

*Foto: Umeå marina forskningsstation*

# ORSAKER TILL MINSKANDE SYREHALTER I BOTTENHAVET

HAVSMILJÖINSTITUTET

RAPPORT NR 2017:5

JOAKIM AHLGREN<sup>1,2</sup>, CARL ROLFF<sup>3</sup>, ANDERS GRIMVALL<sup>1</sup>, ANDERS OMSTEDT<sup>4</sup>  
OCH JOHAN WIKNER<sup>1,2</sup>

<p>Havsmiljöinstitutets rapport nr 2017:5</p> <p>Publiceringsdatum: 2017-11-27</p> <p>Titel: Orsaker till minskande syrehalter i Bottenhavet</p> <p>Författare: Joakim Ahlgren<sup>1,2</sup>, Carl Rolff<sup>3</sup>, Anders Grimvall<sup>1</sup>, Anders Omstedt<sup>4</sup> och Johan Wikner<sup>1,2</sup></p> <p><sup>1</sup> Havsmiljöinstitutet, Box 260, 405 30 Göteborg</p> <p><sup>2</sup> Umeå universitet, Umeå marina forskningscentrum, Norrbyn 557, 905 71 Hörnefors</p> <p><sup>3</sup> Stockholm universitets Östersjöcentrum, 106 91 Stockholm</p> <p><sup>4</sup> Göteborgs universitet, Institutionen för marina vetenskaper, Box 461, 405 30 Göteborg</p>	<p>Referens till rapporten:</p> <p>Ahlgren J., Rolff, C., Grimvall, A., Omstedt, A. Och Wikner, J. (2017) Orsaker till minskande syrehalter i Bottenhavet. Rapport nr 2017:5, Havsmiljöinstitutet.</p> <p>Kontakt: Joakim Ahlgren, Havsmiljöinstitutet/Umeå universitet Umeå marina forskningscentrum Norrbyn 557, 905 71 Hörnefors E-post: joakim.ahlgren@umu.se Telefon: 090-7867978</p> <p>Inom Havsmiljöinstitutet samverkar Göteborgs universitet, Stockholms universitet, Umeå universitet, Linnéuniversitetet och Sveriges lantbruksuniversitet för att bistå myndigheter och andra aktörer inom havsmiljöområdet med vetenskaplig kompetens.</p> <p><a href="http://www.havsmiljoinstitutet.se">www.havsmiljoinstitutet.se</a></p>
--	--

## FÖRORD

Resultat från den nationella miljöövervakningen visar att syrehalterna i Bottenhavets bottenvatten har minskat sedan 1970-talet, en minskning som accelererat från 1990. Detta kan på sikt få konsekvenser för till exempel bottenlevande organismer och för att ha möjlighet kunna åtgärda denna försämring av den marina miljön är det nödvändigt att identifiera dess orsaker. På uppdrag av Havsmiljöinstitutet försöker därför denna rapport att med hjälp av analys av tidsserier och modellanalyser utifrån miljöövervaknings- och forskningsdata påvisa orsakerna till den observerade syrehaltsminskningen.

**JOAKIM AHLGREN**

**UMEÅ, 15 JUNI 2017**

## SAMMANFATTNING

Resultat från den nationella miljöövervakningen visar att syrehalterna i Bottenhavet har minskat sedan 1970-talet, en minskning som accelererat från 1990. För att ha möjlighet att på något sätt kunna åtgärda denna försämring av den marina miljön är det nödvändigt att identifiera orsakerna till denna syreminskning, eftersom olika orsaker kan kräva olika former av åtgärder. Om orsaken till exempel är ökad syreförbrukning beroende på regional övergödning, skulle detta innebära ökat behov av regionala reningsåtgärder. Målsättningen med projektet var därmed att ge en tillförlitlig förklaring till de sjunkande syrehalterna i Bottenhavet under de senaste 20 åren genom att använda data från de nationella miljöövervakningsprogrammen. De huvudhypoteser som undersöktes som orsaker till de sjunkande syrehalterna var:

- Ökad regional gödning av Bottenhavet och därmed ökad produktion.
- Tillförsel av syrefattigt och fosfatrikt från Egentliga Östersjön.
- Starkare haloklin och försämrade ventilation av Bottenhavets djupvatten.
- Ökad temperatur och ökad tillförsel av löst organiskt kol.

Analys av tidsserier och modellanalyser utifrån miljöövervaknings- och forskningsdata visade att den observerade syrehaltsminskningen i Bottenhavets djupvatten främst beror på en ökning av vattentemperaturen och delvis på en ökning av löst organiskt kol i vattnet, samt tillflöde från Egentliga Östersjön. Dataanalysen visade däremot inget tydligt stöd för att ökad produktion av biomassa i Bottenhavet orsakat de minskande syrehalterna. Detta gäller indikatorer för växtplankton, sedimentation och bakterieplankton som alla förväntas öka vid ökad produktion och det finns således inga direkta indicier för att stödja hypotesen om ökad gödning av Bottenhavet.

Sammantaget visar de analyser som gjorts inom projektet att Bottenhavets framtida hälsa främst gynnas av en kombination av åtgärder för att motverka globala klimatförändringar, samt åtgärder för att förbättra vattenkvaliteten i Egentliga Östersjön. Näringstillförsel från Bottenhavets avrinningsområden bedöms främst ha haft betydelse för syresituationen i kustnära vattenförekomster. Den bedöms därför inte i betydande omfattning ha orsakat de minskande syrehalterna i Bottenhavets utsjöområden.

# INNEHÅLL

FÖRORD .....	3
SAMMANFATTNING .....	4
INNEHÅLL .....	5
1 INTRODUCTION .....	7
1.1 Bakgrund .....	7
1.2 Hypoteser .....	8
1.3 Syfte .....	9
1.4 Studieområde .....	9
2 RESULTAT .....	11
2.1 Associations- och trendanalyser av tidsserier .....	11
2.2 Jämförelse mellan norra Egentliga Östersjön och Bottenhavet .....	12
2.3 Modellering .....	13
3 DISKUSSION .....	15
REFERENSER .....	18
BILAGA 1: METODER .....	21
Datakällor .....	21
Statistiska metoder .....	21
Modellering .....	22
BILAGA 2: TABELLER .....	23



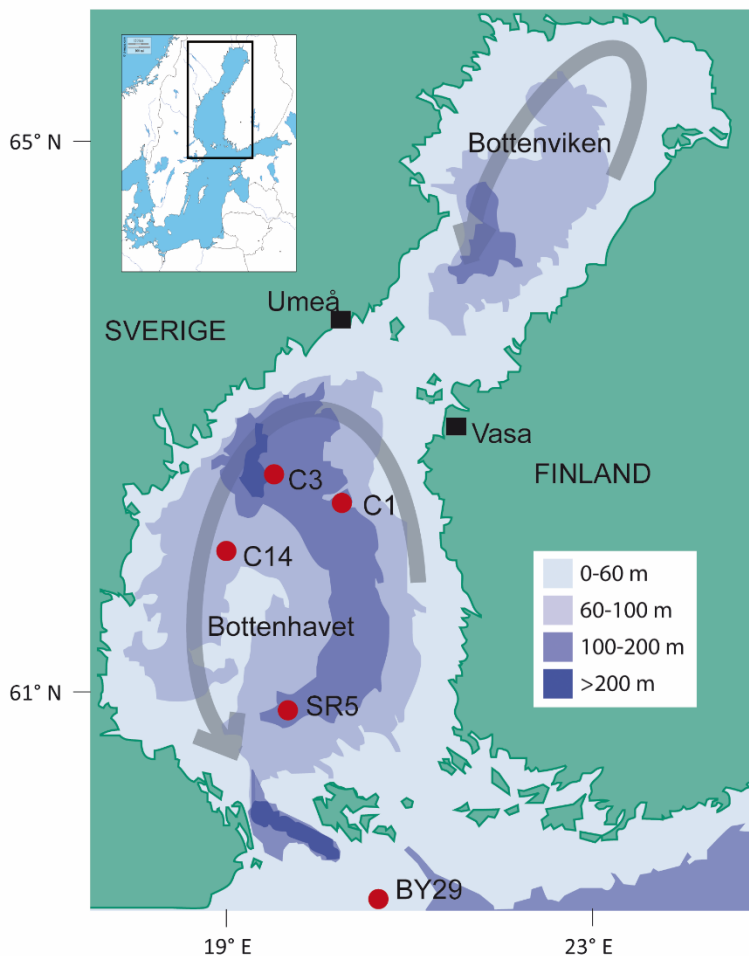
# 1 INTRODUKTION

## 1.1 BAKGRUND

Områden med syrebrist (hypoxi) eller helt syrefria (anoxi) i ökar i marina miljöer över hela världen, med konsekvenser både för fiskproduktion och utbredning av giftiga algblomningar (Rabalais et al. 2010, Diaz & Rosenberg 2008). Ökningen är framförallt orsakad av mänskliga aktiviteter, antingen direkt genom utsläpp av näringsämnen eller indirekt genom klimateffekter som temperaturhöjning och ökad avrinning från land. Även transport av syrefattigt vatten mellan havsbassänger och tillförsel av löst organiskt material kan dock påverka syreförhållanden i marina områden (Chan et al. 2008, Kemp et al. 2005, Nydahl et al. 2013), och åtgärder för att minska problemen är därför beroende av att korrekt kunna särskilja mellan dessa orsaker.

Östersjön utgör i dagsläget ett lämpligt område att studera pågående syreminskingsprocesser och dess orsaker. Östersjön har en permanent haloklin vid 60–70 m djup och vattenutbyte och förnyelse av djupvatten regleras av sunden mellan Östersjön och Atlanten. Permanent syrebrist har funnits etablerad i Östersjöns större bassänger sedan 50-talet, även om perioder med alternerande syresatta och syrefria perioder har påvisats även under geologiska tidsskalor (Karlsson et al. 2002, Zillén et al. 2008). Under det senaste decenniet har arealen med syrebrist i Egentliga Östersjön, Östersjöns största bassäng, ökat till rekordnivåer (Carstensen et al. 2014). Vanligtvis anses antropogen övergödning vara den dominerande orsaken till detta, men vissa rapporter anger även hydrografisk ventilation av bassängerna som största orsak (Savchuk 2010). Tyvärr saknas i stort studier om klimatrelaterade faktorerers inverkan på syrebrist.

I kontrast till Egentliga Östersjön har de nordligare delarna av Östersjön, Bottenhavet och Bottenviken (figur 1), genom åren inte haft några problem med låga syrehalter i bottenvattnen. Detta har dock de senaste 20 åren börjat förändras med sjunkande syrehalter i Bottenhavet, där syrenivåerna nu ligger mellan 4 och 5 ml l<sup>-3</sup> (Ahlgren & Palmbo-Bergman 2014, Raateoja 2013, supplementary data). Detta väcker farhågor om potentiell framtida syrebrist i området, med medföljande negativa konsekvenser för bland annat fisk och bottenlevande organismer. Dessutom kan låga syrenivåer främja internbelastning, dvs. friläggning av fosfat från sediment genom reduktion av Fe<sup>3+</sup> till Fe<sup>2+</sup> och därigenom ytterligare öka näringsnivåerna i bottenvattnet, något som i värsta fall kan accelerera syrebristen (Viktorsson et al. 2012). Orsakerna till denna minskning av syrehalterna i Bottenhavet är i dagsläget inte kända, och en identifiering av orsakerna är därför nödvändig för att kunna bedöma lämpligheten hos eventuella åtgärdsprogram.



Figur 1. Studieområdet med provtagningsstationer. Grå pilar indikerar övergripande ytcirkulation i respektive havsbassäng.

## 1.2 HYPOTESER

Den ledande hypotesen i dagsläget är att mänskligt orsakad övergödning är den huvudsakliga orsaken till syrebrist globalt (Rabalais et al. 2010), men det anses svårt att särskilja influensen av klimateffekter från övergödningen i historiska data (Conley et al. 2009). I Bottenhavet kan man förvänta sig att typiska övergödningssindikatorer som klorofyll, primärproduktion och bakterieproduktion skulle uppvisa samband med syreminskningen, om näringstillskott i överflöd vore den primära orsaken till minskningen.

En annan hypotes av relevans för Bottenhavet är att inflöde av fosfatrikt och syrefattigt vatten från Egentliga Östersjön är den dominerande orsaken till de minskande syrehalterna (Raateoja 2013). För närvarande uppvisar Egentliga Östersjön historiskt låga syrenivåer, vilket även ger upphov till ökad internbelastning av fosfat, och detta har stor potential att påverka intilliggande bassänger (Carstensen et al. 2014, Rolff & Elfving 2015). Eftersom direkta mätningar av vattenutbytet mellan bassängerna inte finns tillgängliga i dagsläget måste studier av denna



hypotes förlita sig på modellering. PROBE-Baltic är en för denna tillämpning relevant modell som använts i studier för att undersöka klimatförändringars koppling till biogeokemisk omvandling av ämnen i och processer mellan bassängerna (Omstedt 2015, Omstedt et al. 2014).

En tredje hypotes är att starkare haloklin och ändrade vindförhållanden har minskat ventilationen av syre till djupvattnet. Skiktning av vattenmassan är en nyckelfaktor för utveckling av syrefattiga miljöer, och är speciellt viktigt i miljöer med markerad temperatur- och saltskiktning (Kemp et al. 2005). Förändringar av temperatur och salthalt i Östersjön har under lång tid påverkar stabiliteten i vattenpelaren och därmed även omblandningen mellan syrerikt yt-vatten och syrefattigt bottenvatten (Meier et al 2011). Denna hypotes kan undersökas genom en jämförelse mellan nedgången av syrekoncentrationen med förändringar av vattenmassans täthet i bassängens olika vattenlager.

Slutligen kan även klimatrelaterade faktorer, som ökad temperatur och ökad tillförsel av organiskt material (DOC) från land genom tillrinning, ge upphov till syrebrist genom stimulans av bakterierespiration. Det är visat att högre temperaturer främjar bakterierespirationen i området (Panigrahi et al. 2013), men kopplingar till syrebrist är svårare att hitta (Keeling & Garcia 2002, Rabalais et al, 2010), och såvitt vi vet finns det inga undersökningar som kopplar syrebrist till DOC. Potentialen hos DOC att påverka systemet bör dock inte förbises; studier har indikerat en möjlig temperaturhöjning på 3°C och en ökad nederbörd på 20 % vid slutet på 2000-talet (BACC I 2008, BACC II 2015, Meier 2006), vilket skulle medföra betydligt höjda DOC-nivåer. Både temperatur och DOC har dessutom separat visats främja mikrobiell respiration (Nydahl et al 2013, Panigrahi et al 2013) och är därmed möjliga förklaringar för den pågående minskningen i syrehalter. Vidare innebär en temperaturökning en minskning av syrelösligheten i vattnet, och tillsammans med en starkare saltskiktning, kommer skiktningen av vattenpelaren öka och förutsättningarna för ventilation av bottenvattnet kan därigenom komma att försämrats (Keeling & Garcia 2002).

### 1.3 SYFTE

Syftet med studien var därmed att undersöka om orsaken till de minskande syrehalterna i Bottnhavets bottenvatten går att förklara med en, eller en kombination, av ovanstående hypoteser. Speciellt viktigt var att klargöra om framförallt lokala utsläpp av näringsämnen eller klimatrelaterade faktorer kan anses som huvudorsak till nedgången. Detta skulle kunna indikera om åtgärder i närområdet eller någon annanstans i Östersjöns avrinningsområde skulle vara mest effektivt. Alternativt behöver åtgärder implementeras på en helt annan skala, om meteorologiska eller klimatrelaterade faktorer är huvudorsaken. Hypoteserna utvärderades med data från miljöövervakningsprogram kombinerat med hydrografisk modellering.

Studien visar att klimatrelaterade faktorer som temperatur och DOC kan förklara en signifikant del av de minskande syrehalterna, men även att inflöde av syrefattigt vatten från Egentliga Östersjön troligen har bidragit. Däremot finns det inga tecken på ökad lokal tillförsel av näringsämnen eller ökad övergödning under den undersökta perioden.

### 1.4 STUDIEOMRÅDE

Bottniska viken består av fyra delbassänger; Ålands Hav, Skärgårdshavet, Bottnhavet och Bottenviken. Bottnhavet är den näst största bassängen i Östersjön och utgör ungefär en femtedel av Östersjöns totala volym (Leppäranta & Myrberg 2009). Medeldjupet är 66 m och Bottnhavet separeras från Bottenviken i norr av Norra Kvarken och från Egentliga Östersjön i söder av Södra Kvarken. Både Norra och Södra Kvarken är grunda trösklar som begränsar flödet

mellan bassängerna, och därmed har stark påverkan på vattenförhållandena i området. Det begränsade vattenutbytet med de sydligare delarna av Östersjön sammantaget med det stora inflödet av sötvatten från älvarna i Bottniska viken gör att Bottenhavets karaktär skiljer sig från Egentliga Östersjön.

Utbytet av vatten mellan Bottenhavet och Egentliga Östersjön har framförallt undersökts genom vattenbalansstudier eftersom direkta mätningar inte finns att tillgå. Färskvatteninflödet till Bottniska viken blandas med havsvatten och når Egentliga Östersjön som ytvatten med låg salthalt, medan Egentliga Östersjöns djupvatten går motsatt väg via bottenströmmar genom Ålands hav.

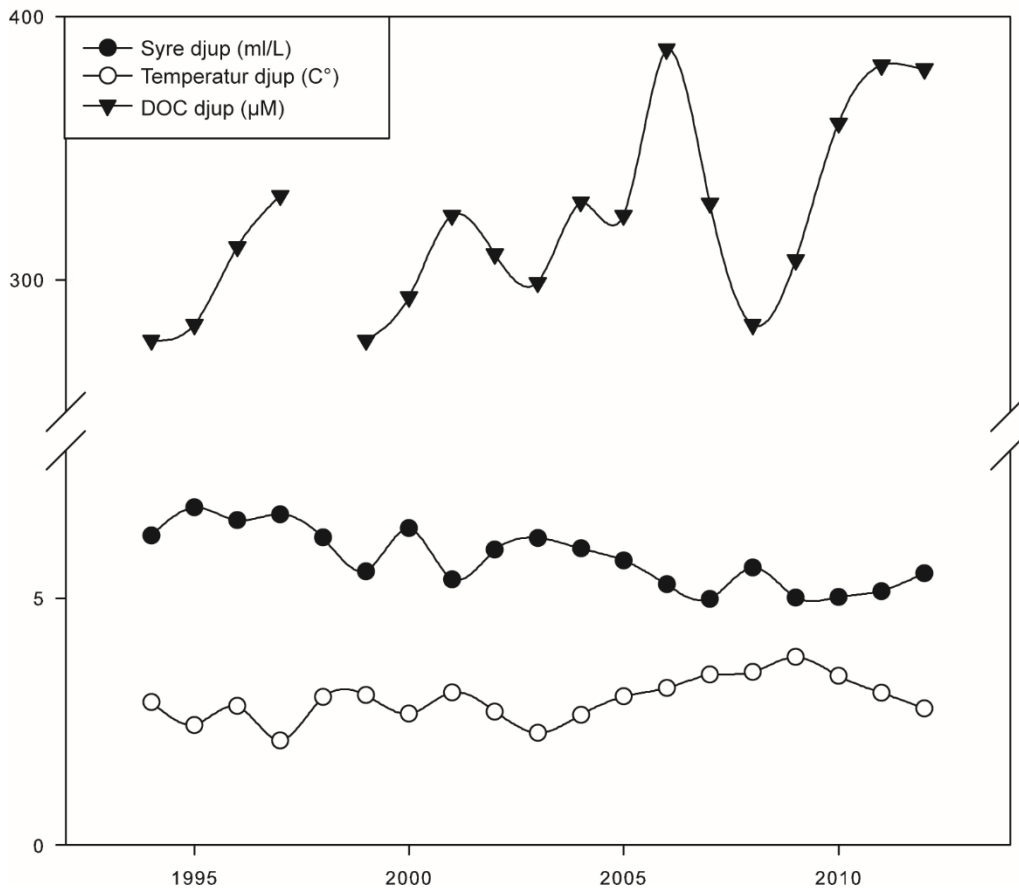
## 1.5 METODER

I studien analyserades tidsserier och data från den nationella miljöövervakningen, samt modellanalys av hydrografiska processer och trender utifrån miljöövervaknings- och forskningsdata. För detaljerad information om de använda metoderna inklusive statistik, se bilaga 1.

## 2 RESULTAT

### 2.1 ASSOCIATIONS- OCH TRENDANALYSER AV TIDSSERIER

Minskande trender påvisades för syre, sedimentation och bakterietillväxt i djupvattnet, medan ökande trender påvisades för DOC (både djup och ytvatten),  $\text{PO}_4$  (både djup och ytvatten), Tot-P (djupvatten), temperatur (djupvatten) och bakteriell biomassa (ytvatten) (figur 2 samt tabell 1 i bilaga 2). Inga andra prediktorer visade signifikanta trender för den undersökta tidsperioden.



Figur 2. Tidsserier för årsvärden för syre ( $\text{ml l}^{-1}$ ), DOC ( $\mu\text{mol l}^{-1}$ ) och temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ ) i Bottenhavets djupvatten 1994–2012 (Stationer C1, C3 and C14). Notera den brutna Y-axeln och att parametrarna använder olika enheter på samma axel. Alla variabler uppvisade signifikanta monotona trender enligt Mann-Kendall test (tabell 1 i bilaga 2).

På bassängskala visade stegvis multipel regressionsanalys att ökad temperatur i kombination med högre DOC halter förklarade så mycket som 81% av förändringen i syrehalterna i Bottenhavets djupvatten (tabell 2 i Bilaga 2). Tot-N, PO<sub>4</sub> och bakterietillväxt i ytvattnet visade signifikant samband med syrehalterna på bassängnivå, men förlorade sin signifikans och exkluderades när klimatrelaterade faktorer lades till i modellen. Även sedimentation uppvisade ett signifikant samband med syrehalterna, men sambandet var positivt i kontrast med hypotesen (dvs. negativ, att ökad sedimentation orsakar minskade syrehalter).

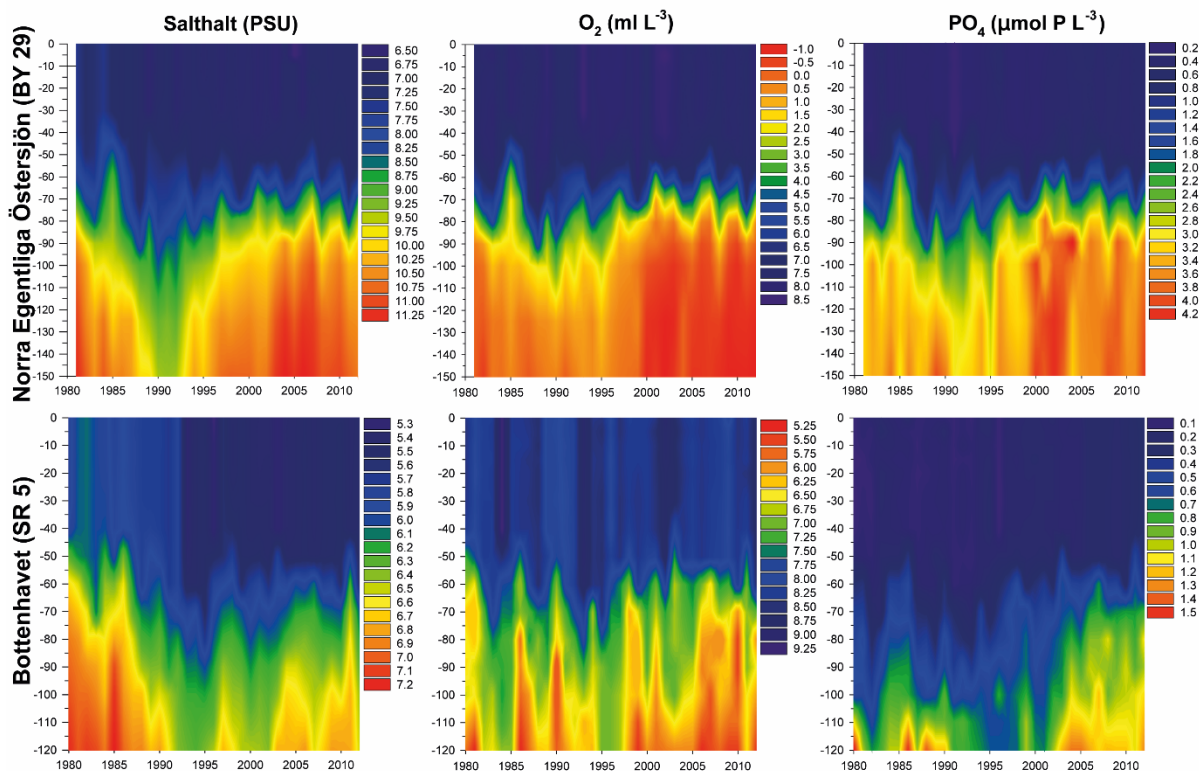
Temperatur och DOC var även signifikanta prediktorer när data analyserades på stationsnivå. Salthalt var endast en signifikant prediktor på stationsnivå i ett test utan temperatur och DOC i modellen. Vidare visade täthet i vattenmassan signifikant korrelation med syrehalterna, dock med en eftersläpning på två år, och endast på station C3. Ingen annan prediktor visade signifikanta samband med syre på vare sig bassäng eller stationsnivå.

Eftersom ett samband inte nödvändigtvis behöver innebära en förklarande trend så undersöktes om tecknet på trenderna överensstämde med studiens hypoteser. Syrehalterna i Bottenhavets djupvatten uppvisade en negativ trend på 1% år<sup>-1</sup> från 1994 till 2012 (figur 2, tabell 2 i bilaga 2). Signifikant positiva trender av samma storleksordning påvisades hos temperatur och DOC, vilket visar att de påvisade sambanden har möjlighet att förklara den minskande trenden hos syrehalterna.

## 2.2 JÄMFÖRELSE MELLAN NORRA EGENTLIGA ÖSTERSJÖN OCH BOTTENHAVET

Jämförelsen mellan längre tidsserier med vintervärden från stationerna SR5 och BY29 visade att salthalt, syre och fosfat i djupvattnet har haft en liknande utveckling över tid (figur 3). Två perioder med hög salthalt i djupvattnet i Egentliga Östersjön (1980–1989 och 1993–2012) åtföljdes av sjunkande syrehalter och ökande fosfatnivåer. Liknande utveckling, men mindre distinkt, kan urskiljas i Bottenhavets djupvatten. Perioden med högre syrehalt i Östersjön orsakades av en succesiv försvagning av saltklinien från 1980 till 1993 när ett större inflöde av kallt högsalint och syresatt vatten från Kattegatt inträffade.

Salthalten var lägre i Bottenhavets bottenvatten (100–120 m vid SR5) än vid både 40-50m och 60-70m i norra Egentliga Östersjön. Syre och fosfathalter låg generellt mellan motsvarande koncentrationer vid 40–50m och 60–70m i Egentliga Östersjön. Bristen på bättre överensstämmelse indikerar att även lokala processer bidrar till syrehaltsminskning och fosforfrisättning i Bottenhavet, och inte enbart påverkan från inflöde från Egentliga Östersjön. Den enda signifikanta regressions sambandet mellan Bottenhavets djupvatten och norra Egentliga Östersjöns vatten vid saltklinien var för salthalt ( $r^2 = 0,42$ ,  $p < 0,001$ ) vid 40-50 m på BY29. Sambanden förbättrades inte nämnvärt om mätdata från Bottenhavet försköts ett år för att ta hänsyn till transporttiden mellan bassängerna.



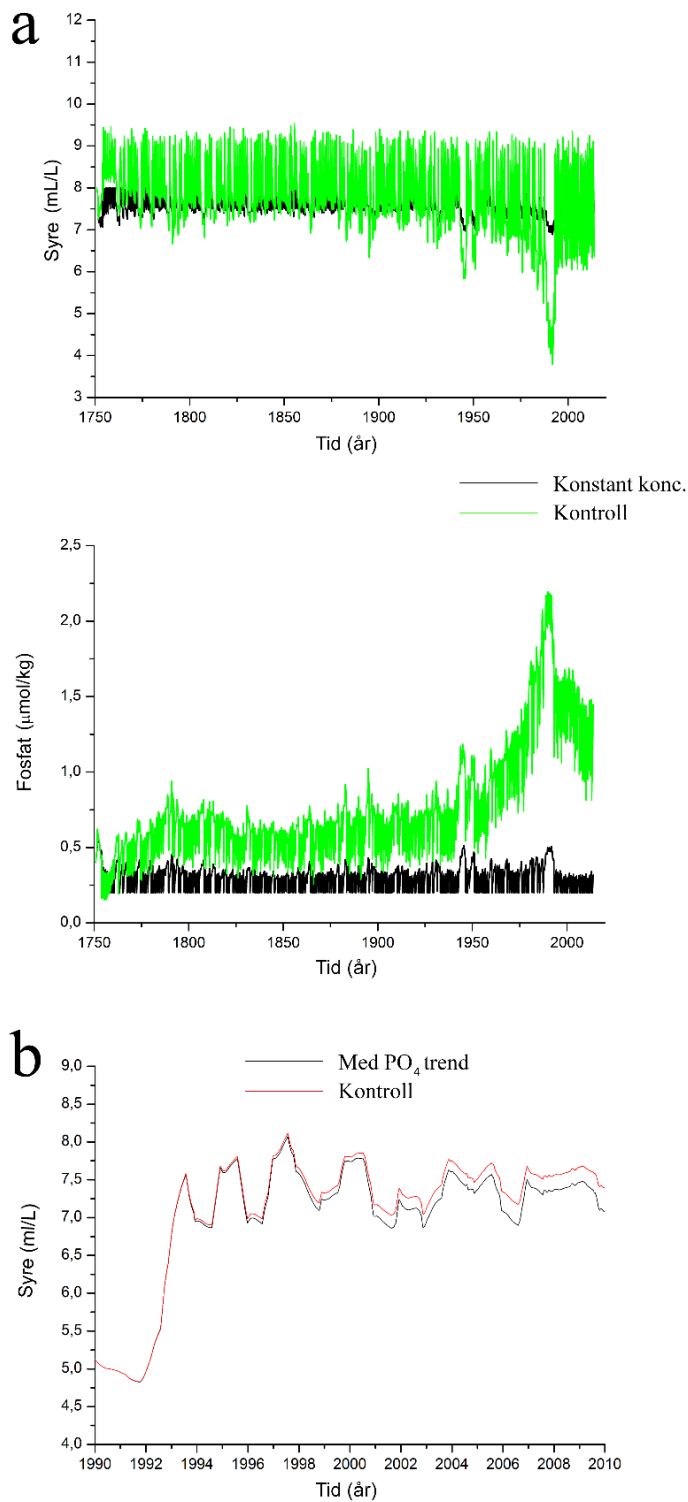
Figur 3. Primärdata som isopleth-diagram för vintervärden av salthalt, syrehalt and fosfathalt för norra Egentliga Östersjön (BY29) och Bottenhavet (SR5). Tid (år) på den horisontella axeln, och djup (meter) på den vertikala, vilket visas som negativa värden med ökande djup. Notera de olika skalorna i panelerna.

## 2.3 MODELLERING

Kontrollkörningen visade att en stark nedgång i salthalt i Bottenhavet under 80- och 90-talen var kopplad till en lång stagnationsperiod i Egentliga Östersjön, ett decennium utan något större inflöde av syre- och saltrikt vatten från Atlanten (figur 4).

Påverkan från det inflödande vattnet från Egentliga Östersjön på Bottenhavet undersöktes genom att jämföra kontrollkörningen med experiment 1, där de biogeokemiska egenskaperna i Egentliga Östersjön hölls konstanta. Resultaten visade inga förändringar för egenskaperna hos bottenvattnet i Bottenhavet (figur 4a).

För att undersöka de variationer i kontrollkörningen som experiment 1 inte kunde förklara adderades en ökande fosfattrend till modellen (experiment 2). Denna trend motsvarade den ökning på  $0.03 \mu\text{mol PO}_4 \text{ l}^{-1} \text{ år}^{-1}$  som övervakningsdata visat under den perioden 1990–2014 i norra Östersjön och adderade alltså endast fosfat till det inflödande vattnet från Egentliga Östersjön. Resultatet av detta var en korrelerad minskning av syrehalterna i Bottenhavet (figur 4b), och slutsatsen kan därför dras att förhållandena i Egentliga Östersjön har potential att påverka syrestatusen i Bottenhavet.



Figur 4. Resultat av modelleringskörningar med PROBE-Baltic version 3.2. a) Simulerade syre och fosfatkoncentrationer i Bottenhavets bottenvatten från kontrollkörning (svart linje) och körningen med konstanta värden för näringsämnen, kol och syre i det inflödande vattnet (grön linje). b) Simulerade syrekoncentrationer i Bottenhavets bottenvatten från kontrollkörning (svart linje) och körningen med ökande fosfattrend (röd linje).

### 3 DISKUSSION

Målet med denna studie var att klargöra de drivande faktorerna bakom uppkomsten av syrebrist i en större havsbassäng, inkluderande både klimatrelaterade faktorer, vattentransport mellan bassänger och möjlig påverkan från mänskligt orsakad närsaltsbelastning. Detta är en viktig fråga att besvara för att kunna erbjuda bästa möjliga vetenskapliga underlag för besluts hos berörda myndigheter, och undvika miljöproblem såsom ökande cyanobakterieblomningar, försämrade villkor för bottenfauna och ökad internbelastning av fosfat.

Den påvisade nedgången av syrehalter i Bottenhavets djupvatten förklarades primärt av en temperaturhöjning, och delvis även av en ökning av löst organiskt kol (DOC) i vattnet ( $R_{Adj.}^2 = 0.81$ , tabell 2 i bilaga 2). Detta var giltigt både på bassäng och stationsskala, vilket visar att slutsatsen är oberoende av spatiell skala. Både temperatur och DOC är kopplade till observerade och beräknade klimatförändringar. Eftersom ingen av de testade övergödningrelaterade prediktorerna visade signifikans när klimatrelaterade faktorer inkluderades, och det inte finns någon indikation på ökad regional närsaltsbelastning (Sonesten 2014), är det inte troligt att ökad lokal tillförsel av näringsämnen förklarar någon större del av syrehaltsminskningen i området. Regionala åtgärder för att minska närsaltskoncentrationerna är därför sannolikt inte effektiva för att motverka syrehaltsminskningen i Bottenhavet, men kan fortfarande vara viktiga på en lokal skala i områden känsliga för övergödning.

Temperatur och DOC påverkar troligen syrenivåerna framförallt genom att gynna syrekonsumtion, d.v.s. respiration. Dessa faktorer har individuellt visat sig öka planktonrespiration, både i det aktuella området och i andra marina miljöer (e.g., Nydahl et al. 2013, Panigrahi et al. 2013). Det är dock inte fastställt om den ökande temperaturen och höjda DOC-halterna beror på regionala förändringar inom Bottenhavet och/eller inflöde av vatten med högre temperatur och högre DOC-halter från Egentliga Östersjön.

Även om den observerade temperaturökningen under den undersökta perioden var förhållandevis liten skulle den räcka för en signifikant ökning i respiration om temperaturkänsligheten (e.g.  $Q_{10}$ -faktorn) var tillräckligt hög. Om nyligen observerade  $Q_{10}$ -värden för Bottenhavets kustområden är applicerbara även för utsjön så skulle en temperaturändring på 0.78 °C (1994–2012) innebära en ökning av respirationstakten med 29 %, vilket visar att även en liten temperaturökning kan ha en stor effekt på processerna i djupvattnet.

Det bör även noteras att en temperaturökning innebär att syrets löslighet i vattnet minskar. Dock visar beräkningar att i detta fall är den uppmätta syrehaltsminskningen i Bottenhavets djupvatten betydligt större än vad den minskade temperaturberoende lösligheten kan förklara.

Förhöjda DOC-nivåer kan bero på både ökad primärproduktion och avrinning från land. Enligt Erlandsson et al. (2008) har DOC koncentrationerna i svenska floder ökat och även övervakningsdata visar en signifikant ökning av den DOC som når havsbassängerna (Sonesten 2014). För Bottenhavet uppvisar växtplanktonproduktion en signifikant ökande trend under perioden 1994–2012, vilket indikerar att även detta är en källa till ökad DOC i området (tabell 1 i Bilaga 2). Ökad växtplanktonproduktion kan dock inte på egen hand förklara en signifikant del av syrehaltsminskningen under studieperioden (tabell 2 i bilaga 2).

Vatten från Egentliga Östersjön, i huvudsak från över saltklinen, transporteras norrut till bassängerna i Bottniska viken (Raateoja 2013). En av hypoteserna för studien var att de biogeokemiska förutsättningarna i Egentliga Östersjön kunde påverka syreförhållandena i Bottenhavet. De låga syrehalterna i Egentliga Östersjöns djupvatten anses ofta bero på övergödning (e.g. Funkey et al. 2014), men syrebristsyrebrist i Egentliga Östersjön beror också till stor del av variationer i inflöden över de Danska sunden (Savchuk 2010). Periodiska inflöden av kallt, högsalint och syrerikt Atlantvatten ersätter periodiskt djupvattnet i Egentliga Östersjön med syrerikt vatten, men en längre stagnationsperiod utan större inflöden sedan början av 90-talet har resulterat i stora arealer av syrebristsyrebrist och syrefrihet. Jämförelsen mellan stationerna SR5 och BY29 visade på likheter mellan djupvattnet i norra Egentliga Östersjön och Bottenhavet, med två stagnationsperioder med högre salthalter, minskande syrehalter och ökande fosfathalter (figur 3).

Syre och fosfathalterna i SR5:s djupvatten ligger mellan de motsvarande koncentrationerna på 40–50 m och 60–70 m djup vid BY29 i Egentliga Östersjön, medan salthalten i djupvattnet i Bottenhavet är lägre än i de bägge lagren i Egentliga Östersjön. Det innebär att halterna i Bottenhavets djupvatten inte enbart kan förklaras av inflöden. Tröskeldjupet som separerar norra Egentliga Östersjön från Ålands hav anses generellt vara 45 m, men det råder en viss osäkerhet om detta värde och inflöden från djup upp till 70 m kan möjligen förekomma (Rolff & Elfving 2015). Sammantaget innebär detta att även lokala processer med största sannolikhet är viktiga för syreminskning och fosforfriläggning i Bottenhavets djupvatten, vilket stödjer vikten av lokal påverkan av temperatur och DOC enligt tidigare resonemang.

Modelleringsresultaten understryker påverkan från Egentliga Östersjön på Bottenhavets djupvatten. En jämförelse av de olika modellkörningarna visar att utan någon form av interaktion mellan bassängerna skulle Bottenhavet se väldigt annorlunda ut mot vad det gör idag (figur 4). Dataassimileringskörningen är betydligt mer lik kontrollkörningen än vad konstantkörningen är, vilket tydliggör betydelsen av inflöden från Egentliga Östersjön för Bottenhavets biogeokemiska status och därmed också dess närings- och syreförhållanden. Sammantaget ger jämförelsen mellan SR5 och BY29 och modelleringsresultaten en god indikation på att inflödande vatten från mellanlagret i Egentliga Östersjön har potential att påverka kvaliteten hos Bottenhavets djupvatten. Detta är ett exempel på fördelarna med att kombinera statistisk analys av observationer medmodellering, något som hittills använts mycket sparsamt inom marin forskning.

Tidigare modelleringsstudier har visat att både temperatur och ökad produktion av organiskt material (genom t ex övergödning) kan förklara minskande syrehalter, med näringsämnestillskott som huvudförklaring (Carstensen et al. 2014). Savchuk (2010) förordade istället klimatrelaterade faktorer och saltvattensinflöden till Östersjön som huvudförklaringsfaktorer för syrebristsyrebrist, medan Kemp et al (2009) påpekade vikten av både närsaltsbelastning och klimatfaktorer för att förstå processerna bakom sådan utveckling av syrebrist. Således kan både klimatrelaterade faktorer, vattenutbyte och ökad näringsbelastning övervägas som drivande orsaker bakom marin syrebristsyrebrist, vilket även stämmer med resultaten från denna studie. Resultaten från denna studie är även i linje med studier fokuserade på syreminskningar på global nivå, där Matear & Hirst (2003) konstaterade att klimatförändringar kommer att leda till minskande syrehalter både vid och under termoklinen, och Keeling et al (2010) förutspår en 1–7 % minskning av oceanernas syreförråd under det närmaste århundradet på grund av klimatförändringar.



Vår slutsats att temperatur är en viktig faktor för utvecklingen av syrehalter i Bottenhavet är även i linje med nuvarande bilden av respirationskontroll. Ekosystemanalyser av estuarier har visat att både temperatur och tillgång på organiskt material var signifikanta faktorer för respiration (Hopkinson & Smith 2005). Temperatur och koltillgång har även visats kontrollera respiration i både fullt salina miljöer och i Bottenhavet (Lopez-Urrutia & Moran 2007, Nydahl et al. 2013). De minskande syrehalterna kan därmed både vara orsakad av ökad respiration i själva Bottenhavet, men även bero på förhöjd respiration i Egentliga Östersjön och inflöde av syrefattigt och fosfatrikt vatten därifrån. Den höga förklaringsgraden givet av temperatur och DOC i den här studien indikerar att interna processer dominerar, men det är troligt att inflöde från Egentliga Östersjön också har bidragit.

Baserat på resultaten i den här studien blir slutsatsen att strategier för att vända trenden med minskande syrehalter i Bottenhavets djupvatten framförallt beror på åtgärder för att minska de globala koldioxidutsläppen som ger upphov till uppvärmning och ökad nederbörd i området. Dock bör det även påpekas att det är av vikt att minimera utsläpp av näringsämnen i Bottenhavets och Egentliga Östersjöns avrinningsområden för att säkerställa att övergödningssituationer inte förvärras i framtiden.

## REFERENSER

- Ahlgren, J., and A. Palmbo-Bergman. 2014. Oceanografi, p. 47-50. In M. Svärd, T. Johansen and M. Lewander [eds.], Havet 2013/14. The Swedish Agency for Marine and Water Management and The Swedish Environmental Protection Agency
- Carstensen J, Andersen JH, Gustafsson BG, Conley DJ (2014) Deoxygenation of the Baltic Sea during the last century. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 111: 5628-5633.
- Chan, F., J. A. Barth, J. Lubchenco, A. Kirincich, H. Weeks, W. T. Peterson, and B. A. Menge. 2008. Emergence of anoxia in the California current large marine ecosystem. *Science* 319: 920-920.
- Conley, D. J., S. Bjorck, E. Bonsdorff, J. Carstensen, G. Destouni, B. G. Gustafsson, S. Hietanen, M. Kortekaas, H. Kuosa, H. E. M. Meier, B. Muller-Karulis, K. Nordberg, A. Norkko, G. Nurnberg, H. Pitkanen, N. N. Rabalais, R. Rosenberg, O. P. Savchuk, C. P. Slomp, M. Voss, F. Wulff, and L. Zillen. 2009. Syrebrista-Related Processes in the Baltic Sea. *Environ Sci Technol* 43: 3412-3420.
- Diaz, R., and R. Rosenberg. 2008. Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *Science*: 926-929.
- Edman MK, Anderson LG (2014) Effects on pCO<sub>2</sub> by Phytoplankton Uptake of Dissolved Organic Nutrients in the Central and Northern Baltic Sea, a Model Study. *J. Marine Systems*, in press.
- Erlandsson M, Buffam I, Fölster J, Laudon H, Temnerud J, Weyhenmayer GA, Bishop K (2008) Thirty-five years of synchrony in the organic matter concentrations of Swedish rivers explained by variation in flow and sulphate. *Glob. Change Biol.* 14: 1191-1198.
- Funkey CP, Conley DJ, Reuss NS, Humborg C, Jilbert T, Slomp CP (2014) Syrebrista Sustains Cyanobacteria Blooms in the Baltic Sea. *Environ Sci Technol* 48: 2598-2602.
- Helcom (2014). Manual for Marine Monitoring in the COMBINE Programme of HELCOM. <http://helcom.fi/action-areas/monitoring-and-assessment/manuals-and-guidelines/combine-manual/>
- Hirsch, R. M., and J. R. Slack. 1984. A non-parametric trend test for seasonal data with serial dependence. *Water Resources Research* 20: 727-732.
- Hopkinson CS, Smith EM (2005). Estuarine respiration: an overview of benthic, pelagic and whole system respiration. *Respiration in aquatic ecosystems*. P. A. del Giorgio and P. J. Williams, leB. New York, Oxford University Press Inc.: 122-146.
- Keeling, R. F., and H. E. Garcia. 2002. The change in oceanic O<sub>2</sub> inventory associated with recent global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 99: 7848-7853
- Keeling R. F, Koertzinger A, and Gruber N.(2010). Ocean deoxygenation in a warming world, *Ann. Rev. Mar. Sci.*, 2, 199–229, doi:10.1146/annurev.marine.010908.163855, 2010.

- Kemp, W. M., W. R. Boynton, J. E. Adolf, D. F. Boesch, W. C. Boicourt, G. Brush, J. C. Cornwell, T. R. Fisher, P. M. Glibert, J. D. Hagy, L. W. Harding, E. D. Houde, D. G. Kimmel, W. D. Miller, R. I. E. Newell, M. R. Roman, E. M. Smith, and J. C. Stevenson. 2005. Eutrophication of Chesapeake Bay: historical trends and ecological interactions. *Marine Ecology Progress Series* **303**: 1-29.
- Kemp WM, Testa JM, Conley DJ, Gilbert D, Hagy JD (2009) Temporal responses of coastal syrebrista to nutrient loading and physical controls. *Biogeosciences* **6**: 2985-3008.
- Lopez-Urrutia A, Moran X AG (2007) Resource limitation of bacterial production distorts the temperature dependence of oceanic carbon cycling. *Ecology* **88**(4): 817-822.
- Matear R. J. and Hirst A. C. Long-term changes in dissolved oxygen concentrations in the ocean caused by protracted global warming, *Global Biogeochem. Cycles*, **17**(4), 1125, doi:10.1029/2002GB001997, 2003.
- Meier, H. E. M. 2006. Baltic Sea climate in the late twenty-first century: a dynamical downscaling approach using two global models and two emission scenarios. *Clim. Dynam.* **27**: 39-68.
- Meier, H. E. M., H. C. Andersson, K. Eilola, B. G. Gustafsson, I. Kuznetsov, B. Muller-Karulis, T. Neumann, and O. P. Savchuk. 2011. Syrebrista in future climates: A model ensemble study for the Baltic Sea. *Geophysical Research Letters* **38**
- Nydahl A, Panigrahi S, Wikner J (2013) Increased microbial activity in a warmer and wetter climate enhances the risk of coastal syrebrista. *FEMS Microbiol. Ecol.* **85**: 338-347.
- Omstedt A, Axell L (2003) Modeling the variations of salinity and temperature in the large Gulfs of the Baltic Sea. *Continental Shelf Research* **23**: 265-294. DOI [10.1016/S0278-4343\(02\)00207-8](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(02)00207-8)
- Omstedt, A., (2015). Guide to process based modelling of lakes and coastal seas. Second Edition. Springer-Praxis books in Geophysical Sciences, DOI 10.1007/978-3-319-17990-2. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Omstedt A, Humborg C, Pempkowiak J, Pertillä M, Rutgersson A, Schneider B, Smith B (2014) Biogeochemical Control of the Coupled CO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> System of the Baltic Sea: A review of the results of Baltic-C. *Ambio*, **43**: 49-59. DOI 10.1007/s13280-013-0485-4
- Panigrahi S, Nydahl A, Anton P, Wikner J (2013) Strong seasonal effect of moderate experimental warming on plankton respiration in a temperate estuarine plankton community. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* **135**: 269-279.
- Raateoja M (2013) Deep-water oxygen conditions in the Bothnian Sea. *Boreal Environmental Research*, **18**: 235-249.
- Rabalais, N. N., R. J. Diaz, L. A. Levin, R. E. Turner, D. Gilbert, and J. Zhang. 2010. Dynamics and distribution of natural and human-caused syrebrista. *Biogeosciences* **7**: 585-619.
- Rolff C and T Elfving (2015) Increasing nitrogen limitation in the Bothnian Sea, potentially caused by inflow of phosphate-rich water from the Baltic Proper. *Ambio* **44**:601-611
- Savchuk OP (2010) Large-Scale Dynamics of Syrebrista in the Baltic Sea Chemical Structure of Pelagic Redox Interfaces: Observation and Modeling. E. V. Yakushev. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag.

Sonesten L (2014) Belastning på havet. Havet 2013/2014. M. Svärd, T. Johansen and M. Lewander, Havsmiljöinstitutet: 1-104.

Viktorsson, L., E. Almroth-Rosell, A. Tengberg, R. Vankevich, I. Neelov, A. Isaev, V. Kravtsov, and P. O. J. Hall. 2012. Benthic Phosphorus Dynamics in the Gulf of Finland, Baltic Sea. *Aquatic Geochemistry* **18**: 543-564.

## BILAGA 1: METODER

### DATAKÄLLOR

Det använda datasetet sträckte sig från 1994 till 2012, med 10 provtagningar per år på 1, 5, 10, 40, 60, 80, 150 och 190 m, samt maximalt djup på respektive station. Hydrografiska, kemiska och biologiska variabler sammanställdes från öppna nationella miljöövervakningsdata arkiverade i databaserna dBotnia vid Umeå marina forskningscentrum (<http://www.umf.umu.se/english/>) och SHARK vid SMHI (<http://www.smhi.se/klimatdata/oceanografi/havsmiljodata>). Undersökta variabler inkluderade salt, densitet, fosfor (total (Tot-P) och oorganisk (PO<sub>4</sub>)), kväve (total (Tot-N) och oorganiska (DIN, bestående av NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub> och NH<sub>4</sub>)), temperatur, klorofyll, DOC, växtplanktonproduktion, bakteriebiomassa, bakterieproduktion, pH och sedimentation. Prover inom miljöövervakningen tas med Niskinhämtare, utom för klorofyll och växtplankton där en 10 m slang används för ett integrerat prov. Hydrografiska variabler mättes med CTD-sond (Seabird, USA), närsalter enligt Grashoff et al (1999), DOC genom katalytisk oxidation vid hög temperatur (Sugimura and Suzuki 1988), pH med pH-meter vid 25 °C (Helcom 2014) och syre genom Winklertitrering (Grasshoff et al. 1983). Klorofyll mättes med fluorometri i etanolextrakt (Helcom 2014), växtplanktonproduktion med <sup>14</sup>C upptag (Andersson et al. 1996, Riegman et al. 1990), bakteriebiomassa med direktmikroskopi (Blackburn et al. 1998) och bakterieproduktion genom tymidinupptag (Smith and Azam 1992).

Årsvärden för bassängen beräknades genom aggregering av stationerna C1, C2 och C14 genom att använda medianvärden för 0-10m (ytvatten) och >80m (djupvatten). Multipel regression utfördes även på individuella stationer för att verifiera resultaten på en spatiell skala.

Förutom ovanstående analys av data från C-stationerna gjordes även en jämförelse på vintervärden mellan stationerna SR5 och BY29. Dessa stationer är belägna på var sin sida om Södra kvarken som separerar Bottenhavet från Egentliga Östersjön, och är därför lämpliga för att i kombination med modellering undersöka vikten av inflöde från Egentliga Östersjön för de minskande syrehaltererna i Bottenhavet.

### STATISTISKA METODER

Temporala trender för de undersökta parametrarna testades med ett Mann-Kendall test (Hirsch and Slack 1984) på aggregerade värden från djupvattnet. Analysen utfördes med programvaran Multitest (<http://www.miljostatistik.se/mannkendall.html>, Linköpings Universitet).

Alla variabler standardiserades till samma skala genom beräkning av z-med ett medelvärde av 0 och en standardavvikelse av 1 (SPSS<sup>TM</sup>). Normalitetstest (Shapiro-Wilks) och stam-och-bladdiagram visade ingen avvikelse från normalfördelning.

Stegvis multipel-regression kördes med syrekoncentrationer som målvariabel, och prediktorer valdes enligt hypoteserna ovan. Sannolikheten att lägga till prediktorer sattes till 0.05 och att ta bort 0.1.

För jämförelsen mellan SR5 och BY29 utfördes tidsserie-regression för salt, syre och fosfat för djupen 40–50 m och 60–70 m vid BY29 (ovanför respektive nedanför skiktningdjupet på ca 60 m i Egentliga Östersjön) samt för det djupaste vattnet vid SR5 (100–120 m).

## MODELLERING

För att undersöka potentiell påverkan av inflöde från Egentliga Östersjön tillämpades PROBE-Baltic version 3.2, inklusive en fullt kopplad fysisk-biogeokemisk model med DOC från både terrestra och marina källor (Edman and Anderson, 2014). Vidare beskrivning av den fysiska modellen finns i Omstedt och Axell (2003), och en ingående beskrivning av detaljerna för hur modellen applicerades i denna studie finns i Ahlgren et al (2016).

Analysen omfattade tidsspannet 1750–2014 och täckte därmed in både klimatförändringar och modern övergödning i form av ökade näringsämnesutsläpp. Modellen finns tillgänglig i Omstedt (2015).

Tre numeriska experiment utfördes för denna studie:

1. En referenskörning (kontroll) enligt Edman & Anderson (2014), där hela modellen används och inga speciella förutsättningar är tillagda.
2. En biogeokemisk konstantkörning (experiment 1), där den fysiska delen av cirkulationen var aktiv och konstanta värden för näringsämnen, kol och syre i det vatten som flödar in i Bottenhavet genom Ålands hav.
3. En dataassimileringskörning (experiment 2), där en ökande trend i fosfat på  $0.03 \mu\text{mol PO}_4 \text{ l}^{-1} \text{ år}^{-1}$  enligt uppmätta värden lades till för 1990–2014 för att redogöra för den variation konstantkörningen inte förklarade.

## BILAGA 2: TABELLER

Tabell 1. Mann-Kendall tester för trender i tidsserier (1994–2012) i Bottenhavets yt- och djupvatten. Aggregerade årsdata från stationerna C3 och C14 användes (även C1 1994–1999). Ett, två eller tre plus eller minustecken korrelerar till p-värden på respektive 0.05, 0.01 och 0.001.

Variable	MK statistik	p-värde (tvåsidig)	Signifikans kod	Lutning (ändring/år)	Median
PO <sub>4</sub> P yt (µM)	98	0.0006	+++	0.0074	0.25
Tot-N djup (µM)	125	0.0000	+++	0.1980	21.32
SiO <sub>4</sub> djup (µM)	105	0.0002	+++	0.7952	32.62
DOC djup (µM)	68	0.0098	++	4.6000	318.50
SiO <sub>4</sub> yt (µM)	91	0.0015	++	0.4940	18.94
DOC yt (µM)	78	0.0013	++	4.5929	323.25
pH surface	41	0.0425	+	0.0110	7.98
Tot-N yt (µM)	73	0.0107	+	0.0595	16.81
Bakt. Biomassa yt (cells l <sup>-1</sup> )	71	0.0130	+	0.7125	31.02
Temperatur djup (°C)	67	0.0191	+	0.0421	3.00
Tot-P djup (µM)	63	0.0275	+	0.0259	1.04
PO <sub>4</sub> P djup (µM)	61	0.0328	+	0.0184	0.88
Syre djup (ml/l)	-105	0.0002	---	-0.0845	5.76
Syremättnad djup (%sat)	-115	0.0001	---	-1.0078	63.91
Sedimentation (g m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	-89	0.0018	--	-2.0257	37.45
Bakt tillväxt djup (cells l <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> )	-65	0.0197	-	-0.0115	0.36
Temperatur yt (°C)	-13	0.6492		-0.0488	5.33
Salt yt (psu)	-55	0.0543		-0.0157	5.26
DIN yt (µM)	-18	0.4951		-0.0219	4.04
Tot-P yt (µM)	37	0.1955		0.0024	0.33
Humus yt (µg/l)	-14	0.3930		-0.0625	10.10
Klorofyll A yt (µg/l)	5	0.8611		0.0150	1.68
Plankton Photosyntes (µg C l <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> )	43	0.1034		1.5467	38.91
Bakt tillväxt yt (cells l <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> )	13	0.6488		0.0200	1.96
Bakt Resp yt (µmol O <sub>2</sub> l <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> )	15	0.5997		0.0146	2.91
Salt djup (psu)	25	0.3818		0.0090	6.07
Densitet djup (kg m <sup>-3</sup> )	-11	0.7004		-0.0029	1005.50
DIN djup (µM)	38	0.1834		0.0408	7.63
Humus djup (µg/l)	3	0.8695		0.0125	11.33
Klorofyll A djup (µg/l)	7	0.8065		0.0066	1.47
Bakt Biomassa djup (cells l <sup>-1</sup> )	48	0.0929		0.2897	18.24
Bakt Resp djup (µmol O <sub>2</sub> l <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> )	-53	0.0637		-0.0241	1.01

Tabell 2. Förklaringsmodeller för data aggregerad på havsbassängnivå ( $n=19$ , stationer C1, C3 och C14), när  $z$ -värden testades genom stegvis multipel regression för syrekoncentrationer (beroendevariabel) i djupvatten ( $>80$  m) i Bottenhavet. När två olika signifikanta modeller blev resultatet visas båda, dessutom presenteras även tester som inte gav någon signifikant modell.

Förklaringsmodell	Prediktor	Adj. $R^2$	$p$	Lutnings- koeff.	$\pm$ SE	Intercept	$\pm$ SE	Std. lutn koeff.	Djup faktorer
Klimat <sup>1</sup> Modell I	Temp	0.658	<0,001	-0.812	0.140	-0.044	0.140	-0.823	Djup
Klimat <sup>1</sup> Modell II	Temp	0.810	<0,001	-0.760	0.105	-0.044	0.104	-0.770	
	DOC		0.002	-0.402	0.108			-0.396	
Övergödning <sup>1,2</sup> Modell I	PO <sub>4</sub>	0.240	0.022	-0.699	0.434	0.543	0.457	-0.419	Yt
Övergödning <sup>1,2</sup> Modell II	PO <sub>4</sub>	0.398	0.022	-0.699	0.434	0.543	0.457	-0.419	
	Bakteriell tillväxt		0.009	-0.355	0.291			-0.347	
Klimat/Överg. <sup>3</sup> Modell I	Temp	0.678	<0,001	-0.812	0.140	-0.044	0.140	-0.823	Djup
Klimat/Överg. <sup>3</sup> Modell II	Temp	0.832	<0,001	-0.760	0.105	-0.044	0.104	-0.770	
	DOC	-	0.002	-0.402	0.108	-	-	-0.396	
Skiktning <sup>4</sup>	Densitet	-0.066	0.937	-0.019		-0.145	0.236	-0.021	Djup
Övergödning <sup>2,5</sup>	Primär sedimentation	0.393	0.002	0.653	0.184	6.42E-16	0.179	0.653	30 m

Testade faktorer:

- <sup>1</sup> Z-värde för Temperatur, DOC, Bakteriell Biomassa, Bakteriell tillväxt och Bakteriell Respiration för djupvatten.
- <sup>2</sup> Z-värde för Tot-N, Tot-P, PO<sub>4</sub>, Klorofyll-a, Plankton fotosyntes and Bakteriell tillväxt för ytvatten.
- <sup>3</sup> Z-värde för Temperatur, DOC, Salt (djupvatten), PO<sub>4</sub> (ytvatten) and Tot-N (ytvatten).
- <sup>4</sup> Z-värde för täthet i vattenmassan, förskjuten -2 år.
- <sup>5</sup> Z-värde för Primär sedimentation.



Tabell 3. Förklaringsmodeller för data aggregerad på havsbassängnivå (n=13, utom station C1 med n=6), när z- värden testades genom stegvis multipel regression för syrekoncentrationer (beroendevariabel) i djupvatten (>80 m) i Bottenhavet.

Förklaringsmodell	Prediktor	Adj. R <sup>2</sup>	p	Lutnings- koeff.	±SE	Intercept	±SE	Std. lutn koeff.	Djup faktorer
Klimat <sup>1</sup> Modell I	Temp	0.658	<0,001	-0.812	0.140	-0.044	0.140	-0.823	Djup
Klimat <sup>1</sup> Modell II	Temp	0.810	<0,001	-0.760	0.105	-0.044	0.104	-0.770	
	DOC		0.002	-0.402	0.108			-0.396	
Övergödnings 1 <sup>2</sup> Modell I	PO <sub>4</sub>	0.240	0.022	-0.699	0.434	0.543	0.457	-0.419	Yt
Övergödnings 1 <sup>2</sup> Modell II	PO <sub>4</sub>	0.398	0.022	-0.699	0.434	0.543	0.457	-0.419	
	Bakteriell till- växt		0.009	-0.355	0.291			-0.347	
Klimat/Överg. <sup>3</sup> Modell I	Temp	0.678	<0,001	-0.812	0.140	-0.044	0.140	-0.823	Djup
Klimat/Överg. <sup>3</sup> Modell II	Temp	0.832	<0,001	-0.760	0.105	-0.044	0.104	-0.770	
	DOC	-	0.002	-0.402	0.108	-	-	-0.396	
Skiktning <sup>4</sup>	Densitet	-0.066	0.937	-0.019		-0.145	0.236	-0.021	Djup
Övergödning 2 <sup>5</sup>	Primär Sedimentation	0.393	0.002	0.653	0.184	6.42E-16	0.179	0.653	30 m

Testade faktorer:

<sup>1</sup> Z-värde för Temperatur och DOC.

<sup>2</sup> Z- värde för Temperatur, DOC and salt.

<sup>3</sup> Z- värde för Tot-N, Tot-P, Klorofyll-a, Plankton fotosyntes and bakteriell tillväxt.

<sup>4</sup> Z- värde för salt and täthet.

<sup>5</sup> Z- värde för salt and täthet med förskjutning -2 år.



# Havsmiljöinstitutet

Umeå universitet • Stockholms universitet  
Göteborgs universitet • Linnéuniversitetet  
Sveriges lantbruksuniversitet