie. Stan nasycenia jest zgodny z gradientem alkaliczności, przy czym Zatoka Botnicka i Zatoka Ryska znajdują się na przeciwległych krańcach. Stan nasycenia zmienia się również sezonowo, a najniższe wartości występują późną zimą. Zimą wody powierzchniowe Bałtyku Właściwego są już niedosycone w odniesieniu do aragonitu ($\Omega < 1$) i prawie niedosycone w odniesieniu do kalcytu ($\Omega = \sim 1$) (Tyrrel i współpracownicy 2008). W Zatoce Botnickiej zimą stan nasycenia kalcytu jest bardzo niski ($\Omega = 0,2$), natomiast w Zatoce Ryskiej kalcyt pozostaje przesycony przez cały rok (najniższe wartości w marcu, $\Omega = 1,3$).

Wysoko produktywne siedliska przybrzeżne, które cierpią z powodu sezonowego



Rys. 7. Czasowe zmiany pH w wodach powierzchniowych (0-1 m lub 5 m) w najczęściej pobieranych stacjach monitorujących na Morzu Bałtyckim. Wykresy pokazują zmiany w harmonogramie pobierania próbek, wahania sezonowe, jak również kilka potencjalnych malejących trendów długoterminowych (US5B, LL7). Należy zauważyć, że dokładność danych zmieniała się na przestrzeni lat. (Dane w skali NBS. Dane: HELCOM, ICES Dataset on Ocean Hydrography, The International Council for the Exploration of the Sea, Copenhagen. 2014)

niedotlenienia, już teraz doświadczają niższych wartości pH i stanów nasycenia CaCO_3 niż prognozowane na najbliższe stulecie. Zatoka Kilońska w zachodniej części Morza Bałtyckiego jest przykładem takiego siedliska. Przyszłe zakwaszenie ulegnie na tych obszarach pogłębieniu, co może spowodować, że zamieszkujące je populacje przekroczą granice swojej tolerancji. W chwili obecnej obszary te mogą być wykorzystywane jako systemy modelowe do badania możliwości adaptacyjnych ekosystemów morskich w odpowiedzi na wysokie poziomy zakwaszenia.

Uwagi końcowe

W tym raporcie zwróciliśmy uwagę na zagrożenia ekologiczne, jakie niesie ze sobą zakwaszenie mórz i oceanów, oraz na potrzeby w zakresie łagodzenia skutków i adaptacji. Mamy nadzieję, że raport ten spowoduje dalszy nacisk na poprawę strategii i mechanizmów zarządzania, które zdecydowanie nie są aktualne w odniesieniu do zakwaszenia mórz i oceanów.

Zachęcamy organizacje pozarządowe, uniwersytety i innych do zaangażowania się w akcje o charakterze publicznym, podnoszące świadomość. W tym celu, w ramach projektu opublikowano przewodnik działań na temat zakwaszenia mórz i oceanów, między innymi propozycję organizacji międzynarodowego tygodnia zakwaszenia mórz i oceanów. Zachęca się również inne organizacje pozarządowe i zainteresowanych do połączenia sił w celu zmniejszenia zakwaszenia mórz i oceanów.

Podziękowania

Niniejszy raport powstał w ramach projektu BALSAM finansowanego przez Szwedzki Instytut. Autorzy pragną również podziękować dr. Karolowi Kulińskiemu za zewnętrzną recenzję. Za wszelkie pozostałe błędy odpowiadają autorzy.

Literatura

Morze Bałtyckie - wyjątkowy przypadek pod wieloma względami

Gustafsson, E., Gustafsson, B.G. (2020) Future acidification of the Baltic Sea – A sensitivity study. *Journal of Marine Systems* 211, 103397. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2020.103397>.

Melzner, F., Thomsen, J., Koeve, W., Oschlies, A., Gutowska, M.A., Bange, H., Hansen, H.P., Körtzinger, A. (2013) Future ocean acidification will be amplified by hypoxia in coastal habitats. *Marine Biology* 160, 1875–1888. <https://doi.org/10.1007/s00227-012-1954-1>

Omstedt, A., Edman, M., Anderson, L., Laudon, H. (2010) Factors influencing the acid–base (pH) balance in the Baltic Sea: a sensitivity analysis. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology* 62:4, 280–295. DOI: 10.1111/j.1600-0889.2010.00463.x

Omstedt, A., Edman, M., Claremar, B., Frodin, P., Gustafsson, E., Humborg, C., Hägg, H., Mörth, M., Rutgersson, A., Schurgers, G., Smith, B., Wällstedt, T., Yurova, A. (2012) Future changes in the Baltic Sea acid–base (pH) and oxygen balances. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology* 64:1, 19586 DOI: 10.3402/tellusb.v64i0.19586

Omstedt, A., Humborg, C., Pempkowiak, J., Pertillä, M., Rutgersson, A., Schneider, B., Smith, B. (2014) Biogeochemical control of the coupled CO₂–O₂ system of the Baltic Sea: A review of the results of Baltic-C, *Ambio* 43, 49–59. <https://doi.org/10.1007/s13280-013-0485-4>

Wahl, M., Schneider Covachá, S., Sadern V., Hiebenthal, C., Müller, J.D., Pansch, C., Sawall, Y. (2018) Macroalgae may mitigate ocean acidification effects on mussel calcification by increasing pH and its fluctuations. *Limnology and Oceanography* 63, 3–21. doi:10.1002/lno.10608

Zasadowość ogólna, zdolność buforowania - Morza Bałtyckiego

Gustafsson, E., Gustafsson, B.G. (2020) Future acidification of the Baltic Sea – A sensitivity study. *Journal of Marine Systems* 211, 103397. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2020.103397>

Gustafsson, E., Wällstedt, T., Humborg, C., Mörth, C.-M., Gustafsson, B. G. (2014) External total alkalinity loads versus internal generation: The influence of nonriverine alkalinity sources in the Baltic Sea. *Global Biogeochemical Cycles* 28, 1358–1370. doi:10.1002/2014GB004888

Kuliński, K., Schneider, B., Szymczycha, B., Stokowski, M. (2017) Structure and functioning of the acid–base system in the Baltic Sea, *Earth System Dynamics* 8, 1107–1120. <https://doi.org/10.5194/esd-8-1107-2017>

Müller, J. D. (2018) Ocean acidification in the Baltic Sea. Involved processes, metrology of pH in brackish waters, and calcification under fluctuating conditions. Doctoral Dissertation, University of Rostock. doi: 10.18453/rosdok_id00002303

Müller, J.D., Schneider, B., Rehder, G., (2016) Long-term alkalinity trends in the Baltic

Sea and their implications for CO₂-induced acidification. *Limnology and Oceanography* 61, 1984–2002. doi:10.1002/lno.10349

Wpływ na ekosystem Morza Bałtyckiego

STREFA PRZYBRZEŻNA

Morszczyń pęcherzykowaty

Al-Janabi, B., Kruse, I., Graiff, A., Winde, V., Lenz, M., Wahl, M. (2016) Buffering and Amplifying Interactions among OAW (Ocean Acidification & Warming) and Nutrient Enrichment on Early Life- Stage *Fucus vesiculosus* L. (Phaeophyceae) and Their Carry Over Effects to Hypoxia Impact. *Plos One* 11, e0152948. doi:10.1371/journal.pone.0152948

Al-Janabi, B., Kruse, I., Graiff, A., Karsten, U., Wahl, M. (2016) Genotypic variation influences tolerance to warming and acidification of early life-stage *Fucus vesiculosus* L. (Phaeophyceae) in a seasonally fluctuating environment. *Marine Biology* 163, 1–15. doi:10.1007/s00227-015-2804-8

Graiff, A., Bartsch, I., Ruth, W., Wahl, M., Karsten U. (2015) Season exerts differential effects of ocean acidification and warming on growth and carbon, metabolism of the seaweed *Fucus vesiculosus* in the Western Baltic Sea. *Frontiers in Marine Science* 2, 112. DOI=10.3389/fmars.2015.00112

Graiff, A., Dankworth, M., Wahl, M., Karsten, U., Bartsch, I. (2017). Seasonal variations of *Fucus vesiculosus* fertility under ocean acidification and warming in the western Baltic Sea. *Botanica Marina* 60, 239-255. doi: <https://doi.org/10.1515/bot-2016-0081>

Takolander, A., Leskinen, E., Cabeza, M. (2017) Synergistic effects of extreme temperature and low salinity on foundational macroalga *Fucus vesiculosus* in the northern Baltic Sea. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 495, 110-8. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2017.07.001>

Takolander, A., Cabeza, M., Leskinen, E. (2019). Seasonal interactive effects of pCO₂ and irradiance on the ecophysiology of brown macroalga *Fucus vesiculosus* L. *European Journal of Phycology* 54, 380–392. <https://doi.org/10.1080/09670262.2019.1572226>

Wahl, M., Werner, F.J., Buchholz, B., Raddatz, S., Graiff, A., Matthiessen, B., Karsten, U., Hiebenthal, C., Hamer, J., Ito, M., Gülzow, E., Rilov, G, and Guy-Haim, T. (2020) Season affects strength and direction of the interactive impacts of ocean warming and biotic stress in a coastal seaweed ecosystem. *Limnology and Oceanography* 65, 807-827. <https://doi.org/10.1002/lno.11350>

Omulek jadalny

Melzner, F., Stange, P., Trübenbach, K., Thomsen, J., Casties, I., Panknin, U., Gorb, S. N., Gutowska, M. A. (2011) Food Supply and Seawater pCO₂ Impact Calcification and Internal Shell Dissolution in the Blue Mussel *Mytilus edulis*. *Plos One* 6, e24223. doi:10.1371/journal.pone.0024223

Sanders, T., Schmittmann, L., Nascimento-Schulze, J., Melzner, F. (2018) High calcification costs limit mussel growth at low salinity. *Frontiers in Marine Science* 5: 352.

doi: 10.3389/fmars.2018.00352

Thomsen, J., Stapp, L. S., Haynert, K., Schade, H., Danelli, M., Lannig, G., Wegner, K. M., Melzner, F. (2017) Naturally acidified habitat selects for ocean acidification-tolerant mussels. *Science Advances* 3, e1602411. DOI: 10.1126/sciadv.1602411

Wahl, M., Schneider Covachã, S., Saderne, V., Hiebenthal, C., Müller, J.D., Pansch, C., Sawall, Y. (2018) Macroalgae may mitigate ocean acidification effects on mussel calcification by increasing pH and its fluctuations. *Limnology and Oceanography* 63, 3-21. doi:10.1002/lno.10608

OTWARTA TOŃ WODNA

Ekosystemy planktonu

Almén, A.-K., Vehmaa, A., Brutemark, A., Engström-Öst, J. (2014) Coping with climate change? Copepods experience drastic variations in their physicochemical environment on a diurnal basis. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 460, 120–128. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2014.07.001>

Almén, A.-K., Vehmaa, A., Brutemark, A., Bach, L., Lischka, S., Stuhr, A., Furuhausen, S., Paul, A., Bermúdez, J. R., Riebesell, U., Engström-Öst, J. (2016) Negligible effects of ocean acidification on *Eurytemora affinis* (Copepoda) offspring production *Biogeosciences* 13, 1037–1048. <https://doi.org/10.5194/bg-13-1037-2016>

Crawford, K. J., Alvarez-Fernandez, S., Mojica, K. D. A., Riebesell, U., Brussaard, C. P. D. (2017) Alterations in microbial community composition with increasing fCO₂: a mesocosm study in the eastern Baltic Sea. *Biogeosciences* 14, 3831–3849. <https://doi.org/10.5194/bg-14-3831-2017>

Horn, H. G., Boersma, M., Garzke, J., Sommer, U., Aberle, N. (2020) High CO₂ and warming affect microzooplankton food web dynamics in a Baltic Sea summer plankton community. *Marine Biology* 167, 69. DOI 10.1007/s00227-020-03683-0

Hornick, T., Bach, L. T., Crawford, K. J., Spilling, K., Achterberg, E. P., Woodhouse, J. N., Schulz, K. G., Brussaard, C. P. D., Riebesell, U., Grossart, H.-P. (2017) Ocean acidification impacts bacteria-phytoplankton coupling at low-nutrient conditions *Biogeosciences* 14, 1–15 <https://doi.org/10.5194/bg-14-1-2017>

Ismar-Rebitz, S. M. H., Sommer, U., Garzke, J. (2020) Zooplankton growth and survival differentially respond to interactive warming and acidification effects. *Journal of Plankton Research* 42, 189-202. DOI 10.1093/plankt/fbaa005

Lindh, M.V., Pinhassi, J. (2018) Sensitivity of Bacterioplankton to Environmental Disturbance: A Review of Baltic Sea Field Studies and Experiments. *Frontiers in Marine Science* 5, 361. doi: 10.3389/fmars.2018.00361

Lischka, S., Bach, L.T., Schulz, K.-G., Riebesell, U. (2017) Ciliate and mesozooplankton community response to increasing CO₂ levels in the Baltic Sea: insights from a large-scale mesocosm experiment. *Biogeosciences* 14, 447-466. <https://doi.org/10.5194/bg-14-447-2017>

Paul, A. J., Bach, L. T., Schulz, K.-G., Boxhammer, T., Czerny, J., Achterberg, E. P.,

- Hellemann, D., Trense, Y., Nausch, M., Sswat, M., Riebesell, U. (2015) Effect of elevated CO₂ on organic matter pools and fluxes in a summer Baltic Sea plankton community. *Biogeosciences* 12, 6181–6203. <https://doi.org/10.5194/bg-12-6181-2015>
- Paul, C., Sommer, U., Garzke, J., Moustaka-Gouni, M., Paul, A., Matthiessen, B. (2016), Effects of increased CO₂ concentration on nutrient limited coastal summer plankton depend on temperature. *Limnology and Oceanography* 61, 853–868. doi:10.1002/lno.10256
- Sommer, U., Paul, C., Moustaka-Gouni, M. (2015) Warming and Ocean Acidification Effects on Phytoplankton—From Species Shifts to Size Shifts within Species in a Mesocosm Experiment. *Plos One* 10, e0125239. doi:10.1371/journal.pone.0125239
- Vehmaa, A., Brutemark, A., Engström-Öst, J. (2012) Maternal Effects May Act as an Adaptation Mechanism for Copepods Facing pH and Temperature Changes. *Plos One* 7, e48538. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0048538>
- Vehmaa, A., Almén, A.-K., Brutemark, A., Paul, A., Riebesell, U., Furuhaugen, S., Engström-Öst, J. (2016) Ocean acidification challenges copepod phenotypic plasticity. *Biogeosciences* 13, 6171–6182. <https://doi.org/10.5194/bg-13-6171-2016>
- Wulff, A., Karlberg, M., Olofsson, M., Torstensson, A., Riemann, L., Steinhoff, F.S., Mohlin, M., Ekstrand, N., Chierici, M. (2018) Ocean acidification and desalination: climate-driven change in a Baltic Sea summer microplanktonic community. *Marine Biology* 165, 63. <https://doi.org/10.1007/s00227-018-3321-3>

Ekosystemy bentosowe

- Jakubowska, M., Normant-Saremba, M. (2015) The Effect of CO₂-Induced Seawater Acidification on the Behaviour and Metabolic Rate of the Baltic Clam *Macoma balthica*. *Annales Zoologici Fennici* 52, 353–367. <https://doi.org/10.5735/086.052.0509>
- Jansson, A., Norkko, J., Norkko, A. (2013) Effects of reduced pH on *Macoma balthica* larvae from a system with naturally fluctuating pH-dynamics. *Plos One* 8, e68198. doi:10.1371/journal.pone.0068198
- Jansson, A., Norkko, J., Dupont, S., Norkko, A. (2015) Growth and survival in a changing environment: Combined effects of moderate hypoxia and low pH on juvenile bivalve *Macoma balthica*. *Journal of Sea Research* 102, 41–47. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2015.04.006>
- Jansson, A., Lischka, S., Boxhammer, T., Schulz, K.G., Norkko, J. (2016) Survival and settling of larval *Macoma balthica* in a large-scale mesocosm experiment at different f CO₂ levels. *Biogeosciences* 13, 3377–3385. <https://doi.org/10.5194/bg-13-3377-2016>
- Van Colen, C., Jansson, A., Saunier, A., Lacoue-Labathe, T., Vincx, M. (2017) Biogeographic vulnerability to ocean acidification and warming in a marine bivalve. *Marine Pollution Bulletin* 126, 308–311. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.10.092>

Ryby pelagiczne

- Brander, K. (2020) Reduced growth in Baltic Sea cod may be due to mild hypoxia. ICES

Journal of Marine Science 77, 2003–2005. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsaa041>

Frommel, A. Y., Stiebens, V., Clemmesen, C., Havenhand, J. (2010) Effect of ocean acidification on marine fish sperm (Baltic cod: *Gadus morhua*). *Biogeosciences* 7, 3915–3919. <https://doi.org/10.5194/bg-7-3915-2010>

Frommel, A.Y., Schubert, A., Piatkowski, U., Clemmesen, C. (2013) Egg and early larval stages of Baltic cod, *Gadus morhua*, are robust to high levels of ocean acidification. *Marine Biology* 160, 1825–1834. <https://doi.org/10.1007/s00227-011-1876-3>

Neuenfeldt, S., Bartolino, V., Orio, A., Andersen, K. H., Andersen, N. G., Niiranen, S., Bergström, U., Ustups, D., Kulatska, N., Casini, M. (2020) Feeding and growth of Atlantic cod (*Gadus morhua* L.) in the eastern Baltic Sea under environmental change. *ICES Journal of Marine Science* 77, 624–632. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsz224>

Stiasny, M. H., Mittermayer, F. H., Sswat, M., Voss, R., Jutfelt, F., Chierici, M., Puvanendran, V., Mortensen, A., Reusch, T. B. H., Clemmesen, C. (2016) Ocean Acidification Effects on Atlantic Cod Larval Survival and Recruitment to the Fished Population. *Plos One* 11, e0155448. doi:10.1371/journal.pone.0155448

Łagodzenie skutków i adaptacja

Biosfarprogrammet (2021, January 11.) Biosphere for Baltic. International collaboration for a sustainable Baltic Sea. Retrieved from: <https://biosfarprogrammet.se/projekt/biosphere-for-baltic/>

Galdies, C., Bellerby, R., Canu, D., Chen, W., Garcia-Luque, E., Gašparović, B., Godrijan, J., Lawlor, P.J., Maes, F., Malej, A., Panagiotaras, D., Martinez Romera, B., Reymond, C.E., Rochette, J., Solidoro, C., Stojanov, R., Tiller, R., Torres de Noronha, I., Uścińowicz, G., Vaidianu, N., Walsh, C., Guerra, R. (2020) European policies and legislation targeting ocean acidification in European waters - Current state. *Marine Policy* 118, 103947. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2020.103947>

Havenhand, J., Crépin, A.-S., Filipsson, H.L., Jagers, S., Langlet, D., Matti, S., Niiranen, S., Troell, M., Anderson, L.G. (2017) Acidification of Swedish seas in a changing environment: causes, consequences, and responses – an interdisciplinary review of current knowledge, knowledge gaps, and implementation needs. Report. The Environmental Committee, The Royal Swedish Academy of Sciences. 55 p. Retrieved from: https://s3.eu-de.cloud-object-storage.appdomain.cloud/kva-image-pdf/2017/04/Acidification-of-Swedish-Seas_170421.pdf

HELCOM (2021, January 11.) Marine Protected Areas. Retrieved from: <https://helcom.fi/action-areas/marine-protected-areas/>

Wahl, M., Schneider Covachã, S., Saderne, V., Hiebenthal, C., Müller, J.D., Pansch, C., Sawall, Y. (2018) Macroalgae may mitigate ocean acidification effects on mussel calcification by increasing pH and its fluctuations. *Limnology and Oceanography* 63, 3–21. doi:10.1002/lno.10608

Wahl, M., Werner, F.J., Buchholz, B., Raddatz, S., Graiff, A., Matthiessen, B., Karsten, U., Hiebenthal, C., Hamer, J., Ito, M., Gülzow, E., Rilov, G., Guy-Haim, T. (2020) Season affects strength and direction of the interactive impacts of ocean warming and biotic

stress in a coastal seaweed ecosystem. *Limnology and Oceanography* 65, 807-827. <https://doi.org/10.1002/lno.11350>

Monitorowanie wskaźników zakwaszenia

HELCOM (2017) Manual for marine monitoring in the COMBINE programme of HELCOM (last updated: July 2017). Retrieved from: <https://helcom.fi/media/publications/Manual-for-Marine-Monitoring-in-the-COMBINE-Programme-of-HELCOM.pdf>

HELCOM (2020, December 1.) HELCOM Monitoring Manual / Water column habitat / Hydrochemistry / O₂, pH, pCO₂ (H₂S). Retrieved from: <https://helcom.fi/action-areas/monitoring-and-assessment/monitoring-manual/>

Kuliński, K., Schneider, B., Hammer, K., Machulik, U., Schulz-Bull, D. (2014) The influence of dissolved organic matter on the acid-base system of the Baltic Sea. *Journal of Marine Systems* 132, 106-115. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2014.01.011>

Aktualny stan zakwaszenia w Morzu Bałtyckim

Almén, A.-K., Glippa, O., Pettersson, H., Alenius, P., Engström-Öst, J. (2017) Changes in wintertime pH and hydrography of the Gulf of Finland (Baltic Sea) with focus on depth layers. *Environmental Monitoring and Assessment* 189(4), 147. doi:10.1007/s10661-017-5840-7

Brutemark, A., Engström-Öst, J., Vehmaa, A. (2011) Long-term monitoring data reveal pH dynamics, trends and variability in the western Gulf of Finland. *Oceanological and Hydrobiological Studies* 40, 91-94. DOI: <https://doi.org/10.2478/s13545-011-0034-3>

Havenhand, J.N., Filipsson, H.L., Niiranen, S., Troell, M., Crépin, A.-S., Jagers, S., Langlet, D., Matti, S., Turner, D., Winder, M., de Wit, P., Anderson, L.G. (2019) Ecological and functional consequences of coastal ocean acidification: Perspectives from the Baltic-Skagerrak System. *Ambio* 48, 831-854. doi:10.1007/s13280-018-1110-3

Melzner, F., Thomsen, J., Koeve, W., Oschlies, A., Gutowska, M.A., Bange, H., Hansen, H.P., Körtzinger, A. (2013) Future ocean acidification will be amplified by hypoxia in coastal habitats. *Marine Biology* 160, 1875-1888. <https://doi.org/10.1007/s00227-012-1954-1>

Omstedt, A., Edman, M., Claremar, B., Frodin, P., Gustafsson, E., Humborg, C., Hägg, H., Mörth, M., Rutgersson, A., Schurgers, G., Smith, B., Wällstedt, T., Yurova, A. (2012) Future changes in the Baltic Sea acid-base (pH) and oxygen balances, *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 64, 19586, DOI: 10.3402/tellusb.v64i0.19586

Omstedt, A., Humborg, C., Pempkowiak, J., Pertillä, M., Rutgersson, A., Schneider, B., Smith, B. (2014) Biogeochemical control of the coupled CO₂-O₂ system of the Baltic Sea: A review of the results of Baltic-C. *Ambio: a Journal of Human Environment* 43, 49-59. <https://doi.org/10.1007/s13280-013-0485-4>

Tyrrell, T., Schneider, B., Charalampopoulou, A., Riebesell, U. (2008) Coccolithophores and calcite saturation state in the Baltic and Black Seas. *Biogeosciences* 5, 485-494. <https://doi.org/10.5194/bg-5-485-2008>

