

ACTA
REGIAE SOCIETATIS SCIENTIARUM ET LITTERARUM GOTHOBURGENSIS
INTERDISCIPLINARIA 19

BIDRAG TILL KÄNNEDOM AV FINLANDS NATUR OCH KULTUR 216

Vårt gemensamma innanhav

Finskt och svenskt kring Östersjön

Redaktör: Bo Lindberg



Kungl. Vetenskaps- och Vitterhets-Samhället
Finska Vetenskaps-Societeten
Göteborg och Helsingfors 2021

SYREFRITT DJUPVATTEN ACCELERERAR ÖSTERSJÖNS ÖVERGÖDNING

DEN ÅRLIGA BIOLOGISKA PRODUKTIONEN i Östersjön är proportionell mot koncentrationen c_I av det begränsande växtnäringsämnet, vilket är antingen fosfor eller kväve, i ytskiktet vintertid, innan produktionen har kommit igång. Storleken av c_I bestäms av tillförsel av växtnäringsämnet från externa och interna källor och bortförsel till interna sänkor och till Kattegatt genom export med ytvatten. Den biologiska produktionen, som kommer igång under våren när belysningen i ytskiktet har blivit tillräckligt stark, bestämmer vattenkvaliteten. Vanliga mått på vattenkvalité i ytskiktet beskriver siktdjup, koncentration av plankton samt beväxning av grunda bottenar. Cyanobakterier producerar nervgift (BMAA) vilket ackumuleras i näringsväven men också akut kan påverka badande människor och djur. Vid vackert väder under sommaren kan cyanobakterier bilda vidsträckta ansamlingar vid havsytan vilka starkt försämrar vattenkvaliteten.

En del av det organiska material som produceras i ytvattnet sjunker ner i djupvattnet där det ansamlas i sedimentet på botten och långsamt bryts ner, eller mineraliseras, vilket leder till syreförbrukning. Syrekoncentrationen är det viktigaste övergripande måttet på vattenkvalitet i djupvattnet. Alla högre former av liv i vattnet kräver syrgas, bara ett fåtal tolererar en syrgaskoncentration lägre än 2 mg/L.

Avkylning av vattenytan under höst och vinter leder till vertikal omblandning och nedbrytning av den värmskiktning som byggts upp under vår och sommar. Det omblandade ytvattnet blir väl syresatt genom kontakt med atmosfären vid havsytan. Egentliga Östersjön, söder om Bottenhavet, har en permanent saltskiktning (haloklin). Den vertikala höst- och vinteromblandningen hejdas av saltskiktningen samtidigt som omblandningen eroderar toppen av haloklinen så att denna vanligtvis inte når högre upp än till ca 60 m djup. I egentliga Östersjön är salthalten i ytvattnet bara ca 7 (g/kg) mot ca 35 i Nordsjön. Den låga salthalten i Östersjön beror dels på den stora sötvattentillförseln, medelvärde ca $15\,000\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$, dels på att det från Östersjön utströmmade ytvattnet ansamlas i ett tjockt ytskikt i Kattegatt och Bältsjön varifrån det kan strömma tillbaka till Östersjön under perioder med inflöden vilka inträffar då vattenståndet står högre i Kattegatt än i sydvästra Östersjön. Vid inflöden blir det inflödande vattnet successivt saltare efterhand som lagret av Östersjövatten i Kattegatts ytskikt minskar.

Det saltskiktade djupvattnet i egentliga Östersjön får tillskott av syre endast i samband med inströmning av saltare vatten från Kattegatt. Genom medrivning, vilket är en turbulent process i strömmande vatten, blandas ovanförliggande vatten

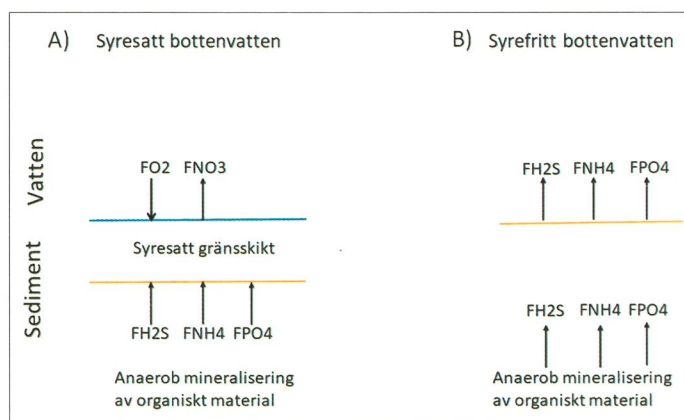
in i det saltare och tyngre vattnet från Kattegatt när detta strömmar in längs botten mot Östersjöns djupa bassänger. På grund av omfattande medrivning är salthalten i Östersjöns djupvatten endast 12–13 trots att inströmmande vatten från Kattegatt vid stora ihållande inflöden kan ha en salthalt i intervallet 20–30. Om det inströmmande vattnet har tillräckligt hög densitet kan det nå stora djup och bilda nytt djupvatten genom att tränga undan och lyfta upp det gamla djupvattnet. Djupvattnet kan bli liggande i upp till tio år innan det blir utbytt. Under denna tid kan dess syreförråd tömmas helt.

SEDIMENTPROCESSER

Anoxi uppstår när förrådet av syre tar slut och mineraliseringen av organiskt material utförs då av anaeroba bakterier vilka använder sulfat (SO_4), en huvudbeståndsdel av havssalt, som oxidationsmedel. Vid anaerob mineralisering av organiskt material som lagrats i sedimentet produceras bland annat svavelväte (H_2S), ammonium (NH_4) och fosfat (PO_4). Hur dessa nedbrytningsprodukter påverkar ovanför liggande bottenvatten beror på huruvida detta är syresatt eller syrefritt. Om bottenvattnet är syresatt diffunderar syre (O_2) in i sedimentet och håller ett skikt närmast bottenvattnet oxiderat, se Figur 1A. I det syresatta gränsskiktet på toppen av sedimentet oxideras ammonium till nitrat (NO_3) och svavelväte till sulfat medan fosfat anrikas och lagras i det syresatta gränsskiktet genom att adsorberas av järnoxider. Kapaciteten att lagra fosfor i det syresatta skiktet ökar om skiktet fördjupas av grävande maskar (*Marenzelleria*) vilka för sin existens kräver att bottenvattnet har tillräckligt hög syrekonzentration. Om bottenvattnet däremot är syrefritt diffunderar nedbrytningsprodukterna svavelväte, ammonium och fosfat från den anaeroba mineraliseringen i sedimentet ut i bottenvattnet där de lagras (Fig. 1B).

Figur 1 Diffusiva flöden (F) mellan bottenvatten och sediment när bottenvattnet är syresatt (A) respektive syrefritt (B). I fall A) adsorberas fosfat (PO_4), som frigörs vid den anaeroba mineraliseringen av organiskt material, av främst järnoxider i det

syresatta gränsskiktet på toppen av sedimentet. I detta skikt oxideras ammonium (NH_4) till nitrat (NO_3) som diffunderar ut i bottenvattnet och svavelväte (H_2S) oxideras till sulfat. I fall B) diffunderar utan hinder i sedimentet frigjord fosfat ut i vattnet tillsammans med svavelväte och ammonium.

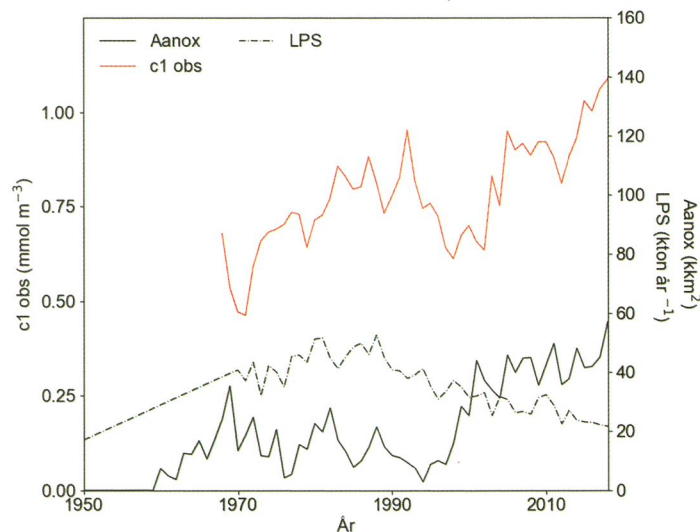


Om bottenvattnet är syresatt fungerar således det syresatta gränsskiktet som en fälla eller filter vilket kvarhåller fosfor som frigörs vid mineralisering av organiskt material inne i sedimentet. Om syresatt bottenvattnet blir syrefritt reduceras järnet i det tidigare syresatta gränsskiktet. Järnet förlorar därmed sin förmåga att adsorbera fosfat varvid frigjord fosfat från gränsskiktet kan diffundera ut till bottenvattnet. Det har därför stor betydelse för fosfors omsättning i Östersjön huruvida bottenvattnet är syresatt eller ej.

SYREFRIA BOTTNAR OCH SYRESKULD I DJUPVATTNET

Fram till slutet av 1950-talet saknades bottenar som täcktes av syrefritt sulfidiskt vatten i egentliga Östersjön. Därefter fluktuerade arean *Aanox* av syrefria bottenar under flera decennier kring 15 000 km² för att vid slutet av 1990-talet ta ett språng till över 40 000 km² då djupvattnet i både Norra och Västra Gotlandsbassängerna blev permanent syrefritt. Rekordåret 2018 var *Aanox* ca 56 000 km² (Figur 2).

Svavelväte och ammonium som ansamlats i det syrefria djupvattnet utgör en syreskuld. För att oxidera en mol svavelväte och en mol ammonium åtgår vardera två mol syre. Genom medrivning och inblandning av gammalt djupvatten med syreskuld orsakas syreförlust i det inströmmande nya djupvattnet. Ju större syreskulden



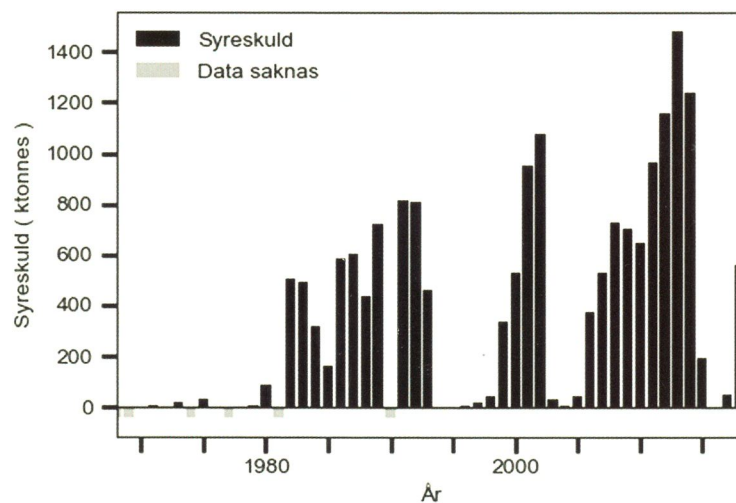
Figur 2 Observerad utveckling i egentliga Östersjön 1950 – 2018 av arean *Aanox* (kilo kvadratkilometer - kkm²) av syrefria bottenar (efter Hansson m.fl., 2019) samt observerad medelkoncentration *c1obs* av fosfor i ytskiktet (0–60 m) vintertid 1968 – 2018 (efter Stigebrandt & Andersson, 2020). Före 1968 mättes fosfor bara sporadiskt men mätningar visar att *c1* var ca 0.25 mmol/m³ i mitten av 1950-talet (Stigebrandt, 2018). *LPS* är tillförseln av fosfor från landbaserade källor till egentliga Östersjön (efter Savchuk, 2018). *LPS*-data före 1970 och efter 2014 är extrapolerade (Stigebrandt & Andersson, 2020).

är i det gamla djupvattnet desto större blir syreförlusten i det nya djupvattnet. Syreskulden i Östra Gotlandsbassängen var försumbar fram till 1960-talet men är sedan dess ökande med avbrott för perioder med stora inflöden av nytt djupvatten, som exempelvis 2014–2016, då syreskulden avbetalades genom oxidation, se Figur 3.

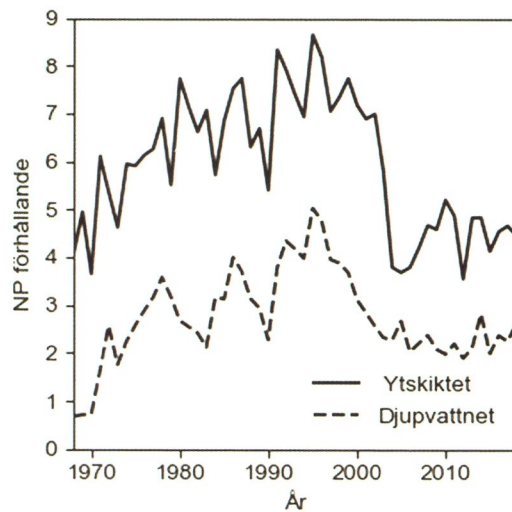
MÖJLIGHETER ATT REDUCERA ÖVERGÖDNINGEN – BEGRÄNSANDE NÄRINGSÄMNE

Kväve (N) och fosfor (P) ingår i proportionerna 16:1 (mol-förhållande) i alger som bildas i havet. Om det i ytvattnet uppstår en brist på något av näringsämnena fosfor (fosfat) och kväve (främst nitrat) begränsas den biologiska produktionen av bristen. Sedan åtminstone 1950-talet anses allmänt fosfor vara det begränsande näringsämnet i sötvatten. Den biologiska produktionen i sjöar och vattendrag kan därför reduceras genom att minska tillförseln av fosfor, exempelvis genom rening av avloppsvatten från hushåll och industri samt genom åtgärder i jordbruket.

Under 1950-talet hade ännu inga effekter av storskalig övergödning rapporterats från Östersjön. Syrefria bottenar saknades. Under 1960-talet ökade både arealen av syrefria bottenar *Aanox* och fosforkoncentrationen *c1* i ytvattnet vintertid (Fig. 2). Fram till ett stycke in på 1980-talet var den allmänna meningen att Östersjöns biologiska produktion, precis som produktionen i sötvatten, begränsas av mängden fosfor i ytvattnet.



Figur 3 Syreskulden i Östra Gotlandsbassängen 1960 – 2018. Syreskulden är den mängd syre som skulle behövas för att oxidera allt svavelväte och ammonium i det syrefria djupvattnet. Syreskulden reduceras under perioder med stora inflöden av nytt djupvatten (efter Stigebrandt & Andersson, 2020).



Figur 4 NP kvotens utveckling i ytvattnet (0–60 m) och djupvattnet vintertid (december-februari) i egentliga Östersjö. NP-förhållanden = $(\text{NO}_3 + \text{NH}_4)/\text{PO}_4$. (Efter Stigebrandt & Andersson 2020)

KVÄVETS UPPGÅNG OCH FALL SOM BEGRÄNSANDE NÄRINGSÄMNE I EGENTLIGA ÖSTERSJÖN

I en vetenskaplig artikel framför Ryther & Dunstan (1971) hypotesen att den biologiska växtproduktionen i marina vatten kontrolleras av vattnets innehåll av kvävenäringsämnen. Hypotesen styrks av resultat från så kallade bag-försök där växtproduktionen i slutna volymer med havsvatten mäts efter tillsättning av kvävegödning (N) och fosfat (P) var för sig. Artikeln fick så småningom en avgörande betydelse för synen på Östersjöns övergödning. Bag-försök visade att tillsats av N, men inte tillsats av P, gav ökad produktion i Östersjövatten. Från mitten av 1980-talet ansåg tongivande Östersjöforskare att kväve begränsar den biologiska växtproduktionen i Östersjön och dess kustvatten. Detta ledde till att svenska myndigheter införde krav på reduktion av kväveutsläpp från reningsverk, jordbruk och förbränningsprocesser (även biltrafik). Att stora utsläpp av kväve orsakar övergödning blev allmänt känt i Sverige genom undervisning ända ner till lågstadiet och genom stor uppmärksamhet i media vilken kan sägas kulminera i det avsnitt av den svenska TV-såpan "Rederiet" där skeppsredare Reidar Dalén får miljöpris för att ha installerat kväverening på sitt fartyg Freja. Det kan vara intressant att påpeka att 100 år tidigare ansågs bristande tillgång till kvävegödsel för jordbruket vara det största problemet för livsmedelsförsörjningen av en växande befolkning på jorden vilket ledde till utveckling av industriella metoder att producera kvävegödsel från luftens kvävgas.

Alla forskare var dock inte övertygade om att tillväxtförsök i slutna volymer är representativa för den årliga biologiska produktionen och att en minskad tillförsel av kvävenäringsämnen reducerar den årliga biologiska produktionen i Östersjön.

Skälet till misstron är att omfattande blomningar av cyanobakterier uppträder sommartid trots att kvävegödseln i ytvattnet långt innan dess förbrukats vid vårbloomingen. NP kvoten i ytvattnet före vårbloomingen har sedan 1968 varierat mellan 8 och 4 (Figur 4) vilket innebär att 50 till 75 % av fosfaten återstår i ytvattnet efter vårbloomingen. Fosfaten kan användas av cyanobakterier vilka kan syntetisera elementärt kväve (N_2) löst i vattnet och därför inte är begränsade av tillgång till kvävenäringsämnen i vattnet. Cyanobakterierna gödslar Östersjön med kväve varje sommar genom att tillföra en stor mängd kväverikt organiskt material och detta upphäver effekten av kväverening av avloppsvatten. Kväverening av avloppsvatten medför en marginellt minskad vårblooming och ett motsvarande marginellt ökat fosforöverskott efter vårbloomingen och därför ökad produktion av cyanobakterier.

Oenigheten om huruvida kväve begränsar den årliga produktionen i Östersjön ledde till en mångårig och tidvis hätsk debatt där meningsmotståndare anklagades för att deras öppet visade tvivel om nyttan av kväverening orsakade osäkerhet hos beslutsfattare och därmed försening av fortsatt minskning av kväveutsläpp och Östersjöns förmodade återhämtning från övergödningen. För att slita tvisten tillsatte Naturvårdsverket en vetenskaplig kommission vilken kom fram till att det är fosfor som begränsar den biologiska produktionen i Östersjön (Boesch med flera 2006). Kommissionens slutsats var uppenbarligen oväntad och svår att acceptera och en svidande prestigeförlust för Naturvårdsverket som satsat på kväve som begränsande näringsämne i Östersjön. Detta framgår av en rapport där det förklaras att Naturvårdsverket tagit till sig förslaget att fosfortillförseln till Östersjön bör minskas men att man fortfarande anser det viktigt att minska kvävetillförseln till Östersjön, dock inte så att blomningar av cyanobakterier ökar lokalt pga. kvävebrist orsakad av utsläpp (Liljelund, 2006).

Naturlig kvävereduktion (främst genom denitrifikation) i egentliga Östersjön är av storleksordningen 1 000 000 ton/år medan kvävereduktionen i svenska reningsverk med avlopp till egentliga Östersjön är knappt 10 000 ton/år, dvs ungefär en procent av den naturliga kvävereduktionen i Östersjön. Härav följer att den svenska kvävereningen har en ytterst liten effekt i egentliga Östersjön. Utifrån perspektivet "förväntad effekt på Östersjön" är det obegripligt att man under senare år har utökat kvävereningen genom mycket kostsam ombyggnad av svenska reningsverk.

ÅTER TILL FOSFOR SOM BEGRÄNSANDE NÄRINGSÄMNE

Den pågående effektiviseringen av kvävereningen i svenska reningsverk måste tolkas som att svenska myndigheter fortfarande anser att kväve är ett begränsande näringsämne i Östersjön. Men bland Östersjöforskare verkar det nu trots allt råda en bred enighet om att fosfor är det begränsande näringsämnet för Östersjöns biologiska produktion och att fosforinnehållet i ytvattnet därför måste reduceras för

att reducera övergödningen. Totala fosfortillförseln *TPS* till egentliga Östersjöns vattenmassa kan uppdelas i tre komponenter; landbaserad tillförsel *LPS*; tillförsel från Kattegatt (oceanen) *OPS*; intern tillförsel *IPS*. Över långa tidskalor kan *OPS* betraktas som approximativt konstant $\approx 10\,000$ ton/år (Stigebrandt & Andersson, 2020). *LPS* kulminerade under 1980-talet men har nu halverats och är ca 23 000 ton/år vilket är samma nivå som under mitten av 1950-talet (Fig. 2). Summan av de externa fosforkällorna, dvs. *LPS* + *OPS*, är nu, liksom under mitten av 1950-talet, således drygt 30 000 ton/år.

Tongivande Östersjöforskare anser att ytterligare reduktion av den landbaserade källan *LPS* är enda möjligheten att åstadkomma en minskning av Östersjöns övergödning. Erfarenheten visar emellertid att denna strategi inte varit särskild framgångsrik eftersom koncentrationen *cI* av fosfor i Östersjöns ytvatten under vintern nu är klart högre än under 1980-talet trots att *LPS* har halverats sedan dess (Fig. 2). Detta visar att det finns en ökande intern källa *IPS* vilken mer än väl har kompenserat för den genomförda reduktionen av den landbaserade källan *LPS*. Vidare kan man konstatera att *cI* nu är ungefär fyra gånger högre än under 1950-talet trots att *LPS* nu har samma storlek som då. Denna skenande ökning av *cI* kan förklaras av en intern källa *IPS*. Om man förstår hur den interna källan *IPS* fungerar rent mekanistiskt kan man utveckla metoder att stoppa den.

Utvecklingen av *cI* har skenat, speciellt sedan slutet av 1990-talet (Fig. 2), vilket inte kan förklaras som en enkel respons på förändringen av *LPS*. Det är uppenbart att *cI*, och därmed övergödningen av Östersjön, nu är dominerad av en intern källa *IPS* vilken är klart större än den land-baserade tillförseln *LPS*. Detta innebär att en stor reduktion av *cI*, och därmed övergödningen, kräver en eliminering av den dominerande källan *IPS* vilket skulle kräva havsbaserade metoder. Framförda förslag att eliminera *IPS* har hittills förkastats av tongivande Östersjöforskare vilka anser att förslag att använda havsbaserade metoder tar fokus från och kan minska viljan att genomföra av dem rekommenderade ytterligare minskningar av *LPS*. Denna typ av argumentation mot kritik av rådande åtgärdsparadigm känns igen från tidigare men då gällde det kritik av dåvarande åtgärdsparadigm – att reduktion av kväveutsläpp är den rätta vägen till minskad övergödning av Östersjön.

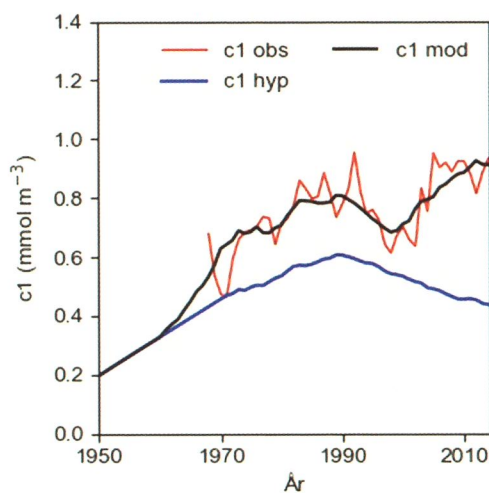
DEN INTERNA FOSFORKÄLLAN IPS

Tidigt under 1960-talet upptäcktes att stora mängder fosfor ackumulerades i syrefritt och sulfidiskt djupvatten vilket började uppträda vid slutet av 1950-talet i egentliga Östersjön (Fonselius, 1967). Det observerade förloppet stämmer väl överens med vad man kan förvänta sig från principskissen i Fig. 1 för fosforutbyte mellan sediment och bottenvatten. Av skissen framgår att fosfat som frigörs av nedbrytningsprocesserna i sedimentet stannar kvar i sedimentet om vattnet är syresatt. Som tidigare förklarats är orsaken till detta att fosfat adsorberas till järnoxider i det oxiderade toppskiktet av sedimentet. Om vattnet däremot är syrefritt

förekommer inte järnoxider och därmed saknas filter i sedimentet varför fosfat fritt kan diffundera ut i vattenmassan. Det är därför logiskt att koppla den interna källan *IPS* till syrefria bottenar. Arean *Aanox* av syrefria bottenar var försumbar under 1950-talet och tidigare varför *IPS* också var försumbar. Under de senaste tjugo åren har arean *Aanox* varierat kring 40 000 km² (Fig. 2).

ÖSTERSJÖN PASSERAR EN 'TIPPING-POINT' OCH FÅR EN SKENANDE FOSFORKONCENTRATION *cI*

Den interna källan *IPS* från syrefria bottenar ger positiv feedback till övergödningen vilket enklast kan förklaras på följande sätt: ökad syrefri area *Aanox* => ökat fosforflöde *IPS* från sedimentet till vattnet => ökad *cI* => ökad biologisk produktion => ökad syreförbrukning i djupvattnet => ökad *Aanox* o.s.v. Östersjön passerade en så-kallad brytpunkt eller 'tipping-point' när denna mekanism aktiverades i och med att syrefria bottenar började uppträda vid slutet av 1950-talet. På grund av positiv feedback ger mekanismen en skenande utveckling av *IPS*, och därmed *cI*, vilket efterhand har dränkt effekten av minskade landbaserade utsläpp av fosfor. Detta illustreras av resultat från två modellberäkningar av fosforkoncentrationen *cI* i egentliga Östersjön, en med och en utan intern fosforkälla *IPS* (Figur 5). Beräkningen *cI hyp* utan intern fosforkälla, dvs. med *IPS*=0, visar att *cI* med viss fördröjning skulle ha följt utvecklingen av *LPS* och att ett maximum skulle ha uppstått ungefär år 1990 varefter *cI* skulle ha minskat för att nu vara nere på samma nivå som under 1960-talet. Denna modellerade utveckling (*cI hyp*) med *IPS*=0 stämmer emellertid inte alls överens med den observerade utvecklingen (*cI obs*) under de senaste tjugo åren (Fig. 5).



Figur 5 Resultat från modellsimuleringar för perioden 1950–2014. Helden svarta linje (*cI mod*) visar hur *cI* i Östersjön har utvecklats enligt modellen med *IPS*=1.22·*Aanox* (ton/år). Helden röda linje (*cI obs* – från Fig. 2) visar den observerade utvecklingen av *cI*. Helden blå linje (*cI hyp*) visar hur koncentrationen *cI* skulle ha utvecklats utan intern tillförsel, dvs med *IPS*=0 så att enbart den externa fosfortillförseln *LPS* + *OPS* påverkade Östersjön. (Efter Stigebrandt & Andersson, 2020).

Den andra modellberäkningen (*c1 mod*) inkluderar även den interna fosforkällan från syrefria bottenar, vilken beskrivs som $IPS = fs \cdot A_{anox}$ (ton/år) och således är proportionell mot arean A_{anox} av syrefria bottenar. Det specifika fosforflödet fs har bestämts med användning av minsta kvadratmetoden, så att bästa möjliga överensstämmelse uppnås mellan *c1 mod* och *c1 obs*. Detta gav $fs = 1,22$ ton/km²/år. Som framgår av Fig. 5 stämmer denna beräkning (*c1 mod*) väl överens med den observerade utvecklingen (*c1 obs*). Avståndet mellan kurvorna *c1 mod* och *c1 hyp* i Fig. 5 visar effekten av bidraget från den interna fosforkällan IPS från syrefria bottenar. Man kan se att effekten av IPS var betydande redan under perioden 1965–1998 vilket var okänt vid den tiden. Effekten av IPS är nu dominerande. Med A_{anox} varierande runt 40 000 km² sedan år 2000 har IPS under samma tid varierat runt 50 000 ton år⁻¹. Det finns en stor risk för att *c1* ökar ytterligare i framtiden eftersom syresättningen av djupvattnet blir allt sämre på grund av den växande syreskulden i djupvattnet (Fig. 3) vilket förväntas leda till en ökad areal A_{anox} av syrefria bottenar och därmed till en ökad IPS .

REDUKTION AV ÖVERGÖDNINGEN GENOM AVSTÄNGNING AV DEN INTERNA FOSFORKÄLLAN IPS

Insikten att den interna fosforkällan IPS nu är den dominerande fosforkällan för Östersjöns vattenmassa uppenbarar en möjlig lösning att reducera Östersjöns övergödning, nämligen att stänga av den interna fosforkällan IPS . Denna är kopplad till syrefria bottenar vilka avger fosfor när det saknas ett oxiderat toppskikt på sedimentet (Fig. 1). Eftersom det oxiderade toppskiktet med sitt innehåll av järnoxider fungerar som ett filter som håller kvar fosfor i sedimentet måste ett oxiderat gränsskikt etableras på sedimentet för att stänga av IPS . Detta kan åstadkommas genom att hålla bottenvattnet syresatt vilket kan göras med olika havsbaserade metoder. Syresättning kan åstadkommas genom att pumpa ner och blanda in kallt och syrerikt så kallat vintervatten i djupvattnet. Vintervatten finns i stor mängd ovanför haloklinen. Detta vatten har en lägre densitet än djupvattnet varför inblandning av vintervatten i djupvattnet leder till att djupvattnets densitet minskar snabbare än annars vilket leder till att inflöden av nytt djupvatten tränger djupare ner än de annars skulle ha gjort vilket innebär att djupvattnets uppehållstid minskar. Denna effekt medverkar till att hålla det djupast liggande djupvattnet syresatt. Med lämpligt pumpflöde kan allt djupvatten i egentliga Östersjön hållas syresatt så att ett oxiderat gränsskikt överallt täcker de djupa sedimenten. Beräkningar visar att om syresättningen pågår under ca 20 år kommer Östersjön att restaureras till ett tillstånd liknande det som rådde under början av 1950-talet varefter syresättningen kan stängas av (Stigebrandt, 2018; Stigebrandt & Andersson, 2020). Detta innebär, förutom väl syresatt djupvatten, bland annat reducerad biologisk produktion pga. lägre *c1*, ökat siktdjup, minskad beväxning av grunda bottenar och mycket reducerad omfattning av blomningar av cyanobakterier.

I en inte alltför avlägsen framtid kan det ha utvecklats en stor marknad för vätgas för lagring av 'grön' energi från sol och vind. Vätgasen framställs genom hydrolys av vatten med syrgas som en "gratis" biprodukt. Om produktionen av vätgas sker vid vindkraftverk på djupt vatten till havs kan syrgasen blandas in i djupvattnet. Genom användning av syrgas kan syresättningens påverkan på skiktningen minimeras. Ringbom med flera (2019) undersökte de legala aspekterna av havsbaserade miljöförbättrande åtgärder och kom fram till att dessa helt beror på balansen mellan risker och fördelar. De ekonomiska fördelarna av en restaurerad Östersjö är enorma enligt Boston Consulting Group (2013) vilket borde stimulera planer på att restaurera Östersjön. Ett första steg mot en restaurering måste vara att utarbeta en grundlig miljökonsekvensbeskrivning (MKB) som kvantifierar risker och fördelar.

De flesta övergödda vatten kan inte restaureras genom tidsbegränsad syresättning av bottenarna. Följande förutsättningar måste vara uppfyllda: 1) den interna belastningen *IPS* från syrefria bottenar måste svara för huvuddelen av fosfortillförseln; 2) syresättningen måste stänga av *IPS*, vilket den gör i Östersjön, men det har visat sig att detta inte är fallet i insjöar som är mycket mer övergödda (dvs har mycket högre fosforkoncentration *cI*) än Östersjön; 3) den landbaserade tillförseln måste kunna reduceras så att den understiger den kritiska belastningen *LPS_t* vilken orsakar syrefritt djupvattnet. Observera att storleken av den kritiska belastningen *LPS_t* bestäms av syretillförseln till djupvattnet. Exempelvis Byfjorden, som har ett syrefritt sulfidiskt djupvattnet, hör inte till den restaurerbara kategorin eftersom villkor 1) och 3) inte är uppfyllda. Fjordens djupvattnet syresattes under åren 2010–2012 vid ett pilotexperiment för att studera effekter av syresättning av djupvattnet (Stigebrandt med flera 2015). Som förväntat hade djupvattnet några år efter experimentet återgått till samma tillstånd som rådde före experimentet.

SAMMANFATTNING

Östersjöns övergödning styrs av fosforkoncentrationen *cI* i ytvattnet vintertid. Denna är nu fyra gånger högre än under 1950-talet trots att den landbaserade tillförseln av fosfor är lika stor. Detta visar att fosforinnehållet i ytvattnet inte kan beskrivas som en enkel linjär funktion av den landbaserade tillförseln. Den observerade skenande utvecklingen av *cI* visar att det numera finns en stor intern fosforkälla. Den interna källan yttrar sig som ett läckage av fosfor, från nedbrytning av organiskt material som ligger lagrat i botten sediment, när sedimentet saknar ett syresatt gränsskikt med järnoxider vilka adsorberar den frigjorda fosfor. Östersjön passerade en brytpunkt ('tipping point') när bottenarna började bli syrefria vid slutet av 1950-talet på grund av alltför stor biologisk produktion i ytskiktet. Den interna källan av fosfor ger en positiv feedback på övergödningen. Den skenande övergödningen är särskilt tydlig från slutet av 1990-talet när arean av syrefria bottenar hade expanderat samtidigt som den landbaserade tillförseln av fosfor hade

minskat kraftigt. År 2018 var den sammanlagda ytan av syrefria bottenar ca 56 000 km² vilket är nytt rekord. Nuvarande strategi för bekämpning av Östersjöns övergödning har misslyckats därför att den inte omfattar åtgärder mot den interna fosforkällan från syrefria bottenar vilken numera är omkring 50 000 ton år⁻¹ och därmed den klart största fosforkällan. Det enda sättet att radikalt minska Östersjöns övergödning är att etablera ett fosforfilter på sedimentytan och på så sätt stänga av den interna fosforkällan. Detta kan göras genom att hålla djupvattnet syresatt så att ett syresatt gränsskikt återskapas och underhålls på toppen av sedimenten.

Referenser

- Boesch, D.F., Hecky, R., O'Melia, C., Schindler, D., Seitzinger, S., 2006. Eutrophication of Swedish Seas. Naturvårdsverket Stockholm, *Rapport 5509*, 67 sid.
- Boston consulting Group, 2013. *Turning adversity into opportunity. A business plan for the Baltic Sea*. Commissioned by WWF, 32 sid.
- Fonselius, S.H., 1967. Hydrography of the Baltic deep basins II. *Fisbery Board of Sweden, Series Hydrography, Report No. 20*. 31 sid.
- Hansson, M., Viktorsson, L., Andersson, L., 2019. Oxygen survey in the Baltic Sea 2018 – Extent of anoxia and hypoxia. 1960 – 2018. *SMHI, Report Oceanografi No 65*, 11 sidor + 2 Appendices.
- Liljelund, L.E., 2006. Övergödningen av Sveriges kuster och hav. Naturvårdsverkets ställningstaganden med anledning av en internationell expertutvärdering av kväve/fosfor-problematiken i våra omgivande hav. *Naturvårdsverket, Rapport 5587*, 38 sid.
- Ringbom, H., Bohman, B., Ilvessalo, S., 2019. *Combating eutrophication in the Baltic Sea: Legal aspects of sea-based engineering measures*. Brill Research Perspectives E-Books Online, 96 sidor.
- Ryther J.H, Dunstan W.M., 1971. Nitrogen, phosphorus, and eutrophication in the coastal marine environment. *Science*, 1971 Mar 12;171(3975):1008-13
- Savchuk, O.P., 2018: Large-Scale Nutrient Dynamics in the Baltic Sea, 1970–2016. *Frontiers in Marine Science* 5, March 2018, Article 95.
- Stigebrandt, A., 2018. On the response of the Baltic proper to changes of the total phosphorus supply. *Ambio*, 47: 31-44.
- Stigebrandt A., Andersson, A., 2020. *The eutrophication of the Baltic Sea has been boosted and perpetuated by a major internal phosphorus source*. *Frontiers in Marine Science*, 7:572994.
- Stigebrandt, A., Liljeblad, B., De Brandabere, L. et al. 2015: An experiment with forced oxygenation of the deepwater of the anoxic By Fjord, western Sweden, *Ambio*, 44, 42-54, DOI:10.1007/S 13280-014-0524-9.