

Kämpersvik 13 juli 2023

Vattenomsättning och miljöproblem i fjordar, grunda vikar och småbåtshamnar

Anders Stigebrandt

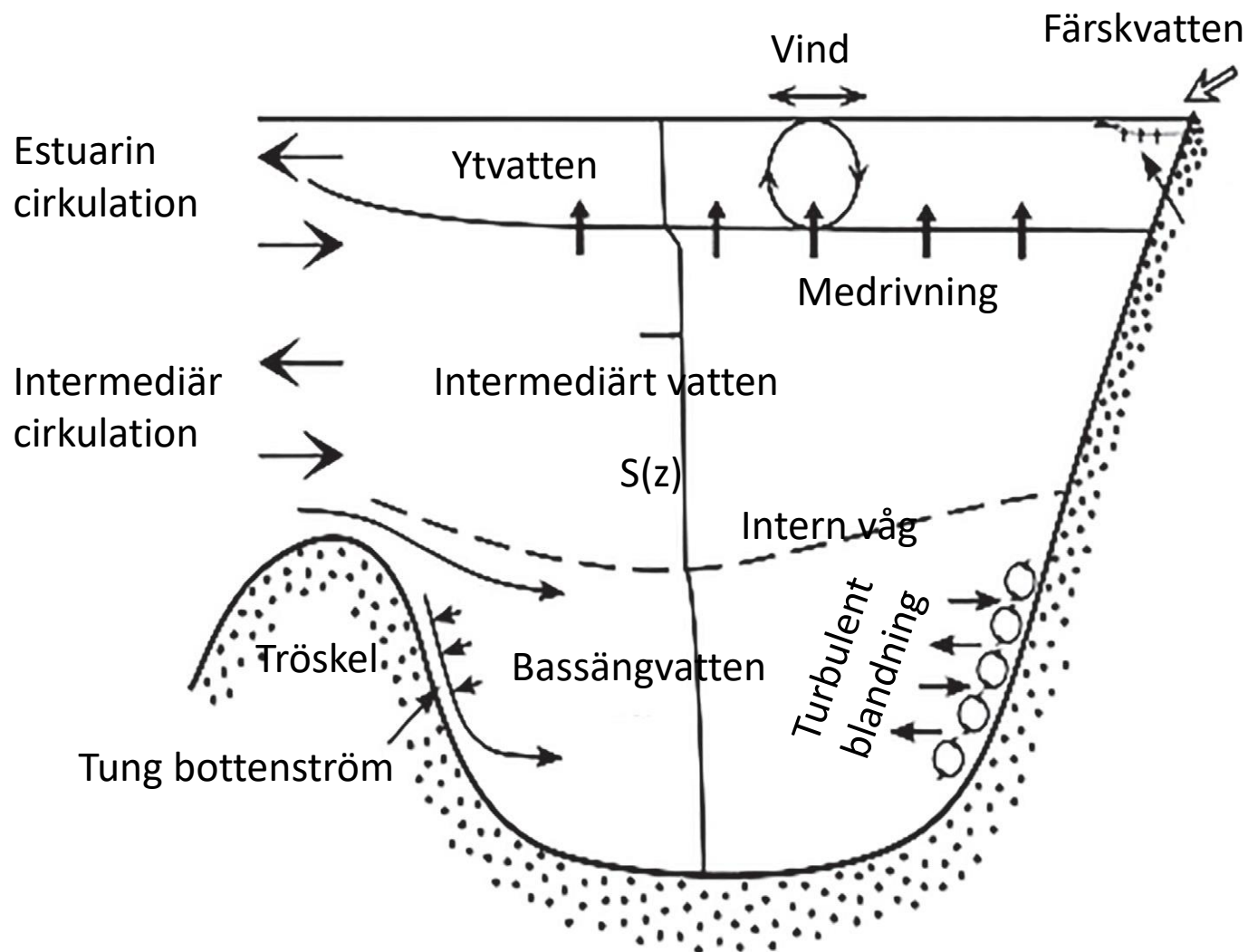
Professor emeritus

Institutionen för marina vetenskaper, Göteborgs universitet

För att kunna förstå hur havet fungerar måste man känna till vissa fakta.

- Hur drivs strömmarna som ventilerar en fjord eller vik?
- Hur påverkar trösklar och smala sund vattenutbytet i innanför liggande område?
- Hur blir skiktade havsbassänger syresatta?
- Hur fungerar växtplankton?
- Vad är övergödning?
- Är fastsittande alger känsliga för vågpåverkan?
- Hur kontrolleras ekosystem, av näringstillförsel eller förändring av funktioner i ekosystemet?
- Kan man förbättra miljön genom olika åtgärder, ekologisk ingenjörskonst?

Fjordar och vikar: vattenmassor och cirkulation



Vattnet är skiktat med ökande densitet, och salthalt, med djupet.

Tre vattenmassor: **ytvatten**, **intermediärt vatten** och **bassängvatten**.

Horisontella tryckskillnader driver horisontella strömmar. OBS **Corioliskraften** pga jordrotationen ger storskaliga horisontella virvlar; ej i små vikar och fjordar!

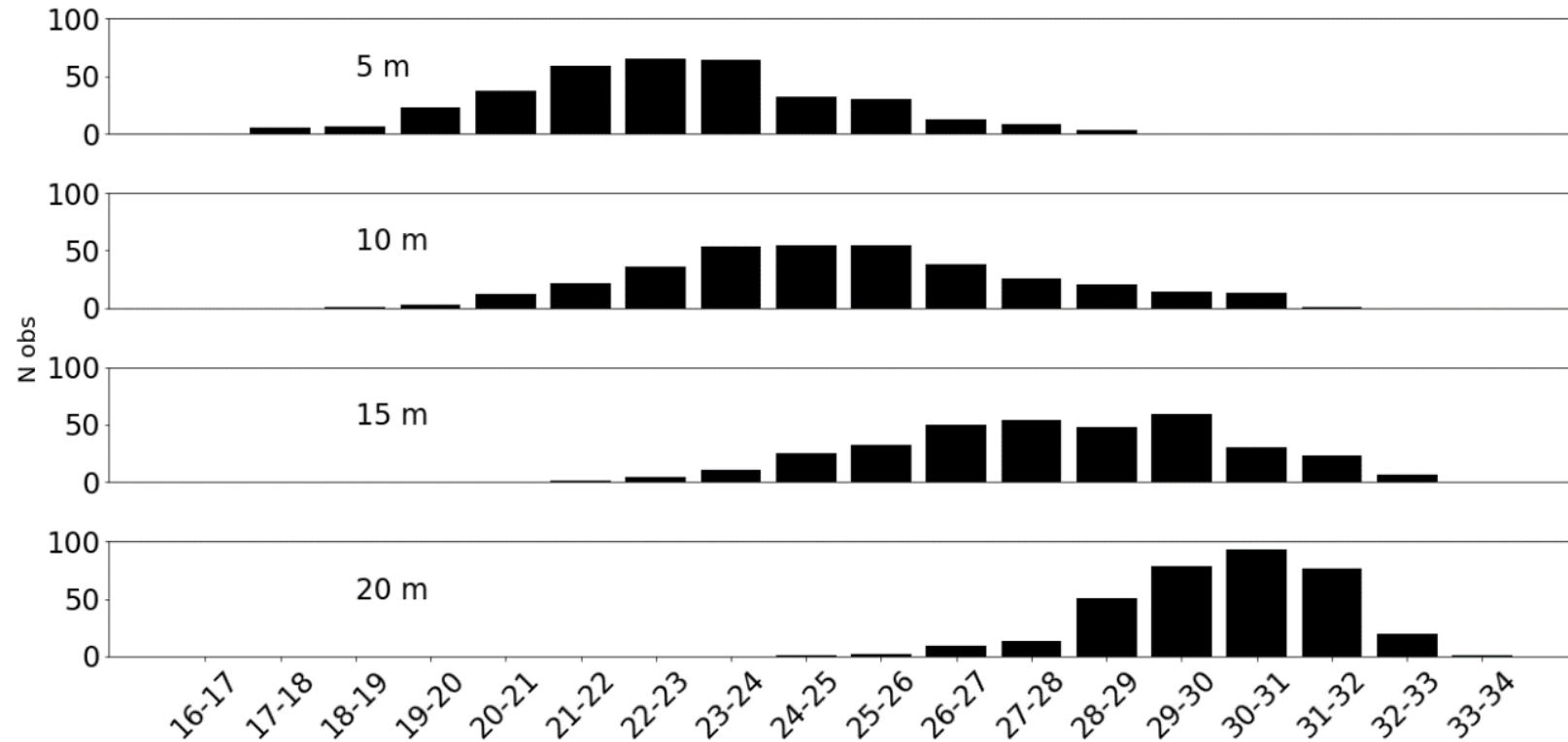
Tre olika slags cirkulation driver vattenutbytet mellan fjorden/viken och utanför liggande kustvatten.

Estuarin cirkulation drivs av sötvattentillförsel och lokal vind.

Intermediär cirkulation drivs av densitetsvariationer i kustvattnet.

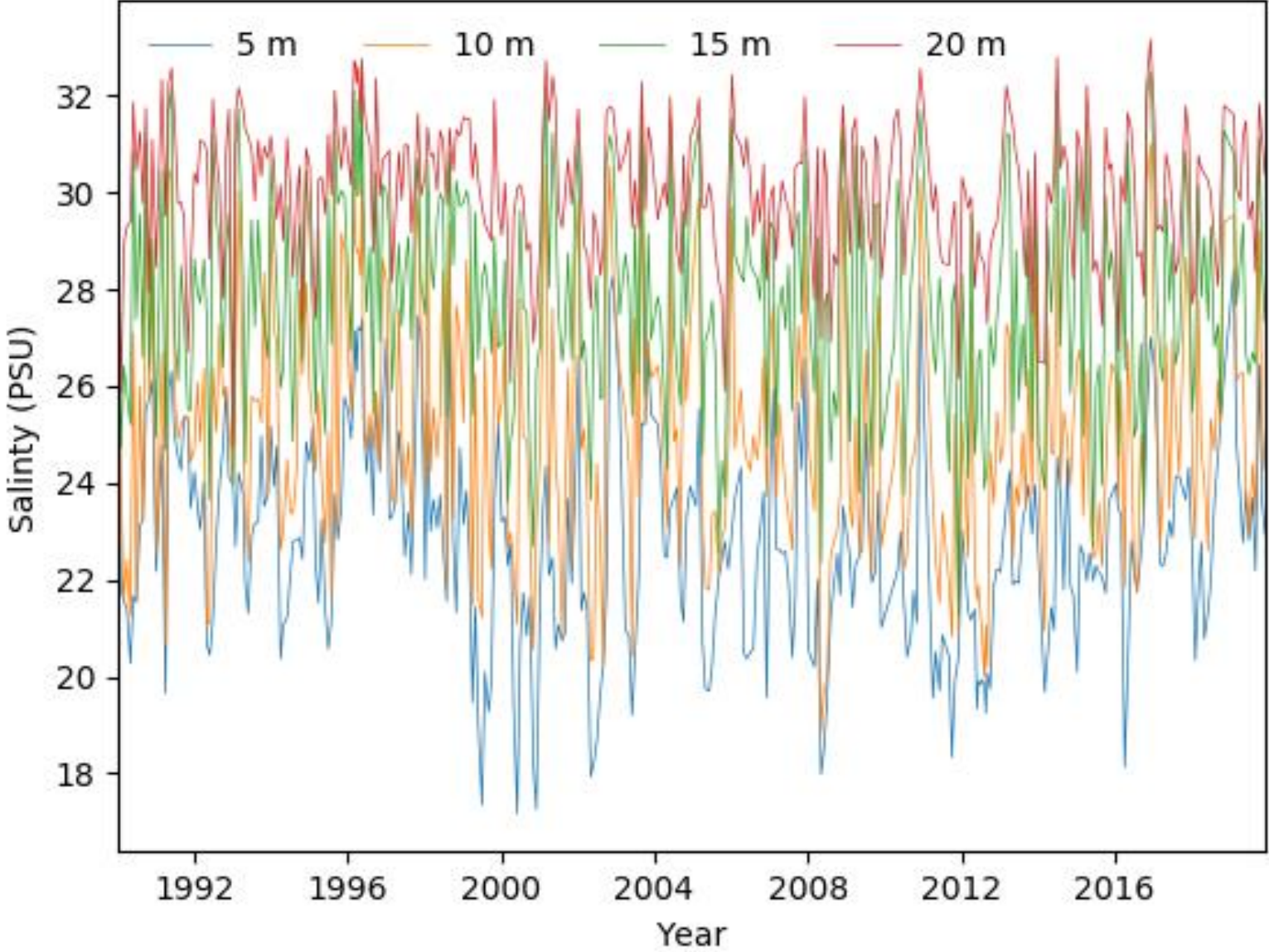
Barotrop Cirkulation drivs av vattenståndsvariationer pga tidvatten eller atmosfärisk påverkan

Stora variationer i salthalt i kustvattnet.

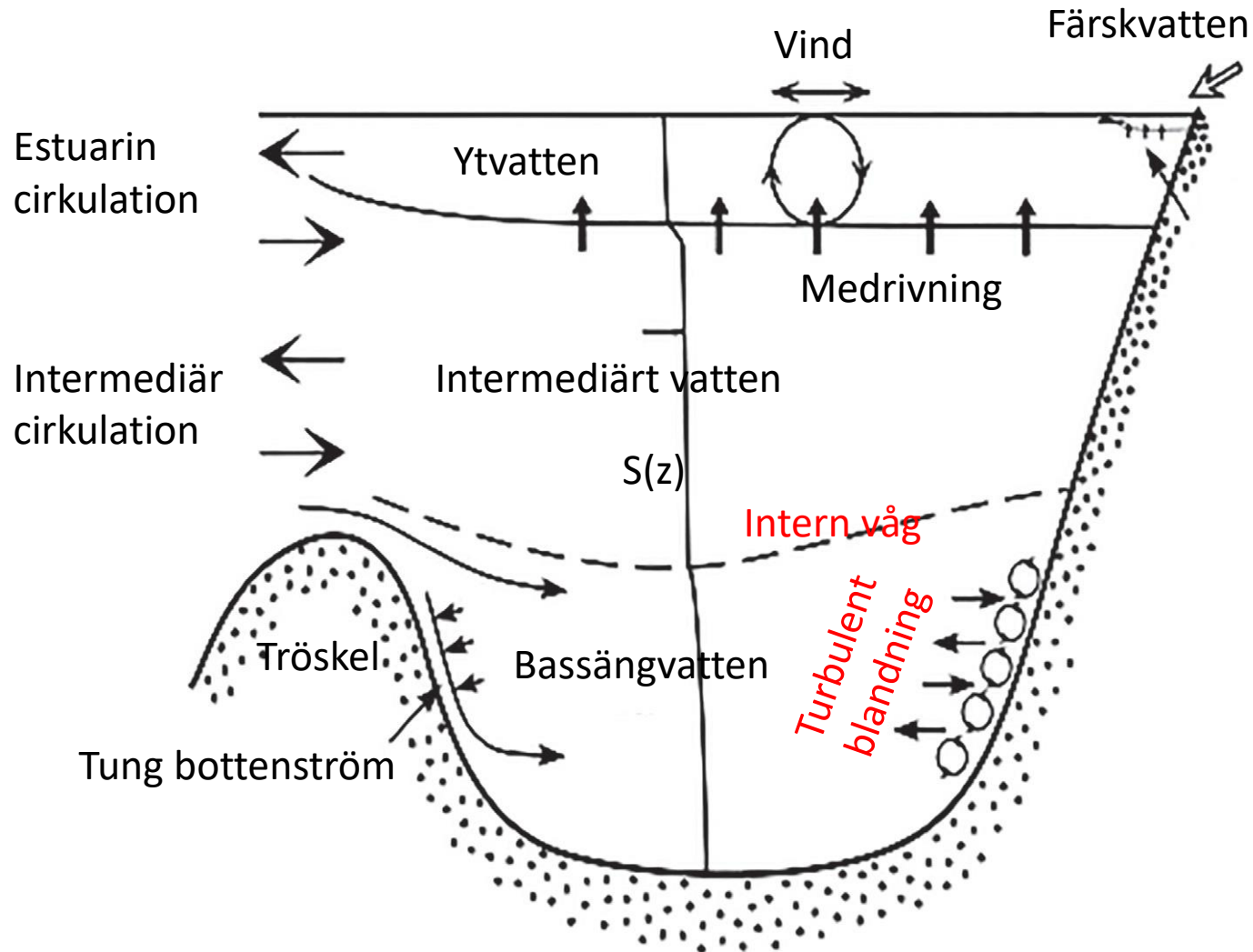


Antal N salthaltobservationer (vertikal axel) i olika salthaltintervall (horisontell axel) på observationsdjupen 5, 10, 15, 20 m i Havstenfjorden under perioden 1960 – 2020 (Från Stigebrandt & Andersson, 2022)

Salinity Havstensfjorden 1990 - 2019



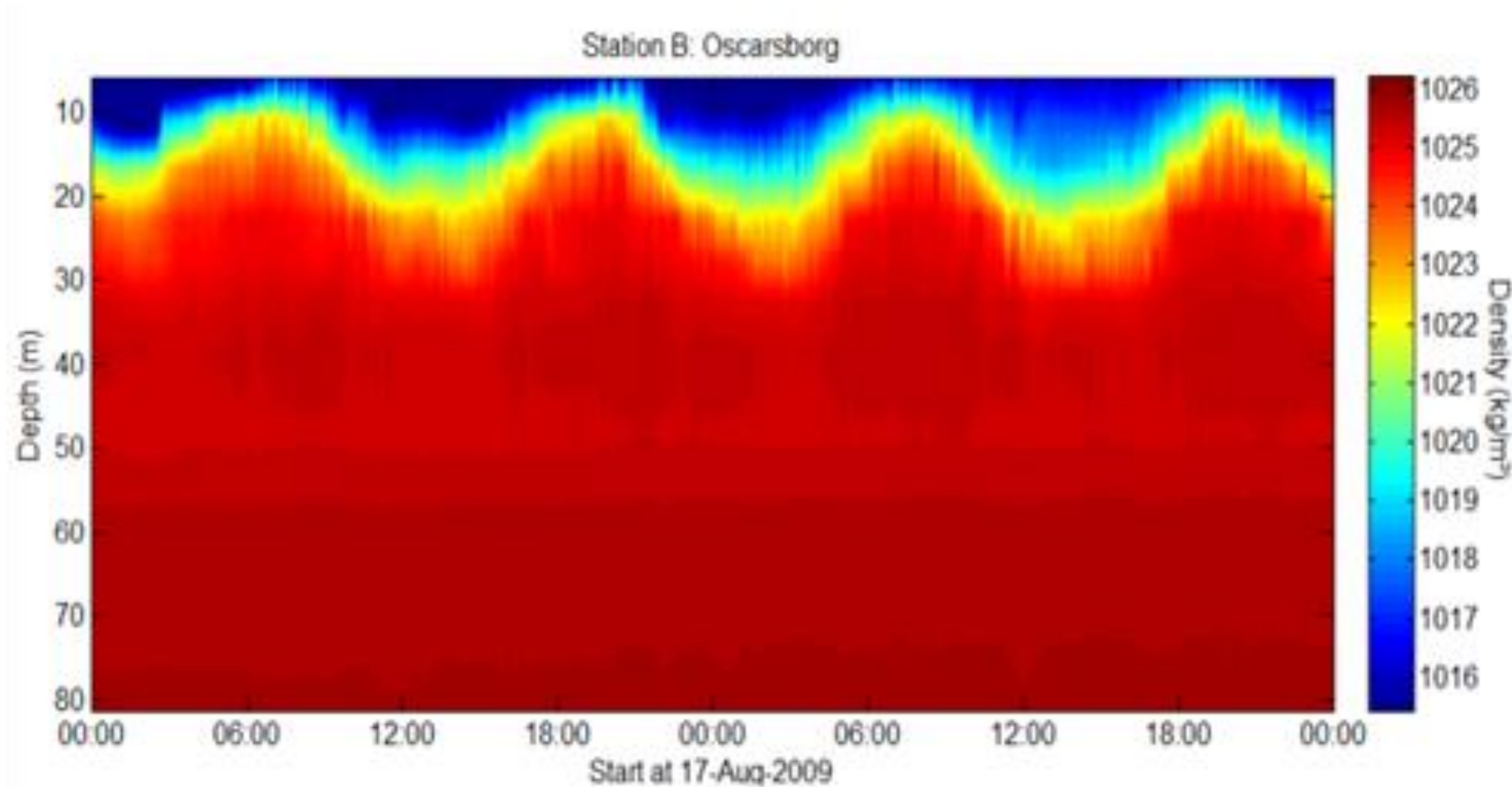
Cirkulation i fjordar och vikar: Tidvatten och blandning



Tidvattenströmmen över tröskeln skapar interna vågor som strålar ut från tröskeln. Vågen som går in i fjorden sönderfaller till turbulens i bassängvattnet. Detta energitillskott till turbulensen är helt dominerande i fjordar (och i världshavet).

Om man ändrar djup/bredd över tröskeln påverkar man blandningen i djupvattnet – och bassängvattnets uppehållstid. Detta har skett i Byfjorden (Uddevalla) där Sunningesund var 5 m djupt och relativt smalt år 1738 men sedan 1990-talet 13.5 m djupt och mycket bredare (pga Uddevallavarvets bygge av stora tankfartyg), se Stigebrandt & Andersson (2022)

Observationer i Dröbakundet, Oslofjorden, strax innanför tröskeln vid Oscarsborg

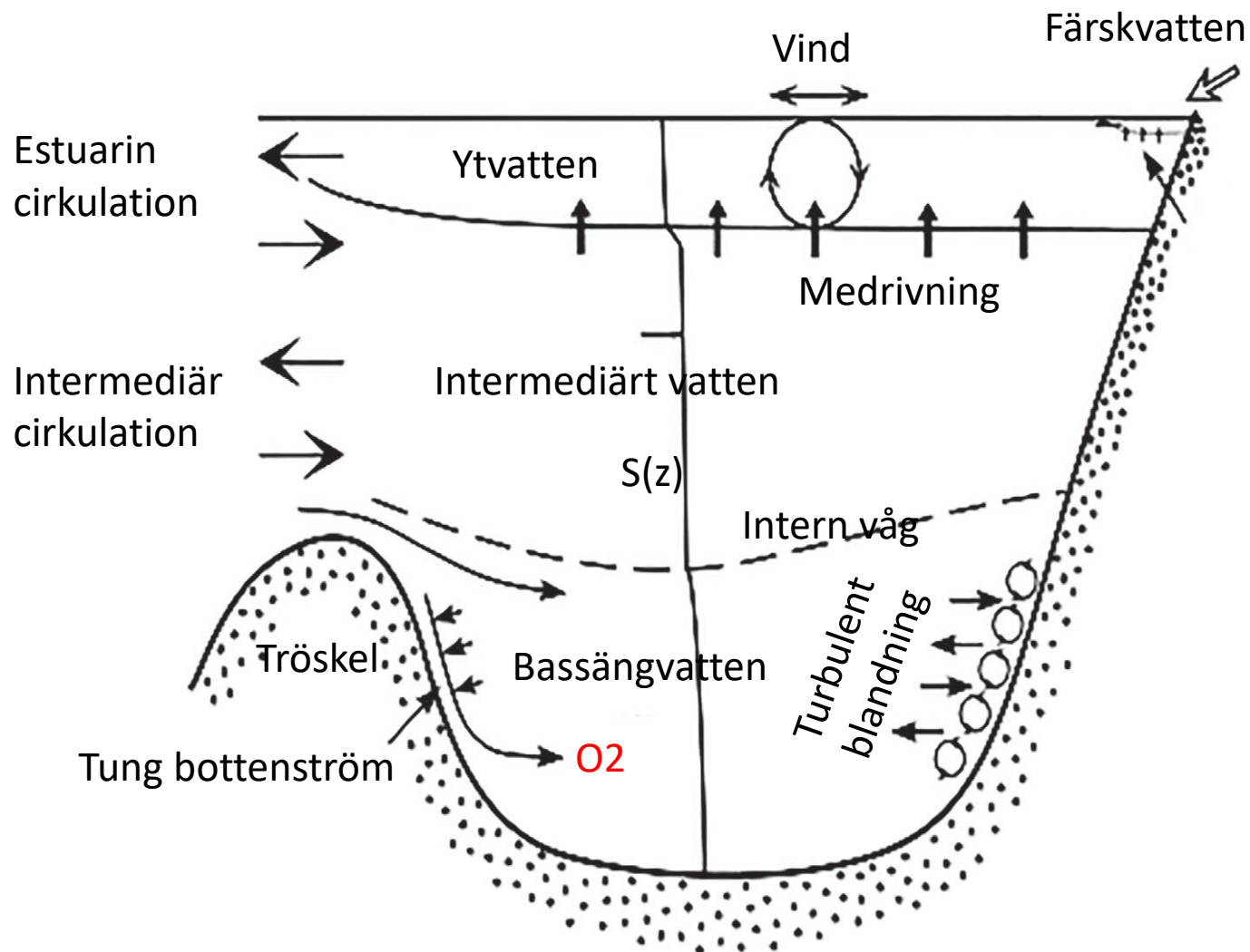


Internt tidvatten
Amplitud ca 10 m

Genererat av
tidvatten med
amplitud ca 0.2 m

Det är de här interna
vågorna som driver
turbulens och
blandning i
bassängvattnet i inre
Oslofjord. (Från
Stigebrandt 2011, se
också Stigebrandt
1976)

Cirkulation i fjordar och vikar: Syre och utbyte av bassängvatten



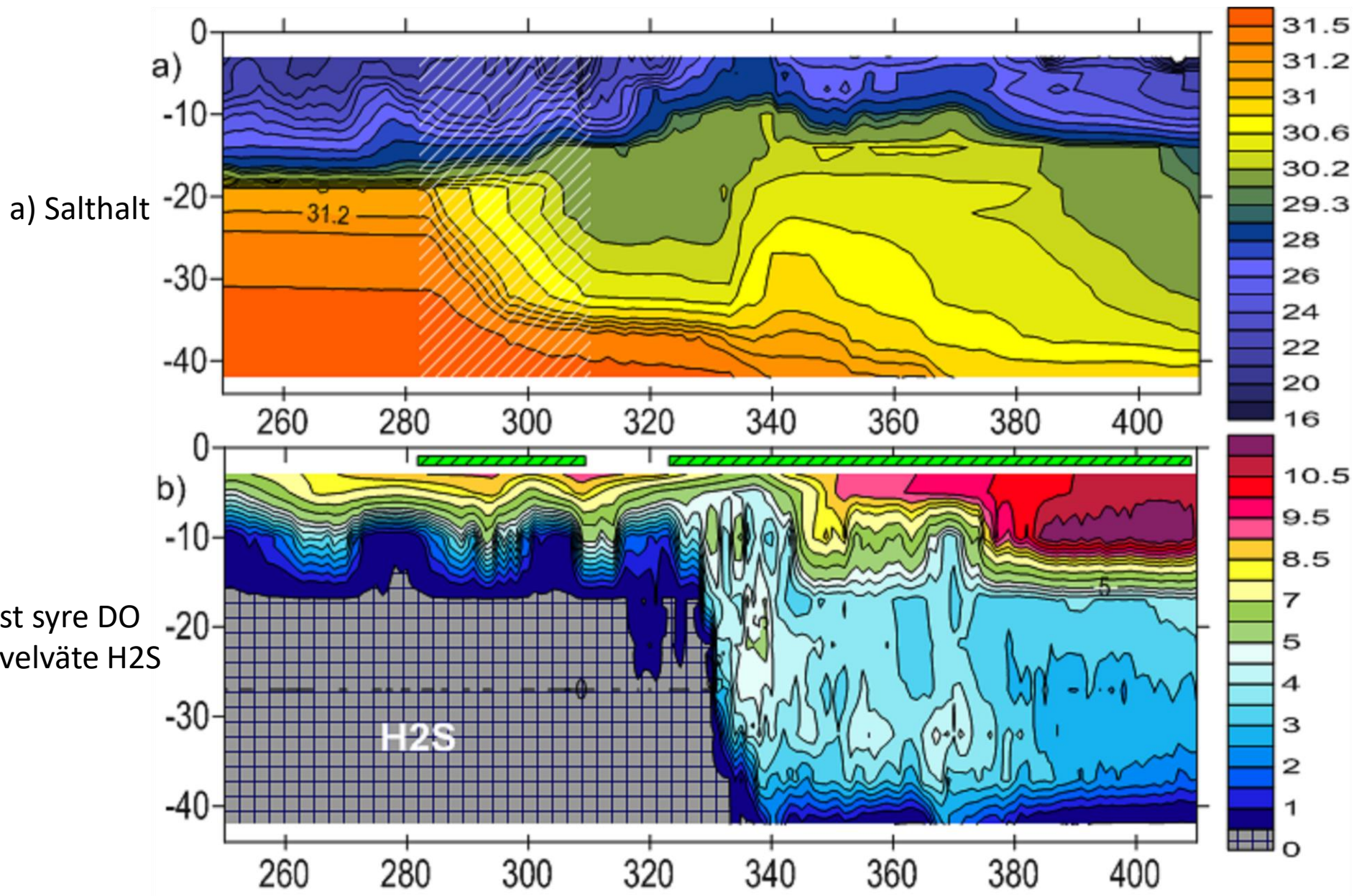
Bassängvattnets densitet minskar pga. Vertikal omblandning. Vattnet byts ut när ett tyngre vatten kommer in i fjorden.

Syre förbrukas när organiskt material bryts ner. Bassängvattnet får syre vid vattenutbyten. Om syrehalten blir låg minskar diversiteten. Om syret förbrukas fylls bassängen gradvis med svavelväte som kommer ut från sedimenten där nedbrytning sker med hjälp av sulfat (SO₄).

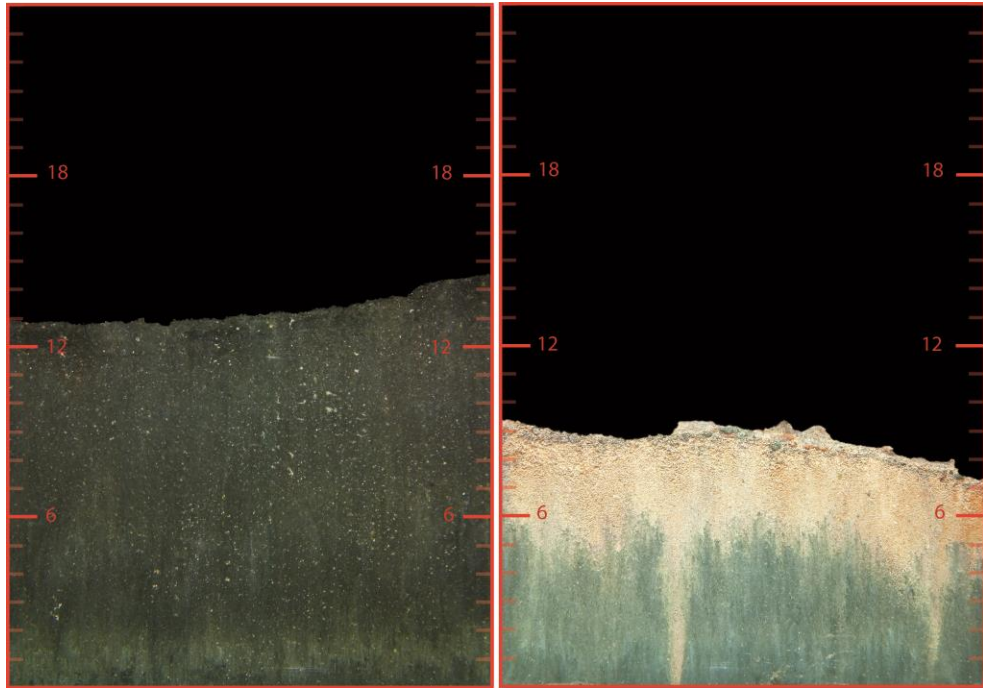
När syret försvinner kommer det ut fosfor (fosfat) som varit bunden i sedimentet så länge detta var syresatt. **Internbelastning.**

Vattenutbyte i Byfjorden under BOX-projektet

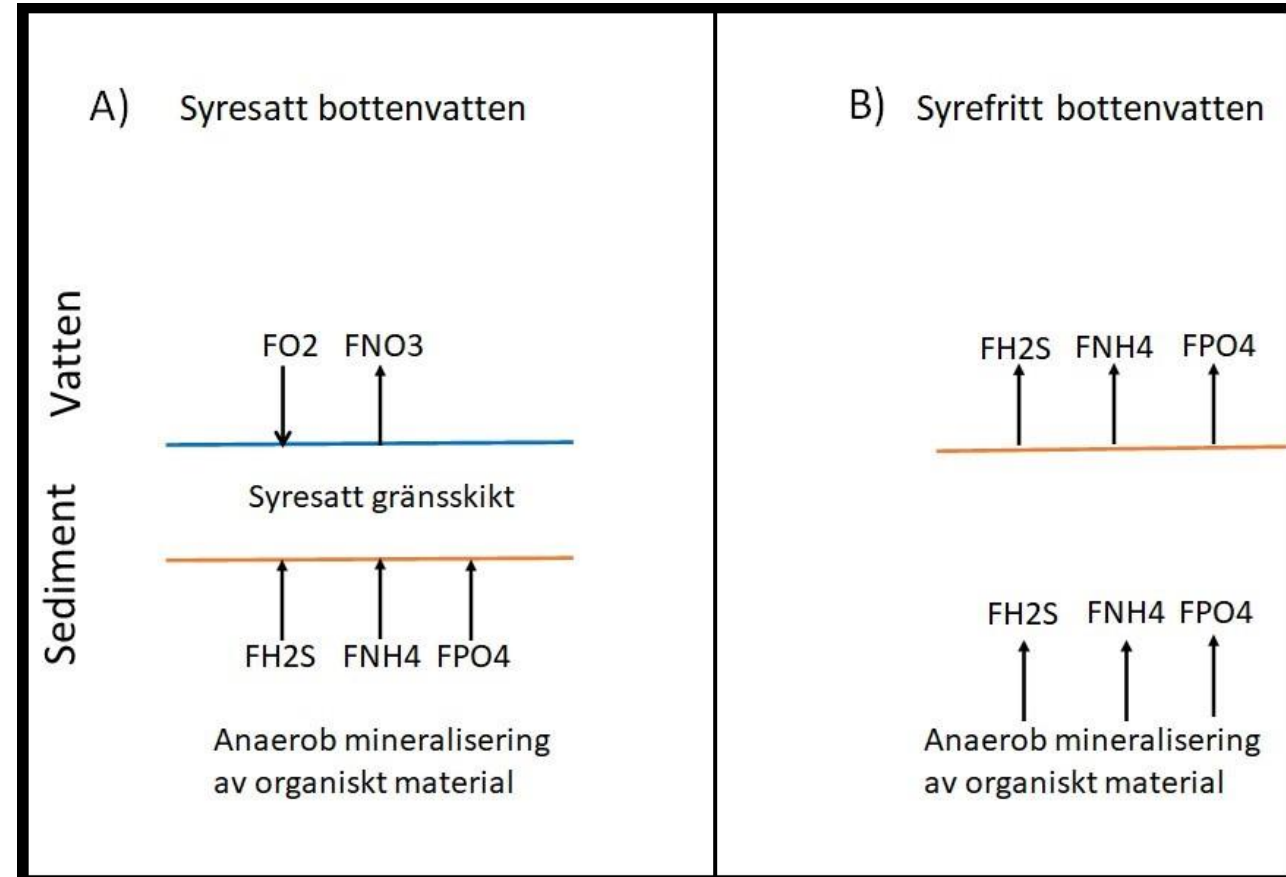
Observationer i Byfjorden
Dag 1 = 20100101
Grön-svart linje överst i b)
= pumpning pågick (från
Stigebrandt med flera
2015)



Ett oxiderat skikt överst på bottensedimentet spelar en avgörande roll för vattenkemin



Vänstra bilden visar ett sediment utan makroskopiskt liv. Högra bilden visar en sedimentbotten som har återkoloniserats och visar ett tydligt ljusbrunt oxiderat skikt och åtminstone två gångar som leder ned i sedimentet. (från Byfjorden – före och efter syresättning) (Från Stigebrandt med flera ,2015)



Diffusiva flöden (F) mellan bottenvatten och sediment när bottenvattnet är syresatt (A) respektive syrefritt (B). (Från Stigebrandt 2021)

Ett bra habitat för fisk och bottenlevande djur kräver att syrekonzentrationen i vattnet är minst 2 mL/L.

Mångfalden av arter ökar med syrekonzentrationen.

Man får inte övermätta vid syresättning eftersom fisk då kan få gasblåsesjuka (motsvarar dykarsjuka):

Förslag: se på filmer från konstgjorda torskrev i Byfjorden: [Filmer från torskreven - Fjordtorsk i Bohuslän](#)

Växtplankton sjunker

Växtplankton och alger tar upp näring (fosfor och kväve) genom diffusion direkt från vattnet.

Om ett plankton inte rör sig relativt omgivande vatten blir upptaget av näring från vattnet mindre och mindre allteftersom planktonet tömmer förrådet i närområdet.

Lösningen på detta problem är att planktonet rör sig relativt vattnet.

Men planktonet har ett skal men inga fenor och kan inte simma.

Genom att ha lite högre densitet än vattnet sjunker planktonet och kan på så sätt flytta sig till vatten med högre näringshalter.

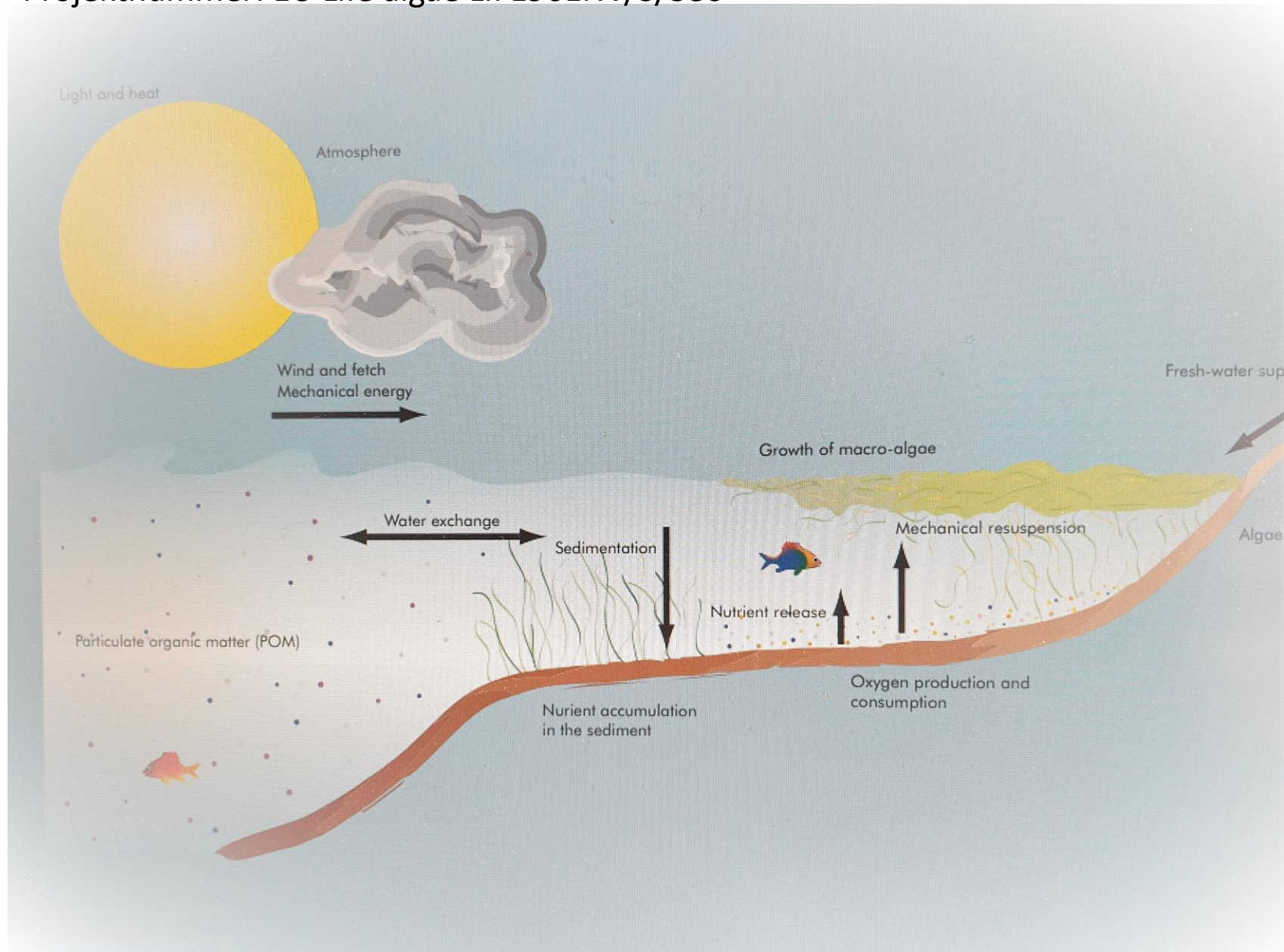
Men planktonet måste vara nära havsytan där fotosyntesen drivs av solenergi.

Turbulens skapad av vinden i ytskiktet ser till att planktonet stannar kvar i ytskiktet.

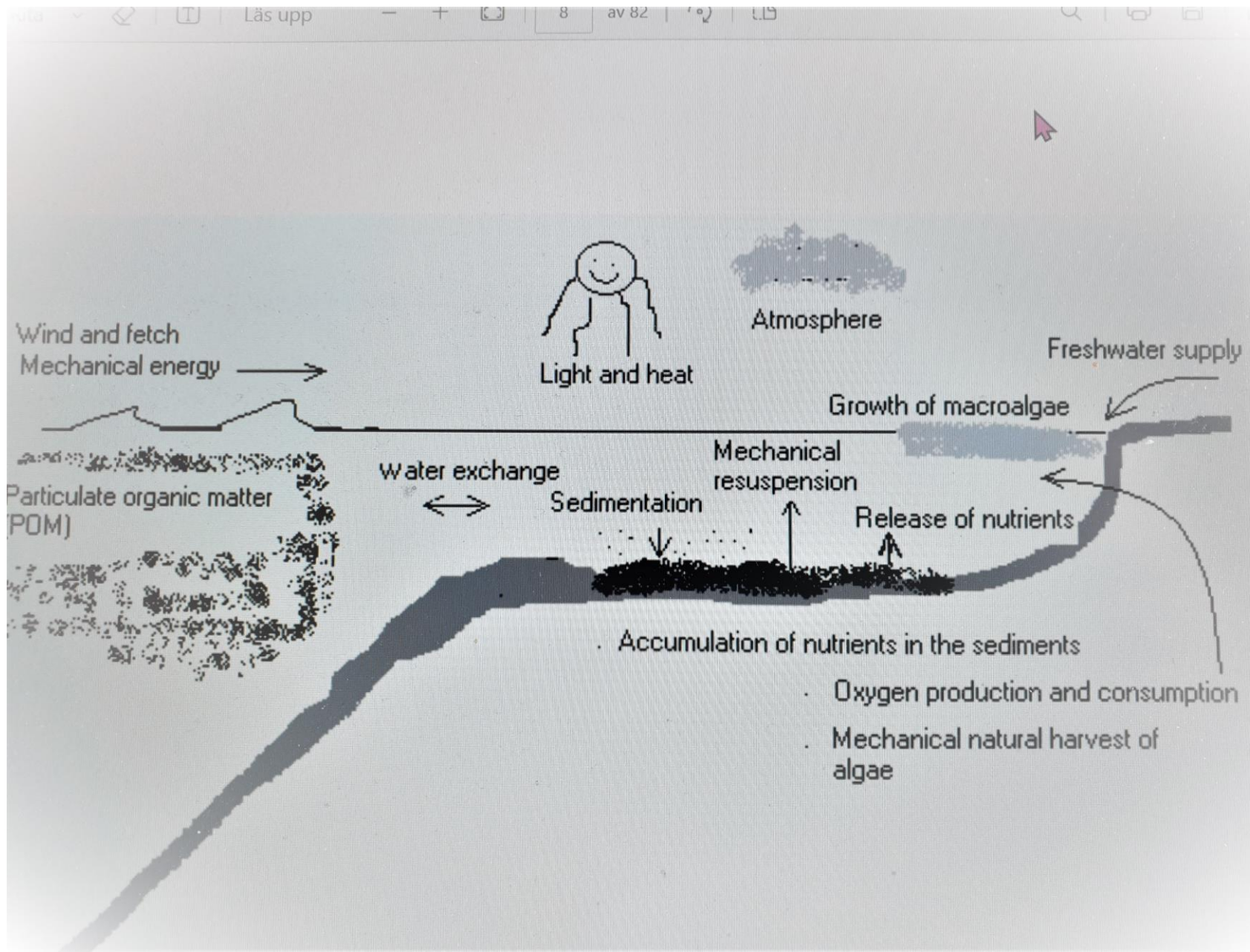
Konsekvens

När växtplankton kommer in i ett grunt område, t.ex. en småbåtshamn, kommer en viss del att bottenfälla och bidra med gödning.

Eilola & Stigebrandt 2001: Modelling filamentous algae in shallow bays. Rapportnummer: 2001:38
Projektnummer: EU Life algae LIFE96ENV/S/380

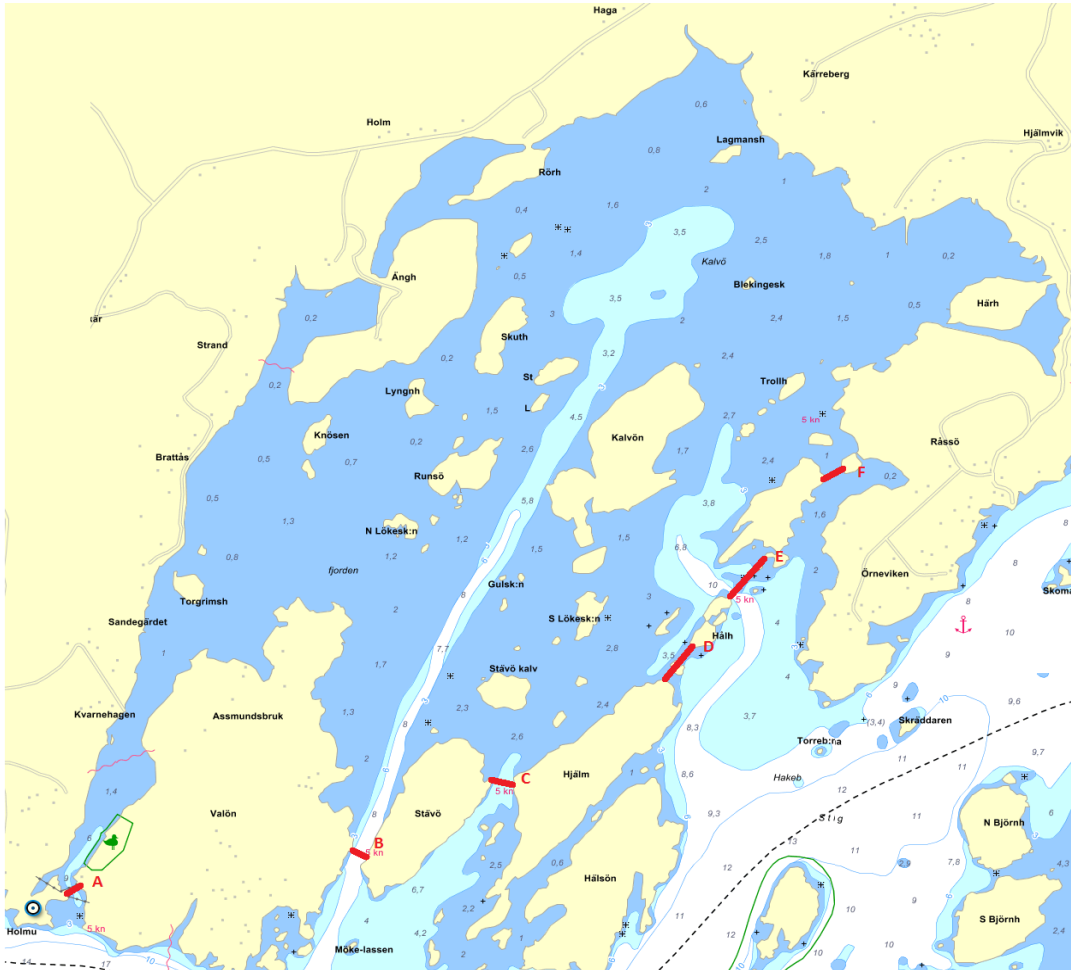


Algmatta i grund vik – under lugna väderförhållanden sommartid



Sedimenterande plankton är ofta största näringskälla. (Från Eilola & Stigebrandt, 2001)

Stigebrandt, Wenzer, Veiderpass, 2014: Förändring av växtbiomassan i ett grunt marint ekosystem, En modellstudie av effekter av näringstillförsel och andra faktorer i Kalvöfjorden söder om Orust. Microsoft Word - [Microsoft Word - Omslag stig vik.docx \(diva-portal.org\)](#)



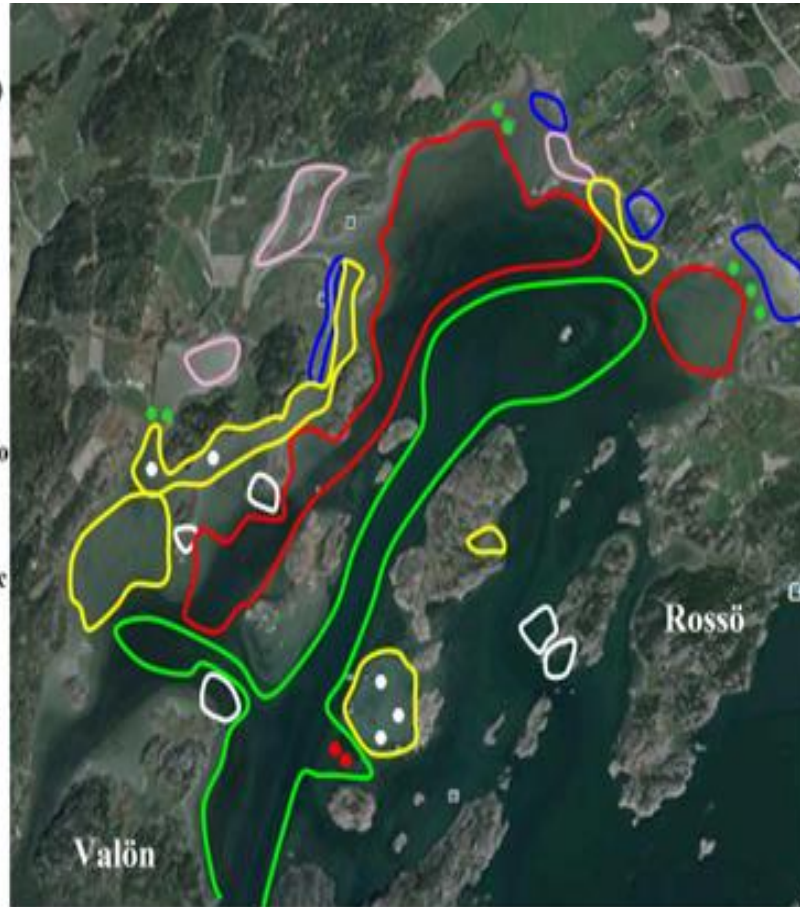
Kalvöfjorden mellan Orust och Stigfjorden

En ökad tillförsel av växtnäring antas ofta vara orsaken till observerad ökning av vegetationens biomassa i kustområden. Logiken är att ökad tillgång till näring bör ge en ökad biologisk produktion och bestånd med större biomassa. Denna **”bottom-up”**- kontroll är sannolikt inte alltid huvudförklaringen eftersom även andra mekanismer kan påverka beståndens biomassa. Förändringar av ekosystemets funktion, på grund av exempelvis utfiskning av stora rovfiskar, kan leda till ett ändrat betningstryck på enskilda arter (**”top-down”**-kontroll). . Modellen visar att det inte är möjligt att förklara en (förmodat) stor ökning av mängden fintrådiga alger i fjorden med en ökning av näringstillförseln från Orust. Upphörandet av tångtäkt kan sannolikt ha bidragit till en viss ökning. Den stora ökning av fintrådiga grönalger som förmodas ha skett i Kalvöfjorden kan ha orsakats av ändringar av en top-down-kontroll av vegetationen i form av selektiv betning av fintrådiga grönalger. **Det är känt att en minskning av bestånd av stora rovfiskar, t.ex. torsk, i ett område kan leda till minskad förekomst av snäckor som betar på fintrådiga alger** men vi vet inte om just denna förklaring stämmer för Kalvöfjorden

Fysiska förhållanden bestämmer i hög grad var olika växter trivs: temperatur, salthalt, vattenstånd, vågkrafter
 (Från Veiderpass & Stigebrandt, 2012)

ålgräs

- Legend**
- Dots (scattered presence)
 - *Fucus Vesiculosus*
 - *Chorda Filum*
 - *Ruppia maritima*
 - Polygons (belts)
 - Diatoms
 - Diatoms and Cyano
 - *Zostera marina*
 - *Zostera marina* with dead epiphytic green algae
 - Green algae mats
 - *Fucus Vesiculosus*

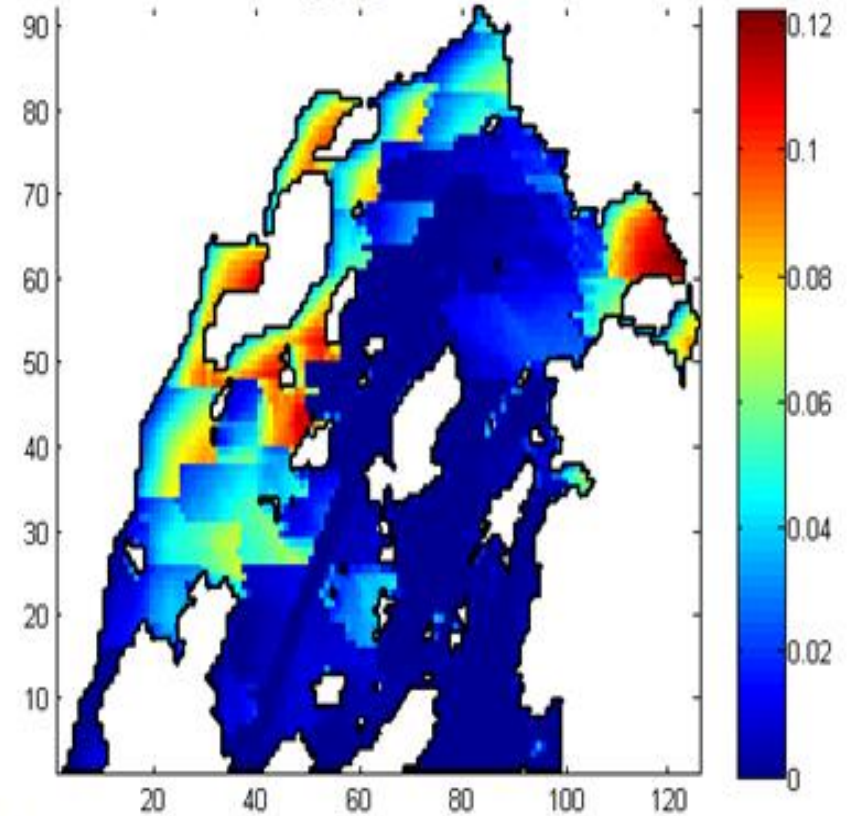


a)

Kalvöfjord

Dragkraft från vågor

Drag potential m^2s^{-2}



b)

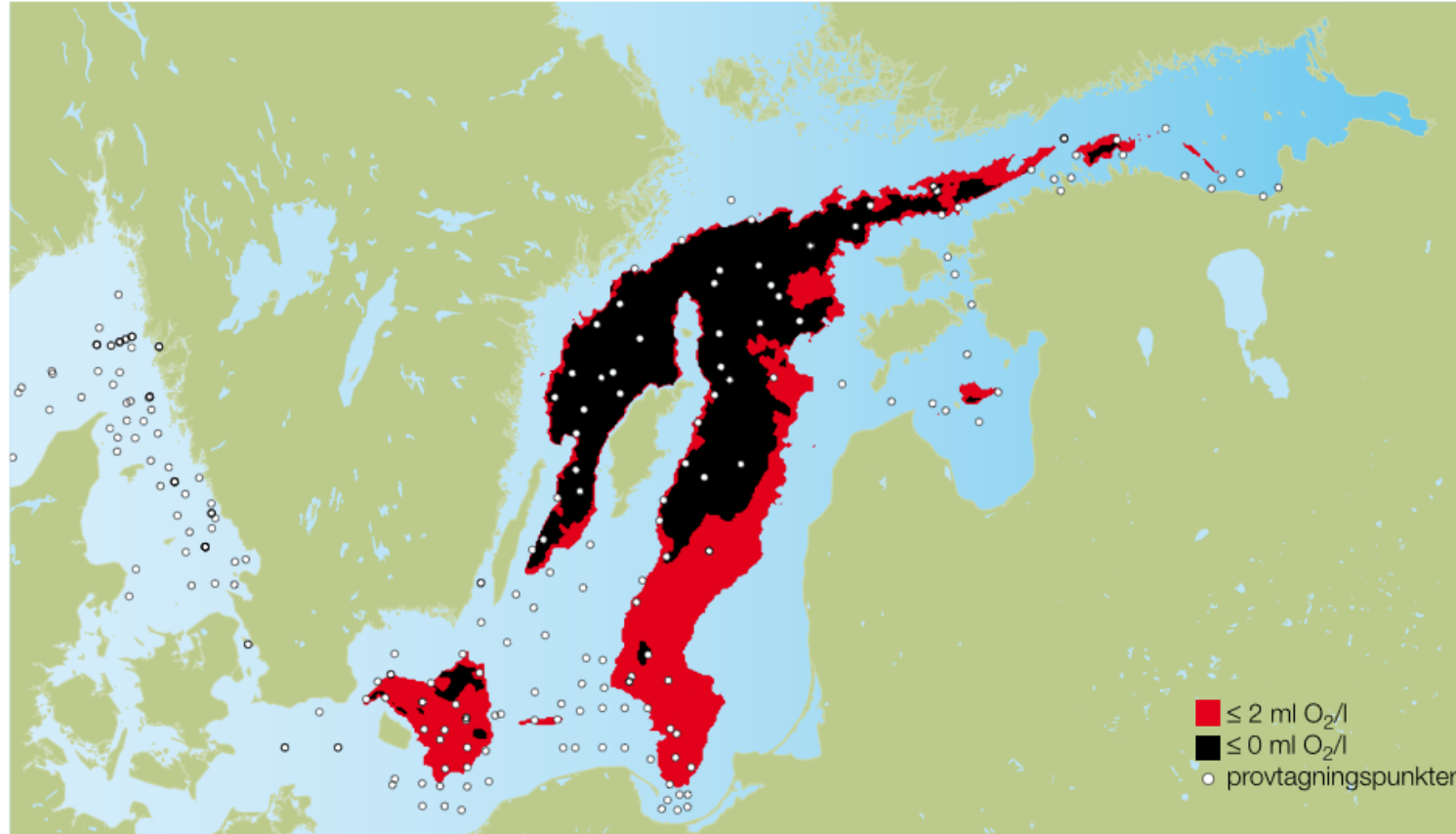
Kalvöfjord

Blomning av cyanobakterier i Egentliga Östersjön



Kväve-fixerande cyanobakterier blommar främst under sommaren, drivna av **överskott på fosfor (P)**. Mer än hälften av P i ytskiktet återstår efter vårblomningen vilken avslutas p.g.a brist på kvävenäringsämnen (nitrat), se Stigebrandt & Andersson (2020)

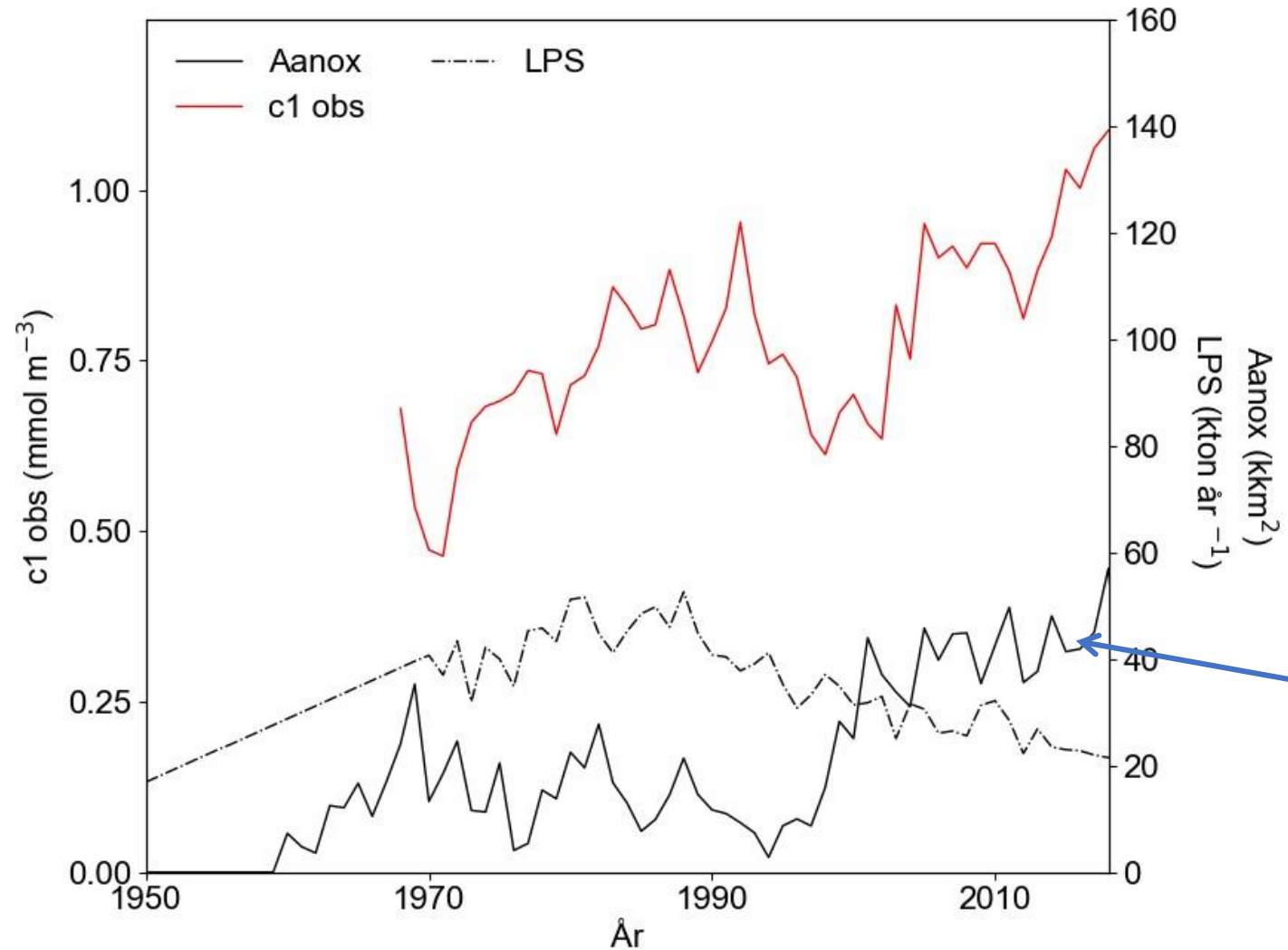
SYREFRIA BOTTNAR OCH BOTTNAR MED SYREBRIST 2015



Utbredning av låga syrehalter. Kartan visar botten utsatta för hypoxi (rött) och anoxi (svart), hösten 2015. Källa SMHI

Syrebrist uppstår p.g.a. obalans mellan syretillförsel och tillförsel av organiskt material

Övergödningen av egentliga Östersjön har förvärrats sedan 1980-talet trots en halvering av utsläppen av fosfor från landbaserade källor



LPS = Landbaserad tillförsel av fosfor (P) till egentliga Östersjön

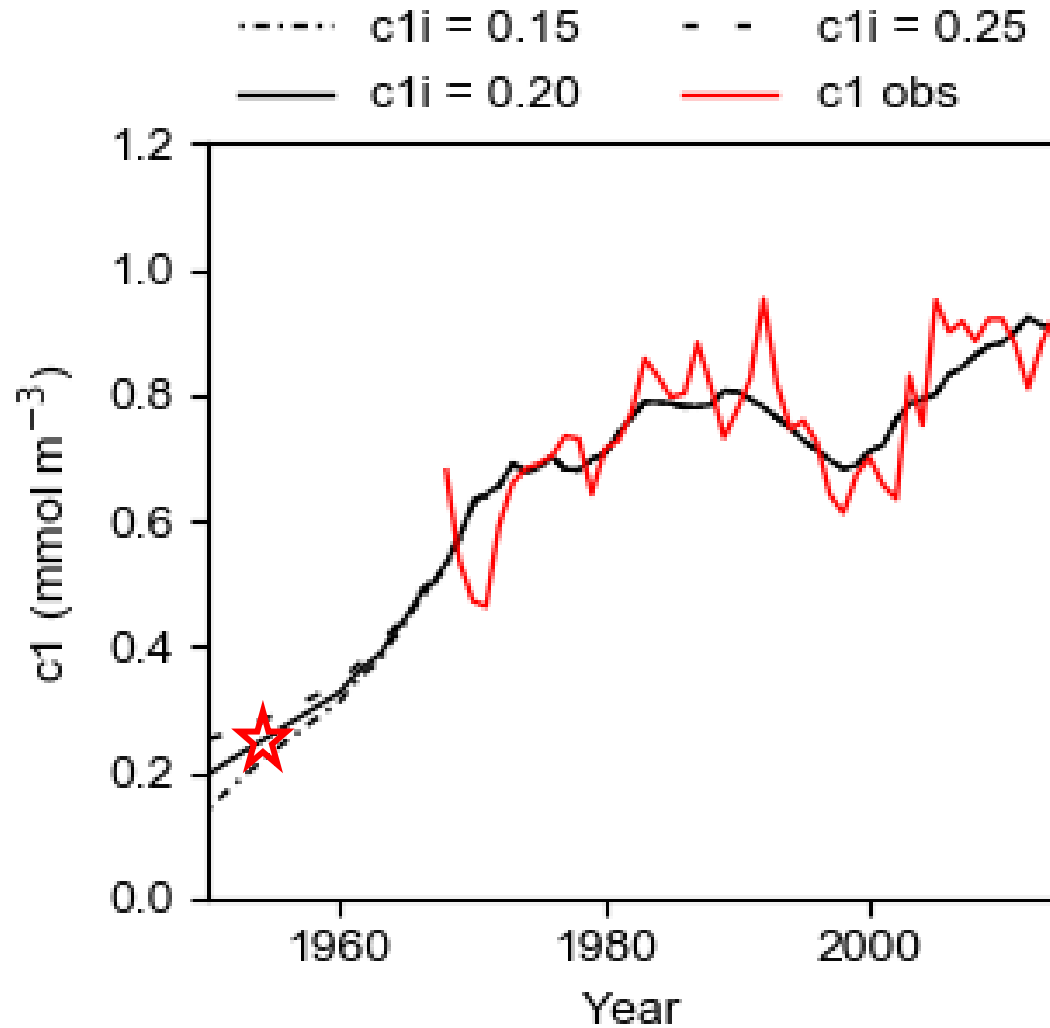
Aanox = arealen av syrefria bottnar

c1obs = koncentrationen av fosfor i ytskiktet vintertid

Den interna belastningen *IPS* är proportionell mot *Aanox*

(Från Stigebrandt & Andersson, 2020, se också Stigebrandt 2021)

Körning av modellen 1950 - 2014 med tre olika initialvärden



Modellen ger god beskrivning av utvecklingen av $c1$.

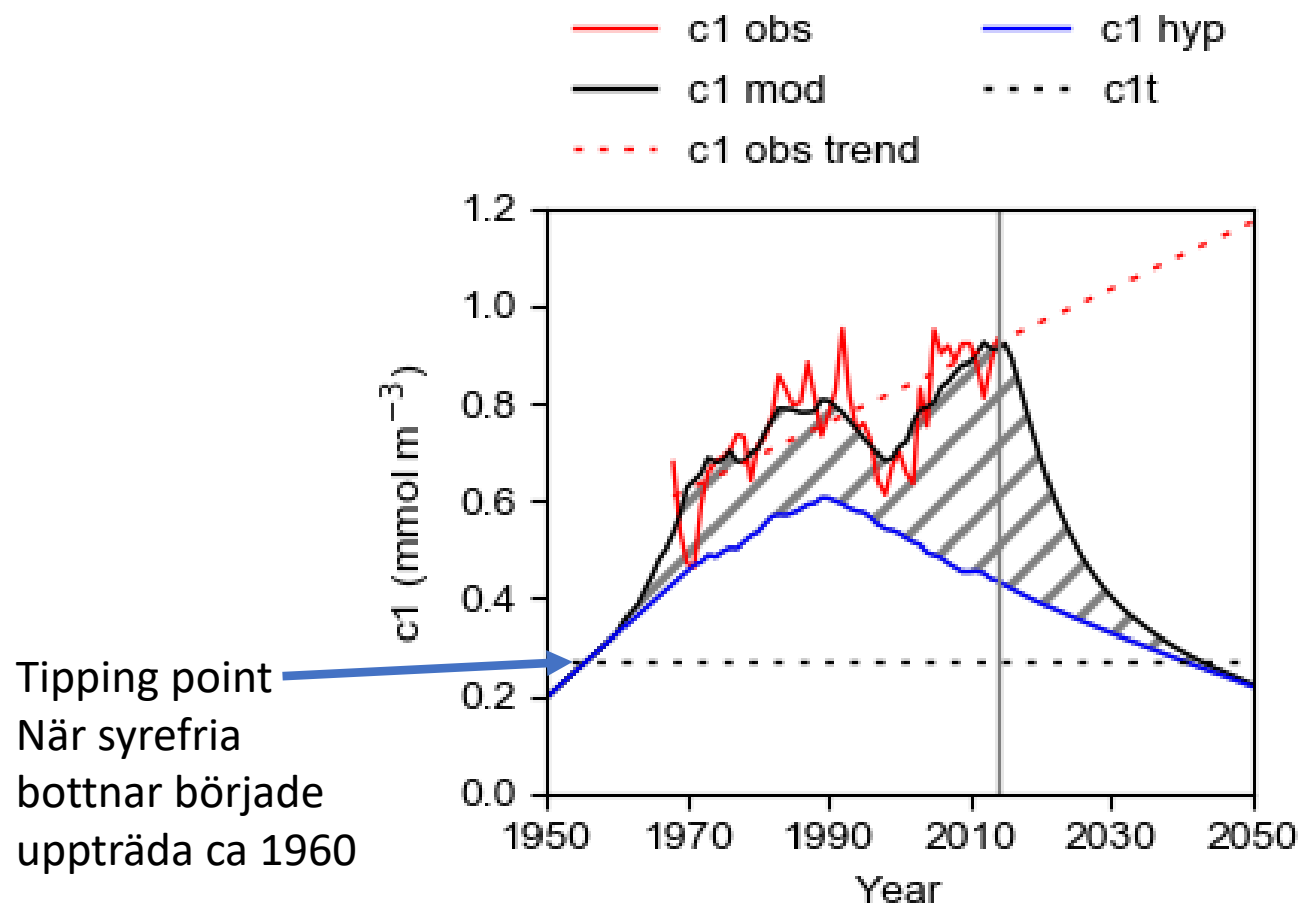
Tre olika initialvärden har använts. Utvecklingen visar att systemet ställer in sig på ungefär 20 år (Spin-up-time).

★ Koncentration 1958 uppskattad från mätningar (Stigebrandt, 2018)

(Från Stigebrandt & Andersson, 2020)

Egentliga Östersjön kan restaureras genom syresättning av djupvattnet

Modellkörning med $IPS=0$ (bottnarna hålls syresatta från år 2015) visar ($c1mod$) att Egentliga Östersjön kan restaureras till ett tillstånd motsvarande det som rådde innan en brytpunkt (tipping point) passerades när bottnarna blev syrefria under slutet av 1950-talet och därmed började läcka fosfor. Ytkoncentrationen var $c1t$ när brytpunkten passerades. (Från Stigebrandt & Andersson, 2020)



- Vid syresättning från år 2015 sjunker ytkoncentrationen $c1mod$ under ca 25 år från ca 0,9 (mmol m⁻¹) till ca 0,25 vilket är lägre än koncentrationen innan 'brytpunkten' inträffade. Syresättningen kan därefter avslutas.
- $c1hyp$ är den beräknade ytkoncentrationen om den interna källan inte hade existerat.
- Det streckade området mellan kurvorna $c1mod$ och $c1hyp$ visar effekten av den interna källan.

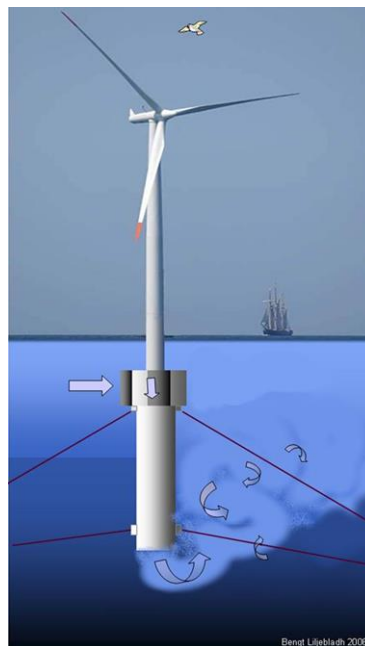
Hur kan man genomföra syresättning av djupvattnet?

Syre tas från övre, syremättade vattenskikt

Pump anläggning som användes i Byfjorden (Stigebrandt et al., 2015a)



Flytande vindmölla med pump



Syrgas från vätgasproduktion

Vid hydrolys av vatten för produktion av vätgas bildas syrgas som biprodukt.

Vätgas väntas få stor användning för energilagring och väntas kunna ersätta fossila bränslen vid industriella processer.

Syrekostnad

Att producera 1 kg vätgas genom elektrolys av vatten kräver ca 50 kWh med användande av modern Teknik med 67% verkningsgrad (H-TEC SYSTEMS). Samtidigt produceras 8 kg syrgas. Med ett elpris på 1 kr/kWh och **utan marknad för vätgas kostar det ca. 6 kr att producera 1 kg syrgas genom elektrolys av vatten.**

Att syresätta Östersjön genom att pumpa ner s.k. vintervatten till djupvattnet kostar ca 1 kr/kg tillförd syrgas.

Det kan finnas fördelar att använda ren syrgas vilket skulle kunna motivera att man betalar mer än 1 kr/kg för syrgas från elektrolys av vatten.

Det finns vindkraftsbolag som planerar att producera vätgas från vindkraft i öppna Östersjön (då blir syret mer eller mindre gratis?).

Byfjorden syresattes 2010-2012 genom nedpumpning och inblandning av ytvatten i djupvattnet, pumpflöde 2 m³/s, se Stigebrandt med flera (2015).



Flottens position
Markerad med röd
ring.

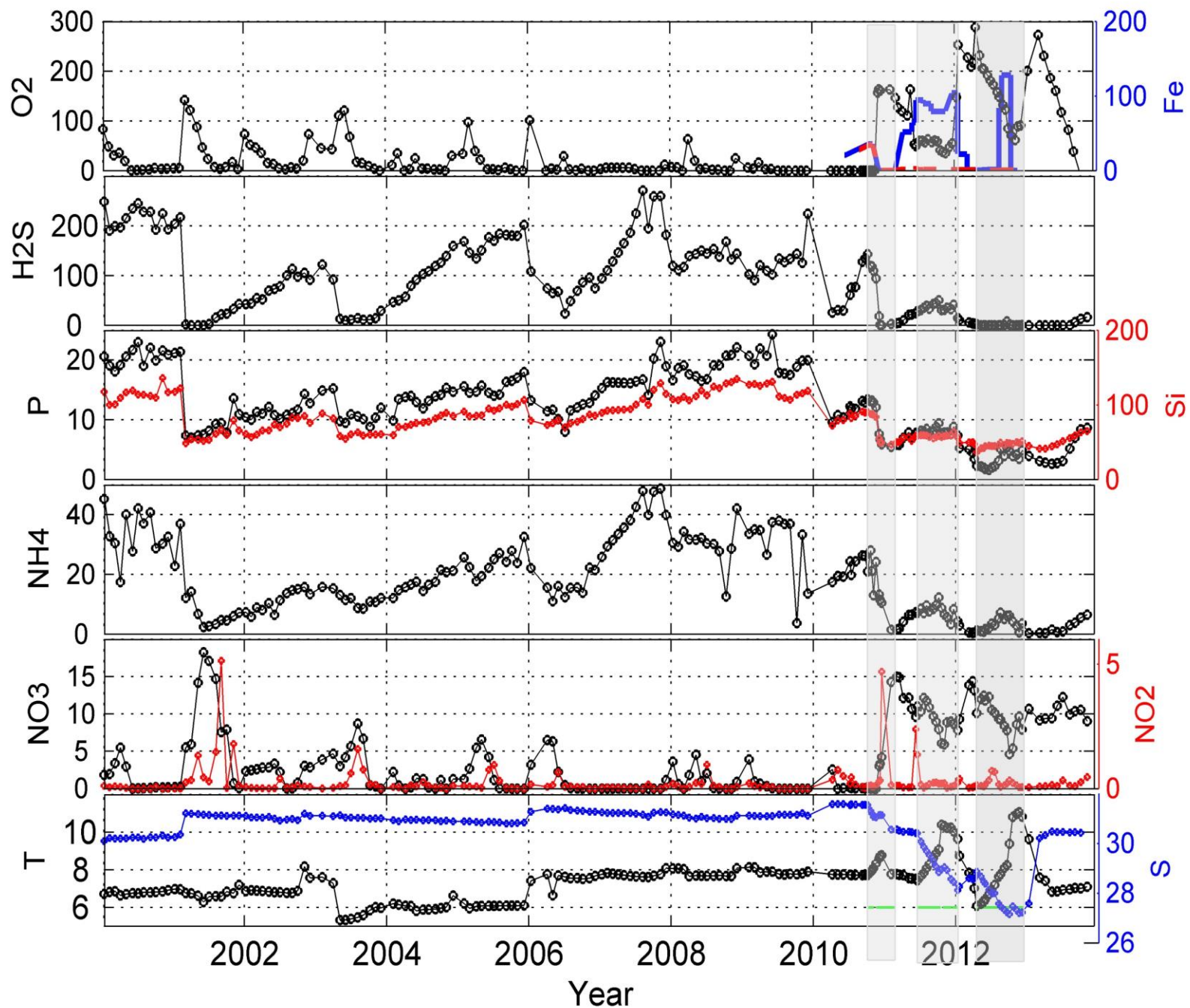
BYFJORDEN

Totala mängder (ton) i vattnet under 17.5 m djup.

Grå skuggade perioder visar när pumpning pågick.

Notera att mängden fosfor minskar under första halvåret av 2013 när hela djupvattenvolymen var väl syresatt.

(Från Stigebrandt med flera, 2015)



Problem?



Referenser

De flesta av referenserna kan laddas ner från nätet. Om inte, mejla anders.stigebrandt@marine.gu.se

Eilola, K., Stigebrandt, A., 2001: Modelling filamentous algae in shallow bays. Rapportnummer: 2001:38
Projektnummer: EU Life algae LIFE96ENV/S/380

[Filmer från torskreven - Fjordtorsk i Bohuslän](#)

Stigebrandt, A., 1976: Vertical diffusion driven by internal waves in a sill fjord. *J. Phys. Oceanogr.*, 6, 486-495.

Stigebrandt, A., 2001: FjordEnv – a water quality model for fjords and other inshore waters Göteborg University, Earth Sciences Centre, Report C40. 41 pp. DOI: 10.13140/RG.2.1.4846.5127

Stigebrandt, A., 2012: Hydrodynamics and circulation of fjords. In *Encyclopedia of Lakes and Reservoirs*, (eds. L. Bengtsson, Herschy, R.W. and Fairbridge, R.W.). DOI 10.1007/978-1-4020-4410-6, @Springer Science+Business Media B.V.

Stigebrandt, A., 2021: Syrefritt djupvatten accelererar Östersjöns övergödning. Sid 9-19 i *Vårt gemensamma innanhav*, red. Bo Lindberg, ACTA REGIAE SOCIETATIS SCIENTIARUM ET LITTERARUM GOTHOBURGENSIS, INTERDISCIPLINARIA I9. [På svenska | Baltic Sea Restoration](#)

Stigebrandt, A., Liljebladh, B., De Brabandere, L. Forth, M., Granmo, Å., Hall, P.O.J., Hammar, J., Hansson, D., Kononets, M., Magnusson, M., Norén, F., Rahm, L., Treusch, A., Viktorsson, L., 2015: An experiment with forced oxygenation of the deepwater of the anoxic By Fjord, western Sweden. *AMBIO*, 44, 42-54, DOI: 10.1007/s13280-014-0524-9

Stigebrandt, A., and Andersson, A., 2022: Improving oxygen conditions in periodically stagnant basins using sea-based measures - Illustrated by hypothetical applications to the By Fjord, Sweden. Continental shelf Research. 244, 104806, <https://doi.org/10.1016/j.csr.2022.104806>

Stigebrandt, A., and Andersson, A., 2022: Improving oxygen conditions in periodically stagnant basins using sea-based measures - Illustrated by hypothetical applications to the By Fjord, Sweden. Continental shelf Research. 244, 104806, <https://doi.org/10.1016/j.csr.2022.104806>

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, <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.572994>

Veiderpass, V., Stigebrandt, A., 2012: The Imp act of Waves on the Distribution of Submerged Macrophytes in Kalvöfjord, Sweden – A study of “Comfort zones” Vindvågors Betydelse för Distributionen av Makrofyter i Kalvöfjorden. VATTEN – Journal of Water Management and Research 68:255–264. Lund 2012

Tack för uppmärksamheten!