



# Övergödningen av Östersjön – en bakgrundsrapport

RAPPORT 2/2020

Östersjöcentrum

  
Stockholms  
universitet

# Innehåll

- 3 Sammanfattning
- 4 Kort om Östersjön
- 6 Historisk utveckling och nuvarande tillstånd
- 11 Östersjöns framtida utveckling
- 16 Effekter av klimatförändringar
- 19 Några slutsatser
- 21 Litteraturhänvisningar
- 22 Referenser



Stockholms  
universitet

**SMHI**

Denna rapport är en samproduktion mellan SMHI och Stockholms universitet. Den bygger på analyser av olika Östersjö-modeller, och särskilt studien *Baltic Sea ecosystem response to various nutrient load scenarios in present and future climates* (2018). Analyserna gjordes inom BONUS-projektet BalticApp, av forskare vid SMHI och Stockholms universitets Östersjöcentrum.

**Författare:** Bo Gustafsson, Baltic Nest Institute, Östersjöcentrum, Stockholms universitet  
Lars Arneborg, SMHI

**Kontakt:** Bo Gustafsson, bo.gustafsson@su.se

**Layout:** Maria Lewander, Stockholms universitets Östersjöcentrum

**Omslagsfoto:** Robert Kautsky/Azote

**Design:** Blomquist & Co

*Citera denna rapport:* Arneborg, L. & Gustafsson B. (2020). *Övergödningen i Östersjön – en bakgrundsrapport*. Nr 2/2020. Stockholms universitets Östersjöcentrum och SMHI.



# Sammanfattning

Den här rapporten är skriven med syftet att ge en relativt heltäckande översikt över övergödningsproblematiken i Östersjön. Allt från den historiska utvecklingen till dagens situation, men framförallt om kunskapsläget inför framtiden.

Övergödningen av Östersjön har drivits av ett århundrade av stor tillförsel av kväve och fosfor, orsakat av människans aktiviteter. De främsta orsakerna till den ökande tillförseln av näringsämnen var ökade avloppsmängder från växande städer, kraftigt ökad användning av konstgödsel i samband med mekanisering av jordbruket, intensifierad djurhållning samt ökade utsläpp till atmosfären av kväveföreningar. Under många år har man nu arbetat för att minska läckaget av näringsämnen till miljön. Insatserna har gett resultat och tillförseln har minskat kontinuerligt sedan mitten på 1980-talet, dock med stora regionala skillnader.

Men Östersjöns miljötillstånd har blivit radikalt sämre sedan de första observationerna om tillståndet gjordes kring förra sekelskiftet. Områden med syrefattiga och syrefria bottenar breddade snabbt ut sig redan efter andra världskriget. Den snabba ökningen av koncentrationerna av näringsämnen i vattnet skedde senare, under 1970-talet. I Östersjöns öppna centrala delar syns idag tyvärr få tecken på förbättring. Utbredningen av syrefria bottenar är fortsatt väldigt stor och blomningar av cyanobakterier vanliga. Men i vissa havsområden är situationen betydligt hoppfullare, till exempel längs danska kusten, i Kattegatt och Stockholms innerskärgård.

En förklaring till att Östersjöns tillstånd inte förbättras, trots minskad tillförsel av näring från land, verkar vara att stora mängder närsalter, framförallt fosfor, ansamlats genom åren i vatten och sediment. Modeller pekar på att det tar cirka 50 år för Östersjöns fosforcykler att anpassa sig till en förändrad tillförsel. Havets kvävehalter anpassar sig mycket snabbare till förändringar eftersom kvävet kan regleras när cyanobakterier fixerar kvävgas från luften, kvävgas som också kan avges åter till luften genom så kallad denitrifikation. I dagsläget verkar det som att tillförseln av näring till Östersjön är mindre än vad Östersjön kan göra sig av med så överskottet av fosfor bör minska i framtiden.

Exakt hur miljötillståndet i Östersjön kommer att utvecklas i framtiden beror på en rad faktorer som är svåra att förutse. Det är flera komplicerade samband mellan hur kväve och fosfor styr algproduktion, hur algproduktionen bidrar till syrebrist och hur syrebrist påverkar kretsloppet av näringsämnen. Dessutom sker stora variationer i Östersjöns cirkulation och skiktning på grund av skillnader i väder mellan åren som gör det svårt att identifiera trender från observationer och påverka till exempel utbredningen av syrebrist under många år.

De långsamma processerna kommer också att påverkas av klimatförändringarna. Klimatmodellerna visar att temperaturen kommer att öka med 2–3 °C till år 2100 jämfört med slutet av 1900-talet. Temperaturökningen kommer snabba på många biokemiska processer, såsom nedbrytning av organiskt material, en process som kräver syre och kan leda till snabbare syrebrist. Vidare finns det en tendens till att salthalten kommer att minska på grund av mer avrinning av vatten från land på grund av förväntat ökad nederbörd, men här är resultaten mycket osäkra. En ökad avrinning bör också leda till större tillförsel av näringsämnen via vattendragen. Resultaten från modelleringarna visar dock tydligt att åtgärder för att minska tillförseln av kväve och fosfor kommer att ge en positiv utveckling av Östersjöns vattenkvalitet även i ett förändrat klimat.

## Kort om Östersjön

Östersjön har formen av en fjordbassäng, med ett stort mynningsområde innehållande grunda trösklar i Öresund och bälten. Dessa trösklar begränsar vattenflödena och utbytet mellan salt och sötare vatten – vilket i sin tur har en avgörande betydelse för Östersjöns ekosystem.

Östersjön mottar färskvatten från avrinningsområden på land som är ungefär fyra gånger större än Östersjöns yta. Bottentopografin och färskvattentillförseln ger Östersjön sin karakteristiska saltfördelning, med bräckt vatten innanför de grunda trösklarna och mer marina förhållanden och betydligt saltare vatten i Västerhavet.

Utanför trösklarna inkluderar Östersjön även Kattegatt, där endast måttliga mängder havsvatten med hög salthalt blandas med det sötare vatten som strömmar ut genom sundet och bälten.

Österut, innanför trösklarna, består Östersjöns vatten i genomsnitt av en del vatten från Nordsjön och tre delar färskvatten från avrinningsområdet. I förhållande till Östersjöns storlek är varken avrinningsområdet eller färskvattentillförseln är extremt stora jämfört med andra kusthav, men i kombination med det begränsade vattenutbytet med Nordsjön blir uppehållstiden för vatten i Östersjön väldigt lång. Det tar ungefär 30 år för allt vatten i Östersjön att bytas ut.

Hela Östersjön har en stark skiktning mellan salt och sött vatten, och långa uppehållstider i djupvattnet därunder. Det beror dels på topografin och färskvattentillförseln (figur 1), dels på avsaknaden av tidvatten som energikälla för omblandning, vilket medför att vattenpelaren blandas långsammare. Djupvattnet fylls på med tungt och salt vatten från Västerhavet och det inflödande vattnet tränger lättare gammalt djupvatten trängs uppåt i vattenkolumnen. Detta gör att skiktningen förstärks. Det pågår ständigt en blandningsprocesser i vattenkolumnen som strävar efter att minska skillnaderna mellan djup och ytvatten. Eftersom relativt lite vatten med hög salthalt blandas med det sötare vattnet i Västerhavet (Kattegatt) varierar salthalterna dessutom kraftigt i inflödena till Egentliga Östersjön.

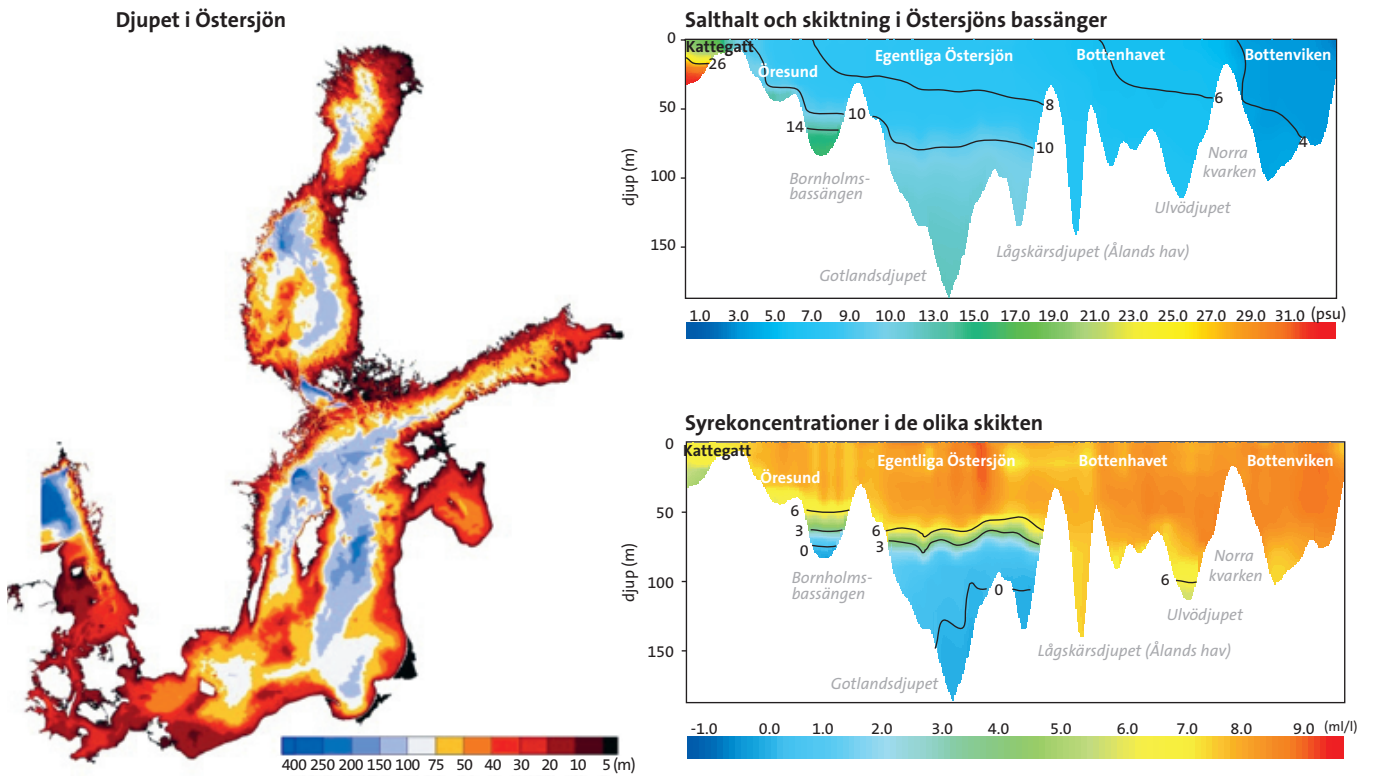
Betydande mängder av de näringsämnen (främst kväve och fosfor) som finns eller tillförs på land i avrinningsområdena, till exempel via jordbruket, förs ut i havet via åar, floder och vattendrag. Den långa uppehållstiden gör att en mycket stor andel av näringsämnena som tillförs Östersjön från land omsätts och måste finna sina sänkor inom Östersjön, ungefär som i en sjö. De allra flesta sänkor för näringsämnen kräver att näringen först övergår i partikulär organisk form, alltså tas upp i växtplankton, innan det förs vidare till havsbotten. När det organiska materialet sedan bryts ner vid botten förbrukas syre. I Östersjön leder detta till utbredd syrebrist.

Under vissa omständigheter förekommer syrebrist även utan mänsklig påverkan. Sedan Östersjön övergick från sjö till innanhav för 8 000 – 9 000 år sedan har syreförhållandena växlat mellan goda och dåliga i djupvattnet. Perioderna med omfattande syrebrist inträffade för 4 000 – 7 000 år sedan respektive för 700 – 1 700 år sedan. Under dessa perioder var syrebristen dock inte kontinuerlig, utan avbröts med återkommande intervaller om något eller några tiotals år. Det tycks dessutom inte ha funnits någon period i historien med lika syremässigt dåliga djupvattenförhållanden som de vi ser i Östersjön i dag.

*Östersjön är ett instängt havsområde, nästan helt omgivet av land..*







**Figur 1.** Till vänster visas en djupkarta över Östersjön. De två graferna till höger visar tvärsnitt från Kattegatt till Bottenviken av salthalt (mitten, g/kg (psu)) och syregaskoncentration (ml/l). Salthalten ökar med djupet och skapar en stabil skiktning i hela Östersjön. Salthalten minskar kraftigt i Kattegatt och Bälten, och sedan mer gradvis norrut. Syrebrist förekommer permanent i de djupare delarna av Egentliga Östersjön.

Stora delar av de näringsämnen som finns eller tillförs på land i avrinningsområdena, till exempel inom jordbruket, förs ut i havet via åar, floder och vattendrag.



# Historisk utveckling och nuvarande tillstånd

## Orsaker till storskalig övergödning

Tillförseln av näringsämnen till Östersjön via floder och punktkällor vid kusten ökade kraftigt under framför allt andra hälften av 1900-talet och nådde sin kulmen runt 1980 (se Figur 2). Ökningen har ett flertal orsaker:

- **Urbaniseringen**, som tillsammans med ökad användning av vattentoaletter kraftigt bidrog till framför allt fosfortillförseln
- **Användningen av konstgödsel** ökade drastiskt i samband med mekaniseringen av jordbruket efter andra världskriget
- **Djurhållningen intensifierades**, vilket också medförde att stallgödsel i större utsträckning började behandlas som avfall istället för som resurs.
- **Ökande utsläpp av kväveföreningar till atmosfären** på grund av ökad förbränning, både för energiproduktion och transporter, och intensifierad djurhållning.

Sverige är i dag ett föregångsland i Östersjöregionen när det gäller till exempel avloppsrening. Man ska dock komma ihåg att den svenska trenden av ökade utsläpp av fosfor bröts först 1970. Och för kväve bröts trenden inte förrän i mitten av 1980-talet.

I de östeuropeiska länderna runt Östersjön började liknande trendbrott inte synas ordentligt förrän under 2000-talet, och implementeringen av effektiv avloppsrening pågår fortfarande. Exempel på stora utbyggnader på senare år är Warsawa 2012-2013, St Petersburg 2011 och Kaliningrad 2015. Tillsammans har bara dessa tre anläggningar uppskattningsvis minskat fosforbelastningen på Östersjön med grovt räknat 2 000 ton/år.

*Övergödningen av Östersjön har många orsaker i historisk och modern tid. Flera faktorer som ökad urbanisering och introduktionen av vattentoaletter, användning av konstgödsel, intensiv djurhållning och mer trafik har tillsammans bidragit till dagens situation.*



Foto: Carina Andreasson/Mosphoto



Foto: Annika E. Persson/Mosphoto





Foto: NASA/Visible Earth/Aqua modis

Under 1800-talet var blomningar av cyanobakterier ovanliga, och den totala mängden plankton var ungefär hälften av vad den är i dag.

Användningen av konstgödsel kulminerade under 1980-talet. Som mest spreds nära 1,3 miljoner ton fosfor per år ut på odlad mark i avrinningsområdet. I samband med kommunismens kollaps i östeuropa minskade gödselspridningen radikalt. Under ungefär samma tid infördes regleringar i jordbruket i väst, som också minskade användningen av konstgödsel inom jordbruket. I dag sprids ungefär 0,4 miljoner ton fosfor per år.

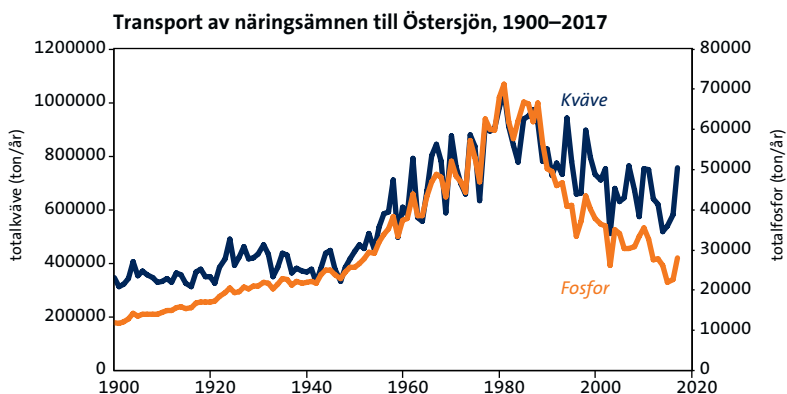
En positiv bieffekt av att använda mindre konstgödsel är att stallgödsel används på ett mer förnuftigt sätt än tidigare. Effekten på belastningen från minskad gödselanvändning varierar förstås rumsligt, men sett över hela avrinningsområdet sker en gradvis minskning av fosforbelastningen på grund av den minskade användningen av konstgödsel. I länder med mycket och intensivt jordbruk, såsom Danmark, har belastningen minskat kraftigt på grund av effektiva åtgärder, så som strikta och bindande regler för hantering, lagring och spridning av gödsel, samt införande av vintertäckande fänggrödor. I Danmark arbetar man framförallt med bindande regelverk, medan många andra länder arbetar mer utifrån frivillighet. Minskad belastning som resultat av åtgärder är svårare att detektera i områden med mindre andel jordbruksmark och/eller mindre intensivt jordbruk på grund av att förändringen blir liten jämfört med den naturliga variationen driven av framförallt vädret så som torra och blöta år, varma och kalla år, snövintrar eller barmark osv.

Medan fosfor så gott som uteslutande når Östersjön via vattenburna källor sprids en ansevärd mängd av det kväve som når Östersjön via luften, bland annat genom avgaser från förbränningsprocesser. Tillförseln av kväve via atmosfäriskt nedfall har minskat kraftigt under senare år (ca 30% mellan 1995 och 2017) på grund av minskade utsläpp från framförallt trafik, förbränning i el- och värmeproduktion och jordbruk.

Sammantaget har tillförseln till Östersjön av både kväve och fosfor minskat sedan 1980-talet (se Figur 2). Data för senare år visar dock att totalt för Östersjön har minskningen av kvävetillförseln avstannat sedan 2012, medan fosforbelastningen fortfarande minskar. Enligt HELCOMs kommande utvärdering överstiger tillförseln utsläppstaken i HELCOM BSAP<sup>1</sup> till Egentliga Östersjön (med ca 30% för kväve och 100% för fosfor), Finska viken (med ca 10% för kväve och 50% för fosfor) och



Foto: Roland Magnusson/Mostphotos



**Figur 2.** Tillförsel av kväve och fosfor från alla vattendrag och punktkällor runt Östersjön från år 1900 till och med 2017. Källa: [helcom.fi/baltic-sea-trends/environment-fact-sheets/eutrophication/waterborne-nitrogen-and-phosphorus-inputs/](https://helcom.fi/baltic-sea-trends/environment-fact-sheets/eutrophication/waterborne-nitrogen-and-phosphorus-inputs/)

1. HELCOM Baltic Sea Action Plan fastlägger så kallade "Maximum Allowable Inputs" (MAI) som är de utsläppsnivåer av näringsämnen som leder till att god status uppnås med avseende på övergödning. I denna skrift har MAI översatts till "utsläppstak".

Rigabukten (med ca 10% för kväve och 30% för fosfor) medan tillförseln till övriga bassänger är under utsläppstaket.

Under de senaste dryga 20 åren har belastningen från Sverige också minskat (Figur 3) om än i mindre omfattning. Utvecklingen är tydligast för kvävebelastningen (Figur 3A och 3C). Det är dock en oroande kraftig ökning i kvävebelastningen från Sverige till Egentliga Östersjön på senare år. Vid en närmare granskning visar det sig att ökningen framförallt kommer från de avrinningsområden som inte övervakas med mätningar utan belastningen uppskattas. Kvävebelastningen till Västerhavet verkar stabiliserats på senare år och den nedåtgående trenden har brutits. Fosforbelastningen varierar betydligt mer mellan år så utvärderingen av trender blir mer osäker. Under 2020 kommer en ny utvärdering från HELCOM av ländernas belastning i relation till BSAP, och då görs också en rigorös statistisk analys av trenderna.

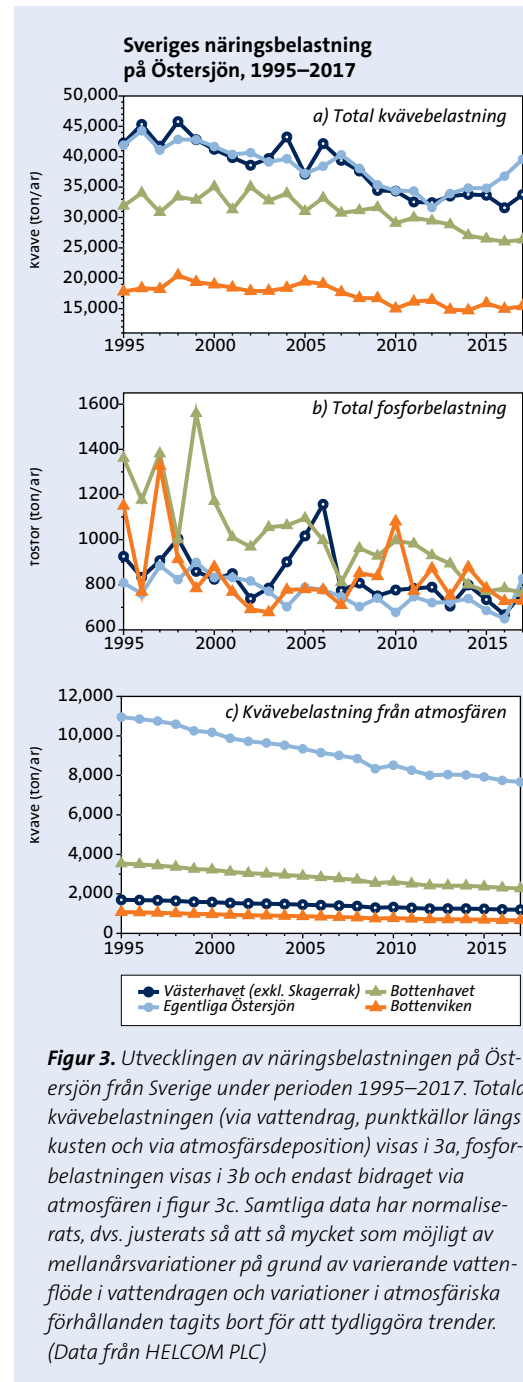
### Utvecklingen av tillståndet i Östersjön

De första kvantitativa observationerna av tillståndet i Östersjön är från slutet av 1800-talet. Redan då noteras signifikant mänsklig påverkan på ekosystemet – framförallt på högre nivåer i näringskedjan, till följd av fiske och jakt. De tidigaste mätningarna visar dock att siktdjupet var markant större över hela Östersjön jämfört med i dag, och även syrgasförhållandena var betydligt bättre. Blomningar av cyanobakterier var ovanliga, och den totala mängden plankton var ungefär hälften av vad den är i dag.

Försämringen av Östersjöns tillstånd på grund av övergödningen verkar ha skett i flera steg. Första steget skedde när utbredningen av syrefattiga bottenar ökade och siktdjupet minskade efter 2:a världskrigets slut, vilket ses i Figur 4 som en ökning av ER.<sup>2</sup> Redan i början av 1970-talet var utbredningen av syrefattiga bottenar nära nuvarande nivåer (Figur 5). Det var först under 1970-talet som det andra steget började i form av snabbt ökande näringsämneskoncentrationer i de stora Östersjöbassängerna, vilket ledde till drastiskt ökande primärproduktion av alger och andra vattenlevande växter. Den ökande primärproduktionen ledde till ökad sedimentation av organiskt material på havsbotten. Sedimentprov från de djupare delarna av Östersjön visar att syrebristen på dessa bottenar var total vid 1980-talets början, och att nedbrytningen av organiskt material då helt hade övergått till att ske genom så kallad sulfatreduktion<sup>3</sup> med svavelväte som resultat. Även på grundare bottenar, där syrekoncentrationerna i vattnet normalt är hög på grund av närmare kontakt med atmosfären, minskade syrekoncentrationerna drastiskt i sedimenten på grund av den ökande nedbrytningen av organiskt material.

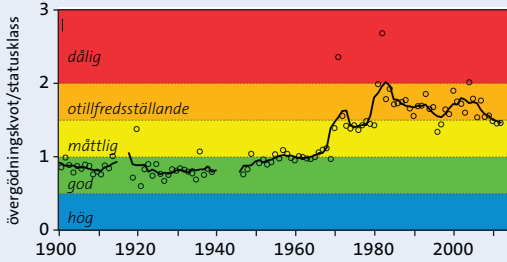
2. Eutrophication ratio (ER) är ett integrerat mått på miljöstatus i öppna Östersjön med avseende på övergödning. Ett ER < 1 innebär att tillståndet är opåverkat av övergödning och ER > 1 att tillståndet påverkat av övergödning. Detta mått används i HELCOMs uppföljningar av övergödningens status (HELCOM Eutrophication Assessment Tool, HEAT) och det innebär att man jämför ett viktat medelvärde indikatorerna koncentrationer av näringsämnen, halter av klorofyll, siktdjup, syrebrist och bentisk fauna med deras målvärde (s.k. target eller threshold value). Måttet följer i mångt och mycket status klassificering för övergödning inom vattendirektivet.

3. När organiskt material skall brytas ner behövs syre för att omvandla kolet i materialet till koldioxid. När syrgas inte är tillgängligt så kan bakterier använda spjälka upp molekyler som innehåller syre och använda det syret istället. I marin miljö är det framförallt löst sulfat (SO<sub>4</sub>), löst nitrat (NO<sub>3</sub>), järnoxid (Fe(OH)<sub>3</sub>) samt manganoxid (MnO<sub>2</sub>) som finns tillgängliga och kan spjälkas. Vid spjälkningen blir det restprodukter (svavelväte (H<sub>2</sub>S), ammonium (NH<sub>4</sub>), löst järn (Fe) och löst mangan (Mn)) som effektivt tar upp syre igen (oxiderar) när de kommer i kontakt med syre. I marin miljö finns det mycket löst sulfat och därför kan stora mängder svavelväte bildas. När molekylerna med tillgängligt syre tar slut bryts organiskt material ner genom jäsnings och metan bildas istället för koldioxid.



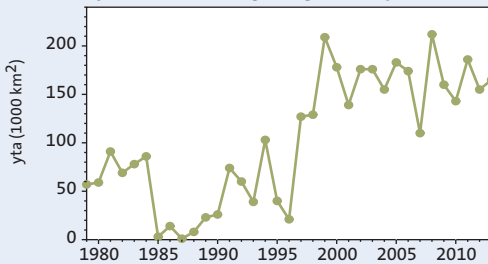


### Tillståndet för övergödningen i Östersjön, 1900–2012



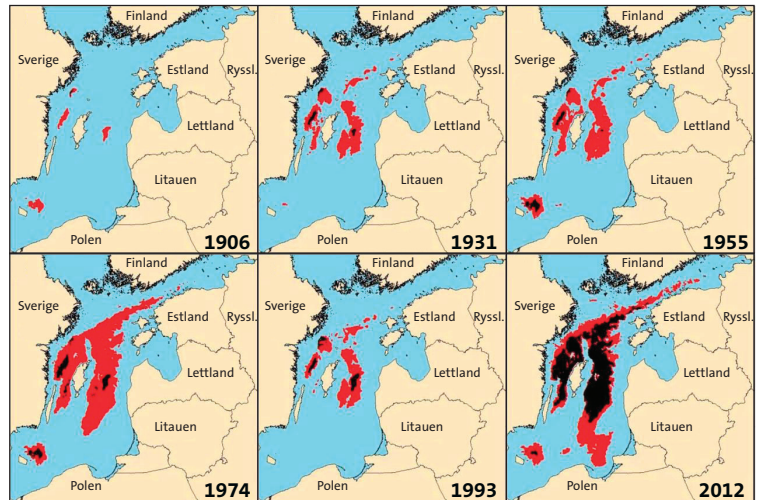
**Figur 4.** Övergödningens utveckling från 1900 till 2012. Färgerna visar statusklasserna enligt Vattendirektivet. Indexet ER är ett sammantaget mått på tillståndet i förhållande till vad som definierats som god miljöstatus av HELCOM. Källa: Andersen et al, 2017.

### Cyanobakterier i Egentliga Östersjön



**Figur 6.** Utbredning av cyanobakterier i Egentliga Östersjön bestämd från satellitmätningar. Kurvan visar i hur stor del av Östersjön där någon gång under säsongen signifikanta nivåer av cyanobakterier detekterats. (Efter Kahru och Elmgren, 2014)

### Utbredningen av syrefria botten Egntliga Östersjön, 1906–2012



**Figur 5.** Långtidsutvecklingen av syrefria botten i Östersjön. Röda ytor visar botten med syrefria och svarta helt syrefria. (Från Carstensen et al, 2014)

Från slutet av 1970-talet till 1993 var det en lång period utan några stora saltvatteninbrott till Östersjön. Detta fick som konsekvens att salt-halterna i djupvattnet gradvis minskade och haloklinen fördjupades på grund av vertikal omblandning. Med den fördjupade haloklinen minskade utbredningen av syrefattiga botten trots att halterna av svavelväte ökade till aldrig tidigare noterade nivåer i de allra djupaste djuphålorna (Figur 5).

Under 1990-talet kom sedan flera större saltvatteninbrott då stora mängder syrerikt saltvatten från Västerhavet trängde in i Östersjön och fyllde på mängden djupvatten. När skiktningen mellan salt och sötare vatten stabiliserades inleddes det tillstånd vi fortfarande ser i dag, med mycket stora ytor med syrefria botten och höga halter av svavelväte högt upp i vattenkolumnen. Detta medförde en drastisk ökning av cyanobakterier under slutet av 1990-talet (se Figur 6) och var en starkt bidragande faktor till dagens mycket stora obalans mellan kväve och fosforhalter i vattenkolumnen.

Sedimenten i de djupaste delarna av Egentliga Östersjön innehåller nu så mycket organiskt material och svavelväte att de saltvatteninbrott som har skett under 2010-talet endast har syresatt vattnet kortvarigt. Det ”nya” syre som kommit med inbrotten har snabbt förbrukats av nedbrytningsprocesserna vid botten. Sedimenten verkar därför inte ha påverkas nämnvärt av dessa stora men sporadiska syretillskott.

Trots att situationen i Egentliga Östersjön är väldigt dystert och låst ses ändå tendenser till en förbättring av den sammantagna statusen för Östersjön (se Figur 4). Detta beror på att det faktiska tillståndet blir gradvis bättre i vissa områden. Kattgatt är idag relativt nära att uppnå god status och situationen i Bälthavet har förbättrats signifikant. Det finns också tendenser till förbättrade förhållanden i södra Östersjön.

### Åtgärder ger effekt

Det finns i dag många exempel på områden i Östersjön där statusen signifikant förbättrats på grund av minskad tillförsel av näringsämnen. Tydligast är det förstås i de områden där belastningen varit mycket stor. Nyligen gjordes en noggrann genomlysning av hur danska kustområden påverkats av de kraftiga minskningar av kväve- och fosfortillförseln

(från lantbruk och punktkällor) som genomförts från mitten av 1980-talet och framåt. Studien visar att den direkta responsen i minskande närsaltkoncentrationer är tydlig. Dock motverkas den i viss mån av att näringsämnen finns lagrade i sedimenten, samt av inströmning av vatten med höga närsaltkoncentrationer från utsjön.

Statusen i kustområdena förbättrades också med avseende på andra parametrar, men tolkningen komplicerades av en samtidig minskning av omblandning i vattenkolumnen på grund av minskande vindar från 1990 och framåt, vilket ökade risken för syrebrist. Vidare kan man konstatera att erfarenheterna visar att återhämtning av mer komplexa habitat med vegetation och djur kan vara långsamma och beroende på komplexa samband.

Ett annat område med tydliga förbättringar är Stockholms innerskärgård, som tidigare mottog stora mängder dåligt renat avloppsvatten. Här skedde en relativt snabb förbättring när avloppsreningen blev effektiv. Längre ut i Stockholms skärgård är tillståndet fortsatt kraftigt påverkat av tillståndet i öppna Östersjön.

Som tidigare nämnts är tillståndet i Kattegatt också betydligt bättre idag än vad det var på 1980–90-talen, vilket sannolikt kan kopplas till kraftigt minskad av näringsbelastning från Danmark och Sverige. Till en viss del kan också de väsentligt förbättrade förhållandena i sydöstra Nordsjön ha betydelse. Under 1990-talet förekom episoder då vatten med extremt höga närsaltkoncentrationer transporterades från tyska bukten till Kattegatts djupvatten.

*Åtgärder inom jordbruket har haft effekt, men fortfarande finns mycket att göra för att minska kväve- och fosforbelastningen från odlingsmarker och djurhållning.*



Foto: Rico Kädder/Westphoto

*Stockholms innerskärgård mottog stora mängder dåligt renat avloppsvatten, men här förbättrades vattenkvaliteten snabbt när avloppsreningen blev effektiv.*



Foto: SVAVAB



# Östersjöns framtida utveckling

Som beskrivs ovan finns det tecken till förbättringar på många håll i Östersjön. Men för merparten av öppna Östersjön är övergödningssituationen fortsatt mycket dålig, vilket också hämmar graden av förbättringar längs stora delar av kusten. Att så fortfarande är fallet, trots att omfattande åtgärder gjorts för att minska näringstillförseln, skapar förstas mycket frustration och rastlöshet hos såväl politiker som allmänhet. I det här avsnittet skall vi försöka sammanfatta varför situationen är som den är och hur vi tror att Östersjöns övergödningssituation kan utvecklas framöver, med fokus på öppna Östersjön. Diskussionen begränsas i huvudsak till biogeokemiska kretslopp eftersom kunskapen om framtiden för ekosystemet i vidare bemärkelse är än svårare att förstå.

## Respons på belastningsförändringar och fördröjningar i respons

Det har utvecklats ett flertal avancerade mekanistiska modeller av Östersjöns cirkulation och biogeokemiska kretslopp, och ett antal av dessa har simulerat övergödningens historia sedan 1800-talet och fram till idag.

En central aspekt av övergödningens utveckling i Östersjön över tid är hur näringsämnen (framförallt fosfor) successivt ackumuleras i vattenkolumn och i botten sediment. I grunden handlar det om skillnaden mellan hur mycket fosfor som tillförs och hur mycket som tas bort.

### Det finns bara tre sätt för Östersjön att bli av med fosfor:

- 1) genom att fosfor transporteras med vattenutflödet till Nordsjön
- 2) genom att fosfor begravs tillräckligt djupt i sedimenten
- 3) genom att fosfor som är bundet i organiskt material (till exempel alger och fisk) tas upp ur havet.

Fosforkoncentrationen i vattnet blir konstant först när summan av nettouttaget och begravnings i sedimenten är lika stor som tillförseln från land.

Detta kan uttryckas som att mängden fosfor som förs via utflödet till Nordsjön är proportionellt mot koncentrationen av fosfor i vattnet, samt att mängden fosfor som begravs djupt ned i sedimenten är proportionell mot koncentrationen av fosfor i sedimenten. Detta gör att fosfor reagerar långsamt och tillförd fosfor förblir i omsättning i Östersjön i genomsnitt i ungefär 50 år. Enligt en av de vetenskapliga modellerna (BALTSEM) finns ungefär hälften av all mänskligt tillförd fosfor fortfarande kvar i Östersjöns kretslopp.

Kväve har helt annat kretslopp, med kontinuerliga omvandlingar från nitrat och ammonium till kvävgas, och vice versa via den fixering av kvävgas som cyanobakterier står för. Detta innebär att kväve har en mycket kortare uppehållstid (några få år) än fosfor.

Dagens tillstånd i Östersjön är alltså inte enbart beroende på de utsläpp vi gör i dag utan också av summan av de utsläpp som gjorts under de senaste 50 åren.

Modellerna visar också att det inträdde en ungefärlig balans mellan tillförsel och "borttagande" av fosfor ungefär vid år 2000. De minskningar i tillförseln som har skett efter det bör därmed successivt leda till lägre fosforkoncentrationer.

*Dagens tillstånd i Östersjön är summan av de utsläpp som gjorts under de senaste 50 åren.*



I Figur 7 visas modellerad förväntad utveckling av forfor (egentligen den oorganiska delen fosfat) i Egentliga Östersjöns ytskikt med två olika näringsbelastningar: 1) medelbelastningen 2012-2014, och 2) belastning med utsläppstaket angivet i Baltic Sea Action Plan (BSAP).

Simuleringen startar med dagens situation, och belastningen hålls konstant till de givna värdena för vardera scenario. Modellen uppskattar också den naturliga variationen med olika väder (visas med staplarna) för att ge en indikation på hur lång tid det tar att observera en förändring. Simuleringarna har gjorts med BALTSEM, som också användes för att bestämma utsläppstaket i BSAP. Därför är det inte förvånande att målnivån för fosfor precis nås.

Modellen visar att även med dagens belastning minskar koncentrationerna på sikt. Och i grova drag ser det ut som att vi kan förvänta oss en viss förbättring redan inom 20-år, även om dagens näringstillfösel kvarstår på samma nivåer.

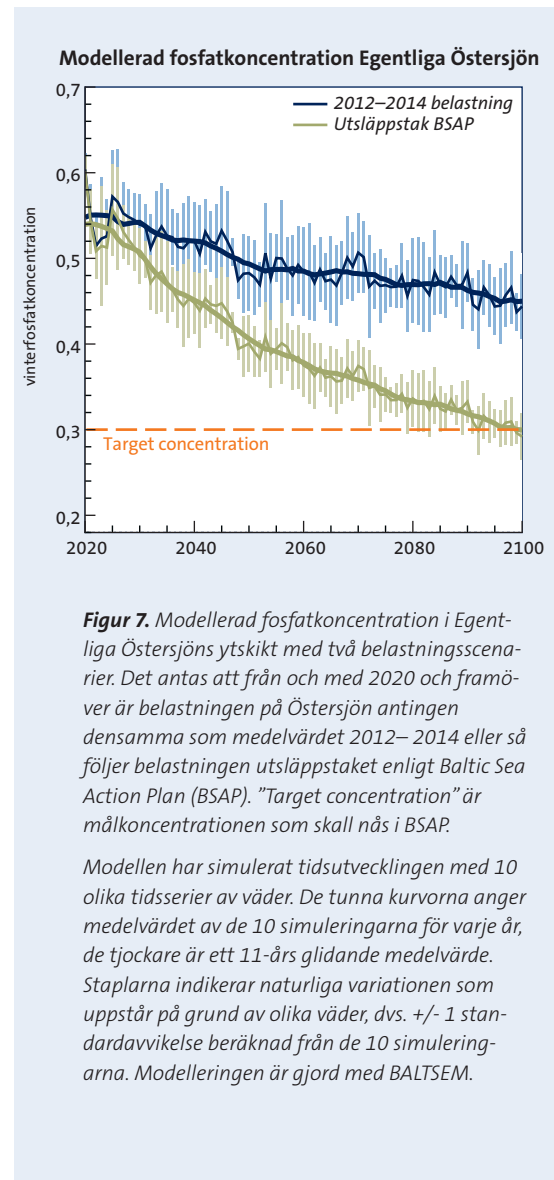
Senaste utvärderingen från HELCOM visar att näringsbelastningen på Egentliga Östersjön och Finska viken har fortsatt att gå ner efter 2014. Om det bibehålls kan man alltså förvänta sig ännu något lägre koncentrationer. Vi skall dock betrakta dessa tidskalor med viss skepsis.

## Betydelsen av syrebrist för fosforcyklerna

Ytan av syrefria bottenar har under senare tid varit större än någonsin. Dessutom, vilket diskuteras ovan, är mängden svavelväte i djupvattnet och i sedimenten mycket stora, liksom halten av organiskt material i sedimenten. Detta betyder att även om tillförseln av nytt organiskt material skulle minska på grund av mindre produktion kommer det ta lång tid att minska mängden organiskt material i sedimenten, som i dag producerar svavelväte. Det ”nya” syre som transporterats in i Östersjön vid de senaste årens stora inbrott av salt och syrerikt vatten verkar ha konsumerats mycket fort, troligtvis genom oxidation av svavelväte. Det är ännu något oklart hur bra Östersjömodellerna beskriver denna upplagring av organiskt kol och processerna kring svavelväte i sedimenten. Det finns en risk att modellerna underskattar tiden det kommer att ta för djupvattnets syrenivåer att återhämta sig. Risken är alltså att när produktionen börjar gå ner på grund av lägre fosforhalter, blir det ytterligare en tidsfördröjning innan syreförhållandena i djupvattnet återhämtar sig. Denna effekt har kunnat observeras i praktiken i den lilla Björnöfjärden. Efter en omfattande aluminiumbehandling minskade både fosfor-koncentrationerna och produktionen kraftigt, men syrgasnivåerna förblev låga på grund av fortsatt stor nedbrytning av organiskt kol i sedimenten.

Sambandet mellan syrebrist och fosfor är mycket omdiskuterat. För bara 10 år sedan var kunskapen om processerna som styr fosforomsättningen i Östersjöns sediment relativt okända. Men efter ett flertal projekt med fältundersökningar och modellering börjar bilden klarna, även om all kunskap från studier av enskilda platser och tidpunkter ännu inte har skalats upp.

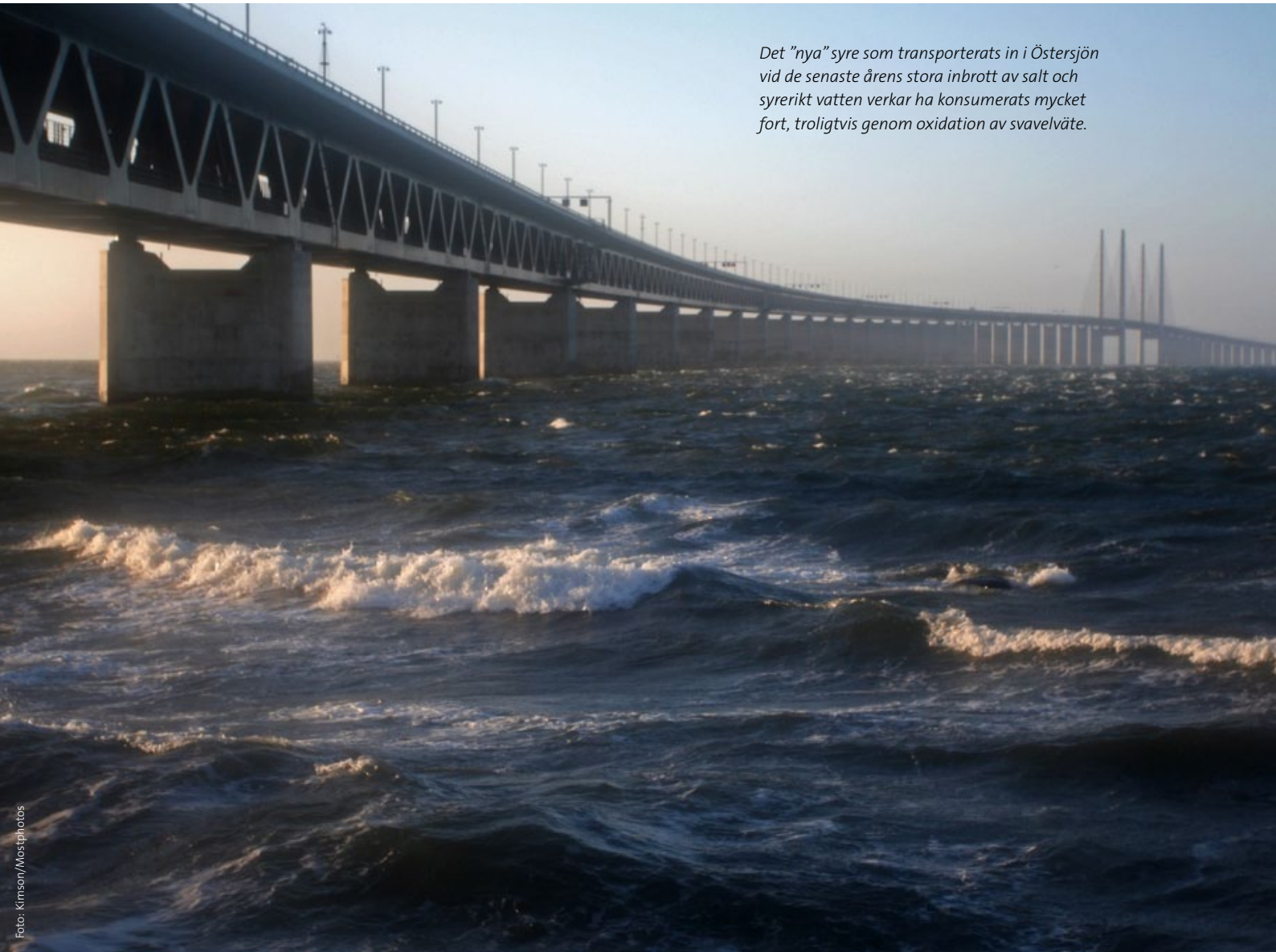
Enkelt uttryckt kan man konstatera att i alla sediment i Östersjön, förutom eventuellt i Bottenviken, förbrukas allt syre i det översta tunna ytlagret av sedimenten. Därunder bryter andra oxidanter ner organiskt material (se fotnot 4). Först förbrukas järnoxider och manganoxider, och därunder sulfat som reduceras till svavelväte. Ännu djupare ner i sedimenten tar även sulfatet slut och resterande mängd organiskt material bryts där ner genom jäsnings, som producerar metan som restprodukt.



**Figur 7.** Modellerad fosfatkoncentration i Egentliga Östersjöns ytskikt med två belastningsscenarioer. Det antas att från och med 2020 och framöver är belastningen på Östersjön antingen densamma som medelvärdet 2012–2014 eller så följer belastningen utsläppstaket enligt Baltic Sea Action Plan (BSAP). ”Target concentration” är målkonzentrationen som skall nås i BSAP.

Modellen har simulerat tidsutvecklingen med 10 olika tidsserier av väder. De tunna kurvorna anger medelvärdet av de 10 simuleringarna för varje år, de tjockare är ett 11-års glidande medelvärde. Staplarna indikerar naturliga variationen som uppstår på grund av olika väder, dvs. +/- 1 standardavvikelse beräknad från de 10 simuleringarna. Modelleringen är gjord med BALTSEM.





*Det "nya" syre som transporterats in i Östersjön vid de senaste årens stora inbrott av salt och syrerikt vatten verkar ha konsumerats mycket fort, troligtvis genom oxidation av svavelväte.*

I Östersjöns sediment förekommer fosfor framförallt som en del av det organiska materialet eller som bundet till metalloxiderna järnoxid och manganoxid.

Metalloxiderna förbrukas till stor del när syret tar slut och då frigörs också fosfor i form av fosfat till porvattnet<sup>4</sup> i sedimenten. Det är endast under speciella omständigheter som vissa former av mineral som innehåller metaller och fosfat kan bildas som inte bryts ner i sedimenten utan kan stå för en begravning av fosfor. Alltså, så länge det finns ett skikt med goda syrgasförhållanden i sedimenten kan en viss mängd fosfor lagras i detta skikt bundet till metalloxider.

4. Sedimenten är mer eller mindre porösa och i mellanrummen mellan partiklarna så finns det vatten, s.k. porvattnet. Detta gör att ämnen kan finnas både i löst och partikulär form i sedimenten. På grund av att det ständigt tillförs nya partiklar, både i form av mineralpartiklar och organiskt material, begravs gradvis ämnen i partikulär form (om inte djur gräver upp dom), men om ämne löses upp eller bildas i porvattnet kommer molekylär diffusion i vattnet att sprida det lösta ämnet uppåt och/eller neråt. T.ex. löst fosfat som bildas vid nedbrytning av organiskt material eller frigörs från bindningen till metalloxider kan transporteras tillbaka till vattenkolumnen med hjälp av diffusion i porvattnet.

### Mängden metalloxidbunden fosfor som kan lagras i skiktet beror på två saker:

- **skiktets tjocklek**, som i sin tur beror på syrgaskoncentrationen i vattnet ovanför sedimenten och halten av organiskt material i sedimenten (syreförbrukningen)
- **tillförseln av metalloxider med sedimentationen**. Med ökad övergödning har sedimentationen av organiskt material ökat och därmed har mängden metalloxidbunden fosfor minskat över hela Östersjön. Helt syrefria bottenar är förstås helt tömda på denna form av fosfor. Empiriskt ser man att i perioder med mindre utbredning av syrefattiga bottenar kan en viss mängd av metalloxidbunden fosfor åter bindas i bottenarna.

Under åren med minimal utbredning av syrefattiga bottenar i början av 1990-talet räknar man med att ungefär 100 000 ton fosfor tillfälligt bands i metalloxid på grund av bättre syreförhållanden. Men man räknar också med att ungefär samma mängd fosfor frigjordes direkt när syreförhållandena blev sämre.

I dag, när det finns så mycket organiskt material i sedimenten och så stora mängder fosfor i övrigt, spelar metallbunden fosfor troligtvis en marginell roll, men det finns indikationer på att återkopplingen mellan reservoaren av metallbunden fosfor och syrebrist kan ha varit en viktig process för att förklara de perioder med hög produktivitet och syrebrist som förekommit tidigare i Östersjöns historia.

Den absolut största delen av fosforbegravningen i sediment sker med organiskt material. Det har visat sig att också denna process är beroende av om det finns ett syrerikt skikt överst i sedimenten eller inte. Om sedimenten är syrerika bryts kol och fosfor ner i ungefär samma takt. Men om nedbrytningen sker i syrefria sediment bryts fosfor ner snabbare än kol, vilket leder till att det organiska material som blir över innehåller en mindre andel fosfor.

Bakterierna som är aktiva i nedbrytningen är dock mindre effektiva i en syrefri miljö, vilket gör att det under ett givet tidsintervall då blir mer organiskt material över. Troligen innebär detta att mindre fosfor begravs per sedimenterat organiskt material, men det är inte ännu slutligen visat exakt hur fosforbegravningen varierar under olika förutsättningar.

I budgetberäkningar ser man tydligt att begravningen av fosfor i Egentliga Östersjön fungerar mindre effektivt än i t.ex. Bottenhavet. Därmed är det dock inte bevisat att begravnings effektiviteten skulle förbättras snabbt om man tillförde syre till djupvattnen.

Det finns sedan länge flera förslag på tekniska lösningar för att via exempelvis storskalig mekanisk pumpning tillföra syre (syresatt ytvatten) till Östersjöns djupvattnen. Genom att tillföra mer syre hoppas man att mer fosfor ska bindas till metalloxid i sedimenten och därmed ”neutraliseras” och inte längre bidra till övergödningseffekten.

Ett problem med att förutse följderna av sådana storskaliga experiment är att bottenarna dels har väldigt hög organisk halt och dels har varit utsatta för syrebrist så länge att det är svårt att göra jämförande studier.

I en modellstudie observerades dock att man genom att syresätta bottenvattnet också ökade nedbrytningen av det organiska materialet – och fosfor som frigjordes från detta bands till metalloxider i sedimentets ytskikt. På kort sikt överförde man alltså relativt stabilt organiskt fosfor i sedimenten till metallbunden fosfor, som direkt skulle frigöras till vattenkolumnen i samma stund som vattnet åter blev syrefritt. På längre

*Syrepumpning är en metod som förespråkats för att binda den fosfor som bidrar till övergödningen. Det finns dock stora risker med den typen av storskaliga experiment när man fortfarande inte känner till mekanismerna i detalj. Bilden visar en pumpanläggning som användes på försök i ett samarbetsprojektet Proppen mellan finska och svenska forskare 2011.*



Foto: Vesi-Eko Oy/Syke



sikt kommer förstås detta att hända även när vattenkolumnen blir syrerikare på naturligt sätt. Skillnaden är att då har mängderna fosfor i Östersjön minskat vilket gör att konsekvenserna förmodligen blir mindre påfallande. Detta är ett område där det behövs ytterligare modellutveckling för att förstå precis hur Östersjön kommer att återhämta sig.

### Stora och långsamma naturliga variationer

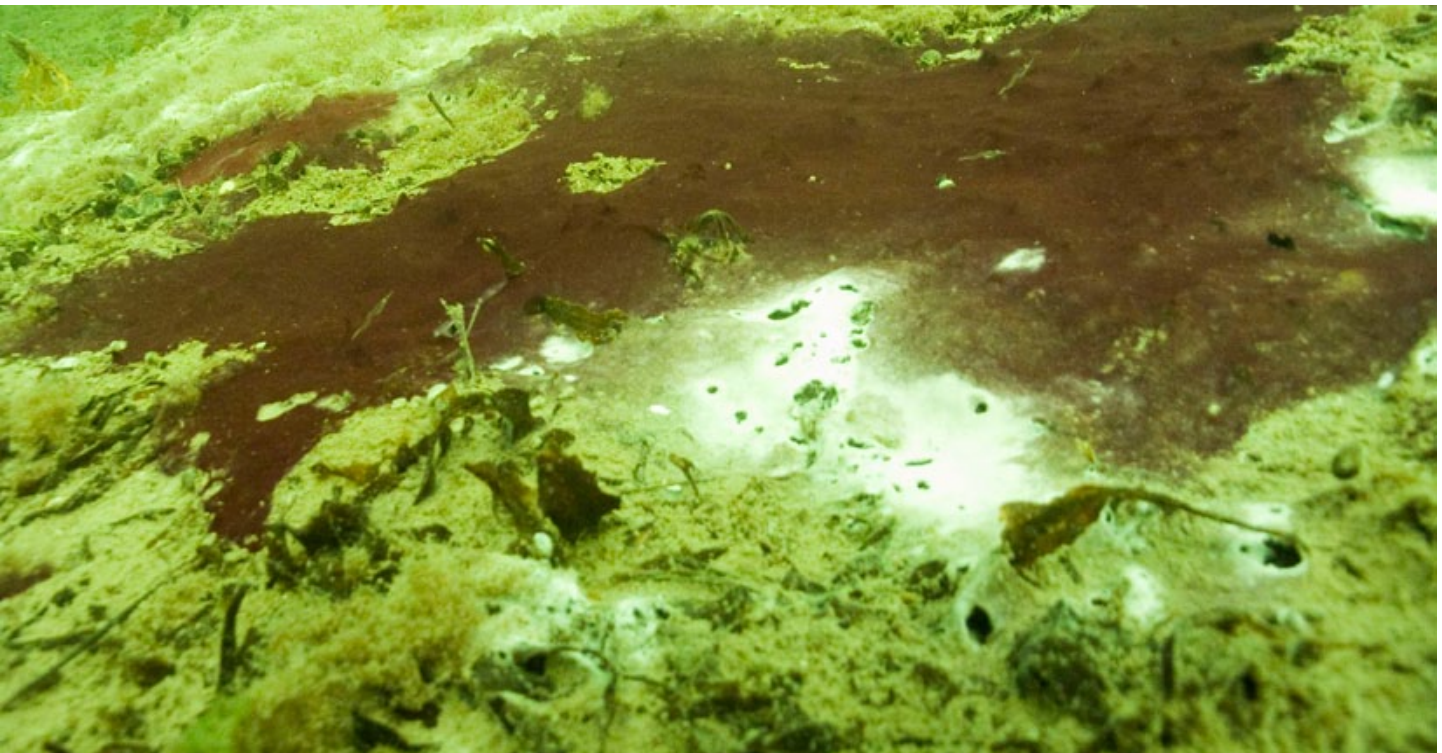
De vetenskapliga modeller som hjälper oss att försöka se Östersjöns ekosystem både bakåt och framåt i tiden moduleras genom variationer i väder och klimat. Östersjöns cirkulation är väl förstådd, och så länge vi känner vädret och färskvattentillförseln kan vi med stor exakthet reproducera salthalter, temperaturer, isutbredning med mera. Vi kan till och med beskriva de största saltvatteninbrotten som byter ut det djupaste djupvattnet utifrån enbart tidserier av väder.

Problemet är att tidskalorna i Östersjön är långa, vilket gör att en serie saltvatteninbrott eller ett antal exceptionellt våta år får konsekvenser som påverkar ekosystemet åratals därefter genom till exempel ökad eller minskad utbredning av syrefattiga bottenar eller förändringar i artsammansättning. Detta gör det väldigt svårt att göra en prognos för långsamma fenomen såsom övergödning på relativt korta tidskalor (tiotals år). Dessutom är det lika svårt att utvärdera trender i mätningar från Östersjön.

Man kan se detta illustrerat i modellsimuleringarna i Figur 7. Även i scenariot med belastning enligt utsläppstaket i BSAP skulle det knappast gå att uttyda en nedåtgående trend förrän flera år efter den tidpunkt då fosforkoncentrationen började minska.

Detta gör att modellverktyg är vår enda möjlighet att utvärdera hur effektiva våra vidtagna åtgärder är och om vi är på rätt spår. Och tillförlitliga utvärderingar blir allt viktigare i takt med att vi närmar oss utsläppsmålen och de samhällsekonomiska kostnaderna ökar per ytterligare reduktion.

*Bakteriernas roll i omsättningen av kol och fosfor är fortfarande ganska dåligt känd.*



## Effekter av klimatförändringar

Eftersom Östersjöns tidsskalor är långa, och påverkansfaktorer och åtgärder först får effekt efter flera decennier är det även nödvändigt att ta hänsyn till effekterna av klimatförändringarna i den långsiktiga förvaltningen. Förändringar i klimatet påverkar Östersjön och Östersjöns avrinningsområde genom ökade luft- och vattentemperaturer, förändrad nederbörd, förändrade vindar, försurning, minskat istäcke och förändrade vattenstånd. Förändrad nederbörd över avrinningsområdet leder i sin tur till förändrad tillrinning av sötvatten och näringsämnen till Östersjön.

Temperaturen i Östersjön har ökat mycket jämfört med i världshaven och andra inlandhav under de senaste decennierna. Mellan 1982 och 2006 ökade vattnets yttemperatur med 1,35°C, vilket bara delvis kan förklaras av klimatförändringen. En del är orsakad av en naturlig långperiodisk cyklisk förändring i Nordatlantens yttemperaturer, den så kallade Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO), där temperaturerna var höga runt 1940-talet, låga runt 1980-talet, och nu är höga igen. Dock visar nya klimatprojektioner att medeltemperaturen i Östersjön kan komma att öka med cirka 2 till 3°C vid slutet av detta sekel jämfört med slutet av det förra, beroende på hur kraftfull den globala klimatpolitiken kommer att bli.

Klimatmodellerna visar en tendens mot minskade salthalter (Figur 8) till följd av förändrad nederbörd över avrinningsområdet, vilket ger förändrad sötvattenavrinning och därmed en förändrad sötvattentillförsel till Östersjön. Eftersom de globala klimatmodellerna har problem med vattnets kretslopp på regional nivå (se diskussionen om osäkerheter nedan) är det dock fortfarande oklart om salthalterna i Östersjön kommer att öka eller minska.



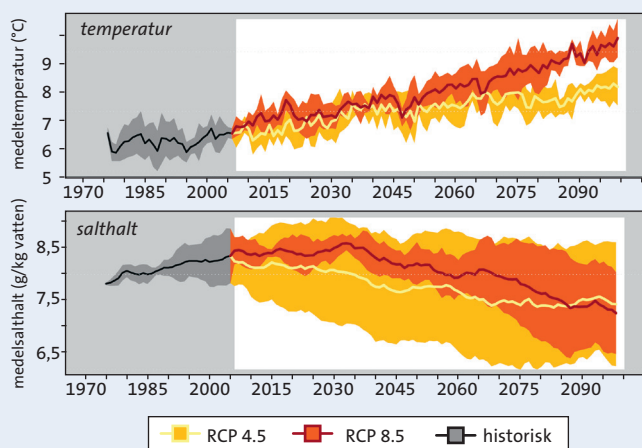
Foto: Bert Eriksson/Mostphotos



Foto: Maria Brun Thegerström/Mostphotos

Klimatförändringar förväntas påverka Östersjön på flera sätt, ett exempel är när ökad nederbörd över avrinningsområdet bidrar till större tillrinning i våra vattendrag, och därmed ökad tillförsel av näringsämnen och organiskt material till havet. Ett annat är att en förhöjd temperatur ökar nedbrytningen av organiskt material, något som i sin tur ökar syreförbrukningen och cirkulationen av näringsämnen.

Temperatur och salthalt i Östersjön enligt två klimascenarier



**Figur 8.** Utveckling av medeltemperatur och medelsalthalt för hela Östersjöns volym fram till slutet av detta sekel för två olika klimatscenarier, RCP4.5 och RCP8.5 (se faktaruta). Det färgade bandet runt linjerna motsvarar osäkerheten som orsakas av intern variabilitet samt modellosäkerhet (se Bring 2019). Även den historiska perioden är behäftat med osäkerhet, eftersom modellerna har tillåtit köra fritt från olika starttillstånd. Salthalten anges i gram salt per kg havsvatten. Efter Saraiva et al. 2019a.



### Representativa koncentrations- utvecklingsbanor (RCP:er)

Klimatscenarioer för framtida klimat grundas på olika antaganden om hur stora utsläppen av växthusgaser kan komma att bli. I senaste utvärderingsrapporten från IPCC från 2013 (AR5) och även i den kommande rapport (AR6) beskrivs utvecklingen genom fyra olika utvecklingsbanor för framtida koncentrationer av långlivade växthusgaser, aerosoler samt andra klimatpåverkande faktorer. Dessa utvecklingsbanor går under benämningen RCP:er, som kommer från engelskans "representative concentration pathways". RCP:erna är namngivna efter den nivå av strålningsdrivning som uppnås år 2100. Strålningsdrivningen är skillnaden mellan hur mycket energi solstrålningen som träffar jorden innehåller och hur mycket energi som jorden strålar ut i rymden igen. Denna energi mäts i enheten watt per kvadratmeter, W/m<sup>2</sup>. Olika strålningsdrivningar motsvarar olika ökning av växthusgas-halter i atmosfären. Exempelvis betyder RCP4.5 att koncentrationen av växthusgaser i atmosfären genererar en strålningsdrivning på 4.5W/m<sup>2</sup> år 2100, jämfört med förindustriell nivå. Enligt senaste IPCC uppskattningen i specialrapporten om hav och kryosfär (SROCC) motsvarar de fyra RCP:er följande sannolika intervaller för globala temperaturökningar för perioden 2081-2100 jämfört med 1850-1900:

RCP2.6: 0.9 – 2.4 °C

RCP4.5: 1.7 – 3.3 °C

RCP6.0: 2.0 – 3.8 °C

RCP8.5: 3.2 – 5.4 °C

Sök i kunskapsbanken på [www.smhi.se](http://www.smhi.se) för en mer utförlig beskrivning av RCP:er, eller läs mer i IPCC rapporterna AR5 och SROCC som kan laddas hem från [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch).

Klimatets förändring påverkar övergödningens problematiken i Östersjön främst genom en eventuellt ökad tillförsel av näringsämnen och organiskt material till följd av ökad nederbörd över avrinningsområdet. Men även den ökande temperaturen påverkar. Vid en temperaturhöjning ökar nedbrytningen av organiskt material och därmed även syreförbrukningen och cirkulationen av näringsämnen, vilket totalt sett ökar omsättningen av organiskt material. Syrehalten minskar dock inte enbart på grund av högre förbrukning utan även på grund av att syre som tillförs från atmosfären löser sig sämre i varmare vatten än i kallare. Andra klimatfaktorer som kan påverka övergödningen är förändrade inflöden av vatten från Västerhavet till följd av exempelvis höjt vattenstånd i mynningsområdet.

### Flera scenarier för framtiden

Uppskattningar av den samlade effekten av alla dessa faktorer har gjorts med Östersjömodeller, där påverkan från atmosfären och tillrinningen av sötvatten har skalats ner från globala klimatmodeller till högre upplösning på regional nivå.<sup>5</sup> Detta har gjorts för olika scenarier för klimatförändringar och näringstillförsel (exempel i Figur 9).

De två scenarierna för klimatförändring kallas RCP4.5 och RCP8.5 (se faktaruta), och motsvarar en ganska kraftfull respektive en obefintlig global klimatpolitik. Dessa scenarier påverkar atmosfärsdrivningen (t.ex. vindar, lufttemperatur och nederbörd) samt tillflödet av sötvatten till Östersjön. Notera att RCP4.5 sannolikt inte är tillräckligt kraftfull för att klara Parisavtalets mål på max. 1.5 °C temperaturökning.

Båda dessa klimatscenarier har dessutom undersökts för tre olika scenarier för näringsämnestillförsel:

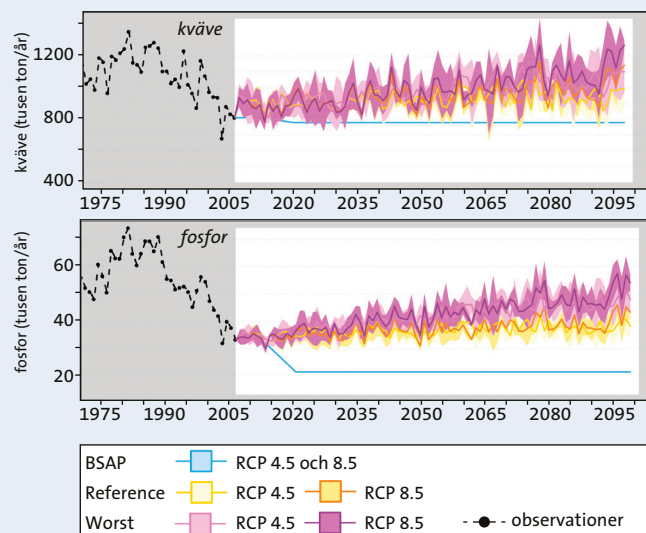
**BSAP** – motsvarar att målen för Baltic Sea Action Plan nås till 2020 och att tillförseln därefter är konstant. Notera att detta scenario sannolikt är förknippat med ökade åtgärdskrav om avrinningen ökar i samband med klimatförändringen.

**Reference** – motsvarar dagens tillförsel av näringsämnen, men att dessa sedan ökar till följd av ökad avrinning orsakat av klimatförändringen.

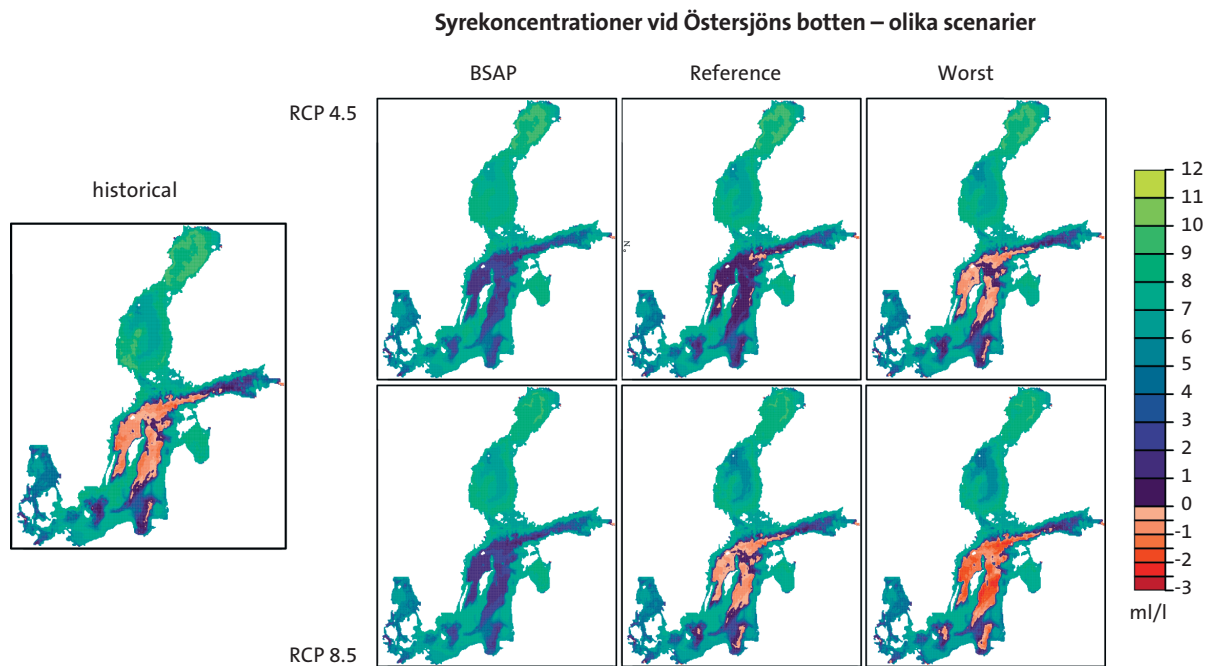
**Worst** – motsvarar en samhällsutveckling med ökade utsläpp av näringsämnen från landbruk och städer, som dessutom förstärks av klimatförändringen.

**Figur 9.** Tillförsel av fosfor till Östersjön för olika scenarier för klimat och näringstillförsel. Den blåa linjen motsvarar BSAP och antas vara giltig oavsett klimatförändringarna. Gula linjerna/banden motsvarar dagens näringstillförsel, fast med en ökning som orsakas av ökat avrinning i framtida klimat. Lila linjerna/banden motsvarar en situation där näringstillförseln tillåts öka i ett worst case scenario. Efter Saraiva et al. 2019a.

**Tillförsel av kväve och fosfor till Östersjön – två scenarier**



5. Globala klimatmodeller är ofta för grova för att beskriva klimatförändringar i lokala och regionala områden, och måste därför skalas ner för att ge tillräckligt detaljerad information.



Resultaten för syreförhållanden i Östersjöns djupvatten (Figur 10) visar att:

- För de flesta kombinationer av klimat- och åtgärdsscenarioer blir utbredningen av syrefria bottenar bättre vid slutet av detta seklet än vid slutet av förra seklet. Enbart för det mest pessimistiska åtgärdsscenarioet (Worst) kombinerat med det mest pessimistiska klimatscenarioet (RCP8.5) blir situationen sämre.
- För varje åtgärdsscenario är syresituationen sämre för det mest pessimistiska klimatscenarioet (RCP8.5) än för det mer optimistiska (RCP4.5).
- För BSAP åtgärdsscenarioet är skillnaden mellan de två klimatscenarioerna liten. Effekterna av klimatförändringen på syresituationen är därför liten om näringsämnestillförseln kontinuerligt justeras så att BSAP följs. Genom att minska näringsämnestillförseln blir Östersjön mer motståndskraftig mot klimatförändringar.

**Figur 10.** Syrekoncentration vid botten för olika kombinationer av scenarier för klimat och näringstillförsel (medel för perioden 2069-2098, bilderna till höger), samt för historiska perioden (1976-2005, bilden till vänster). Negativa koncentrationer är ett sätt att representera svavelväte. Efter Saraiva et al. 2019a.

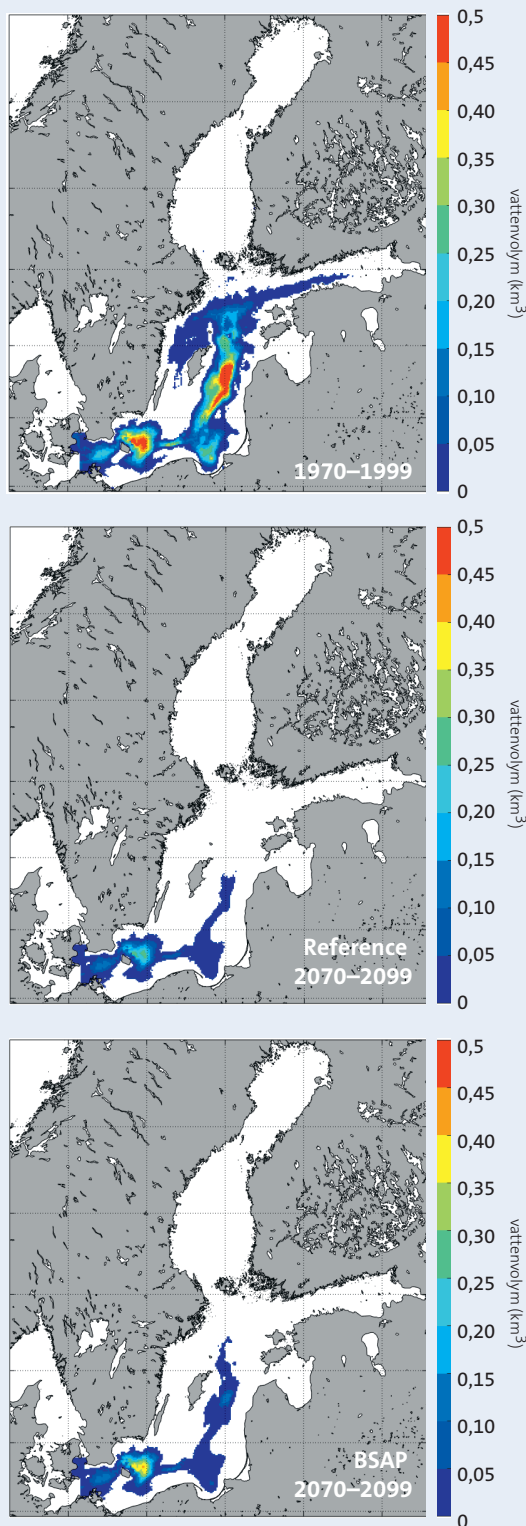
## Osäkerheter i resultaten

Resultaten skiljer sig ganska mycket mellan olika studier som har gjorts. Till exempel visar senare studier en större skillnad mellan BSAP scenarioet och de andra åtgärdsscenarioerna än studier som har publicerats tidigare. Detta förklaras till stor del av olika referensperioder samt att det har gjorts olika antaganden om hur BSAP skulle realiseras. I tidigare studier antog man att näringsämnestillförseln, efter att målen med BSAP uppnåtts till 2020, sedan ökar till följd av ökad tillrinning av sötvatten. I den senare studien antog man istället att den maximala tillåtna tillförseln enligt BSAP kommer att följas även då tillrinningen ökar. I senare fallet måste åtgärderna skärpas i takt i takt med ökande flöden. Man kan argumentera för att en del av klimateffekten tas bort på detta sättet. Å andra sidan visar resultaten tydligt att BSAP, om den följs strikt även i ett framtida klimat, kommer att leda till stora förbättringar även om temperatur, salthalt och andra parametrar förändras.

En mer detaljerad analys av när klimateffekterna förväntas bli viktiga för syreförhållandena i Östersjön kan inte göras baserat på nuvarande



## Förhållanden för torskreproduktion – scenarier



**Figur 11.** Färgat område visar 30 års genomsnittlig utbredning av områden möjliga för reproduktion av tors, dvs. en salthalt högre än 11 g/kg och en syrekonzentration högre än 2 ml/l. Färgskalan visar volymen vatten i km<sup>3</sup>. Överst visas utbredningen för perioden 1970-1999 och underst för två scenarier av närsaltstillförsel (REF och BSAP) under perioden 2070-2099. Källa: *Limnology and Oceanography*. <https://doi.org/10.1002/lno.11446>

kunskapsnivå, eftersom uppskattningarna är ganska osäkra. En stor del av klimateffekterna beror på ökad näringstillförsel till följd av ökad avrinning, vilket är en parameter behäftad med stor osäkerhet i klimatmodellerna. Detta beror dels på att variabiliteten av nederbörd och avrinning är stor, och dels på att de processer som styr vattnets transport i atmosfären ännu är en stor utmaning för de globala klimatmodellerna. Det har även visats att vattenståndshöjningen, som är mycket osäker i klimatmodellerna, kan ha en icke försumbar negativ effekt på syreförhållandena.

## Ekosystemrespons

Studier har visat att en eventuell minskning i salthalt i kombination med en minskning av syrekonzentrationen i ett framtida klimat kan komma att påverka det marina ekosystemet i Östersjön. En känslig art är torsken, som kan komma att få försämrade möjligheter till lyckad reproduktion. För att torskens ägg skall överleva och kläckas behöver djupvattnet ha både hög salthalt (>11 g/kg) och innehålla löst syre (> 2 ml/l). Vattenvolymer med dessa förutsättningar kommer troligen att minska i Östersjön i ett framtida klimat (Figur 11).

## Några slutsatser

Belastningen på Östersjön har gått ner kraftigt sedan den var som störst på 1980-talet. Reduktionstakten går dock ner och har till och med avstannat i vissa fall. Dock fortsätter fosforbelastningen att minska till Egentliga Östersjön och Finska viken.

- Östersjöns ekosystem är kraftigt modifierat av övergödningen. Processen har fortgått under hela 1900-talet.
- Det finns stora mängder fosfor som är aktivt i kretsloppen i Östersjön, men det verkar som fosforreservoarerna slutade att fyllas på omkring millennieskiftet eller några år därefter. De fortsatta minskningarna i fosfortillförseln som skett sedan dess, och som förhoppningsvis fortsätter, gör att fosforkonzentrationerna långsamt kommer att minska.
- I Östersjöns djupa bottnar har mycket organiskt material ackumulerats och vattensolumn och sediment innehåller mycket svavelväte. Förmodligen kommer detta att ytterligare fördröja förbättringar i syreförhållandena. Detta är en aspekt som vi behöver förbättra våra modeller för att fullständigt förstå.
- Det är osannolikt att syresättning av djupvattnen i Östersjön ger en snabb minskning av fosforhalten i vattensolumnen.
- De stora variationerna på grund av varierande väder och klimat i kombination med de utdragna övergödningprocesserna gör det väldigt svårt att bestämma förändringar utifrån observationer på kort sikt. Minst 10-20 år krävs för att se en förändring. Ofta ännu mer.
- Vattentemperaturerna i Östersjön kommer att öka till följd av klimatförändringen, men ökningen efter 2050 beror på hur kraftfulla de globala åtgärderna mot klimatförändringar blir.
- Klimatmodellerna visar en tendens mot minskat salthalt, vilket i så fall får konsekvenser för ekosystemen, t.ex. genom minskade möjligheter för torskreproduktion. Än så länge kan man dock inte med säkerhet säga om salthalterna kommer att öka eller minska.

- För de flesta kombinationer av klimat- och åtgärdsscenarioer blir utbredningen av syrefria bottenar bättre vid slutet av detta seklet än vid slutet av förra seklet. Enbart för det mest pessimistiska åtgärds-scenarioer (Worst) kombinerat med det mest pessimistiska klimatscenarioer (RCP8.5) blir situationen sämre.
- För varje åtgärdsscenario är syresituationen sämre för det mest pessimistiska klimatscenarioer (RCP8.5) än för det mer optimistiska (RCP4.5).
- För BSAP åtgärdsscenarioer är skillnaden mellan de två klimatscenarioerna liten. Effekterna av klimatförändringen på syresituationen är därför liten om näringsämnestillförseln kontinuerligt justeras så att BSAP följs.
- Genom att minska näringsämnestillförseln blir Östersjön mer motståndskraftig mot klimatförändringar.

Förhållandet mellan klimatförändringarna och övergödningssituationen i framtidens Östersjön är ett komplicerat samspel mellan en rad olika faktorer, som dessutom präglas av stora osäkerheter. På ett övergripande plan kan vi dock konstatera att temperatur och salthalt troligen är de parametrar som kan komma att påverkas mest av stora klimatförändringar, medan syrehalten främst kommer att påverkas av hur väl vi lyckas minska näringsämnestillförseln från land.

Vi kan också konstatera att oavsett hur starka framtidens klimateffekter blir (i form av till exempel ökad vattentemperatur och ökad nederbörd), kommer arbetet med att strypa näringsämnestillförseln från land till hav att förbli en helt central faktor för Östersjöns ekosystem. Minskad näringsämnestillförsel ökar havets förmåga till återhämtning, och stärker dess motståndskraft mot kommande klimatförändringar.

*Arbetet med att minska näringsämnestillförseln från land till hav fortsätter att vara av stor betydelse för Östersjöns ekosystem. Minskad näringsämnestillförsel ökar havets förmåga till återhämtning, och stärker dess motståndskraft mot kommande klimatförändringar.*



Foto: Niklas Wikmark/Azote



Foto: Johan Bjurer/Westphotos



# Litteraturhänvisningar

Östersjöns fysiska oceanografi finns beskriven i t.ex. Leppäranta och Myrberg (2009). Savchuk (2018) ger en omfattande beskrivning av stor-skalig dynamik av näringsämnen och syre i Östersjön. I rapporten Savchuk et al. (2012) och Ruoho-Airola et al. (2012) beskrivs i detalj vilka antaganden som ligger bakom vår förståelse av tidiga utsläpp av kväve och fosfor. Utvecklingen av belastningen på senare år (1995-) följs av HELCOM och publiceras både som "fact sheet" och "Indicator" varje år på HELCOMs hemsida. Uppföljningar per land görs mer oregelbundet som en del av uppföljningen av reduktionsmålen i BSAP.

I Gustafsson et al. (2012) gjordes en modellbaserad rekonstruktion av övergödningens utveckling under 1900-talet. Andersen et al. (2017) använde tillgängliga data för att uppskatta status under samma period. Savchuk et al. (2008) och Carstensen et al. (2014) beskrev syrebristens utbredning från 1900 och framåt. I Finni et al. (2001) och Kahru och Elmgren (2014) analyseras utvecklingen av cyanobakterieblomningarna. Riemann et al. (2015) ger en omfattande sammanfattning av utvecklingen i danska kustområden under de senaste decennierna. Utvecklingen av näringsomsättningen i Stockholms skärgård beskrivs i Walve et al. (2018). I denna finner man också vidare läsning om utvecklingen av förhållandena.

Under de senaste 10 åren har forskningen om sedimentprocesser i Östersjön varit intensivt och mycket ny kunskap har framkommit. Det finns ett relativt stort antal artiklar om olika aspekter, men tyvärr ingen lättillgänglig aktuell sammanfattning. Några nyckelartiklar i ämnet är t.ex. Mort et al. (2010), Jilbert et al. (2011), Reed et al. (2011, 2016), Hermans et al. (2018).

Budgetberäkningar presenteras i Savchuk (2018).

En sammanställning av klimateffekter på Östersjön finns i BACC II Author Team (2015). En undersökning av vad som har orsakat de senaste decenniernas uppvärmning finns publicerat i Kniebusch et al. (2019). Resultaten för framtida förändringar i temperatur, salthalt och botten-syre baserar sig främst på Saraiva et al. (2019a,b). En detaljerat beskrivning av scenarierna för näringsämnen som har använts i dessa studier kan finnas i Zandersen et al. (2019). Framtida förutsättningar för reproduktion av torsk är under publikation i Wåhlström et al. (under revision). En sammanställning av osäkerhetskällor i klimatmodeller har gjorts för miljömålsberedningen (Bring 2019). För en mer utförlig beskrivning av RCP:er och klimatscenarier; sök i kunskapsbanken på [www.smhi.se](http://www.smhi.se) eller läs mer i IPCC rapporterna AR5 och SROCC som kan laddas hem från [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch).



# Referenser

- Andersen, J. H., Carstensen, J., Conley, D. J., Dromph, K., Fleming-Lehtinen, V., Gustafsson, B. G., et al. (2017). Long-term temporal and spatial trends in eutrophication status of the Baltic Sea. *Biological Reviews*, 92(1), 135–149. <http://doi.org/10.1111/brv.12221>
- BACC II Author Team (2015). Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. *Regional Climate Studies*, Springer. doi: 10.1007/978-3-319-16006-1
- Bring, A. (2019). Källor till osäkerhet i klimatmodeller. Formas PM till Miljömålsberedningen, Dnr: 2019-01880.
- Carstensen, J., Andersen, J. H., Gustafsson, B. G., & Conley, D. J. (2014). Deoxygenation of the Baltic Sea during the last century. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(15), 5628–5633. <http://doi.org/10.1073/pnas.1323156111>
- Finni, T., K. Kononen, R. Olsonen, and K. Wallström. 2001. The history of cyanobacterial blooms in the Baltic Sea. *AMBIO* 30: 172–178.
- Gustafsson, B. G., Schenk, F., Blenckner, T., Eilola, K., Meier, H. M., Müller-Karulis, B., et al. (2012). Reconstructing the Development of Baltic Sea Eutrophication 1850–2006. *AMBIO: a Journal of the Human Environment*, 41(6), 534–548. <http://doi.org/10.1007/s13280-012-0318-x>
- Hermans, M., Lenstra, W. K., van Helmond, N. A. G. M., Behrends, T., Egger, M., Séguet, M. J. M., et al. (2019). Impact of natural re-oxygenation on the sediment dynamics of manganese, iron and phosphorus in a euxinic Baltic Sea basin. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 246, 174–196. <http://doi.org/10.1016/j.gca.2018.11.033>
- Jilbert, T., Slomp, C. P., Gustafsson, B. G., & Boer, W. (2011). Beyond the Fe-P-redox connection: preferential regeneration of phosphorus from organic matter as a key control on Baltic Sea nutrient cycles. *Biogeosciences*, 8(6), 1699–1720. <http://doi.org/10.5194/bg-8-1699-2011>
- Kahru, M. and Elmgren, R. (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>.
- Kniebusch, M., Meier, H. M., Neumann, T., & Börgel, F. (2019). Temperature variability of the Baltic Sea since 1850 and attribution to atmospheric forcing variables. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(6), 4168–4187.
- Leppäranta, M., & Myrberg, K. (2009). *Physical Oceanography of the Baltic Sea*, 1–422.
- Mort, H. P., Slomp, C. P., Gustafsson, B. G., & Andersen, T. J. (2010). Phosphorus recycling and burial in Baltic Sea sediments with contrasting redox conditions. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 74, 1350–1362.
- Reed, D. C., Slomp, C. P., & Gustafsson, B. G. (2011). Sedimentary phosphorus dynamics and the evolution of bottom-water hypoxia: A coupled benthic–pelagic model of a coastal system. *Limnol Oceanogr*, 56(3), 1075–1092.
- Reed, D. C., Gustafsson, B. G., & Slomp, C. P. (2016). Shelf-to-basin iron shuttling enhances vivianite formation in deep Baltic Sea sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, 434, 241–251. <http://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.11.033>
- Riemann, B., Carstensen, J., Dahl, K., Fossing, H., Hansen, J. W., Jakobsen, H. H., et al. (2015). Recovery of Danish Coastal Ecosystems After Reductions in Nutrient Loading: A Holistic Ecosystem Approach. *Estuaries and Coasts*, 39(1), 82–97. <http://doi.org/10.1007/s12237-015-9980-0>
- Ruoho-Airola, T., K. Eilola, O.P. Savchuk, M. Parviainen, and V. Tarvainen. (2012). Atmospheric nutrient input to the Baltic Sea for 1850–2006: A reconstruction from modeling results and historical data. *AMBIO*. doi:10.1007/s13280-012-0319-9.
- Saraiva, S., Meier, H. E., Andersson, H., Höglund, A., Dieterich, C., Gröger, M., Hordoir, R., and Eilola, K. J. (2019a). Uncertainties in projections of the Baltic Sea ecosystem driven by an ensemble of global climate models. *Frontiers in Earth Science*, 6, 244.
- Saraiva, S., Meier, H. M., Andersson, H., Höglund, A., Dieterich, C., Gröger, M., Hordoir, R., and Eilola, K. (2019b). Baltic Sea ecosystem response to various nutrient load scenarios in present and future climates. *Climate Dynamics*, 52(5-6), 3369–3387.
- Savchuk, O. P. (2018). Large-Scale Nutrient Dynamics in the Baltic Sea, 1970–2016. *Frontiers in Marine Science*, 5, 450–20. <http://doi.org/10.3389/fmars.2018.00095>
- Savchuk, O. P., Wulff, F., Hille, S., Humborg, C., & Pollehne, F. (2008). The Baltic Sea a century ago - a reconstruction from model simulations, verified by observations. *Journal of Marine Systems*, 74(1-2), 485–494. <http://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2008.03.008>
- Savchuk, O. P., Eilola, K., Gustafsson, B. G., Rodriguez Medina, M., & Ruoho-Airola, T. (2012). Long-term reconstruction of nutrient loads to the Baltic Sea 1850-2006. Baltic Nest Institute technical report no 6, available from <https://www.su.se/ostersjocentrum/vetenskap/marinmodellering-och-beslutsstod-baltic-nest-institute>
- Walve, J., Sandberg, M., Larsson, U., & Lännergren, C. (2018). A Baltic Sea estuary as a phosphorus source and sink after drastic load reduction: seasonal and long-term mass balances for the Stockholm inner archipelago for 1968–2015. *Biogeosciences*, 15(9), 3003–3025. <http://doi.org/10.5194/bg-15-3003-2018>
- Wählström, I., Höglund, A., Almroth-Rosell, E., MacKenzie, B.R., Gröger, M., Eilola, K., Andersson, H.C., Plikshs, M.. Combined climate change and nutrient load impacts on future habitats and eutrophication indicators in an eutrophic coastal sea.
- Zandersen, M., Hyytiäinen, K., Meier, H. M., Tomczak, M. T., Bauer, B., Haapasaari, P. E., Olesen, J.E. Gustafsson, B.G., Refsgaard, J.C., Fridell, E., Pihlainen, S., Le Tissier, M.D.A., Kosenius, A.-K., and Van Vuuren, D.P. (2019). Shared socio-economic pathways extended for the Baltic Sea: exploring long-term environmental problems. *Regional Environmental Change*, 19(4), 1073–1086.



## **RAPPORTER FRÅN ÖSTERSJÖCENTRUM**

RAPPORT 1/2017

Människan, näringen och havet

RAPPORT 1/2018

Historien om Östersjötorsken

REPORT 2/2018 (engelska)

Limitations of using blue mussel farms as a nutrient reduction measure in the Baltic Sea

RAPPORT 1/2019

Miljögifter i Östersjön – en exposé

RAPPORT 1/2020

Våtmarker som fiskevårdsåtgärd vid kusten

RAPPORT 2/2020

Övergödningen av Östersjön – en bakgrundsrapport

## Övergödningen av Östersjön – en bakgrundsrapport

Denna rapport har målsättningen att ge en relativt heltäckande översikt över övergödningens problematiken i Östersjön. Allt från den historiska utvecklingen till dagens situation, men framförallt om kunskapsläget inför framtiden.

### Stockholms universitets Östersjöcentrum

Vid Stockholms universitet har framgångsrik forskning och utbildning om havet bedrivits i över fem decennier. Här utförs världsledande Östersjöforskning, men även forskning i andra svenska havsområden, i tropiska hav och i polarområdena. Forskningen bidrar i sin tur till universitetets breda utbud av marina kurser och utbildningar. Östersjöcentrum har i uppdrag att stärka och synliggöra den marina verksamheten vid universitetet.

Vi är en länk mellan vetenskapen och samhället. En unik kombination av forskare, kommunikatörer och omvärldsanalytiker som arbetar med att öka kunskapen om havet och förbättra samhällets åtgärder mot olika miljöutmaningar. Vi ger vetenskapligt stöd i Östersjörelaterade beslut och gör forskningsresultat användbara för samhället. Fokus ligger på Östersjöns miljöutmaningar; minska övergödningen, nå ett hållbart fiske, minska miljögiftsbelastningen och bevara den biologiska mångfalden.