

Zmiana cyklu hydrologicznego w zlewisku Morza Bałtyckiego

Magdalena Kalinowska

Uniwersytet Gdański, Wydział Oceanografii i Geografii

E-mail: m.kalinowska.904@studms.ug.edu.pl

tutorka: dr Mirosława Malinowska prof. UG

Uniwersytet Gdański, Wydział Oceanografii i Geografii

Katedra Oceanografii Fizycznej i Badań Klimatu

Słowa kluczowe: cykl hydrologiczny, zlewisko Morza Bałtyckiego, zmiana klimatu, odpływ, parowanie, opady

degradacja wyżej wymienionych ekosystemów oraz częstsze występowanie ekstremalnych zjawisk pogodowych.

Streszczenie

Artykuł analizuje wpływ współczesnej zmiany klimatu na cykl hydrologiczny w zlewisku Morza Bałtyckiego. Przedstawia, w jaki sposób rosnące temperatury powietrza i wód, intensyfikacja opadów atmosferycznych, zmiany w parowaniu i odpływie zakłócają równowagę wodną całego regionu Bałtyku. Skutki tych zaburzeń obejmują zwiększone ryzyko powodzi, długotrwałych susz oraz pogorszenie warunków dla ekosystemów wodnych, lądowych i miejskich. W artykule podkreślono, że elementy cyklu hydrologicznego są wzajemnie zależne. Zmiana jednego z elementów cyklu, na przykład wzrost parowania, wpływa na bilans opadów i odpływ powierzchniowy. W konsekwencji prowadzi to do negatywnych skutków dla środowiska, takich jak ograniczenie zasobów wodnych,

Wprowadzenie

Bałtyk to szelfowe morze śródlądowe, głęboko wciśnięte w kontynent europejski, które łączy się z Morzem Północnym przez cieśniny zewnętrzne (Kattegat i Skagerrak) oraz cieśniny wewnętrzne (Sund, Wielki Bełt, Mały Bełt), znacznie węższe i płytsze (Meier i in., 2022a). Morze Bałtyckie dzieli się na siedem głównych regionów: Kattegat, Sund i Morze Bełtów, Bałtyk Właściwy, Zatokę Ryską, Zatokę Fińską, Morze Botnickie i Zatokę Botnicką. Jego linia brzegowa jest bardzo urozmaicona, występują tu liczne zatoki, zalewy, półwyspy i wyspy, przy czym na północy dominują skaliste szkiery, a na południu i wschodzie przeważają plaże, wydmy i klify [1]. Bałtyk to morze o niskim zasoleniu, zasilane głównie słodką wodą z rzek i opadów, a jego połączenie z oceanem przez Cieśniny Duńskie jest ograniczone [2].

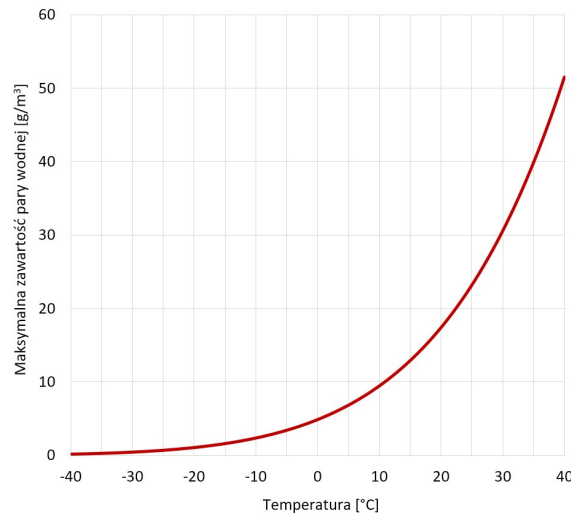
Cykl hydrologiczny to nieustanny obieg wody pomiędzy atmosferą, lądami i oceanami, proces pozornie niewidoczny, a jednak kluczowy dla życia na Ziemi. To dzięki niemu pada deszcz, płyną rzeki, rosną rośliny i funkcjonują ekosystemy. Woda pokrywa większość naszej planety, tylko niewielki jej procent (0,6%) to źródło wody pitnej [3]. Każda kropla ma znaczenie. Obieg wody w przyrodzie wpływa na kształtowanie klimatu, m.in. poprzez regulację temperatury i wilgotności powietrza, transport ciepła i parowanie. Jednocześnie cykl hydrologiczny silnie reaguje na zmiany klimatu, np. wzrost temperatury powietrza czy zmiany w opadach powodują modyfikacje parowania, odpływu i retencji wód. W dobie globalnego ocieplenia obserwuje się wyraźne przyspieszenie tego cyklu, wzrasta parowanie, zmieniają się cykle opadów jak i ich intensywność, a ekstremalne zjawiska pogodowe stają się coraz częstsze. Skutki zmian klimatu są zróżnicowane regionalnie, dlatego konieczne jest badanie ich w kontekście lokalnym. Morze Bałtyckie, płytkie, półzamknięte i otoczone krajami o zróżnicowanej gęstości zaludnienia, to przykład szczególnie wrażliwego ekosystemu. Nawet niewielkie zmiany w bilansie wodnym mogą prowadzić do poważnych konsekwencji środowiskowych, takich jak pogorszenie jakości wód, deficyt tlenu w głębinach czy zmiany zasolenia. Te z kolei mają istotny wpływ na funkcjonowanie całego ekosystemu. Zrozumienie obiegu wody w skali lokalnej staje się nie tylko naukowym wyzwaniem, ale koniecznością. Dokładne poznanie cyklu hydrologicznego Bałtyku jest niezbędne do przewidywania przyszłych zmian, ochrony zasobów wodnych, zarządzania jakością wód oraz zapobiegania skutkom ekstremalnych zjawisk pogodowych. Poniższy artykuł ma charakter przeglądowy i opiera się na analizie literatury przedmiotu,

w której wyniki badań, w zależności od publikacji, obejmują okres od 1950 roku (Meier i in., 2022a) do 2025 roku [13;15].

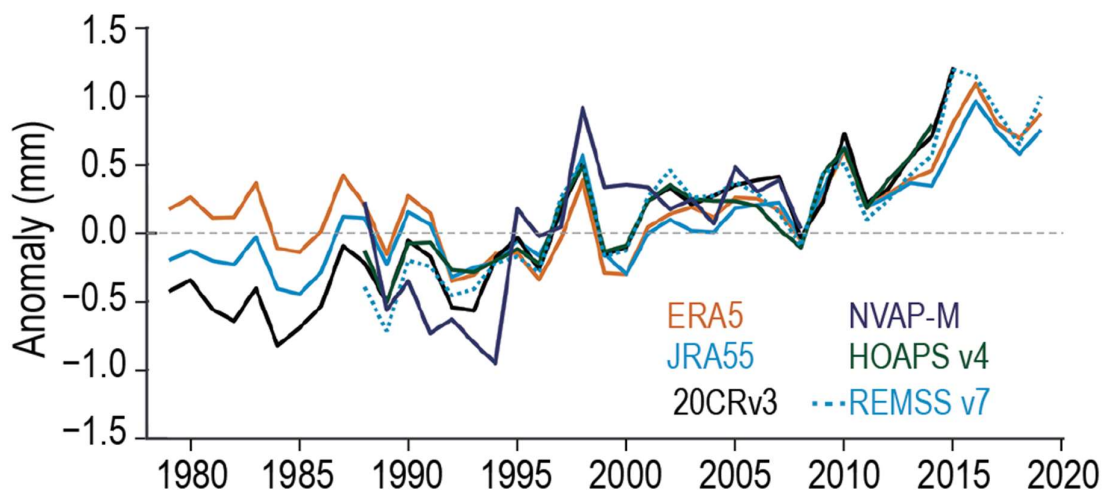
Parowanie

W cyklu hydrologicznym przejście wody z podłoża do atmosfery to parowanie z powierzchni wód i gleby (90%) i transpiracja roślin (10%) (Graham i in., 2010). Unosi się ona do atmosfery, gdzie przebywa średnio przez 10 dni, zanim wróci na Ziemię jako deszcz albo śnieg lub ulegnie kondensacji w formie szronu, mgły lub rosy (Eki 2017). Te procesy nieustannie wpływają na ilość wilgoci w powietrzu. Na tempo parowania wpływają czynniki takie jak wilgotność i temperatura powietrza, prędkość wiatru, a przede wszystkim ilość docierającego promieniowania słonecznego [4]. Czynniki te jednoznacznie wskazują, że zmiany klimatyczne, poprzez wpływ na cykl hydrologiczny, coraz silniej oddziałują na dostępność wody na lądzie. Zgodnie z zasadą Clausiusa-Clapeyrona (Ryc. 1), wzrost temperatury powietrza zwiększa jego zdolność do zatrzymywania pary wodnej o około 7% na każdy 1°C. Skutkuje to większym parowaniem i akumulacją wilgoci w atmosferze, sprzyjającą gwałtownym i obfitym opadom atmosferycznym. Szybsze parowanie może prowadzić do przesuszenia gleby i nasilenia częstości występowania okresów posusznych i susz. W efekcie tego nasilają się skrajności hydrologiczne, czyli częstsze i dłuższe susze, jak również intensywniejsze opady atmosferyczne prowadzące do powodzi (Ehtasham i in., 2024).

W latach 1980-2020, niezależnie od zastosowanej metody badawczej, zawartość pary wodnej w atmosferze charakteryzowała się wyraźnym trendem wzrostowym (Ryc. 2). Od końca lat 90' XX wieku wyniki różnych grup badawczych są ze sobą bardzo zbieżne.



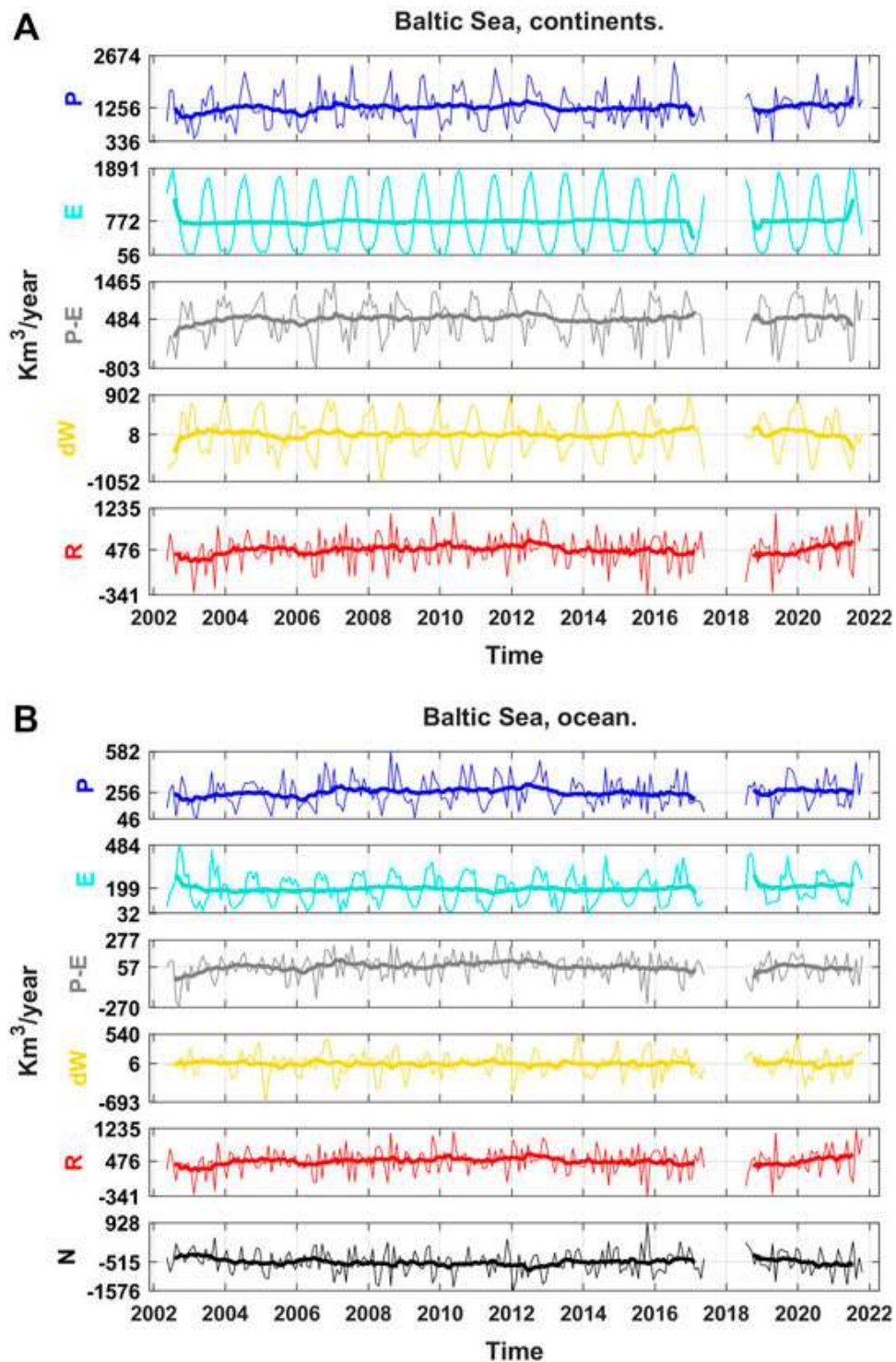
Ryc. 1. Maksymalna zawartość pary wodnej w powietrzu w zależności od temperatury (wilgotność bezwzględna w stanie nasycenia) [5]



Ryc. 2. Anomalie zmian średniej całkowitej zawartości pary wodnej w kolumnie powietrza w latach 1988–2008, (Gulev i in., 2021)

Różnice w wielkości parowania oraz ich zmienność przestrzenna odgrywają kluczową rolę w kształtowaniu bilansu wodnego Morza Bałtyckiego, a ich analiza jest istotna w kontekście oceny skutków zmian klimatu. Według danych satelitarnych i analizy ERA5, średnie roczne parowanie z powierzchni Morza Bałtyckiego wynosiło około $255 \text{ km}^3/\text{rok}$ w latach 2002–2021 (Boulaïhia i in., 2022). Przy założeniu powierzchni Bałtyku wynoszącej $377\,000 \text{ km}^2$ odpowiada to około

$676 \text{ mm}/\text{rok}$ (Boulaïhia i in., 2022). Parowanie charakteryzuje się wyraźną sezonowością (Ryc. 3), najwyższe wartości notowane są w miesiącach letnich, zwłaszcza w lipcu i sierpniu, co związane jest z intensywnym promieniowaniem słonecznym i wyższą temperaturą powierzchni morza (Boulaïhia i in., 2022). Najniższe z kolei wartości parowania występują zimą. Wynika to z niższych temperatur oraz ograniczonego transportu wilgoci z powierzchni wody do atmosfery.



Ryc. 3. Sezonowa i roczna zmienność głównych składowych bilansu wodnego w regionie Morza Bałtyckiego w latach 2002–2021, na podstawie danych z misji GRACE/GRACE-FO i reanalizy ERA5 [mm] (Boulahia i in., 2022):
 A) zlewnia Morza Bałtyckiego, B) obszar Morza Bałtyckiego;
 oznaczenia: P - opad, E - parowanie, P-E - bilans opad-parowanie, dW - zmiana ilości wody w środowisku w analizowanym okresie, R - spływ rzeczny, N - odpływ netto wód z Bałtyku

Szacowane roczne wartości parowania w basenie Morza Bałtyckiego w okresie wrzesień 1998 – sierpień 1999 plasowały się w przedziale od 509 do 625 mm (Smedman i in., 2005). Świadczy to o dużej „wrażliwości” tego procesu na czynniki meteorologiczne oraz wykazuje istotne zróżnicowanie przestrzenne. Ta rozpiętość wartości parowania wynika zarówno ze zróżnicowania przestrzennego czynników klimatycznych, jak i z niepewności związanych z zastosowanymi metodami pomiarowymi oraz modelowymi (Smedman i in., 2005). Wyższe wartości parowania notuje się na otwartych wodach centralnej części Morza Bałtyckiego. Wpływają na to takie czynniki jak, wyższa temperatura powierzchni morza i większa prędkość wiatru (Bumke i in., 1998; Mohamed i in., 2012). Wzdłuż wybrzeży oraz w zatokach całego regionu Morza Bałtyckiego parowanie jest zazwyczaj niższe. Wynika to ze zmiennych warunków mikroklimatycznych, niższej prędkości wiatru oraz dodatkowego parowania z pobliskich zbiorników wodnych i roślinności (Bumke i in., 1998; Mohamed i in., 2012). Sezonowe zmiany parowania wynikające głównie ze zmian temperatury powietrza i powierzchni wody, nasłonecznienia oraz prędkości wiatru, wpływają na zróżnicowanie przestrzenne. Powodują one zmienność zarówno w krótkich, jak i długich okresach czasu (Smedman i in., 2005).

Opady atmosferyczne

Opady to kolejny element stanowiący o naturalnym obiegu wody. Na Ziemi występuje ogromna różnorodność opadów, od intensywnych deszczy w lasach tropikalnych, po praktycznie całkowity ich brak na pustyniach. Zakłócenia równowagi opadów mogą prowadzić do poważnych zmian, wpływając zarówno na faunę i florę, jak i na życie ludzi oraz ich dorobek materialny (Pörtner i in., 2022; Martin i in., 2024).

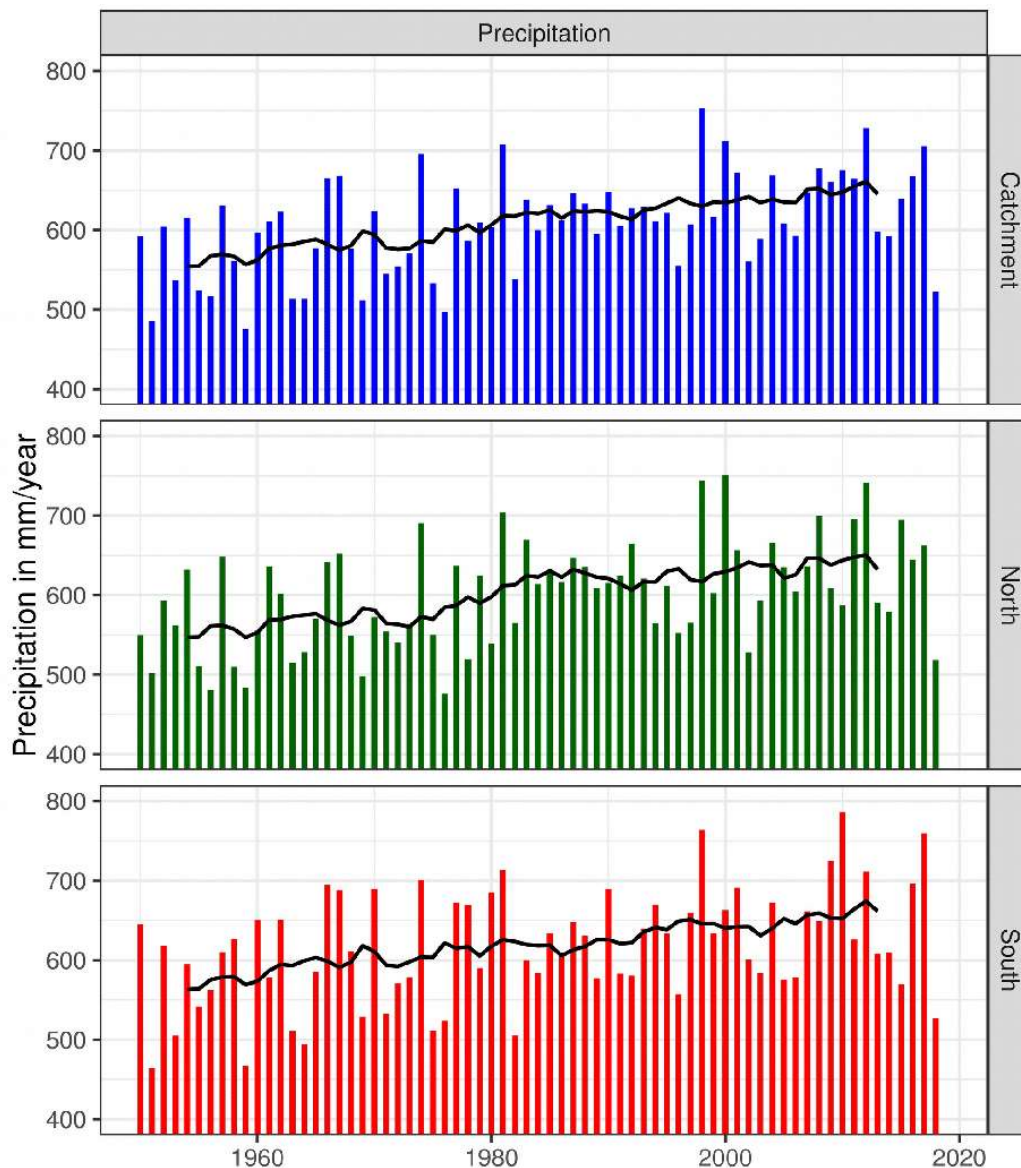
W strefie brzegowej Morza Bałtyckiego, w umiarkowanych szerokościach geograficznych, opady atmosferyczne w dużym stopniu zależą od rzeźby terenu. Różnice w ilości opadów w basenie Morza Bałtyckiego wynikają z cyrkulacji atmosferycznej, czyli sposobu, w jaki przemieszczają się masy powietrza nad Europą, znajdującą się w strefie dominujących wiatrów zachodnich. Jednym z czynników jest tzw. Oscylacja Północnego Atlantyku (NAO) (Meier i in., 2022a). Gdy znajduje się ona w dodatniej fazie, zachodnie wiatry przynoszą więcej wilgoci do Skandynawii, co skutkuje zwiększoną ilością opadów. Jednocześnie może ograniczać ich występowanie w Polsce i w krajach bałtyckich. Trasy wędrówki niżów atmosferycznych przesuwają się coraz częściej na północ (Meier i in., 2022a). W efekcie Szwecja i Finlandia otrzymują więcej opadów, podczas gdy południowe obszary regionu Morza Bałtyckiego mają ich mniej. Zmiany te są częściowo wynikiem globalnego ocieplenia i obserwuje się je już od kilku dekad.

W regionie Bałtyku globalne ocieplenie zwiększa ilość pary wodnej w powietrzu. Ciepłe powietrze może zaabsorbować więcej pary wodnej (prawo Clausiusa-Clapeyrona), co skutkuje silniejszymi i intensywniejszymi opadami atmosferycznymi. Proces ten przyspiesza również zmiany w cyrkulacji atmosferycznej, powodując przesunięcie niżów i kierowanie większej ilości opadów ku północnej części Bałtyku. Dodatkowo, cieplejsze zimy sprawiają, że coraz więcej opadów w tym okresie przyjmuje formę deszczu, a nie śniegu. Łączny wpływ tych procesów prowadzi do większego zróżnicowania ilości i formy opadów w różnych regionach Morza Bałtyckiego (Meier i in., 2022a).

W basenie Morza Bałtyckiego najwięcej opadów występuje latem i jesienią. W niektórych obszarach (w północno-wschodnich rejonach nadbałtyckich, takich państwach jak Litwa, Łotwa, Estonia) w sierpniu potrafi

spaść ponad 300 mm opadów, a w październiku ponad 250 mm (Mačiulytė i in., 2023). Deszczowe pory bywają coraz bardziej obfite. W przypadku dorzeczy uchodzących do Morza Bałtyckiego wartość 95 percentyla sum dobowych opadów wynosi od 8 do 20 mm opadu (Cardell i in., 2020). W całej zlewni

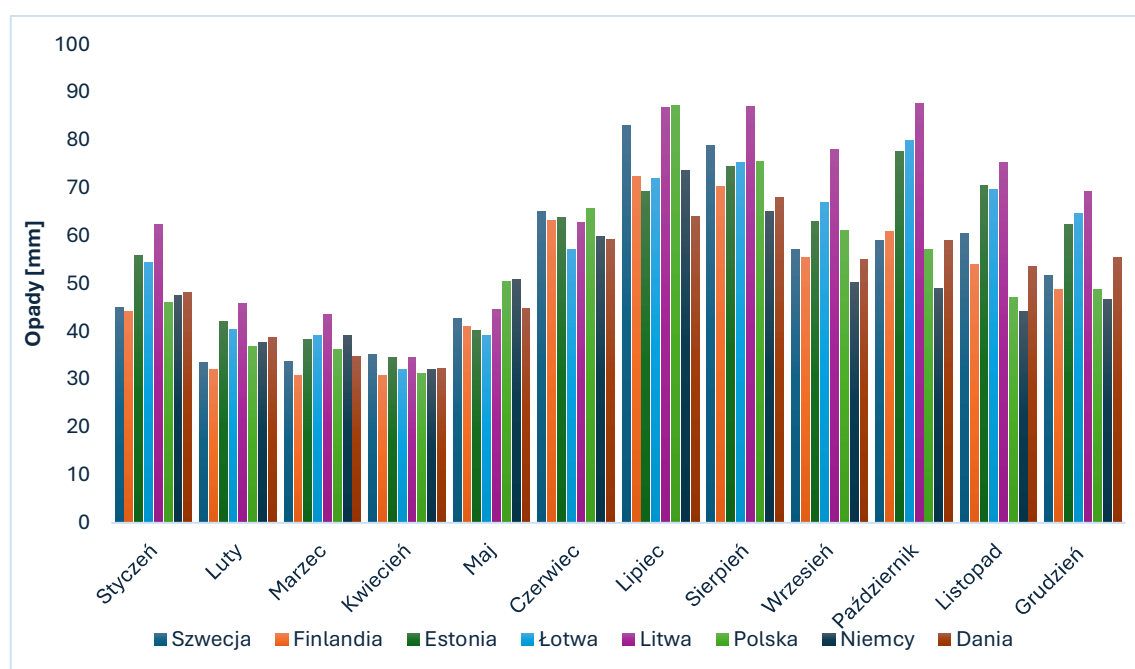
Morza Bałtyckiego zaobserwowano systematyczny wzrost opadów rocznych w latach 1950-2018 (Meier i in., 2022a). W tym okresie średnie roczne sumy opadu wzrosły z około 550 mm do ponad 650 mm w całym obszarze zlewni Bałtyku (Ryc. 4).



Ryc. 4. Średnie roczne opady [mm] w zlewni Morza Bałtyckiego w latach 1950–2018 wraz z 10-letnią średnią ruchomą (Meier i in., 2022a); wykres niebieski - cała zlewnia Morza Bałtyckiego, wykres zielony - zlewnia Morza Bałtyckiego na północ od 59°N, wykres czerwony - zlewnia Morza Bałtyckiego na południe od 59°N

W regionie Morza Bałtyckiego występują umiarkowane i stosunkowo równomiernie rozłożone opady w ciągu roku, choć ich wartości różnią się między krajami (Ryc. 5). Na Łotwie średnia roczna suma opadów wynosi około 633 mm, a deszczowe dni występują przez około 180 dni w roku [6]. W Danii roczna suma opadów sięga około 765 mm, również przy około 181 dniach z opadem [7]. W Szwecji wartości te wahają się od 500 do 800 mm, a w regionach górskich nawet do

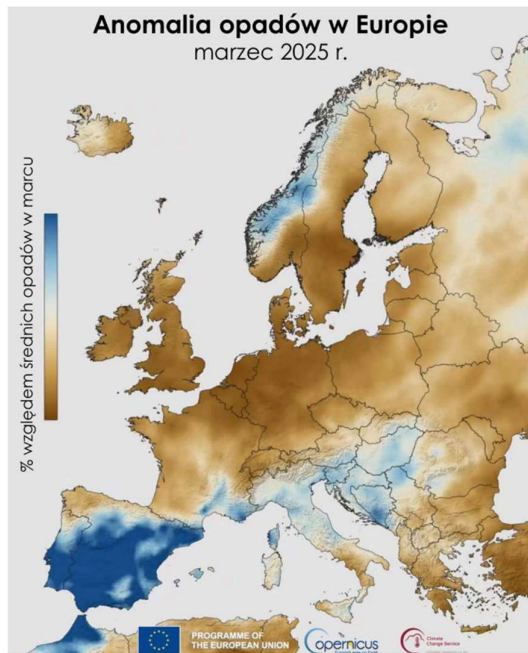
1200 mm; liczba dni z opadem jest zróżnicowana regionalnie, wynosząc przeciętnie od 150 do 190 dni [8]. W Wilnie, stolicy Litwy, średnia roczna suma opadów wynosi około 625 mm, natomiast liczba dni z opadem to 174,9 [9]. Dla Polski liczba dni z opadem jest zróżnicowana regionalnie. W Gdańsku odnotowuje się roczną sumę opadów na poziomie 624 mm i około 172 dni z opadami, natomiast w Warszawie opadów jest mniej, około 490 mm rocznie, ze średnio 155 dniami deszczowymi [10].



Ryc. 5. Roczny przebieg średnich miesięcznych sum opadów na wybrzeżach państw nadbałtyckich w latach 1991–2023 (opracowanie własne na podstawie [11])

Opady atmosferyczne charakteryzują się dużą zmiennością czasową i przestrzenną, co dodatkowo wpływa na pozostałe elementy cyklu hydrologicznego i funkcjonowanie środowiska przyrodniczego. Przestrzenną zmienność anomalii opadów atmosferycznych w Europie w marcu 2025 roku, z wyraźnym zróżnicowaniem warunków hydrometeorologicznych na kontynencie, przedstawiono na Ryc. 6. Podczas gdy w południowo-zachodniej Europie (Półwysep Iberyjski) odnotowano ekstremalne opady przekraczające 300% normy, znaczna część Europy

Środkowej (Polska i kraje nadbałtyckie) znalazły się w strefie ujemnej anomalii opadowej. Oznacza to, że miesiąc ten był w tej części Europy wyraźnie suchszy niż przeciętnie, co mogło sprzyjać pogłębianiu się deficytu wodnego po zimie. Tak duże kontrasty w rozkładzie opadów są najczęściej efektem nietypowego rozkładu układów barycznych. W marcu 2025 roku rozległy wyż nad środkową i wschodnią Europą blokował napływ wilgotnych mas powietrza znad Atlantyku, sprzyjając suchej i bezopadowej pogodzie.



Ryc. 6. Anomalia opadów atmosferycznych w Europie w marcu 2025 [13];

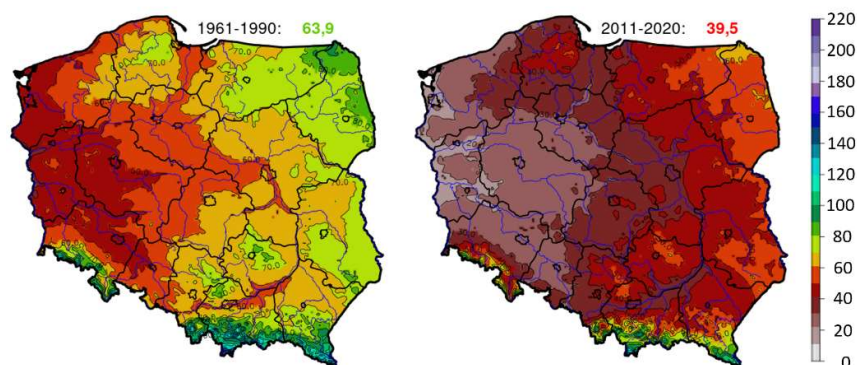
kolory: najciemniejszy brąz - znacznie poniżej normy, lekko brązowy - norma, biały/jasno niebieski - powyżej normy, najciemniejszy niebieski - ekstremalne opady $\geq 300\%$

Zjawisko to było związane z ociepleniem Arktyki, które osłabiło prąd strumieniowy. Jednocześnie niżowe układy znad Atlantyku kierowały się bardziej na południe niż zwykle. Przyniosły intensywne i długotrwałe opady nad Hiszpanię, Portugalię i południową Francję. Tego typu „blokady atmosferyczne”

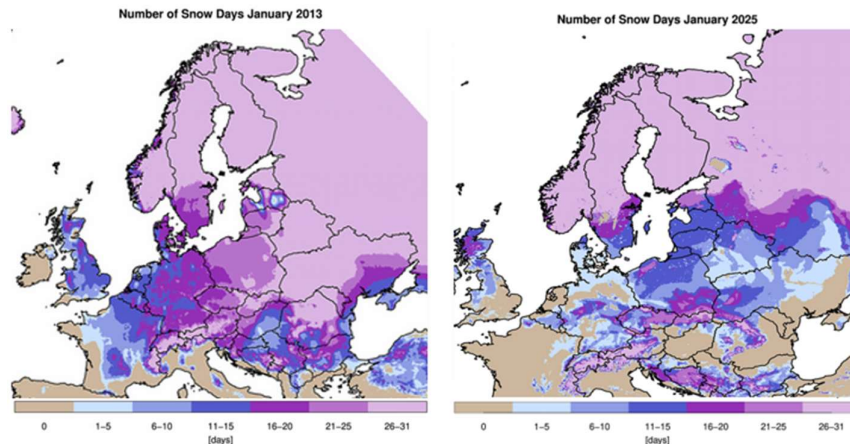
mogą powodować długotrwałe okresy suszy lub nadmiar opadów w poszczególnych regionach i są coraz częstsze w warunkach ocieplającego się klimatu [12].

W latach 1961–1990 średnia liczba dni z pokrywą śnieżną wzdłuż polskiego wybrzeża wynosiła od 50 do 70 w roku. W okresie 2011–2020 wartość ta spadła do zaledwie 20–50 dni rocznie (Ryc. 7). W regionie państw bałtyckich liczba dni z pokrywą śnieżną spada średnio o około 3–4 dni na dekadę (Meier i in., 2022a). Szczególnie dzieje się to w południowej części regionu państw bałtyckich (Ryc. 8). W Estonii sezon śnieżny skrócił się istotnie na większości stacji pomiarowych, głównie przez wcześniejsze topnienie śniegu. Zmiany te są silnie powiązane ze wzrostem temperatury i częstszymi odwilżami zimą. Na ocieplanie klimatu regionu wpływa również coraz cieplejsze Morze Bałtyckie. W latach 1990–2018 średnia temperatura powierzchni Morza Bałtyckiego wzrosła o około $1\text{--}3^{\circ}\text{C}$. Największe ocieplenie, sięgające $4\text{--}5^{\circ}\text{C}$, obserwowano latem i jesienią (maj-listopad), szczególnie w południowej części akwenu. Wiosną (marzec-kwiecień) zmiany były najmniejsze, lokalnie pojawiały się ujemne anomalie, jednak średnia temperatura i tak wzrosła o $0,5\text{--}1,5^{\circ}\text{C}$ (Siegel i in., 2018). Obserwowane anomalie temperatury

Średnia liczba dni z pokrywą śnieżną



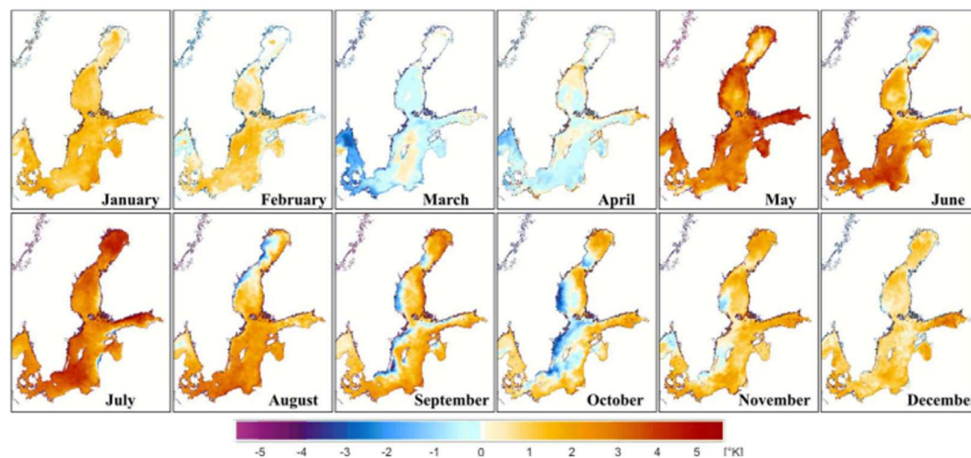
Ryc. 7. Po lewej: średnia liczba dni z pokrywą śnieżną w Polsce w okresie 1961–1990, po prawej w latach 2011–2020 [14]



Ryc. 8. Po lewej: średnia liczba dni z opadami śniegu w styczniu 2013 roku, po prawej w styczniu 2025 roku [15]

powierzchni morza wskazują na znaczny wzrost temperatury wody na przestrzeni lat 1990–2018 (Ryc. 9), co może przyczyniać się do wyższej wilgotności powietrza i zaburzeń w cyrkulacji atmosferycznej, sprzyjając częstszemu opadom deszczu zimą. Mimo dużej zmienności z roku na rok, ogólny trend wskazuje na coraz krótszą i mniej stabilną obecność śniegu. We wschodniej części Bałtyku (Litwa, Łotwa, Estonia) liczba dni z pokrywą śnieżną wyraźnie maleje. Badania obejmujące 57 stacji z lat 1961–2015 wykazały, że średni spadek długości sezonu śnieżnego wynosił 3,3 dnia na dekadę (Rimkus i in., 2018 za Meier i in., 2022a). Szczegółowa analiza

danych z 22 stacji w Estonii z lat 1950/51–2015/16 potwierdziła spadek liczby dni z pokrywą śnieżną średnio o 4 dni na dekadę, z wcześniejszym końcem sezonu śnieżnego na większości stacji (Viru i in., 2020 za Meier i in., 2022a). Liczba dni z pokrywą śnieżną systematycznie maleje, co wynika głównie ze wzrostu temperatur (Ryc. 10). Ciepłe morze wpływa na wzrost wilgotności i zmiany cyrkulacji powietrza, co może sprzyjać częstszemu odwilżom i opadom deszczu nawet zimą. Coraz częściej w sezonie zimowym zamiast śniegu występują opady deszczu, a rosnąca temperatura powietrza skraca długość trwania zimy.



Ryc. 9. SST- Anomalie średniej miesięcznej temperatury Morza Bałtyckiego w 2018 r. odnoszące się do średnich długoterminowych (1990–2018) (Siegel i in., 2018)

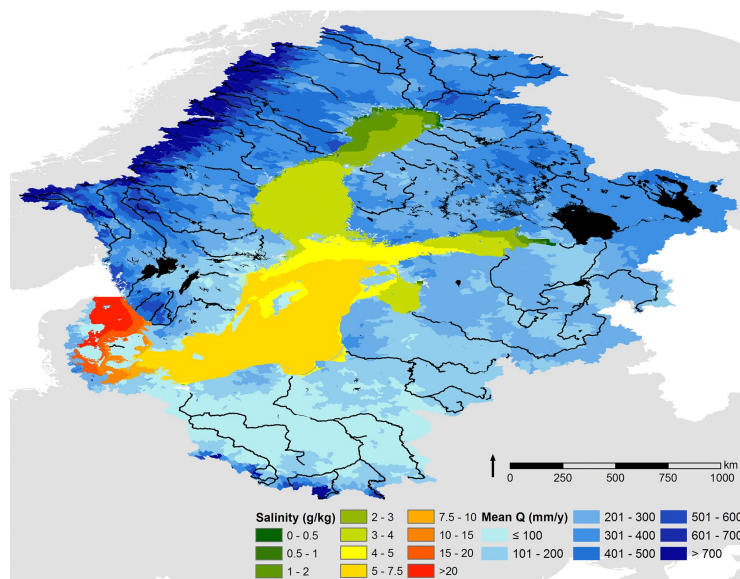


Ryc. 10. 11-letnie średnie ruchome pokrywy śnieżnej (linia niebieska, oś po lewej, suma wielkości dobowych w sezonie) i średniej anomalii temperatury zimą względem lat 1981–2010 (linia pomarańczowa, oś po prawej) w Polsce [16]

Wymiana pozioma wód

Bałtyk to morze śródlądowe, którego średnia głębokość wynosi około 50 m, a największą głębokość jest Głębia Landsort, sięgająca 459 m. Jego powierzchnia, wliczając Skagerrat i Kattegat, sięga około 415 000 km², natomiast zlewisko obejmuje aż 1,7 mln km². Oznacza to, że obszar zlewiska jest cztery razy większy niż powierzchnia Bałtyku (Ryc. 11), a większość wody dopływającej do

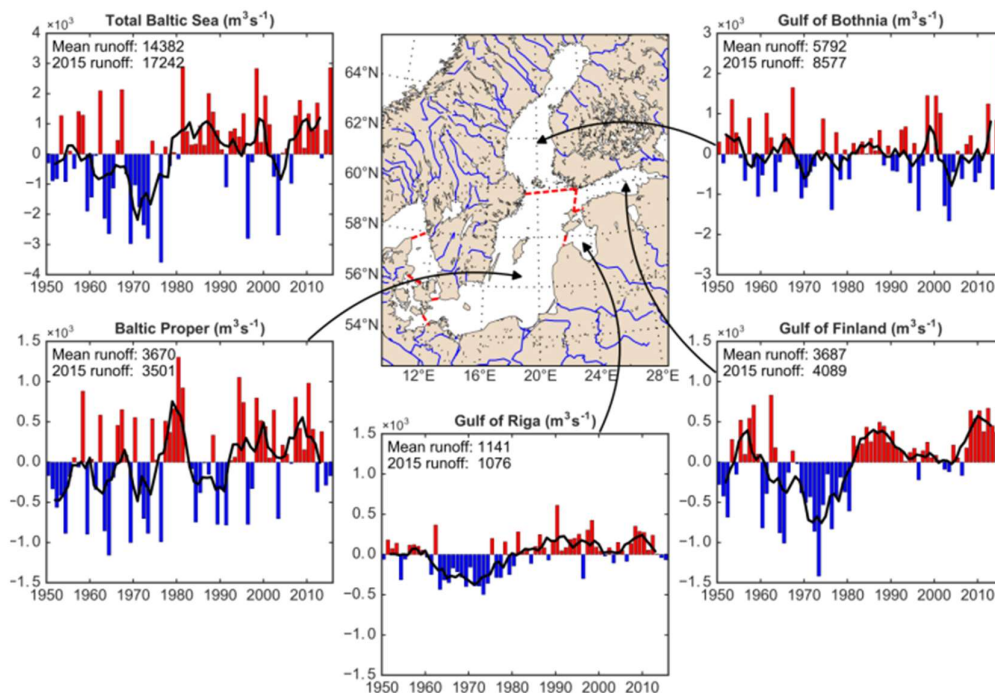
Morza Bałtyckiego to woda słodka, która pochodzi z obszarów lądowych. Na wielkość odpływu rzecznej wpływają również czynniki niezwiązane z klimatem, takie jak obecność zbiorników wodnych, sposób użytkowania terenu oraz pobór wody na potrzeby rolnictwa, zwłaszcza nawadniania. W zależności od kraju, poszczególne fragmenty zlewiska różnią się pokryciem terenu. W Niemczech, Danii i Polsce dominują użytki rolne (60–70% powierzchni), natomiast w Finlandii, Rosji, Szwecji i Estonii przeważają lasy, jeziora i mokradła (65–90%) [17].



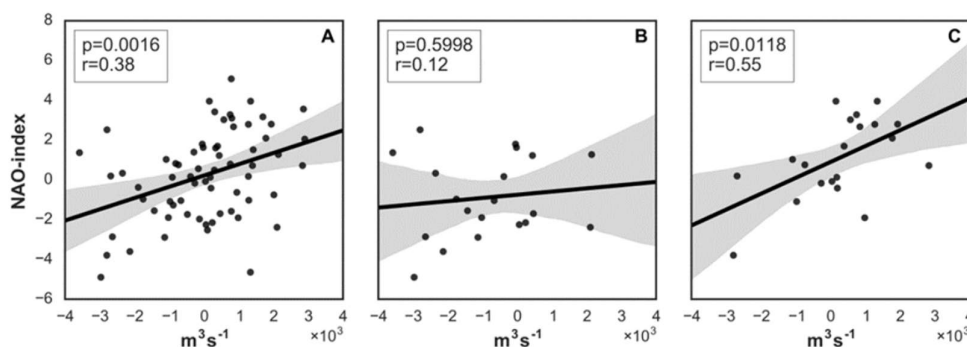
Ryc. 11. Morze Bałtyckie i jego zlewisko ze średnim zasoleniem (g/kg) oraz odpływem rzeczny (mm/rok) (Meier i in., 2022a)

Bałtyk, ze względu na wewnątrzkontynentalne położenie i ograniczoną wymianę wód z oceanem, jest szczególnie zależny od dostaw słodkiej wody. Oszacowano, że Morze Bałtyckie rocznie traci ok. $199 \pm 3 \text{ km}^3$ wody przez parowanie, a otrzymuje $256 \pm 6 \text{ km}^3$ z opadów i $476 \pm 17 \text{ km}^3$ z dopływu rzeczynego (Boulahia i in., 2022). W latach 1950–2015 odpływ rzeczny do Morza Bałtyckiego zmieniał się w rytmie naprzemiennych okresów suchych i wilgotnych, trwających zwykle

od kilku lat do dekady (Ryc. 12). Taka zmienność dobrze pokrywa się z Indekssem NAO (Ryc. 13), który opisuje układ ciśnień i prędkość wiatrów nad północnym Atlantykiem. Rekordowo wysoki odpływ odnotowano w 2015 roku, aż o 12% wyższy niż średnia z lat 1950–2014, głównie dzięki wyjątkowo dużej ilości wody spływającej z Zatoki Botnickiej.



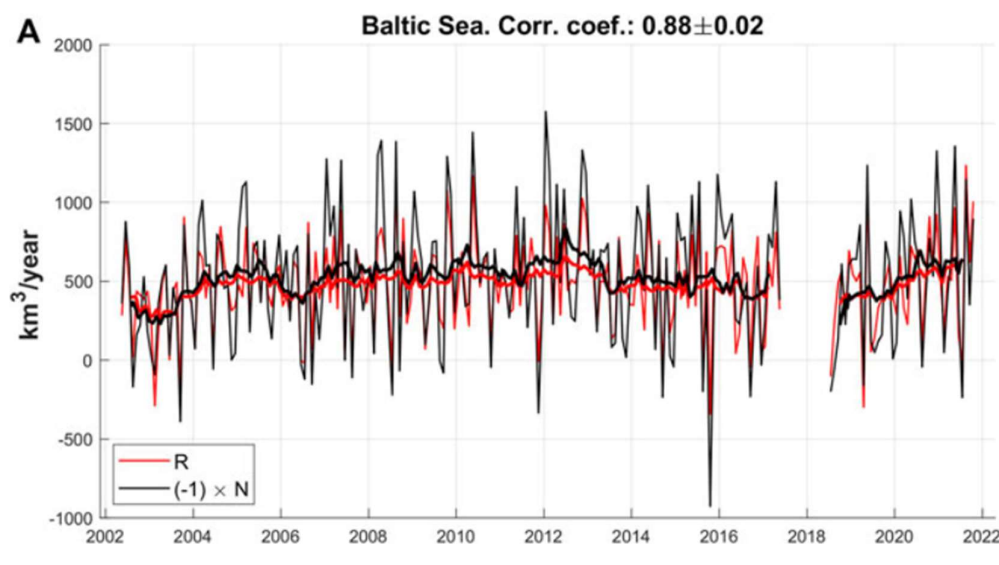
Ryc. 12. Odchylenie odpływu rzeczynego od średniej w okresie 1950–2015 w poszczególnych subregionach Bałtyku wraz z pięcioletnią średnią kroczącą (Johansson 2016)



Ryc. 13. Wzorce korelacji między indeksem NAO, a całkowitym odpływem do Morza Bałtyckiego w różnych przedziałach czasowych: A) 1950–2015, B) 1960–1979, C) 1990–2009 (Johansson 2016)

Z danych przedstawionych przez Boulahia i in., (2022) wynika, że dopływ wody słodkiej do Morza Bałtyckiego wykazuje dużą zmienność sezonową (Ryc. 14). Najwyraźniej przejawia się to w przypadku głównych składowych bilansu wodnego: opadów (P), parowania (E), spływu rzecznego (R) oraz zmiany ilości wody w systemie (dW). Największa ilość dopływu wód rzecznych do Bałtyku występuje w maju ($654 \pm 71/\text{km}^2$), co jest związane z topnieniem śniegu i intensywniejszymi opadami atmosferycznymi w tym okresie. Zarówno opady atmosferyczne (P), jak i parowanie (E) w zlewni kontynentalnej osiągają największe wartości latem, w lipcu i sierpniu wynoszą odpowiednio $1822 \pm 99 \text{ km}^3/\text{rok}$ (P) oraz $1759 \pm 18 \text{ km}^3/\text{rok}$ (E). Zimą parowanie znacznie spada, do poziomu $109 \pm$

$10 \text{ km}^3/\text{rok}$. Opad natomiast nie zmniejsza się tak bardzo, bo w tym czasie przyjmuje postać śniegu, który nie odparowuje. Wskaźnik dW, zmiana ilości wody w systemie, dobrze przedstawia różnice sezonowe. Jesienią i zimą przeważają wartości dodatnie (średnio $+340 \pm 80 \text{ km}^3/\text{rok}$), co oznacza gromadzenie się wody w systemie. Z kolei wiosną i latem dominują wartości ujemne ($-317 \pm 95 \text{ km}^3/\text{rok}$), związane z topnieniem śniegu i intensywnym parowaniem. Największy przyrost wody (dW) notowany jest w grudniu ($547 \pm 66 \text{ km}^3/\text{rok}$), a największy ubytek w maju ($-605 \pm 40 \text{ km}^3/\text{rok}$). Potwierdza to, iż procesy hydrologiczne w basenie Morza Bałtyckiego wykazują silne zmiany sezonowe (Boulahia i in., 2022).



Ryc. 14. Sezonowy transport wody z lądu do Morza Bałtyckiego (linia czerwona) oraz odpływ netto z Morza Bałtyckiego (linia czarna) (Boulahia i in., 2022)

Innym źródłem wody, wpływającym na wskaźnik dW są sezonowe wlewy słone, dobrze natlenionej wody z Morza Północnego. Dominują one zimą w sprzyjających warunkach wiatrowych, podczas długotrwałych wiatrów z kierunku zachodniego lub południowo-zachodniego (Lehmann i in., 2022).

Takie wiatry powodują spiętrzenie wody w Kattegacie i powodują jej napływ przez Cieśninę Duńską do Bałtyku.

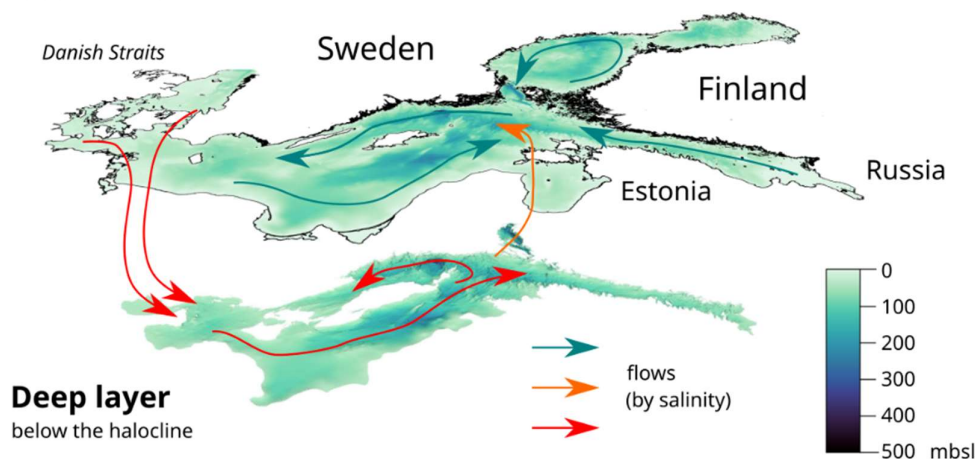
Wlewy słonych wód z Morza Północnego do Bałtyku to istotny proces dla utrzymania równowagi tlenowej w głębokich partiach

morza. Dochodzi do nich głównie zimą, gdy po dłuższym okresie wiatrów wschodnich (które wypychają wodę z Bałtyku i obniżają jego poziom) następuje nagle zmiana cyrkulacji: silne wiatry zachodnie wtłaczają przez Cieśniny Duńskie gęstą, natlenioną wodę morską. Woda ta, jako cięższa od wód bałtyckich, opada poniżej halokliny i powoli przemieszcza się przy dnie w kierunku głębokich basenów, wypierając zalegającą, beztlenową wodę denną. Tego rodzaju wlewy, nazywane barotropowymi, mają charakter epizodyczny. Są niezbędne dla zwiększenia ilości stężenia tlenu w głębiach. Występują oprócz nich również wlewy baroklinowe, napływy wywoływane różnicą gęstości między wodami Morza Północnego a Bałtyku. Mają one charakter stały i są znacznie słabsze. Przenoszą niewielkie ilości słonej wody, które nie sięgają dna i nie są wystarczające do poprawy warunków tlenowych w głębokich warstwach Bałtyku. Dlatego tylko duże wlewy barotropowe mają istotne znaczenie dla ekologicznej równowagi morza (Mohrholz 2018; [18]).

Zgodnie z danymi przedstawionymi przez Boulaia i in., (2022), średni roczny odpływ netto wody z Morza Bałtyckiego do Morza Północnego wynosi $515 \pm 27 \text{ km}^3/\text{rok}$, natomiast dla obszaru rozszerzonego, obejmującego również cieśniny Kattegat i Skagerrak, wartość ta wzrasta do $668 \pm 32 \text{ km}^3/\text{rok}$. Odpływ ten wynika z nadmiaru wody słodkiej, pochodzącej głównie z opadów i spływu rzeczynego, który musi opuścić Morze Bałtyckie. Wymiana wód ma charakter warstwowy (stratyfikowany): bardziej słona woda z Morza Północnego napływa przy dnie do Bałtyku ze średnim natężeniem $1301 \pm 227 \text{ km}^3/\text{rok}$, natomiast mniej zasolona woda opuszcza Bałtyk w warstwie powierzchniowej w ilości $1793 \pm 214 \text{ km}^3/\text{rok}$ (Ryc. 15). Zarówno odpływ rzeczynny, jak i intensywność wlewów wykazują cykliczne zmiany w skali około 30 lat (Raudsepp i in., 2022), co ma istotny wpływ na zasolenie, cyrkulację pionową oraz warunki tlenowe w głębokich partiach Bałtyku, a tym samym na cały jego ekosystem.

Surface layer

above the halocline



Ryc. 15. Schemat dwuwarstwowej cyrkulacji Morza Bałtyckiego [19]

Podsumowanie

Obserwowany obecnie wzrost globalnych temperatur prowadzi do przyspieszenia cyklu hydrologicznego w całym basenie Morza Bałtyckiego. Parowanie oraz opady atmosferyczne stają się intensywniejsze (Ehtasham i in., 2024). Z jednej strony skutkuje to zwiększoną liczbą ekstremalnych zjawisk pogodowych. Są nimi deszcze nawalne czy zjawisko powodzi. W wielu regionach występują długotrwałe susze (Bates i in., 2008). Choć liczba susz może się zmniejszyć, ich czas trwania będzie się wydłużać. Modele klimatyczne przewidują, że do 2090 roku obszary dotknięte ekstremalną suszą mogą się zwiększyć nawet 10–30 razy, a jej częstość oraz średni czas trwania ulegną podwojeniu (Burke i in., 2006). W niektórych krajach europejskich, w tym w Polsce, epizody suszy, które obecnie występują raz na sto lat, mogą pojawiać się nawet co 10 lat, do 2070 roku (Lehner i in., 2005). W efekcie region stanie się bardziej podatny zarówno na zjawisko powodzi, jak i długotrwałe niedobory wody. Skutkuje to poważnymi konsekwencjami dla człowieka i rolnictwa. Zmiany w rozkładzie opadów atmosferycznych bezpośrednio wpływają na odpływ wód ze zlewni, a tym samym na ilość składników odżywczych trafiających do morza. W suchych latach ich dopływ się zmniejsza, co może tymczasowo łagodzić objawy procesu eutrofizacji. W okresie wilgotnym gwałtownie wzrasta, intensyfikując przeżyźnienie wód, co skutkuje pogarszającą się jakością środowiska morskiego. Badania Johanssona (2016) przedstawiają, iż odpływ zależy głównie od opadów i temperatury powietrza. Ten ostatni element warunkuje tempo parowania, dwóch zmiennych, które ulegają największym anomalom.

W obliczu zmiany klimatu wrażliwy system wodny Bałtyku stoi przed poważnym zagrożeniem. Rosnące temperatury powietrza, coraz intensywniejsze opady atmosferyczne i zmienność warunków pogodowych mogą

zaburzyć równowagę pomiędzy dopływem słodkiej i słonej wody. Gdy do Bałtyku dopływa więcej słodkiej wody (np. z opadów atmosferycznych czy topniejącego śniegu) warstwy wodne oddzielają się coraz wyraźniej, co pogłębia stratyfikację i utrudnia transport tlenu w głąb zbiornika. W efekcie w głębokich warstwach rozwija się hipoksja, a życie dennych organizmów stopniowo obumiera. W takiej sytuacji utrzymanie odpowiedniego zasolenia oraz warunków sprzyjających silnym wlewom z Morza Północnego (MBI) staje się sprawą pilną. Stawką nie jest już tylko stan środowiska, lecz przyszłość całego Bałtyku.

Dlatego tak ważne jest, aby kraje sąsiadujące z Bałtykiem działały razem i zaczęły dostosowywać się do nadchodzących zmian. Potrzebujemy więcej zieleni w miastach, odtworzenia terenów podmokłych, lepszego gospodarowania wodą i rozwiązań, które ograniczą spływ zanieczyszczeń do rzek i morza. Jednocześnie nie możemy ignorować źródeł problemu. Konieczna jest redukcja emisji, ochrona przyrody i rozwój odnawialnych źródeł energii. Tylko wspólne i natychmiastowe działania mogą uchronić Bałtyk przed pogłębiającym się kryzysem.

Literatura:

- Alsmo, T., Alsmo, C. (2016). A comparison of relative humidity between two Swedish buildings with different ventilation solutions. *Journal of Environmental Protection*, 7(7), s. 959-971.
- Boulahia, R., Jäggi, A., Dahle, C., Rebischung, P. (2022). The water cycle of the Baltic Sea region from GRACE/GRACE-FO missions and ERA5 data. *Frontiers in Earth Science*, 10. CC-BY 4.0
- Bumke, K., Karger, U., Hasse, L., Niekamp, K. (1998). *Evaporation over the Baltic Sea as*

- an Example of a Semi-Enclosed Sea*. 71(2), s. 249-261.
- Cardell, M.F., Amengual, A., Romero, R., Ramis, C. (2020). Future extremes of temperature and precipitation in Europe derived from a combination of dynamical and statistical approaches. *International Journal of Climatology*, 40, s. 4800-4827.
- Ehtasham, L., Sherani, S.H., Nawaz, F. (2024). Acceleration of the hydrological cycle and its impact on water availability over land: an adverse effect of climate change. *Meteorology Hydrology and Water Management*, 12(1).
- Eki, R. (2017). *Ecology, stormwater management and environmental security in urban centers of developing countries*. International Youth Peace Conference, Nigeria, 9-11, Godfrey Okoye University: Ugwuomu.
- Gulev S.K., Thorne P.W., Ahn J., Dentener F.J., Domingues C.M., Gerland S., Gong D., Kaufman D.S., Namchi H.C., Quaas J., Rivera J.A., Sathyendranath S., Smith S.L., Trewin B., von Schuckmann K., Vose R.S. (2021). *Changing State of the Climate System*. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* Cambridge University Press, s. 287-422. CC-BY-NC-ND 4.0
- Johansson J. (2016). Total and Regional Runoff to the Baltic Sea. *HELCOM Baltic Sea Environment Fact Sheet*. Dostępne do wykorzystania i powielania z podaniem źródła zgodnie z polityką danych HELCOM.
- Lehmann A., Myrberg K., Post P., Chubarenko I., Dailidienė I., Hinrichsen H.-H., Hüseyin K., Liblik T., Meier H.E.M., Lips U. i Bukanova T. (2022). Salinity dynamics of the Baltic Sea. *Earth System Dynamics*, 13, s. 373-392.
- Mačiulytė, V., Rimkus, E., Valiukas, D., Stonevičius, E. (2023). Long-term precipitation events in the eastern part of the Baltic Sea region. *Oceanologia*, 65(1), s. 141-150.
- Martin P.A., Fisher L., Pérez-Izquierdo L., Biryol C., Guenet B., Luyssaert S., Manzoni S., Menival C., Santonja M., Spake R., Axmacher J.C., Yuste J.C. (2024). Meta-analysis reveals that the effects of precipitation change on soil and litter fauna in forests depend on body size. *Glob Change Biology*.
- Meier H. E. M., Kniebusch M., Dieterich C., Gröger M., Zorita E., Elmgren R., Myrberg K., Ahola M. P., Bartosova A., Bonsdorff E., Börgel F., Capell R., Carlén I., Carlund T., Carstensen J., Christensen O. B., Dierschke V., Frauen C., Frederiksen M., Gaget E., Galatius A., Haapala J. J., Halkka A., Hugelius G., Hünicke B., Jaagus J., Jüssi M., Käyhkö J., Kirchner N., Kjellström E., Kulinski K., Lehmann A., Lindström G., May W., Miller P. A., Mohrholz V., Müller-Karulis B., Pavón-Jordán D., Quante M., Reckermann M., Rutgersson A., Savchuk O. P., Stendel M., Tuomi L., Viitasalo M., Weisse R., Zhang W. (2022a). Climate change in the Baltic Sea region: a summary. *Earth System Dynamics*, 13, s. 457-593. CC BY 4.0.
- Meier H.E.M., Saraiva S., Höglund A., Arheimer B., Börgel F., Dieterich C., Dutra E., Gröger M., Hordoir R., Kjellström E., Lara C., Lämmel T., Nilsson J., Pemberton P., Schimanke S., Wang S., (2022b). Climate change impacts on eutrophication and oxygen deficiency in the Baltic Sea: A model ensemble study. *Earth System Dynamics*, 13(2), s. 457-478.
- Mohrholz V., 2018. Major Baltic Inflow Statistics-Revised. *Frontiers in Marine Science*, 5, s. 384.
- Mohamed Y.A., Savenije H.H.G., Bastiaanssen W.G.M., van den Anel A.C.M. (2012). Wetland versus open water evaporation: An analysis and literature review. *Physics and Chemistry of the Earth*, 47-48, s. 114-121.
- Pörtner H.-O., Roberts D. C., Tigno, M., Poloczanska E. S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Löschke S., Möller V., Okem A., Rama B. (red.) (2022). Climate

- Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press*.
- Raudsepp U., Maljutenko I., Barzandeh A., Uiboupin R., Lagema P. (2022). Baltic Sea freshwater content. *Earth System Dynamics*, 13(2), s. 457-475.
- Siegel H., Gerth M. (2018). Sea Surface Temperature in the Baltic Sea 2018. *Leibniz Institute for Baltic Sea Research Warnemünde (IOW)*. Dostępne do wykorzystania i powielania z podaniem źródła zgodnie z polityką danych HELCOM.
- Smedman A.-S., Gryning S.-E., Bumke K., Högström U., Rutgersson A., Batchvarova E., Peters G., Hennemuth B., Tammelin B., Hyvönen R., Omstedt A., Michelson D., Andersson T., Clemens M. (2005). Precipitation and Evaporation Budgets over the Baltic Proper: Observations and Modelling. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 10 (3), s. 163-191
- Źródła internetowe:
- [1] <https://naszbaltyk.pl/cechy-morfometryczne/> [dostęp: 18.06.2025]
- [2] <https://fundacjamare.pl/hydrologia-baltyku/> [dostęp: 18.06.2025]
- [3] Borek D., Gorzelak M., Gustyn J., Kubecka A., Morytz-Balska E., Piłka R., Safader M., Wójcik J., Zielkowska A., *Polska na drodze zrównoważonego rozwoju*, dostępny na: <https://raport-sdg.stat.gov.pl/2020/cel6.html#:~:text=Woda%20zajmuje%20ponad%2070%25%20powierzchni,s%C5%82odkie%20b%C4%99d%C4%85ce%20%C5%BAr%C3%B3d%C5%82em%20wody%20pitnej> [dostęp: 19.06.2025]
- [4] Rafferty J., *Evaporation*, dostępny na: <https://www.britanica.com/science/evaporation> [dostęp: 15.06.2025]
- [5] Popkiewicz M., Kardaś A., Malinowski Sz., *Efekt cieplarniany dla średniozaawansowanych (1): Termiczna struktura atmosfery*, dostępny na: <https://naukaoklimacie.pl/aktualnosci/efekt-cieplarniany-dla-sredniozaawansowanych-1-termiczna-struktura-atmosfery-408> CC BY-NC-ND 3.0 PL [dostęp: 13.05.2025]
- [6] https://en.wikipedia.org/wiki/Geography_of_Latvia#Climate [dostęp: 03.04.2025]
- [7] https://simple.wikipedia.org/wiki/Climate_of_Denmark [dostęp: 03.04.2025]
- [8] https://en.wikipedia.org/wiki/Climate_of_Sweden [dostęp: 03.04.2025]
- [9] <https://en.wikipedia.org/wiki/Vilnius#Climate> [dostęp: 03.04.2025]
- [10] <https://www.pogodairadar.pl/wiadomosci-pogodowe/ile-dni-w-polsce-jest-deszczowych--1e7994c7-21dd-4643-a863-18eddd264603> [dostęp: 30.04.2025]
- [11] <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/> [dostęp: 05.05.2025]
- [12] Korosec M., *Warm wave: Central and Eastern Europe warms up this week*, dostępny na: <https://www.severe-weather.eu/global-weather/warm-wave-heat-dome-europe-march-2025-mk/> [dostęp: 15.06.2025]
- [13] <https://www.copernicus.eu/en/media/image-day-gallery/precipitation-anomaly-europe-march-2025> CC-BY 4.0 [dostęp: 03.04.2025]
- [14] Dżaków P., *Zmiana klimatu w Polsce na mapkach*, dostępny na: <https://naukaoklimacie.pl/aktualnosci/zmiana-klimatu-w-polsce-na-mapkach-468> CC BY-NC-ND 3.0 PL [dostęp: 03.05.2025]
- [15] https://www.dwd.de/EN/ourservices/rcccm/int/rcccm_int_sno.html [dostęp: 05.05.2025]

- [16] Djałow P., *Polskie zimy w XX i XXI wieku* (cz. 2) <https://naukaoklimacie.pl/aktualnosci/polskie-zimy-w-xx-i-xxi-wieku-cz-2-273> CC BY-NC-ND 3.0 PL [dostęp: 03.05.2025]
- [17] https://archive.iwlearn.net/helcom.fi/environment2/nature/en_GB/facts/index.html [dostęp: 12.06.2025]
- [18] <https://naszbałtyk.pl/hydrologia/> [dostęp: 15.06.2025]
- [19] <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=135519265> CC BY-SA 4.0 [dostęp: 14.06.2025]

Notka o autorce: *Studentka II roku studiów licencjackich na Uniwersytecie Gdańskim na kierunku oceanografia, specjalność geologiczno- fizyczno- chemiczna. Zainteresowana współczesnymi zmianami klimatu, ich konsekwencjami oraz możliwościami zapobiegania tym zmianom.*