Havsförsurning ytterligare ett hot mot Östersjöns ekosystem

Havsförsurningen väntas de kommande decennierna bli påtaglig även i Östersjön. För det redan hårt pressade ekosystemet innebär det ytterligare en belastning: Den samlade effekten av försurningen och annan miljöpåverkan kan stressa arter och minska den biologiska mångfalden. För att skydda den unika miljön och den framtida matproduktionen krävs både kraftigt minskade koldioxidutsläpp och åtgärder mot övergödning, överfiske och utsläpp av farliga ämnen.

Att de stora utsläppen av växthusgaser leder till klimatförändringar och global uppvärmning är idag välkänt. Mindre uppmärksammat är det som kallas det andra koldioxidproblemet – försurningen av haven (Doney et al., 2009).

På 1980-talet var försurningen av sjöar och marker ett av de mest uppmärksammade miljöproblemen. Utsläpp av svavel- och kväveoxider i samband med förbränningsprocesser i exempelvis motorfordon, kraft- och värmeverk gav upphov till atmosfäriskt nedfall av svavel- och salpetersyra, populärt kallat ”surt regn”, som fick stora effekter på ekosystemen i sjöar och skogar. Kraftigt förbättrad rening av utsläppen under 1980- och 1990-talen i kombination med kalkning av sjöar och vattendrag har dock lett till att denna typ av försurning har minskat i Östersjöområdet (Omstedt et al., 2015).

De senaste åren har i stället en annan typ av försurning uppmärksammats: den globala havsförsurningen som orsakas av de massiva utsläppen av koldioxid. Hittills har havsförsurningen inte märkts lika tydligt i Östersjön som i de stora världshaven (Müller et al., 2016), men på sikt kommer effekterna att synas även här och ytterligare belasta ekosystemet i havet.

Haven dämpar växthuseffekten – men försuras

Sedan industrialiseringens början har halten koldioxid i atmosfären ökat kraftigt. Analyser av luft som fångats i Antarktis is visar att halterna de senaste 800 000 åren har varierat mellan cirka 180 ppm (parts per million) under istider och 280 ppm under mellanistider (Lüthi et al., 2008). Men de senaste 200 åren har koldioxidhalten i atmosfären ökat till dagens omkring 420 ppm.

I dagsläget släpps årligen cirka 40 miljarder ton koldioxid ut till atmosfären till följd av bland annat förbränning av fossila bränslen, cementproduktion och förändrad landanvändning. Knappt hälften (45 procent) av utsläppen ackumuleras i atmosfären, medan 30 procent tas upp av ekosystem på land och 25 procent tas upp av haven (Friedlingstein et al., 2023). Haven bidrar alltså till att dämpa koldioxidökningen i atmosfären, och därmed växthuseffekten, vilket gör att de länge betraktades i första hand som en koldioxidsänka.

Efter hand har det emellertid blivit tydligt att havens koldioxidupptag inte enbart är positivt, utan också gradvis leder till försurning av alla världens vattenområden, inklusive de stora oceanerna. Orsaken är att koldioxid som tas upp av haven reagerar med vattnet och bildar kolsyra, vilket leder till att pH-värdet i haven gradvis minskar.

Havsförsurningen fram till idag

För närvarande minskar pH med omkring 0,002 pH-enheter per år i oceanernas ytvatten (Carstensen and Duarte, 2019). Sammanlagt sedan industrialiseringens början har pH minskat med mer än 0,1 pH-enheter till dagens omkring 8,1. Minskningen kan låta liten, men eftersom pH-skalan är logaritmisk innebär den en förändring med omkring 30 procent.

I kustnära mindre hav som Östersjön är de långsiktiga pH-förändringarna svårare att urskilja, eftersom vattnets surhetsgrad samtidigt påverkas av flera andra processer som är mer påtagliga, och även varierar kraftigt över året.

I Östersjön finns stora geografiska skillnader i salthalt, men även pH skiljer sig markant mellan de olika delbassängerna och mellan kust och öppet vatten. Detta beror dels på proportionerna mellan oceanvatten och färskvatten i de olika bassängerna – det salta och kalkrika oceanvattnet har oftast högre pH än färskvatten från land. Men pH påverkas också av egenskaper i avrinningsområdet. I sydöstra Östersjön där berggrunden typiskt domineras av kalksten och sandsten har flodvattnet en betydligt högre koncentration av löst kalk, som gör vattnet basiskt, än i norra delarna av Östersjön där berggrunden till stor del utgörs av granit och gnejs (Müller et al., 2016). Detta innebär till exempel att vattnet i Rigabukten har högre pH än det i Bottenviken.

Studier visar att havsförsurningen i vissa delar av Östersjön hittills varit mindre påtaglig än i världshaven, till exempel i Egentliga Östersjön (Müller et al., 2016). I andra delar har pH minskat snabbare än i världshaven, till exempel i några av de danska havsvikarna (Carstensen et al., 2018). Observationer visar att pH i genomsnitt under ett år i nuläget är cirka 8,3 i Rigabukten, 8,1 i centrala Gotlandshavet och 7,8 i Bottenviken (Gustafsson et al., 2023).

Förväntad framtida försurning

Med nuvarande klimatpolitik bedöms det sannolikt att koldioxidutsläppen kommer att kulminera kring mitten av det här århundradet för att sedan sakta minska (Hausfather and Peters, 2020). En sådan utveckling skulle innebära att koldioxidhalten i atmosfären fortsätter att öka till 600 ppm eller mer år 2100 och att pH i oceanernas ytvatten under samma period minskar med cirka 0,15 enheter jämfört med dagens nivå. I mer extrema klimatscenarier som skulle innebära en tillbakagång i klimatpolitik och kraftigt ökande koldioxidutsläpp, något som idag betraktas som mindre troligt (Hausfather and Peters, 2020), ökar koldioxidhalten i atmosfären till cirka 1000 ppm fram till år 2100 samtidigt som pH minskar med 0,3–0,4 enheter. (Lee et al., 2021).

Modelleringar av utvecklingen i Östersjön ger en likartad bild av hur försurningen utvecklas på längre sikt – en sannolik utveckling med dagens klimatpolitik är en genomsnittlig pH-minskning med omkring 0,1–0,15 enheter under det här århundradet (Gustafsson et al., 2023). Även om pH-nivåerna varierar betydligt mellan Östersjöns olika delbassänger så kommer pH-minskningen över tid att vara likartad. I Bottenviken väntas pH-minskningen dock bli aningen mer markant än i centrala Östersjön, och i Rigabukten aningen mindre.

Om Parisavtalets mål – det vill säga att begränsa den globala uppvärmningen till 1,5 grader – förverkligas så skulle de minskade koldioxidutsläppen också leda till att havsförsurningen globalt stoppas och att pH sakta börja öka igen i världshaven och i Östersjön under det här århundradet. Koldioxidutsläppen fortsätter dock att öka globalt och åtgärderna för att minska utsläppen är för närvarande inte tillräckliga (Lamboll el al., 2023). Utsläppen av fossil koldioxid under år 2023 bedöms ha varit de högsta någonsin (Friedlingstein et al., 2023).

Fartygsutsläpp kan ha stor lokal påverkan

Utöver de globala koldioxidutsläppen kan utsläpp av svavel- och kväveoxider från fartyg ha betydande effekt på pH i högtrafikerade fartygsleder och hamnar. Nya strängare globala regler begränsar numera svavelutsläppen till luft. En konsekvens av detta har dock blivit en kraftigt ökad användning av så kallad skrubberteknik.

Skrubberteknik är en rökgasreningsmetod som främst används för att tvätta ur svaveloxider i fartygsavgaser. Processen gör att svavelhalten i avgaserna håller sig under satta gränsvärden, men det vatten som används och som sedan släpps ut i havet är både kraftigt förorenat och kraftigt försurat, ofta med ett pH på cirka 3. Även om den storskaliga effekten av dessa utsläpp på havsförsurningen är liten, jämfört med koldioxidutsläppens, kan kombinationen av försurande och giftiga ämnen i skrubbervatten lokalt ha stora effekter på levande organismer. (Turner et al., 2018).

Ekologiska effekter av försurningen

Med mer än 10 000 vetenskapliga publikationer inom ämnet finns det nu starka bevis för att den pågående havsförsurningen kan få stora konsekvenser för de marina ekosystemen, genom att gynna vissa organismer och missgynna andra (Cooley et al., 2022).

De flesta djurarter har svårt att hantera den surare miljön, till exempel många fiskar, som tycks vara särskilt känsliga i larvstadiet (Stiasny et al., 2018). Att hålla pH-värdet konstant i celler och kroppsvätskor är avgörande för enzymernas funktion, och detta kräver mycket energi av marina organismer. I en försurad miljö är dessa processer ännu mer energikrävande (Thor och Dupont 2018).

Kalkbildande organismer, som använder kalciumkarbonat för att bygga skal eller skelett, identifierades tidigt som arter som riskerade att drabbas särskilt hårt av havsförsurningen. Det beror på att bildandet och upprätthållandet av kalkstrukturer är särskilt energikrävande (Thor och Dupont 2018).

Andra organismer, som maneter och vissa typer av alger, kan gynnas av försurningen (Winder et al., 2017). De förändringar av artsammansättningen långt ner i näringsväven som detta leder till påverkar sedan organismer högre upp, såsom fiskar, fåglar och sälar, eftersom deras tillgång till föda förändras (Rossoll et al., 2012, Bermúdez et al., 2016a). Sammantaget förväntas havsförsurningen bidra avsevärt till förlusten av biologisk mångfald i haven (IPCC 2022).

Påverkan på Östersjöarter

De arter som lever i Östersjön är i allmänhet vana vid och anpassade till naturligt stora variationer i pH, och det antogs tidigare att det skulle vara lättare för dem att hantera havsförsurningen än för arter i de stora världshaven (Thomsen et al 2017). .Nya studier har dock visat att det som främst påverkar organismerna är de lägstanivåer av pH som uppstår. Eftersom havsförsurningen väntas förstärka årsvariationerna kan Östersjöarterna vara mer utsatta än vad som tidigare antagits (Vargas et al., 2017, 2022; Hauri et al., 2024; Cossa et al., 2024).

Studier på specifika Östersjöarter visar att plankton överlag klarar av högre koldioxidhalter i vattnet, även om det finns indikationer på att artsammansättningen kan förändras. Cyanobakterien *Nodularia* har i experiment visat sig missgynnas av försurningen (Paul et al., 2018), men kan å andra sidan gynnas av andra effekter kopplade till klimatförändringarna.

Av de kalkbildande arterna har Östersjömusslan i experiment visat sig ha svårt att klara försurning (Jansson, 2017). Islandsmusslan tycks vara mer tolerant och anpassningsbar, liksom blåmusslan i det

vuxna levnadsstadiet (Hiebenthal et al., 2013). I larvstadiet har blåmusslan däremot visat sig vara mer känslig och den fysiologiska stress som försurning orsakar kan därför skada framtida populationer (Ventura et al., 2016).

För makroalger som blåstången kan försurningen leda till bättre tillväxt tack vare den ökade tillgången till kol som är deras energikälla, men effekten är sannolikt liten (Graiff et al., 2017; Takolander et al., 2017; Takolander et al., 2019).

Flera av fiskarna i Östersjön, såsom sill och torsk, tillhör de arter som i larvstadiet är särskilt känsliga för försurning (Stiasny et al. 2018; Puvanendran et al, 2018), men fiskpopulationerna kan också påverkas av förändringarna längre ner i näringsväven.

Övergödning förstärker naturliga pH-variationer

Sambandet mellan övergödning och försurning är komplicerat. pH varierar naturligt över året på grund av att koldioxid binds i växter och djur och sedan frigörs när dessa bryts ner (Havenhand et al., 2019). En hög tillförsel av fosfor och kväve ger ofta upphov till stora algblomningar (Kahru and Elmgren 2014), vilket innebär att en stor mängd koldioxid fixeras av växter. Detta resulterar också i en stor pH-ökning under vår och sommar när ljusförhållandena är gynnsamma för fotosyntes.

Å andra sidan frigörs den fixerade koldioxiden när det organiska materialet bryts ned, och ju större mängd organiskt material som bryts ned, desto större mängd koldioxid frigörs också. Under en planktonblomning kan pH i exempelvis Gotlandshavets ytvatten öka med mer än 0,5 under loppet av en månad, för att sedan minska lika mycket igen under vintern då koldioxid frigörs genom nedbrytningsprocesser (Havenhand et al., 2019).

I ett övergött hav med stor växtplanktonproduktion blir pH-ökningen under sommaren större än i ett näringsfattigt hav, men samtidigt blir också pH-minskningen under vintern mer påtaglig (Havenhand et al., 2019). I genomsnitt över ett helt år innebär hög tillförsel av kväve och fosfor, med stora algblomningar som följd, att havet får ett något högre pH än det annars skulle ha haft (Gustafsson et al., 2023). Modelleringarna av utvecklingen i Östersjön visar också att den genomsnittliga pH-minskningen blir något mindre om näringstillförseln ligger på en hög nivå, än om den minskar i enlighet med vad Östersjöländerna kommit överens om genom Helcoms Baltic Sea Action Plan.

De marina organismerna påverkas dock inte av medelvärden när det gäller pH, utan av de extremer som förekommer. (Vargas et al., 2017, 2022). De förstärkta variationer som havsförsurningen leder till, i synnerhet under övergödda förhållanden, har negativa effekter för djuren i havet (Cossa et al., 2024).

Kombinerade effekter kan slå hårt

Parallellt med havsförsurningen pågår flera processer i Östersjön kopplade till klimatförändringarna, så som ökad vattentemperatur och värmeböljor, minskad syrehalt, minskad isutbredning, förändrad salthalt och ökad kusterosion (Meier et al., 2022).

Östersjöns ekosystem utsätts dessutom för stress orsakad av överfiske, utsläpp av farliga ämnen och den miljöpåverkan som är relaterad till övergödningen, som stora planktonblomningar och ökad utbredning av syrefattiga djupvattenområden (Reusch et al. 2018).

Det finns ett stort kunskapsbehov när det gäller hur kombinationen av havsförsurning och andra processer kommer att påverka Östersjöns ekosystem i framtiden (Havenhand, 2012; Havenhand et al. 2019). Med de framtida globala klimatförändringarna och havsförsurningen i åtanke finns stor

anledning att snarast göra det som är möjligt för att minska de regionala problem som finns i Östersjön, såsom övergödning, överfiske och utsläpp av farliga ämnen. Det kan göra organismer och ekosystem mer motståndskraftiga mot kommande klimat- och försurningseffekter.

Det pågår idag forskning om möjligheterna att öka bindningen av koldioxid i havet genom att förändra kemin i vattnet, vilket samtidigt skulle bidra till att motverka havsförsurningen (Oschlies et al., 2023). För att bromsa den storskaliga havsförsurningen och begränsa klimatförändringarna är det dock avgörande att kraftigt minska utsläppen av koldioxid till atmosfären.

REKOMMENDATIONER

- Öka ansträngningarna att nå de utsläppsmål för koldioxid som beslutats om globalt och på EU-nivå.
- Öka takten i åtgärdsarbetet för att minska näringstillförsel från land och därmed övergödning, överfiske och utsläpp av farliga ämnen. Många arter kan klara sig i surare vatten men deras motståndskraft och återhämtningsförmåga att klara ytterligare påfrestningar minskar.
- Verka för ett nationellt och internationellt förbud av utsläpp av skrubbervatten i havet, som lokalt kan leda till kraftig försurning, och stimulera framtagande av alternativa bränslen.
- Utvidga mätprogrammen för försurning i både tid och rum, och kombinera provtagningar av kemin i vattnet med biologiska observationer.
- Främja forskning om känsligheten hos Östersjöns arter och ekosystem för havsförsurning i kombination med annan påverkan.

REFERENSLISTA

Bermúdez, J. R., U. Riebesell, A. Larsen, and M. Winder. 2016a. Ocean acidification reduces transfer of essential biomolecules in a natural plankton community. Scientific Reports 6. https://doi.org/10.1038/srep27749

Bermúdez, R., M. Winder, A. Stuhr, A.-K. Almén, J. Engström-Öst, and U. Riebesell. 2016b. Effect of ocean acidification on the structure and fatty acid composition of a natural plankton community in the Baltic Sea. Biogeosciences 13:6625–6635. https://doi.org/10.5194/bg-13-6625-2016

Carstensen, J., Chierici, M., Gustafsson, B.G., Gustafsson, E., 2018. Long-Term and Seasonal Trends in Estuarine and Coastal Carbonate Systems. Global Biogeochemical Cycles 32, 497–513. https://doi.org/10.1002/2017GB005781

Carstensen, J., Duarte, C.M., 2019. Drivers of pH Variability in Coastal Ecosystems. Environ. Sci. Technol. 53, 4020–4029. https://doi.org/10.1021/acs.est.8b03655

Cooley S, Schoeman D, Bopp L, Boyd P, Donner S, Ito S, Kiessling W, Martinetto P, Ojea E, Racault MF, Rost B, Skern-Mauritzen M, Yemane Ghebrehiwet D, Bell JD, Blanchard J, Bolin J, Cheung WWL, Cisneros-Montemayor A, Dupont S, Dutkiewicz S, Frölicher T, Gaitán-Espitia JD, Molinos JG, Gurney-Smith H, Henson S, Hidalgo M, Holland E, Kopp R, Kordas R, Kwiatkowski L, Le Bris N, Lluch-Cota SE, C Logan, Mark FC, Mgaya Y, Moloney C, Muñoz Sevilla NM, Randin G, Raja NB, Rajkaran A, Richardson A, Roe S, Ruiz Diaz R, Salili D, Sallée JB, Scales K, Scobie M, Simmons CT, Torres O & Yool A (2022) Oceans and Coastal Ecosystems and their Services. In ***IPCC AR6 WGII***. Cambridge University Press. pp. 379-550.

Cossa, D., Infantes, E., Dupont, S., Hidden cost of pH variability in seagrass beds on marine calcifiers under ocean acidification, Science of The Total Environment, Volume 915, 2024, 170169, ISSN 0048-9697. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170169.

Doney, S.C., Fabry, V.J., Feely, R.A., Kleypas, J.A., 2009. Ocean Acidification: The Other CO_2 Problem. Annual Review of Marine Science 1, 169–192. https://doi.org/10.1146/annurev.marine.010908.163834

Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M.W., Andrew, R.M., Bakker, D.C.E., Hauck, J., Landschützer, P., Le Quéré, C., Luijkx, I.T., Peters, G.P., Peters, W., Pongratz, J., Schwingshackl, C., Sitch, S., Canadell, J.G., Ciais, P., Jackson, R.B., Alin, S.R., Anthoni, P., Barbero, L., Bates, N.R., Becker, M., Bellouin, N., Decharme, B., Bopp, L., Brasika, I.B.M., Cadule, P., Chamberlain, M.A., Chandra, N., Chau, T.-T.-T., Chevallier, F., Chini, L.P., Cronin, M., Dou, X., Enyo, K., Evans, W., Falk, S., Feely, R.A., Feng, L., Ford, D.J., Gasser, T., Ghattas, J., Gkritzalis, T., Grassi, G., Gregor, L., Gruber, N., Gürses, Ö., Harris, I., Hefner, M., Heinke, J., Houghton, R.A., Hurtt, G.C., Iida, Y., Ilyina, T., Jacobson, A.R., Jain, A., Jarníková, T., Jersild, A., Jiang, F., Jin, Z., Joos, F., Kato, E., Keeling, R.F., Kennedy, D., Klein Goldewijk, K., Knauer, J., Korsbakken, J.I., Körtzinger, A., Lan, X., Lefèvre, N., Li, H., Liu, J., Liu, Z., Ma, L., Marland, G., Mayot, N., McGuire, P.C., McKinley, G.A., Meyer, G., Morgan, E.J., Munro, D.R., Nakaoka, S.-I., Niwa, Y., O'Brien, K.M., Olsen, A., Omar, A.M., Ono, T., Paulsen, M., Pierrot, D., Pocock, K., Poulter, B., Powis, C.M., Rehder, G., Resplandy, L., Robertson, E., Rödenbeck, C., Rosan, T.M., Schwinger, J., Séférian, R., Smallman, T.L., Smith, S.M., Sospedra-Alfonso, R., Sun, Q., Sutton, A.J., Sweeney, C., Takao, S., Tans, P.P., Tian, H., Tilbrook, B., Tsujino, H., Tubiello, F., Van Der Werf, G.R., Van Ooijen, E., Wanninkhof, R., Watanabe, M., Wimart-Rousseau, C., Yang, D., Yang, X., Yuan, W., Yue, X., Zaehle, S., Zeng, J., Zheng, B., 2023. Global Carbon Budget 2023. Earth Syst. Sci. Data 15, 5301–5369. https://doi.org/10.5194/essd-15-5301-2023

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

Gustafsson, E., Carstensen, J., Fleming, V., Gustafsson, B.G., Hoikkala, L., Rehder, G., 2023. Causes and consequences of acidification in the Baltic Sea: implications for monitoring and management. Sci Rep 13, 16322. https://doi.org/10.1038/s41598-023-43596-8

Hauri, C., Pagès, R., Hedstrom, K., Doney, S. C., Dupont, S., Ferriss, B., & Stuecker, M. F. (2024). More than marine heatwaves: A new regime of heat, acidity, and low oxygen compound extreme events in the Gulf of Alaska. *AGU Advances*, 5, e2023AV001039. https://doi.org/10.1029/2023AV001039

Hausfather, Z., Peters, G.P., 2020. Emissions – the 'business as usual' story is misleading. Nature 577, 618–620. https://doi.org/10.1038/d41586-020-00177-3
Havenhand, J.N., 2012. How will Ocean Acidification Affect Baltic Sea Ecosystems? An Assessment of Plausible Impacts on Key Functional Groups. AMBIO 41, 637–644. https://doi.org/10.1007/s13280-012-0326-x

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

Hiebenthal, C., Philipp, E.E.R., Eisenhauer, A., Wahl, M., 2013. Effects of seawater pCO_2 and temperature on shell growth, shell stability, condition and cellular stress of Western Baltic Sea Mytilus edulis (L.) and Arctica islandica (L.). Mar Biol 160, 2073–2087. https://doi.org/10.1007/s00227-012-2080-9

IPCC, 2022: Summary for Policymakers [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem (eds.)]. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3-33, doi:10.1017/9781009325844.001.

Jansson, A., 2017. Ocean acidification in the Baltic Sea: implications for the bivalve Macoma balthica.

Kahru, M., and R. Elmgren. 2014. Multidecadal time series of satellite-detected accumulations of cyanobacteria in the Baltic Sea. Biogeosciences 11:3619–3633. https://doi.org/10.5194/bg-11-3619-2014

Lamboll, R.D., Nicholls, Z.R.J., Smith, C.J. *et al.* Assessing the size and uncertainty of remaining carbon budgets. *Nat. Clim. Chang.* **13**, 1360–1367 (2023). https://doi.org/10.1038/s41558-023-01848-5

Lee, J.-Y., J. Marotzke, G. Bala, L. Cao, S. Corti, J.P. Dunne, F. Engelbrecht, E. Fischer, J.C. Fyfe, C. Jones, A. Maycock, J. Mutemi, O. Ndiaye, S. Panickal, and T. Zhou, 2021: Future Global

Climate: Scenario-Based Projections and Near-Term Information. 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 [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 553–672, https://doi.org/10.1017/9781009157896.006.

Lüthi, D., Le Floch, M., Bereiter, B., Blunier, T., Barnola, J.-M., Siegenthaler, U., Raynaud, D., Jouzel, J., Fischer, H., Kawamura, K., Stocker, T.F., 2008. High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present. Nature 453, 379–382. https://doi.org/10.1038/nature06949

Meier, H. E. M. et al. Climate change in the Baltic Sea region: a summary. Earth System Dynamics 13, 457593 (2022).

Müller, J.D., Schneider, B., Rehder, G., 2016. Long-term alkalinity trends in the Baltic Sea and their implications for CO_2-induced acidification. Limnol. Oceanogr. 61, 1984–2002. https://doi.org/10.1002/lno.10349

Omstedt, A., Edman, M., Claremar, B., Rutgersson, A., 2015. Modelling the contributions to marine acidification from deposited SO_x, NO_x, and NH_x in the Baltic Sea: Past and present situations. Continental Shelf Research, Coastal Seas in a Changing World: Anthropogenic Impact and Environmental Responses 111, 234–249. https://doi.org/10.1016/j.csr.2015.08.024

Oschlies, A., Stevenson, A., Bach, L. T., Fennel, K., Rickaby, R. E. M., Satterfi eld, T., Webb, R., and Gattuso, J.-P. (Eds.): Guide to Best Practices in Ocean Alkalinity Enhancement Research (OAE Guide 23), Copernicus Publications, State Planet, 2-oae2023, https://doi.org/10.5194/sp-2-oae2023, 2023

Puvanendran, A. Mortensen, T. B. H. Reusch, and C. Clemmesen. 2018. Effects of parental acclimation and energy limitation in response to high CO2 exposure in Atlantic cod. Scientific Reports 8:8348.

Paul AJ, Sommer U, Paul C, Riebesell U (2018) Baltic Sea diazotrophic cyanobacterium is negatively affected by acidification and warming. Mar Ecol Prog Ser 598:49-60. https://doi.org/10.3354/meps12632

Reusch, T. B. H., J. Dierking, H. C. Andersson, E. Bonsdorff, J. Carstensen, M. Casini, M. Czajkowski, B. Hasler, K. Hinsby, K. Hyytiäinen, K. Johannesson, S. Jomaa, V. Jormalainen, H. Kuosa, S. Kurland, L. Laikre, B. R. MacKenzie, P. Margonski, F. Melzner, D. Oesterwind, H. Ojaveer, J. C. Refsgaard, A. Sandström, G. Schwarz, K. Tonderski, M. Winder, and M. Zandersen. 2018. The Baltic Sea as a time machine for the future coastal ocean. Science Advances 4:eaar8195. https://doi.org/10.1126/sciadv.aar8195

Rossoll, D., R. Bermúdez, H. Hauss, K. G. Schulz, U. Riebesell, U. Sommer, and M. Winder. 2012. Ocean acidification-induced food quality deterioration constrains trophic transfer. PLoS One 7:e34737. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0034737

Rossoll, D., U. Sommer, and M. Winder. 2013. Community interactions dampen acidification effects in a coastal plankton system. Marine Ecology Progress Series 486:37–46. https://doi.org/10.3354/meps10352

Stiasny, M. H., F. H. Mittermayer, G. Göttler, C. R. Bridges, I.-B. Falk-Petersen, V. Saraiva, S., Markus Meier, H.E., Andersson, H., Höglund, A., Dieterich, C., Gröger, M., Hordoir, R., Eilola, K., 2019. Baltic Sea ecosystem response to various nutrient load scenarios in present and future climates. Clim Dyn 52, 3369–3387. https://doi.org/10.1007/s00382-018-4330-0
Thomsen, J., L. S. Stapp, K. Haynert, H. Schade, M. Danelli, G. Lannig, K. M. Wegner, and F. Melzner. 2017. Naturally acidified habitat selects for ocean acidification–tolerant mussels. Science Advances 3:e 1602411. https://doi.org/10.1126/sciadv.1602411

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

Thomsen, J., Stapp, L., Haynert, K., Schade, H., Danelli, M., Lannight, G. 2017. Naturally acidified habitat selects for ocean acidification–tolerant mussels.*Sci. Adv.***3**,e1602411(2017).DOI:10.1126/sciadv.1602411

Thor, P., Dupont, S., 2018. Ocean Acidification, in: Handbook on Marine Environment Protection. Springer, Cham, pp. 375–394. https://doi.org/10.1007/978-3-319-60156-4_19

Turner, D.R., Edman, M., Gallego-Urrea, J.A., Claremar, B., Hassellöv, I.-M., Omstedt, A., Rutgersson, A., 2018. The potential future contribution of shipping to acidification of the Baltic Sea. Ambio 47, 368–378. https://doi.org/10.1007/s13280-017-0950-6

Vargas CA, Cuevas LA, Broitman BR, San Martin VA, Lagos NA, Gaitán-Espitia JD & Dupont S (2022) Upper environmental *p*CO2 drives sensitivity to ocean acidification in marine invertebrates. ***Nature Climate Change***. 12: 200-207.

Vargas C, Lagos N, Lardies M, Duarte C, Manríquez P, Aguilera V, Broiman B, Widdicombe S & Dupont S (2017) Species-specific responses to ocean acidification should account for local adaptation and adaptive plasticity. ***Nature Ecology and Evolution***. 1:84.

Ventura, A., Schulz, S., Dupont, S., 2016. Maintained larval growth in mussel larvae exposed to acidified under-saturated seawater. Scientific Reports 6, 23728. https://doi.org/10.1038/srep23728

Winder, M., J. M. Bouquet, J. Rafael Bermúdez, S. A. Berger, T. Hansen, J. Brandes, A. F. Sazhin, J. C. Nejstgaard, U. B\a amstedt, H. H. Jakobsen, J. Dutz, M. E. Frischer, C. Troedsson, and E. M. Thompson. 2017. Increased appendicularian zooplankton alter carbon cycling under warmer more acidified ocean conditions. Limnology and Oceanography 62:1541–1551. https://doi.org/10.1002/lno.10516

Widdicombe S, Isensee K, Artioli Y, Gaitán-Espitia JD, Hauri C, Newton JA, Wells M & Dupont S (2022) Unifying biological field observations to detect and compare ocean acidification impacts across marine species and ecosystems: What to monitor and why. ***EGUsphere***. 19: 101-119.