



UPPSALA  
UNIVERSITET

UPTEC W 23019

Examensarbete 30 hp

Maj 2023

# Utvärdering av artificiell syresättning i syrefria bottenvatten och modellering av fjärden Slätbaken

---

Arvid Jonsson



UPPSALA  
UNIVERSITET

## Evaluation of artificial oxygenation of hypoxic bottom waters and modeling of the bay of Slätbaken

---

Arvid Jonsson

### Abstract

As of today, the Baltic Sea is the system with the globally largest expansion of hypoxic or anoxic bottom waters, so-called “dead zones”. It is a consequence of the massive load of nutrients from the surrounding countries that started with the intensified industrialization in the start of the 20<sup>th</sup> century. With the transformation towards renewable energy, wind parks are planned to be built in the Baltic Sea on a substantial scale. Thereby, superfluous energy is planned to be used for sea-based production of hydrogen gas that can be piped to land. Large scale hydrogen gas production would generate enormous amounts of oxygen gas as a byproduct, which gives a theoretical opportunity to artificially oxygenate the dead zones of the Baltic Sea. Three main techniques to artificially oxygenate bottom waters were identified in 21 freshwater systems around the world: Downflow Bubble Contact System (DBCS), Side Stream Pumping System (SSPS) and Direct Oxygen Injection System (DOIS). All three techniques have successfully raised the concentration of dissolved oxygen from hypoxic (< 2 mg/l) to oxic (> 2 mg/l). In many cases, the oxygenation contributed to reduction of dissolved nutrients in the waters and/or enlarged habitats for fish and benthic fauna. A pilot plant for oxygenation in the bay Slätbaken would contribute to better understanding of how a future oxygenation system could be constructed in other parts of the Baltic Sea. A mass balance model was constructed, representing oxygen content and transport in Slätbaken. Results indicated that establishing a pilot plant would need a capacity of 8 tons O<sub>2</sub>/day to guarantee a dissolved oxygen concentration of > 4 mg/l, which would provide local fauna with a suitable safety margin regarding dissolved oxygen concentrations.

**Keywords:** Artificial oxygenation, Geo-engineering, oxygenation, Slätbaken, mass-balance modelling, oxygen demand

Teknisk-naturvetenskapliga fakulteten

Uppsala universitet, Utgivningsort Uppsala/Visby

Handledare: Joakim Hållén Ämnesgranskare: Andreas Bryhn

Examinator: Fritjof Fagerlund

## Referat

### Utvärdering av artificiell syresättning i syrefria bottenvatten och modellering av fjärden Slätbaken

*Arvid Jonsson*

Östersjön är idag det system med störst utbredning av syrefattiga eller syrefria botten i hela världen. Problemet har uppstått som följd av den massiva näringsbelastning från de kringliggande länderna som pågått sedan industrialiseringen intensifierades på 1900-talet. I och med omställningen till förnybar energi planeras framtida vindkraftsparker att byggas i Östersjön. Överflödiga energi planeras att användas till havsbaserad vätgasproduktion som sedan forslas in till land med rör. Vid storskalig vätgasproduktion produceras som biprodukt enorma mängder syrgas vilket ger helt nya förutsättningar för artificiell syresättning av Östersjöns syrefria botten. Tre övergripande tekniker för att artificiellt syresätta bottenvatten med syrgas har identifierats på 21 platser runt om i världen: Downflow Bubble Contact System (DBCS), Side Stream Pumping System (SSPS) och Direct Oxygen Injection System (DOIS). Alla tre tekniker har med goda resultat förhöjt syrgaskoncentrationen i bottenvatten från hypoxiskt ( $< 2$  mg/l) till oxiskt ( $> 2$  mg/l). I flera fall har syresättningen bidragit till reduktion av näringsämnen och/eller utökat habitat för fiskar och bottenlevande djur. En pilotanläggning i fjärden Slätbaken skulle ge bättre förståelse för hur ett system skulle kunna utformas i andra delar av Östersjön. En massbalansmodell konstruerades över Slätbaken och resultatet var att pilotanläggningen bör ha en kapacitet på 8 ton  $O_2$ /dygn för att med säkerhet kunna höja syrgaskoncentrationen till  $> 4$  mg/l. Detta skulle ge en lämplig säkerhetsmarginal för den lokala bottenlevande faunan med avseende på syrgashalt.

**Nyckelord:** Artificiell syresättning, syresättning, syrgasnedpumpning, Slätbaken, massabalansmodellering, syrebehov

## Förord

Det här examensarbetet omfattar 30 hp och genomfördes i samarbete med IVL svenska miljöinstitutet med handledning av Joakim Hållén. Examinator var Fritjof Fagerlund och ämnesgranskare var Andreas Bryhn, forskare vid Institutionen för akvatiska resurser; Kustlaboratoriet. Examensarbetet utgjorde den slutgiltiga kursen i mastersprogrammet för civilingenjörsutbildningen Miljö- och Vattenteknik på Uppsala universitet och Sveriges Lantbruksuniversitet.

Jag vill rikta ett tack till Joakim Hållén och Magnus Karlsson från IVL som har gjort det här arbetet möjligt och gett många roliga stunder. Extra tack till Jocke som lät mig följa med på en fantastisk fältdag i Hudiksvall som introduktion. Tack till Ulf Hagström som lät mig följa med och hålla en presentation för föreningen Hjälmarens Vänner i Örebro, det var mycket inspirerande. Jag riktar också ett stort tack till Andreas Bryhn som bidragit med fantastisk kunskap och vägledning under hela arbetets gång.

Till sist vill jag tacka min familj och mina vänner som i vått och tort stöttar mig genom livet. Utan er hade jag knappast klarat fem år på ingenjörsutbildningen!

## Populärvetenskaplig sammanfattning

Industrialiseringens intensifiering på 1900-talet ledde till en explosionsartad befolkningstillväxt vars avlopp, industriutsläpp och gödning av jordbruks- och skogsmarker ledde till stora näringsläckage som kontinuerligt har belastat Östersjön. Tillförsel av näringsämnen har gett en ökad mängd organiskt material i form av växtplankton, fiskar och djur som, när de dör och sjunker ned till botten, ger en nedbrytningsprocess som är syrekrävande. Då Östersjön har tillrinning både i form av saltvatten genom de danska sunden och sötvatten från land består den av bräckt vatten. Det salta vattnet har högre densitet än det söta vilket har lett till att ett språngskikt i form av en haloklin har bildats vilket gör att omblandningen av vattnet försvåras. Som följd har syrgashalten i Östersjöns bottenvatten utarmats i allt högre takt. Östersjöns problematik med syrefria bottenar har därför utökats vilket har lett till att Östersjön idag är det system med störst utbredning av syrefria bottenar i världen. Fisk och botten djur behöver vattenlöst syrgas för att överleva och fortplantas, så dessa bottenar är därför endast koloniserade av anaeroba bakterier som kan överleva utan syre. Dessa anaeroba bakterier kan bilda svavelväten vilket är giftigt för både fiskar och botten djur och leder till ökat syrebehov. Icke nedbrutet organiskt material och svavelväten har ansamlats på bottenarna och bildat en syreskuld som innebär att syrebehovet ökar på bottenarna. Vid särskilda fall kan starka vindar eller stormar leda till stora inflöden av syrgas till Östersjöns bottenvatten. Dessa inflöden är naturens egna experiment på syresättning av syrefria bottenar och när sådana skeenden har studerats har det upptäckts att syrerika förhållanden kan leda till att näringsämnen fastläggs i sedimentet och således blir oåtkomliga för växter och andra näringskrävande organismer som lever i ytvattnet.

I omställningen mot förnybara energikällor planeras stora vindkraftsparker att byggas till havs i Östersjön. Överflödigt energi beräknas kunna användas till havsbaserad vätgasproduktion. Vid storskalig vätgasproduktion produceras enorma mängder syrgas som biprodukt. En möjlighet har därmed skapats för att artificiellt syresätta de syrefria bottenarna i Östersjön utan någon vertikal omblandning av vattenmassor. Den här rapporten har undersökt vilka tekniska förutsättningar det finns för ett sådant projekt genom att identifiera tidigare försök med artificiell syresättning runt om i världen. En massbalansmodell har också konstruerats över fjärden Slätbaken som ligger utanför Söderköping där ett eventuellt pilotprojekt i mindre skala skulle kunna äga rum.

Det finns god kunskap om artificiell syresättning av syrefria bottenar. Tekniken är välbeprövad i framför allt Nordamerika där den använts bland annat för att säkerställa god drickvattenskvalitet i reservoarer eller för att utöka fiskhabitat. Totalt 21 platser lokaliserades i den här rapporten där kapaciteten varierade mellan några hundra kilo syrgas per dygn till över hundra ton syrgas per dygn. Tre huvudsakliga tekniker har definierats: Downflow Bubble Contact System (DBCS), Side Stream Pumping System (SSPS) och Direct Oxygen Injection System (DOIS). Alla tre tekniker har med goda resultat förhöjt syrgaskoncentrationen i bottenvatten från syrefattigt eller syrefritt till goda syreförhållanden. På flertalet platser noterades utökat habitat för fisk och botten djur, näringsreduktion i bottenvattnet och oxidering av svavelväten. Alla platser har inte haft samma framgång av syresättning. Särskilt näringsreduktion är omdiskuterad och beror på många fler faktorer än endast förhöjd syrgasnivå. I sin helhet har alla tre systemen visats ha stora fördelar på de flesta platser där de använts. För en framtida installation i Östersjön är DOIS det system som är mest intressant då det är ett simpelt system som direkt injicerar syrgasbubblor i bottenvattnet och kan uppnå en

väldigt hög kapacitet. För en pilotanläggning i Slätbaken valdes därför DOIS som det bästa alternativet.

Slätbaken har egenskaper som är attraktiva för ett studieområde som avser representera Östersjön men i mindre skala. Det finns en långvarig syrebrist i de djupaste delarna och det förekommer säsongsmässig syrebrist i en stor del av vattenmassan. Mätdata tyder också på att fjärden, liksom hela Östersjön, har en haloklin. Massbalansmodellen i Slätbaken visade att ett pilotsystem behöver ha en kapacitet på 8 ton syrgas per dygn för att höja syrgashalten i bottenvattnet till en nivå där nyckelarter som torsk och skrubbskädda (flundra) har gynnsamma förhållanden för fortlevnad och fortplantning.

# Innehåll

Referat .....	1
Förord .....	1
Populärvetenskaplig sammanfattning .....	2
1. Inledning.....	1
2. Syfte och frågeställning.....	1
3. Bakgrund och teori .....	2
3.1. Syrebristen i Östersjön .....	2
3.2. Syrets påverkan på fosfor i bottenvatten .....	4
3.3. Studieområdet Slätbaken.....	5
3.4. Stella Professional .....	7
4. Metod .....	7
4.1. Tidigare försök med syresättning av bottnar .....	7
4.2. Bedömning av Slätbaken som studieområde .....	7
4.3. Datainsamling.....	8
4.4. Bearbetning av data .....	8
4.5. Modellerings .....	8
4.6. Kalibrering och validering.....	11
5. Resultat av litteraturstudien.....	11
5.1. Downflow Bubble Contact System (DBCS).....	14
5.1.1. Camanche Reservoir, USA Kalifornien, DBCS.....	14
5.1.2. Newman Lake, USA Washington, DBCS.....	15
5.2. Side Stream Pumping System (SSPS).....	15
5.2.1. Lake Bard, USA Kalifornien, SSPS .....	16
5.2.2. Ottoville Quarry, USA Ohio, SSPS .....	16
5.2.3. Lake Thunderbird, USA Oklahoma, SSPS .....	16
5.2.4. Canning River, Australien, SSPS .....	17
5.3. Direct Oxygen Injection System (DOIS) .....	17
5.3.1. Russell Lake, USA Georgia, DOIS .....	18
5.3.2. Amisk Lake, Canada, DOIS .....	18
5.3.3. Spring Hollow och Carvins Cove, USA Virginia, DOIS .....	19
5.3.4. Calaveras och San Antonio, USA Kalifornien, DOIS .....	19
5.3.5. Pleasant Lake och Vadnais Lake, USA Minnesota, DOIS .....	19
5.3.6. Baldeggersee och Sempachersee, Schweiz, DOIS .....	20
5.2.7. Aurora Reservoir, USA Colorado, DOIS.....	20

5.3.8. Tegeler See, Tyskland, DOIS .....	20
5.3.9. Lake Casitas, USA Kalifornien, DOIS .....	21
5.3.10. Douglas Dam, USA Tennessee, DOIS .....	21
5.4. Energiåtgång.....	21
6. Resultat för Slätbaken som studieområde .....	22
6.1. Vattenkemiska förhållanden.....	22
7. Modellresultat.....	27
7.1. Dimensionering av syrgasdosering .....	28
7.2. Syretäring och omblandning .....	30
8. Diskussion .....	31
8.1. Syresättningsanordningar .....	31
8.2. Slätbakens lämplighet som studieområde .....	32
8.3. Modelldiskussion .....	33
8.3.1. Syretäring .....	33
8.3.2. Isläggning .....	34
8.3.3. Modellens pålitlighet.....	34
8.3.4. Pilotanläggningens syrgasdosering .....	35
8.4. Framtidsutsikter och rekommendationer.....	36
9. Slutsatser .....	36
10. Referenser.....	37
Bilaga A.....	41
Bilaga B.....	42
Bilaga C.....	42
Bilaga D.....	43
Bilaga E.....	44



## 1. Inledning

Syrebristen i Östersjöns djupvatten blir alltmer utbredd och orsakar stora problem för demersal (bottenlevande) fisk och annan bottenfauna, liksom för reproduktionsmöjligheter hos flera nyckelarter (Bernes 2005). Omblandningen i Östersjön är beroende av kraftiga stormar för att nytt, syrerikt vatten ska strömma in från Kattegatt genom de danska sunden (ibid). Det finns en haloklin (saltsprångskikt) som skiljer vatten med hög salthalt och hög densitet från vatten med lägre salthalt (Väli et al. 2012). Det är främst under detta skikt som syrebrist uppstår då utbytet med syrerikt ytvatten är begränsat där (ibid).

De syrefria bottarna har också kopplats samman med den explosionsartade befolkningstillväxt som skedde på 1900-talet, vars avlopp, industriutsläpp och gödning av jordbruks- och skogsmarker har lett till stora näringsläckage till Östersjön och därav intensifierade algbloomningar (Diaz och Rosenberg 2008). Den aeroba bakteriella nedbrytning som sker när algerna dött och sjunkit till djupvatten eller botten förbrukar stora mängder syre och har bidragit till de syrefria bottarna i Östersjön (ibid).

I övergången till fossilfri energiproduktion planeras det att byggas stora vindkraftsparker till havs i Östersjön. I några av dessa finns planer på att producera vätgas med hjälp av elektrolysörer och som sedan transporteras in till land via rörledningar. Vid vätgasproduktion bildas som biprodukt stora mängder syrgas som potentiellt kan användas för att syresätta de syrefria bottarna i Östersjön. IVL Svenska Miljöinstitutet utreder frågan inom ett nyligen påbörjat projekt tillsammans med bland annat vindkraftsparkutvecklaren OX2 och representanter från näringsliv och myndigheter i Östergötland och på Gotland. Tidigare försök med syresättning i Östersjön har gjorts i ett pilotprojekt där ytvatten pumpades ned för att stimulera en omblandning, vilket medförde vissa farhågor enligt en del forskare (Naturvårdsverket 2012). En helt ny möjlighet finns nu att undersöka syresättning med ren syrgas i Östersjön vilket inte behöver leda till en omblandning. Flera sjöar och reservoarer i Nordamerika där tekniken är välbeprövad och används i nuläget i fler än 20 platser med goda resultat (Mobley et al. 2019).

## 2. Syfte och frågeställning

Syftet med examensarbetet var att utgöra en inledande del i en pilotstudie för att testa huvudtesen om huruvida teknik och förutsättningar för miljöförbättrande syresättning i Östersjön finns. Därav ska arbetet i första hand ta fram en modell över studieområdet Slätbakens hydrodynamik och syreomsättning, som ska ligga till grund för den tänkta pilotanläggningen. Med hjälp av modellen utreds hur mycket syre som behöver doseras för att få önskad effekt i systemet. Fyra frågeställningar har utformats för att svara på huvudtesen:

- Hur genomförs syresättning av bottnar i praktiken i andra delar av världen?
- Hur har utfallen för olika tekniska lösningar sett ut?
- Har fjärden Slätbaken grundläggande hydrodynamiska förhållanden som gör det lämpligt att använda den som studieområde?
- Hur ska en framtida pilotanläggning dimensioneras för att dosera rätt mängd syre till systemet?

### 3. Bakgrund och teori

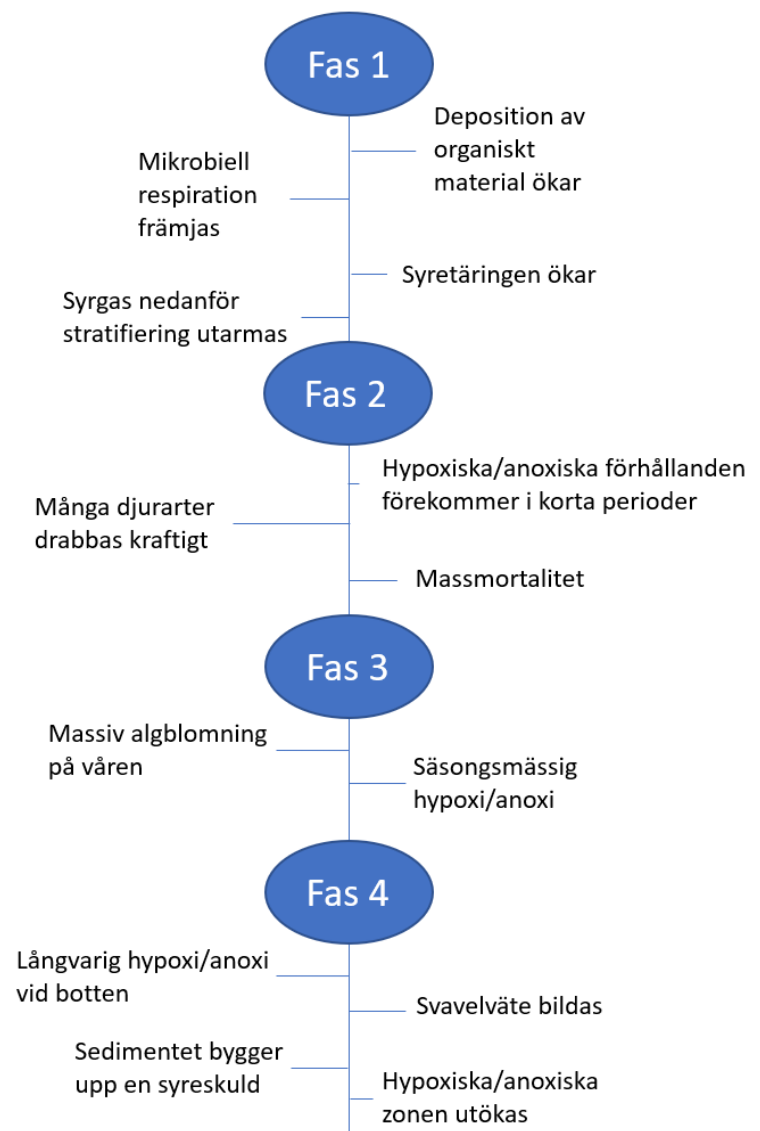
#### 3.1. Syrebristen i Östersjön

Sedan Östersjön bildades för ca. 8000 år sedan, under ett komplext samspel mellan Weichselistidens retirerande inlandsis och postglacial landhöjning, har det i perioder funnits syrebrist på Östersjöns botten (Conley et al. 2009). Både omfattningen i yta och mängd tillgängligt syre har sedan 1850-talet förvärrats alltmer på grund av antropogena utsläpp (Meier et al. 2018). Industrialiseringen på 1900-talet ledde till att befolkningen runt Östersjön ökade mångfaldigt. Näringsläckage från jordbruk, avlopp och industrier har sedan bidragit till den eutrofiering som skett i Östersjön och som har varit en viktig orsak till den rådande syrebristen (Díaz et al. 2008). Ökad mängd biomassa och algbloomningar innebär högre mikrobiell aktivitet och respiration vid nedbrytningen vilket är mycket syrekrävande, och därav har bottenvattnets syreressurser förbrukats i allt högre takt (Naumov et al. 2023). Trots att den externa belastningen av fosfor och kväve har minskat sedan 1980-talet till följd av åtgärder från länderna kring Östersjön består problemen med de syrefria bottenarna (HELCOM 2023a,b). Långvarig syrebrist kan bygga upp en syreskuld så när det väl inströmmar nytt, syrerikt vatten till områdena förbrukas syret snabbare än vad det har gjort förut (Meier et al. 2018; Naumov et al. 2023). Östersjön är idag det system med störst utbredning av syrefria bottenar i hela världen (Díaz och Rosenberg 2008). I sin natur är Östersjön dömd att ha problem med syrefria bottenar då vattenutbytet av saltvatten från Nordsjön genom de danska sunden är lågt medan tillförseln av sötvatten från inlandet är högt (Meier et al. 2018). Det leder till att Östersjön har en haloklin som ger en tydlig stratifiering mellan salt vatten med hög densitet och mindre salt vatten med lägre densitet. System med stratifierade vatten löper större risk för att vattenupplöst syrgas (dissolved oxygen; DO) ska utarmas eftersom sådana system motverkar ventileringen av bottenarna (Díaz och Rosenberg, 2008). I Östersjön är det endast i särskilda fall då speciella väderförhållanden med starka vindar eller stormar kan omblanda och syresätta djuphålorna i så kallade Major Baltic Inflows (MBI:s) (Meier et al. 2018).

När syrenivån i vattnet är under 2 mg/l klassas vattnet som hypoxiskt (syrefattigt) och vid 0 mg/l som anoxiskt (syrefritt) (Conley et al. 2002). Sannolikheten att påträffa torsk och skrubbskädda, två nyckelarter i Östersjön, har visats minska redan när koncentrationen av DO är under 3–4 mg/l och förändringar i fiskarternas utbredning har skett sedan 1980-talet, huvudsakligen orsakad av utökade hypoxiska områden (Orio et al. 2018). De anoxiska områdena utgör endast livsmiljöer för anaeroba bakterier som kan bilda svavelväten, vilket är giftigt för både fiskar och botten djur samt kan leda till ökat syrebehov (Dunnette et al. 1985). Vid analys av MBI:s i Östersjön har det fastslagits att syrebehovet ökar i de anoxiska bottenarna då en syreskuld av

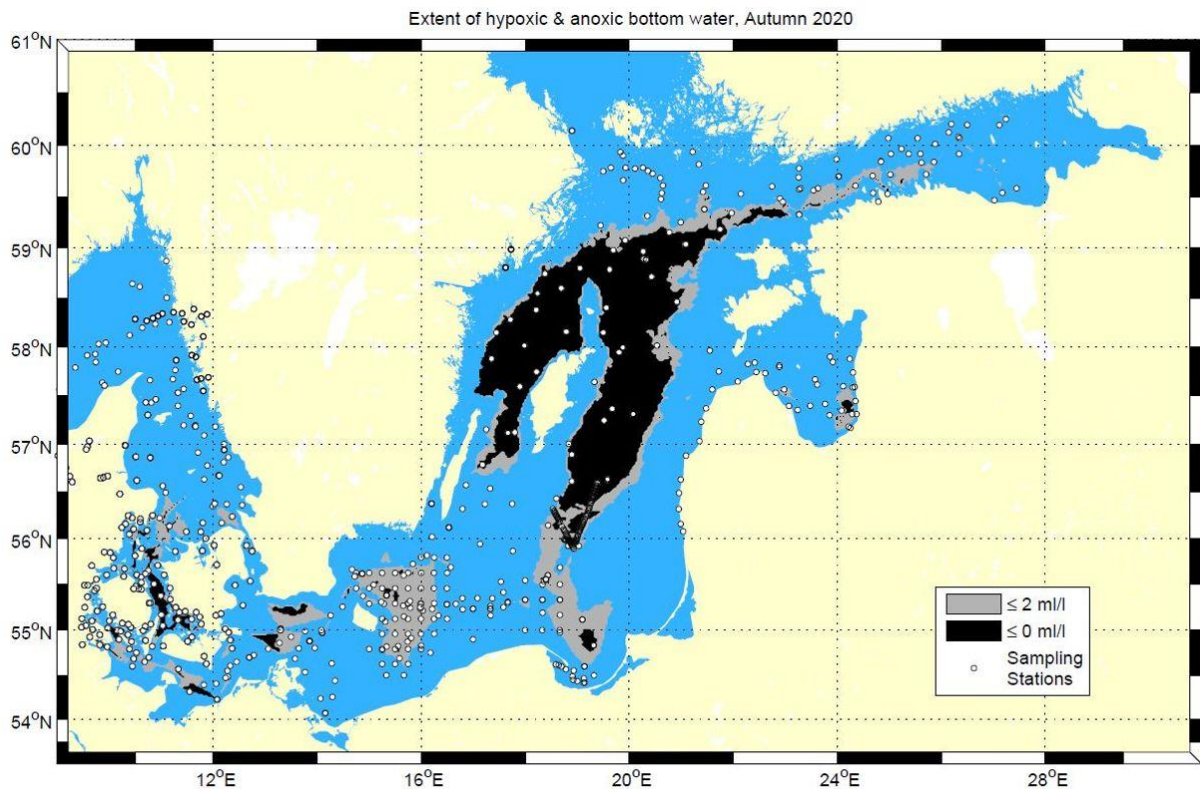
icke-oxiderat biologiskt material och svavelväte byggts upp under åren vilket har lett till att det inflödande syre från MBI:s konsumerats allt snabbare (Meier et al. 2018; Naumov et al. 2023). Stigebrandt och Gustafsson (2007) visade att en sänkt koncentration av fosfor i Östersjön på 1990-talet berodde på ett MBI som syresatte bottenvattnet och menade att det finns potential till att binda 4 ton fosfor per kvadratkilometer i Östersjön om botten hålls syresatt.

Vägen från eutrofiering till hypoxiska och anoxiska zoner beskrevs i fyra faser av Diaz och Rosenberg (2008). Fas 1 inleds när ökad deposition av organiskt material bidrar till ökad syretäring vilket påbörjar en utarmning av syrgasen i bottenvattnet. I fas 2 har hypoxiska eller anoxiska förhållanden uppnåtts i korta perioder och påverkat djurarter kraftigt. Fas 3 innebär massiv algblomning på våren på grund av abundansen av näringsämnen vilket leder till säsongsmässigt hypoxiska/anoxiska bottenar. Fas 4 innebär långvariga hypoxiska/anoxiska förhållanden vilket leder till att svavelväte bildas och en syreskuld byggs upp. I förlängningen utvidgas dessa zoner om inte nytt syre strömmar in (Figur 1).



Figur 1. Fyra faser av syrebrist i bottenar. Illustratör: Arvid Jonsson

Stora delar av Egentliga Östersjön är redan i fas 4 och de anoxiska och hypoxiska områdena har en kraftig utbredning (Figur 2). Det bör dock påpekas att mellanårsvariationen i förekomst av sådana områden kan vara betydande.



Figur 2. Hypoxiska (grå) och anoxiska (svart) bottnars utbredning i Egentliga Östersjön år 2020. Från SMHI ([www.smhi.se/nyhetsarkiv/den-extrema-syrebristen-i-ostersjon-fortsatter-1.169650](http://www.smhi.se/nyhetsarkiv/den-extrema-syrebristen-i-ostersjon-fortsatter-1.169650)).

### 3.2. Syrets påverkan på fosfor i bottenvatten

Mortimer (1941) var pionjär under 1900-talets mitt när han beskrev hur koncentrationen av DO i bottenvatten kontrollerade det sedimentära utbytet av fosfor till vattnet. Som följd har det gjorts en mängd tester där sjöar och reservoarer på artificiell väg har syresatts med syfte att minska fosformängden i ytvattnet (Beutel och Horne 1999; Preece et al. 2019). Många av försöken har bekräftat Mortimers synsätt, men det har också funnit motsägande resultat. Därför bör det sedimentära fosforutbytet ses som en komplex process där flertalet faktorer är betydande. Form och mängd av fosfor samt kontinuerliga processer i sedimentet påverkar alla hur det sedimentära fosforutbytet sker (Hupfer och Lewandowski 2008). Startskottet för huruvida en syresättning av Östersjöns botten påverkar totala fosformängden löst i vattnet kom när Stigebrandt och Gustafsson (2007) kopplade samman kraftiga inströmmingar av syrerikt vatten till djupvattnet under 1993 och 1994 med en massiv minskning av löst fosfor i Egentliga Östersjön.

Löst oorganiskt fosfor (DIP) i Egentliga Östersjön korrelerar med ändringar av hypoxiska områden i bottenvattnet men inte med ändringar av den totala fosforbelastningen (Stigebrandt och Gustafsson 2007; Vahtera et al. 2007). Tvärtemot DIP har löst oorganiskt kväve (DIN) en negativ korrelation till förändringar av hypoxiska bottenvatten. En låg N/P-kvot gynnar cyanobakterier som kan fixera kvävgas (en nästan outtömlig resurs) och på så sätt tillföra kväve till ekosystemet, så hypoxiska botten kan alltså främja algbloomning (Vahtera et al. 2007). Stigebrandt och Gustafsson (2007) kopplade samman att den syresättning av bottenarna i Egentliga Östersjön i början av 1990-talet till följd av en svag haloklin och stormiga vintrar bidrog med en minskning på ungefär 100 kT DIP i vattenmassan och enligt deras preliminära

beräkningar skulle en halvering av fosformängden vara möjlig inom några år av syresatta bottenar. Det är ett argument för hur viktiga de interna processerna i Östersjön är för att påverka näringsbalansen. Att artificiell syresättning inte skedde då beror delvis på att den föreslagna metoden som utgick från att pumpa ned syrerikt ytvatten skulle medföra kraftig vertikal omblandning av Östersjöns vatten, vilket riskerade negativa effekter för salthaltskänsliga organismer (Conley et al. 2009).

”En ond cirkel” är ett uttryck som brukar användas när bottenarnas syrebrist och fosforutsläpp jämförs. Syrebristen leder till ökat utsläpp av fosfor till vattenmassan vilket i sin tur gynnar kvävefixerande fosforlimiterade cyanobakterier. Ökad biomassa leder till ökad nedbrytning i djupvatten eller på botten vilket förbrukar syre och förvärrar syrebristen. (Vahtera et al. 2007)

### 3.3. Studieområdet Slätbaken

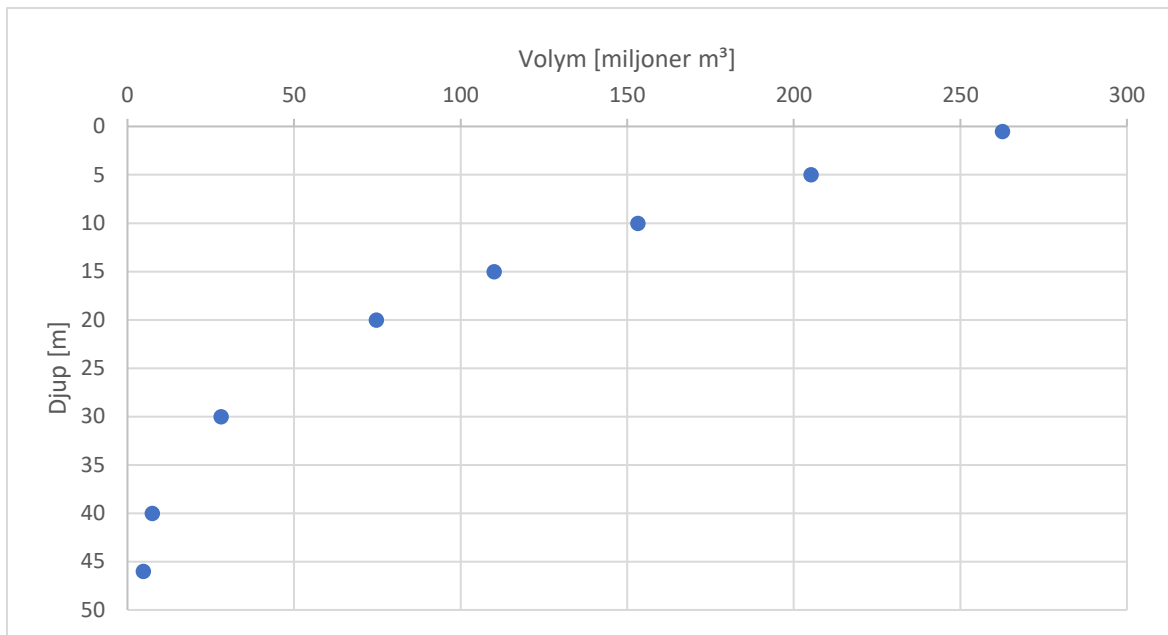
Slätbaken är en kustfjärd i mellersta Sverige öster om Söderköping och sydöst om Norrköping (Figur 4). Den ligger i Östergötlands län och tillhör Södra Östersjöns vattendistrikt (SMHI-SHARKweb 2023). Göta kanal har sin start i fjärden vilket innebär att det finns båttrafik där och den har ett högt rekreativvärde för både turister och lokalboende. Fjärden är 46 meter som djupast (Figur 3) och har ett medeldjup på 17,5 meter. Fler morfometriska egenskaper finns i Tabell 1. Det är en tröskelbelagd fjärd där ett mycket smalt sund med ett djup på ca. 5 meter reglerar vattenutbytet som sker mellan Slätbaken och den utanföriggande Merumsfjärden. Vattenbalansen beror i huvudsak av inströmmande vatten från land och utbytet över tröskeln. Vattenutbytet över tröskeln var 18 m<sup>3</sup>/s utflöde och 13 m<sup>3</sup>/s inflöde, från Söderköpingsån och fjärdens direkta tillrinningsområde inströmmade i genomsnitt 5 m<sup>3</sup>/s, sett som årsmedelvärde under perioden 2010–2021 (Figur 4) (SMHI-Vattenwebb 2023). Näringsrikt vatten från Söderköpingsån har inneburit en hög näringsbelastning på fjärden. Enligt Motala Ströms årsrapport för 2021 påträffades svavelväten på 24,9 meters djup vilket bekräftar att syrebrist förekommit. Inga djur påträffades på 30,5 meters djup vid bottenfaunaundersökningar 2018 och 2021 (Motala ström 2021). I djuphålorna förekommer flerårig syrebrist varpå de är i princip helt livlösa med undantag för vissa bakterier (VISS 2023). Sedimentanalys på 23 och 27 meters djup visade tydliga lamineringar daterade ända till mitten av 1930-talet, vilket tyder på en mycket långvarig syrebrist i fjärden (Karlsson et al. 2010). Oxiska förhållanden tycks ha förekommit år 1996 och 2009 (ibid).

Tabell 1. Slätbakens geografi och morfometri.

<i>Medeldjup (<math>z_{medel}</math>)</i>	17,5 m
<i>Maxdjup (<math>z_{max}</math>)</i>	46 m
<i>Volym</i>	265 Mm <sup>3</sup>
<i>Area</i>	15,4 km <sup>2</sup>
<i>Vattendistrikt</i>	Södra Östersjön
<i>Län</i>	Östergötlands län
<i>Volym i syrebehov*</i>	75 Mm <sup>3</sup>

\*se resultat för härledning

Den hypsografiska kurvan visar hur stor volym av fjärden som befinner sig på varje djup (Figur 3).



Figur 3. Hypsografisk kurva för Slätbaken som visar relationen mellan volym (Mm<sup>3</sup>) och djup (m). Källa: SMHI.

Tidigare åtgärder har gjorts för att motverka näringsbelastningen på Slätbaken. Detta har skett genom att fokusera på att minska näringsbelastningen från källor i avrinningsområdet som jordbruk och enskilda avlopp. Vattendragsrådgivning från organisationer som Greppa näringen och lokala vattenvårdsprojekt är exempel på åtgärder som vidtagits (Länsstyrelsen 2014).



Figur 4. Karta med Slätbaken (ljusblå markering) och dess vattenbalans, in- och utflöde markerade med pilar. Över tröskeln flödar det på årsbasis i genomsnitt 18 m<sup>3</sup>/s ut och 13 m<sup>3</sup>/s

in i fjärden. Från land och mindre vattendrag flödar 5 m<sup>3</sup>/s in. Mätstationen SÖ06 är markerad som en blå prick. Källa: SMHI och VISS.

### 3.4. Stella Professional

Stella Professional är ett modellverktyg från Isee Systems för dynamisk modellering som har använts till bland annat ekonomiska modeller och strategianalyser (Isee Systems 2023). Verktöget är mycket överskådligt och effektivt för att använda till massbalansmodeller vilket har gjorts flertalet gånger tidigare (Carlsson et al. 1999; Håkanson et al. 2004; Håkanson 2009). Simuleringen sker i tidssteg DT som väljs av användaren och simuleras med Eulers metod, RK2, Cycle time eller RK4.

## 4. Metod

### 4.1. Tidigare försök med syresättning av bottnar

Den huvudsakliga litteraturstudien som gjorts i examensarbetet omfattade tidigare försök med syresättning av bottnar. Litteratursökningen grundades i en mapp från uppdragsgivaren IVL med tekniska rapporter och vetenskaplig litteratur kring syresättning som utgångspunkt. Där fanns bland annat en litteratursammanställning av Beutel och Horne (1999), där olika tekniker för syresättning av bottnar och exempel på sjöar som använts som studieområden listades. En tabell i Excel skapades med alla platser som hade haft eller har en syresättningsanordning. När en lista på 21 platser där olika tekniker för syresättning varit aktiva sammanställdes, användes sökorden "namn på sjö" + "oxygenation" i Google Scholar för att påträffa den senaste forskningen kring platserna, databasen Web of Science och Uppsala universitets digitala bibliotek användes också för att nå ytterligare litteratur. Utifrån de källor litteratursökningen gav träffar på sammanställdes sedan en kort text kring varje plats där syresättning skett.

### 4.2. Bedömning av Slätbaken som studieområde

De egenskaper som eftersöks i studieområdet ska vara liknande dem som råder i Egentliga Östersjön. Syresättningen bör därmed i pilotanläggningen ha möjlighet testas på djupare vatten då det är viktigt att syreanordningen ska kunna injicera syrgas under Östersjöns haloklin. Det är också en fördel om platsen har lång omsättningstid för vattnet och ett begränsat vattenutbyte likt genom de danska sunden. Viktigast av allt är att platsen faktiskt har syrebrist, helst permanent i de djupare delarna likt Egentliga Östersjön.

Med detta underlag har dessa faktorer undersökts i Slätbaken:

- Mätdata – finns tillräckligt högupplöst mätdata för att göra en kvalificerad bedömning?
- Syrehalt – förekommer syrebrist?
- Salinitet – finns en haloklin?
- Temperatur – förekommer en omblandning höst och vår?
- Fysikaliska egenskaper – är omsättningstid, djup och vattenbalans jämförbara med Östersjön?

Litteratur som använts för insamling av fakta kring Slätbaken var främst VISS samt Motala Ströms Vattenvårdsförbunds årsrapport 2021. Dessa användes för att ge grundläggande kunskap om fjärden och även för validering av resultat.

### 4.3. Databasinsamling

Data för Slätbaken hämtades från SMHI:s SHARKweb. Datatyp sattes till *Physical and Chemical* och Parametrar till *Alla*. Tidsperioden ställdes in på från 1940 – 2023 med alla månader valda. Därefter valdes stationen *SÖ06 Slätbaken* och sedan *ladda ned*.

Kompletterande data hämtades också från SMHI Vattenwebb. Inre Slätbaken markerades i kartverktyget på hemsidan och hämtades. Data som hämtades hade genererats med SMHI:s HYPE-modell med version *HYPE\_version\_5\_15\_0* och modelluppsättning *s-hype2016\_version\_16\_h*.

### 4.4. Bearbetning av data

Parametrar av störst intresse för att bedöma Slätbaken som lämpligt studieområde var salinitet, syrgashalt, temperatur samt parametrar totalfosfor (tot-P). Dessa medelvärdesbildades för varje månad som fanns tillgänglig från 2014-12-17 till 2021-03-18. Tidsramen bestämdes av att både salinitet och syrgas ändrade mätmetod med första mätvärde 2014-12-17 vilket också ansågs som en rimlig startpunkt och att 2021-03-18 var det nyaste mätvärdet. Detta innebar att det för varje djup fanns 8 mätpunkter som underlag för månadsmedelvärdena. Dessa datapunkter kunde också användas i modellen (se avsnitt 4.5) som input (Tabell 2). Efter medelvärdesbildning ritades grafer upp för varje parameter med djup på y-axeln, koncentration på x-axeln och varje månad som en egen serie med en egen färg. Detta ledde till grafer där fjärdens typiska tillstånd månad för månad med lätthet kunde analyseras (se avsnitt 6).

För att beräkna medeldjup i meter ( $z_{medel}$ ) användes fjärdens volym ( $V$ ) i  $m^3$  dividerat med fjärdens ytarea ( $Area$ ) i  $m^2$ ; se ekvation (1).

$$z_{medel} = \frac{V}{Area} \quad (1)$$

Slätbakens bottenarea,  $Area_{BV}$ , estimerades utifrån ett antal morfometriska parametrar enligt metodik som beskrivs i Håkanson (2003), se ekvation (2), (3) och (4).

$$Area_{BV} = Andel A * Area \quad (2)$$

Andel A beräknas i ekvation (3) och beror av fjärdens maxdjup  $Z_{max}$  och antal meter till fjärdens språngskikt  $Z_{TA}$ .

$$Andel A = \left( \frac{Z_{max} - Z_{TA}}{Z_{max} + Z_{TA}^{(3-Vd^{1.5})}} \right)^{0.5/Vd} \quad (3)$$

$Vd$  är bottenformfaktorn och behövs för att beräkna  $Andel A$ , se (4).

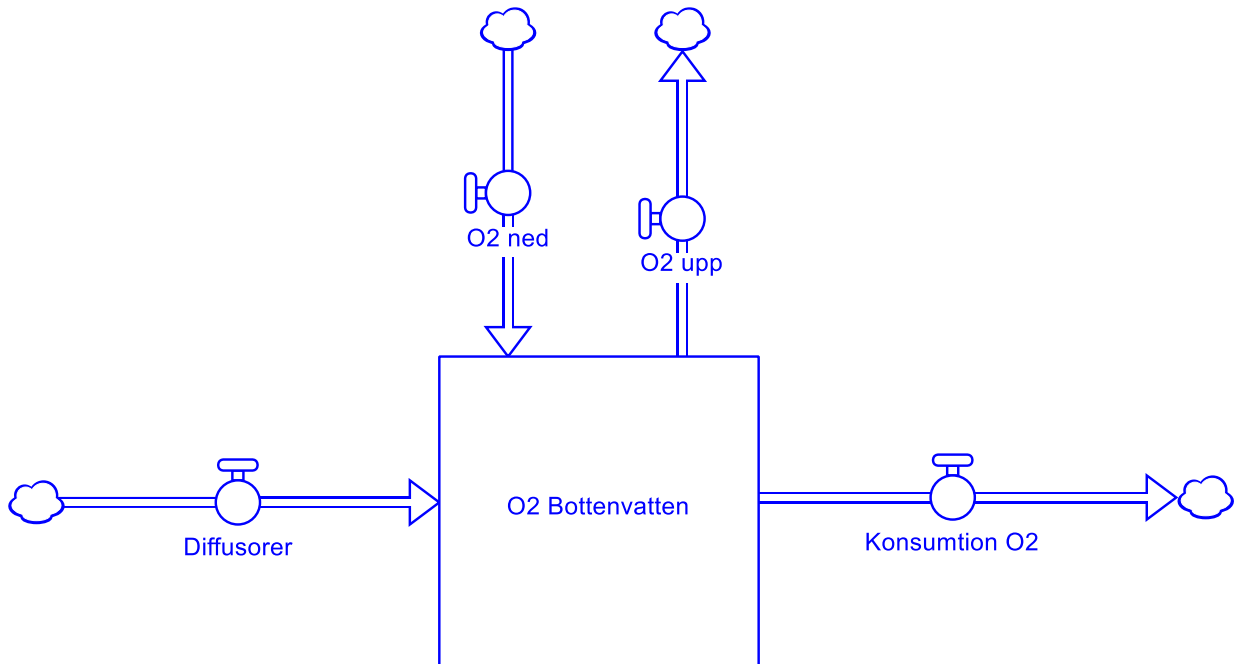
$$Vd = \frac{3 * z_{medel}}{Z_{max}} \quad (4)$$

### 4.5. Modellering

För att bestämma vilken dosering av syrgas som behövs i Slätbaken konstruerades en massbalansmodell i programmet Stella Professional från Isee Systems (Figur 5). Modellen inspirerades av den modell som presenteras i Carlsson et al. (1999), där endast bottenvatten modelleras och in- och utflöden beror av utbytet mellan ytvatten och bottenvatten samt syrgaskonsumtion. Syrekoncentrationen i ytvattnet är tidskontinuerliga data utifrån empiriska



mätvärden som påverkar bottenvattnet genom vertikal transport. Målvariabeln för modellen var syrgaskoncentration i Slätbakens bottenvatten. Boxen *O2 Bottenvatten* i modellen innehåller antal ton  $O_2$ , medan flödena ut och in har enheten ton  $O_2$  per månad. De fyra pilarna i Figur 5 representerar transport av syrgas genom vertikal omblandning mellan yt- och bottenvatten med inflöde ( $O_{2\_ned}$ ) och utflöde ( $O_{2\_upp}$ ), syrekonsumtion i bottenvattnet (*Konsumtion O2*) och syretillförsel från diffusorer (*Diffusorer*) med direktinjicerad syrgas. Eulers metod användes för beräkning i modellen med  $DT = 0.01$  och modellen kördes på månadsbasis i 60 månader (5 år).



Figur 5. Schematisk bild över massbalansmodellen

Ekvation (5) beskriver hur stor mängd syrgas som finns i bottenvattnet i modellen utifrån in- och utflöden av syre samt initialvärdet av syre i bottenvattnet  $O_{2\_init}$ .

$$O_{2\_bottenvatten} = O_{2\_init} + O_{2\_ned} - O_{2\_upp} - \text{Konsumtion} + \text{Diffusorer} \quad (5)$$

Vertikal transport beräknades med samma metod som Håkanson (2009) konstruerat för att modellera omblandning av suspenderat partikulärt material (SPM). SPM byttes ut mot  $O_2$  i denna modell vilket innebar antagandet att syre omblandas på samma sätt som SPM i vertikal riktning. En omskrivning av Håkansons (2009) ekvation med SPM utbytt mot  $O_2$  ger då ekvation (6).

$$O_{2\_upp} = M_{O_{2\_BV}} * R_{xYVBV} * V_{YV}/V_{BV} \quad (6)$$

Den beskriver transporten av  $O_2$  från bottenvattnet (BV) till ytvatten (YV).  $M_{O_2}$  är massan  $O_2$  i ton i BV,  $R_{xYVBV}$  omblandningshastigheten (i enheten  $\text{månad}^{-1}$ ) från YV till BV och  $V_{YV}/V_{BV}$  är en korrigering av flödet för att få rätt hastighet då volymen är lägre i BV än YV. För nedtransporten av  $O_2$  från YV till BV användes ekvation (7).

$$O_{2\_ned} = M_{O_{2\_YV}} * R_{xYVBV} \quad (7)$$

Omblandningshastigheten  $R_{xYVBV}$  (i månad<sup>-1</sup>) beror på saliniteten i ytvatten  $SalYV$  och bottenvatten  $SalBV$  och av  $RMixdef$  enligt ekvation (8).

$$\begin{aligned} & \text{if } SalBV > SalYV \\ & \text{then } R_{xYVBV} = RMixdef * \left( \frac{1}{1 + SalBV - SalYV} \right)^{RMixexp} \\ & \text{else } R_{xYVBV} = RMixdef \end{aligned} \quad (8)$$

$RMixexp$  är vanligtvis satt till 2 (Håkanson, 2009) men kan kalibreras, där högre värde ger större omblandningshastighet.  $RMixdef$  är standardhastigheten (månad<sup>-1</sup>) och beräknas från erosions- och transportarean för sediment (ET-arean) samt temperaturskillnader i YV och BV. ET-arean beräknas med ekvation (9).

$$ET = \frac{(Area - Area_{BV})}{Area} \quad (9)$$

Där  $Area$  är ytarean på fjärden och  $Area_{BV}$  är den estimerade bottenarean (se ekvation 2). Temperaturstratifieringen ( $Strat$ ) beräknas utifrån temperaturskillnader från empiriska temperaturdata i YV och BV (10).

$$\begin{aligned} & \text{if } ABS(YVT - BVT) < 4 \text{ } ^\circ\text{C} \\ & \text{then } Strat = \frac{1 + RMixconst}{1/RMixconst + ABS(YVT - BVT)} \\ & \text{else } Strat = \frac{1}{ABS(YVT - BVT)} \end{aligned} \quad (10)$$

$SWT$  är temperaturen i ytvattnet,  $BVT$  i bottenvattnet.  $RMixconst$  används för att kalibrera storleken på omblandningen. Slutligen får uttrycket för  $RMixdef$  via ekvation (11).

$$RMixdef = \frac{Strat * ET}{12} \quad (11)$$

Standardvärde för  $RMixconst$  är 1 men denna kalibreras från empiriska värden, i denna modell sattes  $RMixconst$  till 3. Tabell 2 sammanfattar den input som behövdes för modellens beräkningar, vilken målvariabel som eftersöktes samt vilka variabler som har använts för att kalibrera modellen. Se fullständig ekvation som den såg ut i modellen i Bilaga D.

Slutligen finns ett utflöde i modellen  $Konsumtion O_2$  (enhet: ton/månad) som beror av sedimentets syretäring i bottenvattnet.

Tabell 2. Input, målvariabel och kalibreringsvariabler.

Input	Förklaring	Värde
YV	volym YV (m <sup>3</sup> )	190 Mm <sup>3</sup>
VBV	volym BV (m <sup>3</sup> )	75 Mm <sup>3</sup>
Sal YV	salinitet i YV (psu)	Tidsserie, se Bilaga A
Sal BV	salinitet i BV (psu)	Tidsserie, se Bilaga A
O <sub>2</sub> massa YV	O <sub>2</sub> i YV (ton)	Tidsserie, se Bilaga A
Area	ytvattenarea (m <sup>2</sup> )	15.4 * 10 <sup>6</sup>

<i>DTA</i>	djup som avskiljer YV och BV (m)	20
<i>Z<sub>m</sub></i>	medeldjup (m)	17.5
<i>Z<sub>max</sub></i>	maxdjup (m)	46
<i>YVT</i>	empirisk temperatur YV (°C)	Tidsserie, se Bilaga A
<i>BVT</i>	empirisk temperatur BV (°C)	Tidsserie, se Bilaga A
<i>Diffusor</i>	tillförd syrgas från syresystem (ton/dygn)	0 - 6

#### *Målvariabel*

<i>O<sub>2</sub> bottenvatten</i>	koncentration syre i BV (mg/l)	Se resultat, Figur 14 och 15
-----------------------------------	--------------------------------	------------------------------

#### *Kalibreringsvariabel*

<i>R<sub>mixconst</sub></i>	Ändrar storlek på omblandningen	3
<i>Konsumtion O<sub>2</sub></i>	Hypolimnisk syreförbrukning (g O <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )	Se resultat, Figur 17

## 4.6. Kalibrering och validering

Empiriska månadsmedelvärdesbildade mätdata över DO i bottenvattnet i Slätbaken användes för att kalibrera och validera modellen. Stigebrandt och Liljebladh (2011) modellerade syrgas i Byfjorden som är belägen utanför Uddevalla och estimerade då syretäringen till 1 g O<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>/månad, vilket användes som referensvärde i denna modell. Carlsson et al. (1998) visade att syretäringen i Östersjön varierar säsongsmässigt och är som högst under juli-oktober och som lägst under vintermånaderna då den biologiska aktiviteten är som lägst på våra breddgrader. Med dessa två studier i beaktning kalibrerades syrekonsumtionen så att syrekoncentrationen i bottenvattnet nådde de empiriska värdena under sommarmånaderna. Omblandningen kalibrerades genom att ändra *R<sub>mixconst</sub>* tills omblandningen blev tillräckligt omfattande för att syrenivån skulle nå de empiriska värdena i slutet av året, då syrenivån höjdes drastiskt i fjärden. Modellen simulerade flera år vilket ledde till en jämvikt, och därefter jämfördes de empiriska mätvärdena med simulerade data för att validera modellen. Slutligen jämfördes de kalibrerade parametrarna, främst syreförbrukningen, med andra studiers värden. När modellen var validerad tillsattes olika inflöden av syrgas från diffusorerna för att undersöka hur stor påverkan det skulle ha på bottenvattnets syrgashalt.

## 5. Resultat av litteraturstudien

### **Tekniska lösningar för syresättning av bottenvatten**

I det här avsnittet presenteras resultatet från litteraturstudien som gjorts för att besvara frågeställningarna ”hur genomförs syresättning av botten i praktiken i andra delar av världen?” och ”hur har utfallen för olika tekniska lösningar sett ut?”. Tre olika lösningar har identifierats som använder syrgas för att syresätta sedimenttytor och bottenvattnet i sjöar och reservoarer:

1. Downflow Bubble Contact System (DBCS)
2. Side Stream Pumping System (SSPS)
3. Direct Oxygen Injection System (DOIS).

Dessa tekniker förklaras och sedan följer exempel på de studieområden där teknikerna testats. I Tabell 3 visas alla de 21 platser som identifierades i litteraturstudien. I marina miljöer har

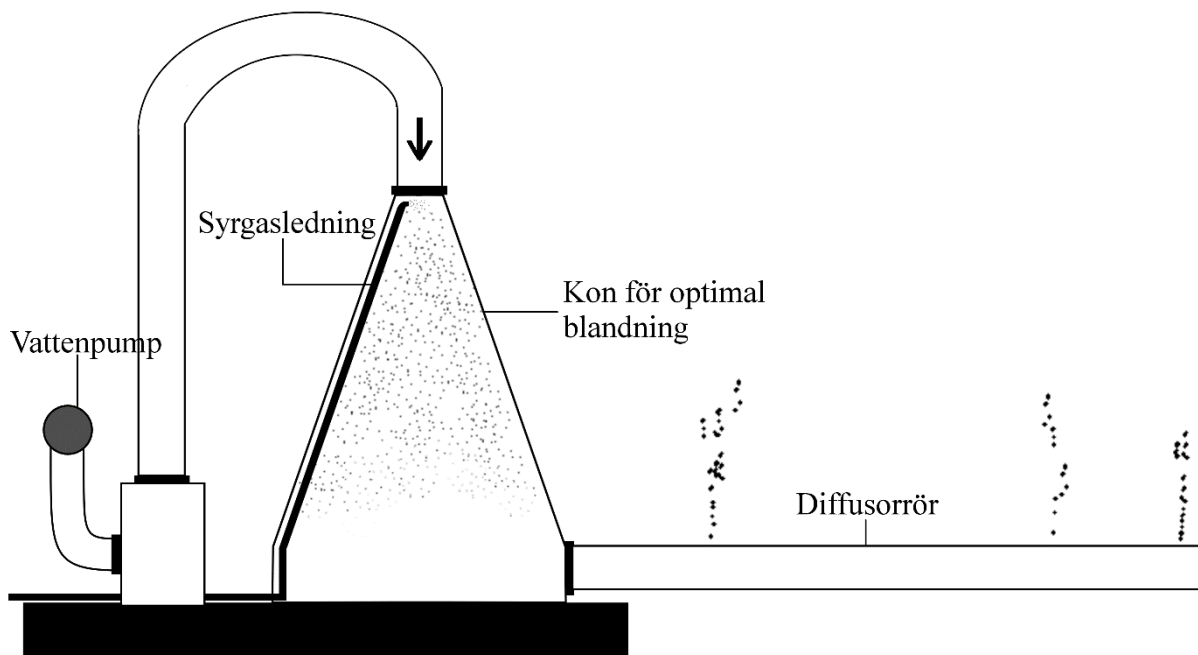
mycket få försök gjorts men dessa tekniker antas i den här rapporten kunna fungera med ungefär samma effektivitet i Östersjöns vatten med hänsyn tagen till hydrodynamik, djupvattenvolym, m.m.

Tabell 3. Lista över de studieområden som undersökts

Vatten	Land/provins	Teknik	Installation	Medeldjup (m)	Maxdjup (m)	Ytarea (km <sup>2</sup> )	Volym (Mm <sup>3</sup> )	Vattnets residenstid (år)	Syresättning (ton/dygn)	Syrgashalt efter syresättning, medel, BV (mg/l)	Källa
Camanche Reservoir	Kalifornien	DBCS	1993	17	48	31	513	1.8	13.2	5	Horne et al. 2019; 2022
Newman Lake	Kalifornien	DBCS	1992	6	10	5	28		2	5.5	Moore & Christensen 2009
Lake Bard	Ohio	SSPS	2004	13	27.4		13		0.38	6	Debroux et al. 2012
Ottoville Quarry	Oklahoma	SSPS	1973	8.7	18	0.007	0.063		0.01	14	Fast et al. 1975; 1977
Lake Thunderbird	Oklahoma	SSPS	2011	4.7	17.6	22.01	428		2.5		OWRB 2019; 2021
Canning River, BAC	Australien	SSPS	1998							5.9	DWER 2020
Canning River, NIC	Australien	SSPS	2014							6.6	DWER 2020
Russel Lake	Georgia	DOIS	1984	12	47	108	1300		100	6	Beutel & Horne 1999
Amisk Lake	Kanada	DOIS	1990	15.5	60	30	99.8	8	2	4.6	Prepas & Burke 1997
Spring Hollow	Virginia	DOIS	1997/2004		64	0.64	13		1	15	Gantzer et al. 2009
Carvins Cove	Virginia	DOIS	2005		21	2.5	24		2.1	>5.2	Gantzer et al. 2009
Calaveras	Kalifornien	DOIS	2005		43	5.81	118		3.4	5.5	Mobley et al. 2012; 2019
San Antonio	Kalifornien	DOIS	2009		40		67.8		8.2	< 2	Mobley et al. 2012; 2019
Pleasant Lake	Minnesota	DOIS	2013		15.2		12.2		7.5	4.2	Austin et al. 2019
Vadnais Lake	Minnesota	DOIS	2011		18		11.1		6.5	8.5	Austin et al. 2019
Lake Baldegg	Schweiz	DOIS	1982	33	66	5.2	170	0.13-0.25	3	5	Gächter & Wehrli 1998
Lake Sempach	Schweiz	DOIS	1984	44	87	14.4	660	0.06	3	>4	Gächter & Wehrli 1998
Aurora Reservoir	Colorado	DOIS	2015		27.4		38.2		2.3	>7	Mobley et al. 2019
Lake Tegel	Tyskland	DOIS	1985	7.6	16		23.15	0.21096			Schauser & Chorus 2007
Lake Casitas	Kalifornien	DOIS	2015		70		293.3		27.3	>8	Mobley et al. 2019
Douglas Dam	Tennessee	DOIS	1993		38		1700		108	4	Mobley & Brock 1995

## 5.1. Downflow Bubble Contact System (DBCS)

Tekniken DBCS utvecklades av ingenjören Dr. Richard E. Speece under 1970-talet. Den består av en ihålig kon (en så kallad Speece Cone) som installeras på botten, en tank på ytan för förvaring av flytande syre, en vattenpump på botten intill konen och en anordning för att föra ner syret till konen (Figur 6). Till toppen av konen pumpas bottenvatten i ett nedåttflöde samtidigt som syrgasbubblor tillförs via en trycksatt ledning. Syrgasbubblornas flytkraft gör att de stiger uppåt i konen och möts av det nedåttflödande vattnet vilket leder till en mycket effektiv inblandning av syret i vattnet. Det syresatta vattnet kan sedan spridas längs sedimentytan med diffusorrör. Eftersom det syresatta vattnets densitet förändras minimalt kan man räkna med en horisontell spridning av det syresatta vattnet längs sedimentytan. Eftersom anläggningen är stationerad på botten finns goda möjligheter att använda tekniken på stora djup. Det har bland annat testats i Camanche Reservoir där en Speece Cone är installerad på över 40 meters djup (Horne et al. 2019).



Figur 6. Schematisk bild av en Speece Cone. Illustratör Arvid Jonsson, modifierad från Horne et al. (2019).

### 5.1.1. Camanche Reservoir, USA Kalifornien, DBCS

Camanche Reservoir ( $V = 513 \text{ Mm}^3$ ,  $A = 31 \text{ km}^2$ ,  $Z_{\text{max}} = 48 \text{ m}$ ) är en damm belägen i Kalifornien som används för vattenkraft, och som även tillhandahåller vatten till nedströms fiskodlingar. Dammen byggdes på 1960-talet och orsakade därefter periodvis fiskdöd nedströms reservoaren på grund av utsläpp av svavelväten som bildats under syrefria förhållanden i bottenvattnet. År 1993 installerades en Speece Cone (DBCS) med syfte att minska mängden svavelväte i nedströms vatten. Med antagandet att en termoklin bildades 6 m under ytan beräknades volymen som behövde syresättas till  $36 \text{ Mm}^3$ . Med ytterligare ett antagande att syreförbrukningen var 0,1 mg per liter och dag beräknades syrebehovet till 6,6 ton per dag. En faktor 2 multiplicerades som säkerhetsmarginal vilket gav en dimensionering

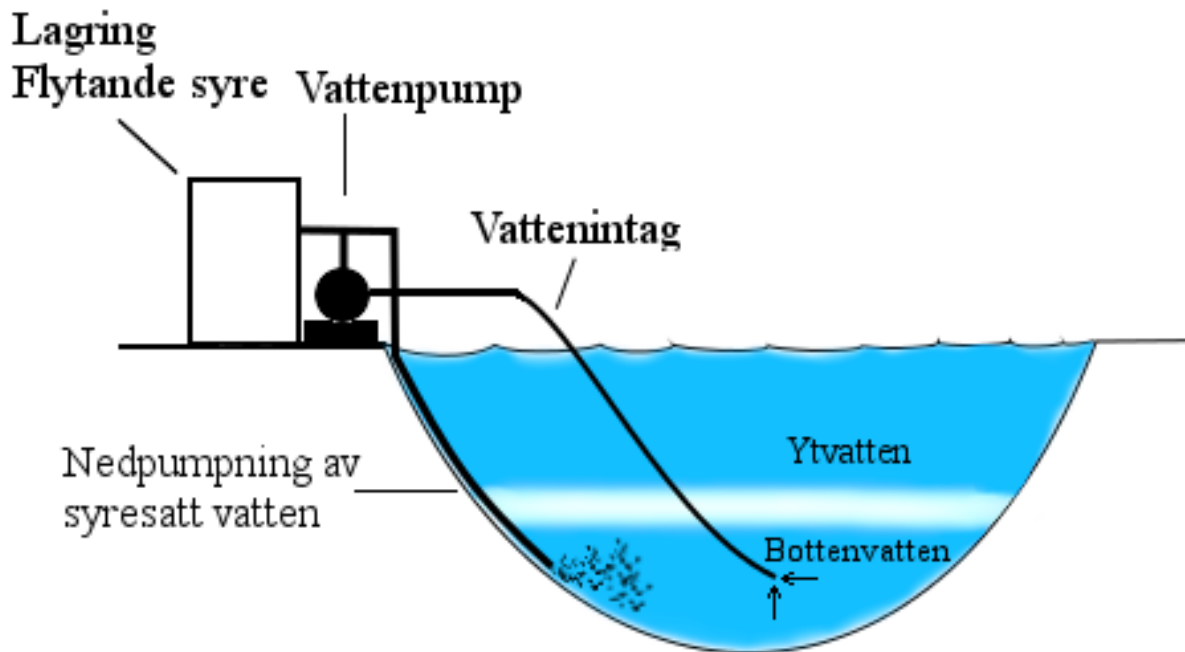
på 13,2 ton O<sub>2</sub> per dag (Horne et al. 2019). I praktiken användes ett flöde på ungefär 8 ton O<sub>2</sub> per dag. Konen var 7 m hög och 3,5 m bred vid basen, och vattenpumpen hade en effekt på 127 kW vilket gav ett flöde på 0,9 m<sup>3</sup>/s. För att fördela det syresatta vattnet längs botten kopplades ett 400 m långt diffusorrör till konen. Sedan 1993 har systemet varit i gång mellan cirka juni och oktober varje år (Horne et al. 2022). Syrehalten i hypolimnion (vattenmassan under ett termiskt språngskikt) ökade till 5–6 mg/l på sommaren (Horne et al. 2009). Vid en uppföljning av Horne et al. (2022) fastslogs det att inom tre år hade fiskrekreationen nedströms reservoaren gynnats avsevärt då inget svavelväte återfanns längre vilket innebar att fiskdöden upphörde. Reproduktionen av vild fisk ökade med 1,7 ggr och återkommande laxfiskar ökade från 0–50 individer per år (1990–1993) till 625 individer år 2017–2018. Det ledde också till minskning av totalfosforkoncentrationer med 19 µg/l (10 ton) och minskning av totalkvävekoncentrationer med 175 µg/l (91 ton). Reduktionen skedde redan första året och kvarstår. Syretillförseln sänktes med > 50 % efter 10 år av bruk utan försämrade verkan (Horne et al. 2019).

### **5.1.2. Newman Lake, USA Washington, DBCS**

Newman Lake ( $V = 28,0 \text{ Mm}^3$ ,  $A = 30 \text{ km}^2$ ,  $Z_{\text{max}} = 10 \text{ m}$ ) är en postglacial sjö som typiskt har en termoklin och omblandas varje höst och vår. Sjön är habitat för öring *Salmo trutta* på vilken bedrivs småskaligt fiske (Thomas et al. 1995). Innan åtgärder sattes in hade sjön återkommande problem med algbloomningar från cyanobakterier och anoxiska bottnar, där 50 % av belastningen av näringsämnen bedömdes komma från externa källor och 50 % från intern belastning (ibid). Sjön behandlades 1989 med aluminium för att fastlägga fosfor och år 1992 installerades en Speece cone (DBCS) för syrgasnedpumpning. Konen är 5,5 m hög och 2,8 m i diameter i basen. Två kompressorer á 37 kW pumpar syrgas till konen där den är installerad på 8,5 meters djup. Vattenpumpen vid konen har en effekt på 46 kW (Moore et al. 2012). Detta ger en kapacitet på ungefär 1360 kg O<sub>2</sub>/dygn (Moore och Christensen 2009), dimensionerat för att hålla över 4 mg/l syrgaskoncentration i hypolimnion (Thomas et al. 1994). Inga anoxiska förhållanden uppmättes efter syresättningen och syrgashalten i vattnet ökade från anoxiskt innan behandlingen till 5,5 mg/l nedanför termoklinen på sommaren. I samband med restaureringen tillsattes även aluminium i sjön. Efter 7 år hade totalfosforkoncentrationerna sjunkit från 50 µg/l till 21 µg/l. Dessutom sjönk maxhalterna av cyanobakterier samt andra växtplankton markant under perioden (Moore och Christensen 2009). Vid uppföljning kring fiskarnas habitat i sjön hade syresättningen medfört att öringens habitat i sjön ökade till 97 % av sjöns volym under sommarstratifieringen (Doke et al. 1995). Predationen på bottendjur ökade därmed vilket ledde till att vissa arter minskade i abundans men syreförhållandena ledde också till en ökning av abundans av andra bottendjur (ibid).

### **5.2. Side Stream Pumping System (SSPS)**

SSPS är ett system där vatten från hypolimnion pumpas upp till en fast anläggning där det syresätts varpå det sedan pumpas tillbaka ner till hypolimnion och sprids (Figur 7). Tekniken har främst använts i grundare områden då vatten behöver pumpas två vägar.



Figur 7. Schematisk bild över ett SSPS. Illustratör Arvid Jonsson, modifierad från Beutel och Horne (1999).

### 5.2.1. Lake Bard, USA Kalifornien, SSPS

I Lake Bard ( $V = 13 \text{ Mm}^3$ ,  $Z_{\text{max}} = 27,4 \text{ m}$ ) testades under två veckor i juni 2004 ett SSPS. Systemet hade en tank med flytande syre på land dit bottenvatten pumpades upp, syresattes och sedan fördes tillbaka till sjöns botten. Sjön är konformad med ett maxdjup på 27,4 m och med en syrgastillförsel på 380 kg  $\text{O}_2$  per dag höjdes syrgashalten från 1–2 mg/l till 5–6 mg/l (Debroux et al. 2012). I studien undersöktes även fosforläckage från sediment, vilket gick från att vara en fosforkälla till en sänka (ibid). Dock fortsatte fosfor att läcka ut från sedimenten inom en vecka efter att syresättningen upphörde.

### 5.2.2. Ottoville Quarry, USA Ohio, SSPS

Ottoville Quarry ( $V = 0,063 \text{ Mm}^3$ ,  $A = 0,0073 \text{ km}^2$ ,  $Z_{\text{max}} = 18 \text{ m}$ ) är ett gammalt stenbrott som blivit en sjö. År 1973 installerades ett system där vatten från hypolimnion syresattes med ett SSPS. På sommaren uppstod en termoklin och syrenivån på botten utarmades totalt. Systemets syfte var att syresätta hypolimnion under tidperioden då hypoxi förekom. Systemet injicerade 9 kg  $\text{O}_2$  per dag (7 juli 1973) i ett vattenflöde av 200 liter per minut vilket höjde syrenivån från i princip noll till 8 mg/l efter tre månaders tid (10 september 1973). När höstomblandningen i sjön skedde upphörde syresättningen och efter en månad (5 oktober) hade syrehalten sjunkit till 4 mg/l. Året därpå (1974) var systemet aktivt från 15 maj till 5 oktober. Den tillsatta syrehalten ökades till 23 kg  $\text{O}_2$  per dag för att undersöka hur hög syremättnad som kunde uppnås. Detta höjde syrehalten i hypolimnion från 7,4 mg/l (12 maj) till 21,5 mg/l (26 september), vilket var en syremättnad på 120 % i hypolimnion. Någon fastläggning av fosfor mättes inte (Fast et al. 1975, 1977).

### 5.2.3. Lake Thunderbird, USA Oklahoma, SSPS

I Lake Thunderbird ( $V = 428 \text{ Mm}^3$ ,  $A = 2200 \text{ km}^2$ ,  $Z_{\text{max}} = 17,6 \text{ m}$ ) installerades ett SSPS år 2011. Volymen av bottenvatten som behövde syresättas beräknades till 49  $\text{Mm}^3$  men till följd



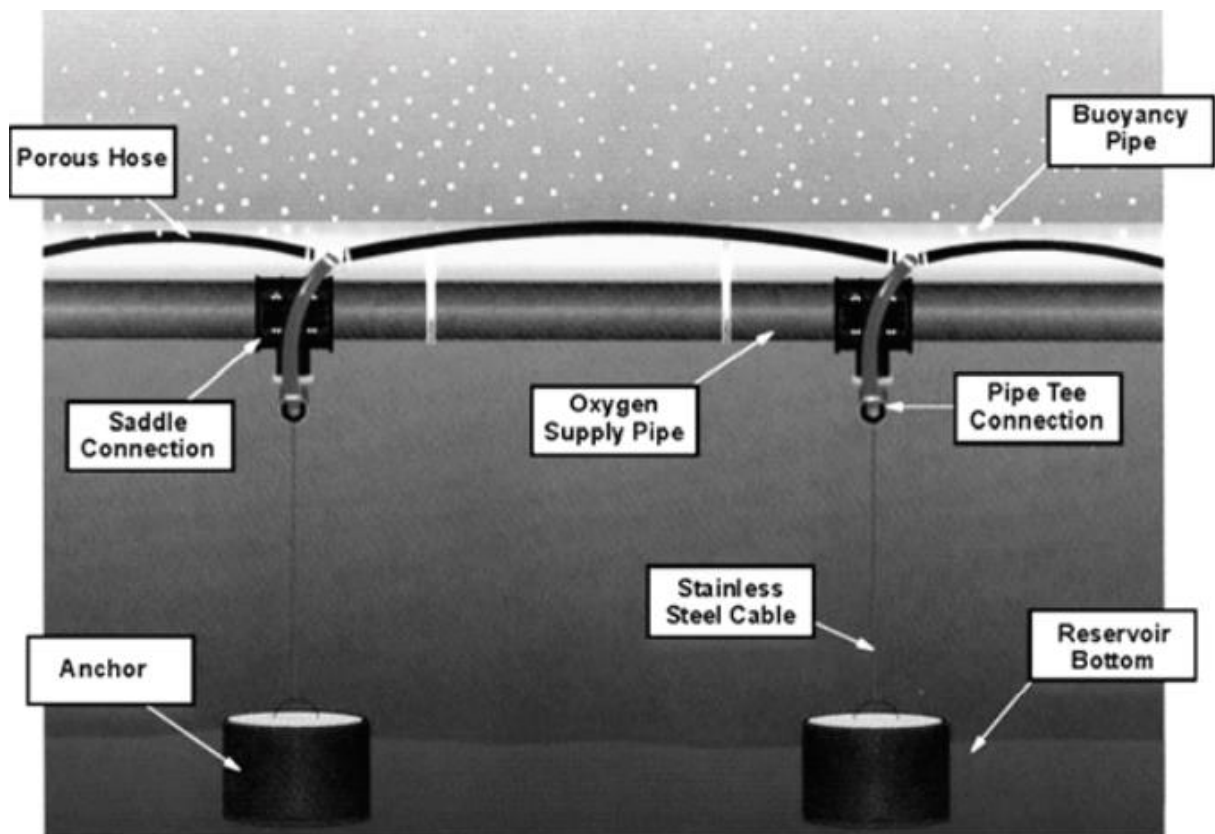
av för höga kostnader skalades systemet ned och det system som installerades beräknades kunna syresätta 2,5 Mm<sup>3</sup>. Vattenströmmen från röret som återförde vattnet till hypolimnion visades orsaka turbulens som signifikant försvagade termoklinen i sjön. Detta var oönskat och därav modifierades munstycket på röret. 2019 tillförde systemet ca. 2 ton O<sub>2</sub> per dag men år 2020 togs den ur bruk efter att anordningen kollapsade. I början av studietiden observerades en viss ökning av DO i vattnet men aldrig så hög att vattnet inte skulle klassas som hypoxiskt. (OWRB 2019, 2021)

#### **5.2.4. Canning River, Australien, SSPS**

I Canning River, Australien, har SSPS använts sedan 1998 vid Bacon Street (BAC) och sedan 2014 vid Nicholson Road (NIR). Vid BAC gick syrenivåernas medelvärden på bottarna från 0,2 mg/l (år 1995) till 5,9 mg/l (år 2019), och vid NIR från 0,9 mg/l (år 2009) till 6,6 mg/l (år 2019). Vid båda platserna reducerades löst fosfat i bottenvattnet: 83 % (BAC) och 79 % (NIR), ammonium: 84 % (BAC) och 88 % (NIR) samt oxiderat kväve: 43 % (BAC) och -5 % (dvs. en ökning, NIR). Viktigt att nämna är att platserna också har behandlats med fosforbindande kemikalier år 2000 och 2010 (Department of Water and Environmental Regulation 2020).

#### **5.3. Direct Oxygen Injection System (DOIS)**

Tekniken DOIS innebär att diffusorrör installeras i djupvattnet, där mikrobubbelteknik sedan används för att tillsätta syrgas direkt i vattnet (Figur 8). Anordningen består huvudsakligen av tre delar, en anordning som förser systemet med syrgas, en anordning för flödeskontroll och diffusorrör (Mobley et al. 2019). Rörens flytkraft kan regleras så anordningen hålls på önskat djup. Förankrade vajrar i botten håller allt på plats. Rören kan installeras på olika djup och i olika formationer för att få bra spridning i vattnet. Syrgasen får en uppåtstigande rörelse som eventuellt kan leda till uppblåsning och läckage. I djupare sjöar har det dock funnits många försök där tekniken använts med stor framgång och med en hög syrgas transfer rate (OTR), som är ett mått på hur väl syret överförs till vattnet utan att försvaga eller bryta eventuella skiktningar.



Figur 8. Schematisk bild av ett DOIS. Bildkälla (Mobley et al. 2012). Återgiven med tillstånd.

### 5.3.1. Russell Lake, USA Georgia, DOIS

Richard B. Russell Lake ( $V = 1300 \text{ Mm}^3$ ,  $A = 108 \text{ km}^2$ ,  $Z_{\text{max}} = 47 \text{ m}$ ) är en reservoar i Savannah River. Den fylldes år 1983–1984 och år 1985 uppskattas det varit anoxiskt i hypolimnion, vilket ledde till förhöjda halter av bland annat fosfor och ammoniak i sjön. Under 1984 släpptes inget vatten ut från reservoaren på grund av dess låga kvalitet. För att höja syrenivåerna installerades ett gigantiskt DOIS med kapacitet på 100 ton  $\text{O}_2$  per dag, med målet att syresätta reservoaren så vattnet vid turbinerna skulle hålla en syrgaskoncentration på minst 6 mg/l. År 1985 hölls syrgashalten över 5 mg/l i hela vattenkolumnen samtidigt som termoklinen hölls intakt. Från 1985 till 1987 sjönk syrebehovet från 14 000 ton/år till 8 000 ton/år och fosforhalten minskade med 80 % (Beutel och Horne 1999).

### 5.3.2. Amisk Lake, Canada, DOIS

Amisk Lake ( $V = 100 \text{ Mm}^3$ ,  $A = 5 \text{ km}^2$ ,  $Z_{\text{max}} = 60 \text{ m}$ ) är en sjö med två delbassänger, där den ena är 33 m djup och den andra 60 m (WLDB UÅ). Det installerades ett DOIS i sjön mellan 1988–1993 då det rådde anoxiska förhållanden i hypolimnion, särskilt på somrarna. Systemet var igång året runt och tillförde 1,3 ton  $\text{O}_2$  per dag vilket ökade syrgaskoncentrationen från 1 mg/l till 4,6 mg/l. Det skedde fastläggning av fosfor i sedimentet, medan medelfosforkoncentrationen minskade från 123 till 56  $\mu\text{g/l}$  trots låg Fe/P kvot (Prepas och Burke 1997). Syresättningen medförde också att fiskpopulationen växte sig större i sjön då de kunde födosöka på djupare vatten men också till att mängden mat per fisk minskade markant (Aku och Tonn 1997).

### 5.3.3. Spring Hollow och Carvins Cove, USA Virginia, DOIS

Både Spring Hollow ( $V = 12,1 \text{ Mm}^3$ ,  $A = 0,64 \text{ km}^2$ ,  $Z_{\text{max}} = 64 \text{ m}$ ) och Carvins Cove ( $V = 24,3 \text{ Mm}^3$ ,  $A = 2,5 \text{ km}^2$ ,  $Z_{\text{max}} = 21 \text{ m}$ ) är dammar i Virginia. I båda reservoarerna installerades diffusorrör (DOIS) för att höja syrenivåerna. Spring Hollows system bestod av ett 610 m långt rör med kapacitet på 1,2 ton  $\text{O}_2$  per dag. Carvins Cove hade två 610 m långa rör och en kapacitet på 4 ton  $\text{O}_2$  per dag. Detta ledde i båda platserna till en ökad syremängd i hypolimnion. Båda systemen kördes året runt och syrgasflödet justerades efter behov (Mobley et al. 2019). Över 7 mg/l syrgashalt har hållits i vattnet efter att syresättningen startade och systemen hade en OTR på 95–98 % i Spring Hollow och 80–85 % i Carvins Cove (Gantzer et al. 2009). Syrebehovet estimerades till 50 kg per dag i Spring Hollow och 430 kg per dag i Carvins Cove. En uppvärmning av hypolimnion noterades men bedömdes inte påverka termoklinen. Båda reservoarerna användes som studieområde för att se hur syresättning påverkade syrebehovet i hypolimnion över tid (Gantzer et al. 2009). Syrebehovet visade sig sjunka i hypolimnion (testet pågick mellan 2007–2008) över tid men var i stort sett oförändrat i metalimnion, vilket tyder på att tillförseln av organiskt material varit konstant. Alltså bedömdes syresättningen vara anledningen till det minskade syrebehovet (Gantzer et al. 2009).

### 5.3.4. Calaveras och San Antonio, USA Kalifornien, DOIS

Calaveras ( $V = 118 \text{ Mm}^3$ ,  $A = 5,81 \text{ km}^2$ ,  $Z_{\text{max}} = 43 \text{ m}$ ) och San Antonio ( $V = 68 \text{ Mm}^3$ ,  $Z_{\text{max}} = 40 \text{ m}$ ) är två reservoarer i Kalifornien. I Calaveras reservoaren bildas på somrarna en termoklin, och över termoklinen blev det för varmt för fiskarter som strimmig havsabborre *Morone saxatilis* och vattnet under termoklinen blev utarmat på syrgas. För att förbättra habitatet för strimmig havsabborre installerades 2005 ett DOIS (Mobley et al. 2012). Det bestod av två diffusorrör á 305 meter med en sammanlagd kapacitet på 3,6 ton  $\text{O}_2$  per dag. Det ena röret placerades i den djupaste delen av reservoaren och den andra 1,6 km uppströms reservoaren för att sprida syrgasen optimalt (Mobley et al. 2012). Redan efter tre veckor höjdes syrenivån i hypolimnion från under 0,5 mg/l till över 1 mg/l och efter fem veckor var syrgasnivån över 3 mg/l i hela reservoaren. Den pumpade syrgasmängden estimerades ha varit ungefär 1,5 ton/dygn. Habitatet för strimmig havsabborre blev mycket bättre efter att systemet kom på plats och det bedömdes som ett lyckat ingrepp. (Mobley et al. 2012)

Efter ingreppet i Calaveras installerades 2009 ett liknande system i samma syfte i San Antonio (Mobley et al. 2012) med två diffusorrör med en total längd på 1 150 meter och en kapacitet på 3,4 ton/dygn (Mobley et al. 2019).

En del fosfor löstes till vattnet från sedimentet efter syresättningen startade i både Calaveras och San Antonio. Det bedömdes att syretillförseln hade reglerats vid för låga nivåer, först när koncentrationen nådde under 2 mg/l. Detta gjorde botten hypoxisk under perioder vilket kan ha lett till en dålig fastläggning och hög löslighet av fosfor från sedimentet. År 2018 höjdes därför gränsen för när syretillförseln ska regleras (Mobley et al. 2019).

### 5.3.5. Pleasant Lake och Vadnais Lake, USA Minnesota, DOIS

Både Pleasant Lake ( $V = 12,2 \text{ Mm}^3$ ,  $A = 2 \text{ km}^2$ ,  $Z_{\text{max}} = 15,2 \text{ m}$ ) och Vadnais Lake ( $V = 11,1 \text{ Mm}^3$ ,  $Z_{\text{max}} = 18 \text{ m}$ ) är postglaciala sjöar med ursprung från ungefär 12 000 år sedan. I båda sjöarna användes innan 2010 en teknik där tryckluft blandades i bottenvattnet för att stimulera syresättning genom omblandning utan att det gav stor inverkan. Därför byttes de ut till spridarsystem med diffusorrör för injicering av ren syrgas (DOIS), 2011 och 2013 (Pleasant). Båda systemen dimensionerades till en kapacitet av 6,5 ton  $\text{O}_2$  per dag. Syrgashalten i

hypolimnion ökade i Pleasant Lake från 2,6 mg/l till 4,2 mg/l. I Vadnais Lake ökade syrgashalten från 1,7 mg/l till 8,5 mg/l. Totalfosfor i hypolimnion sjönk signifikant i båda sjöarna efter att DOIS installerades, i Pleasant Lake från 0,146 mg/l till 0,053 mg/l och i Vadnais Lake från 0,045 mg/l till 0,030 mg/l. Totalfosforkoncentrationerna i ytvattnet hade ingen signifikant ändring som kunde kopplas till syrgasnedpumpningen (Austin et al. 2019).

### **5.3.6. Baldeggersee och Sempachersee, Schweiz, DOIS**

Baldeggersee ( $V = 170 \text{ Mm}^3$ ,  $A = 5,2 \text{ km}^2$ ,  $Z_{\text{max}} = 66 \text{ m}$ ) och Sempachersee ( $V = 660 \text{ Mm}^3$ ,  $A = 14,4 \text{ km}^2$ ,  $Z_{\text{max}} = 87 \text{ m}$ ) är två djupa sjöar i norra Schweiz. Båda sjöarna har haft återkommande hypoxi. Sempachersee var anoxisk under 60 m djup på somrarna och Baldeggersee var permanent anoxisk under 20 m innan pumpningen startade. Årligen planterades fiskyngel in i Baldeggersee och Sempachersee för att det småskaliga fisket i sjöarna skulle kunna fortsätta då minimal förökning skedde naturligt. De låga syrekoncentrationerna misstänktes vara en anledning till att fisken inte kunde föröka sig på egen hand, så därför installerades system för syrgasnedpumpning för att öka den naturliga fiskreproduktionen i sjöarna. På vintern injicerades tryckluft på botten för att stimulera en omblandning av sjöarna. På sommaren injicerades i stället ren syrgas på botten via diffusorrör (DOIS) placerade så att syrgasbubblorna skulle lösa sig helt i vattnet innan de nådde termoklinen för att behålla den naturliga stratifieringen. Syresättningen pågick år 1982–1999 i Baldeggersee och år 1984–1997 i Sempachersee. Efter år 1985 föll DO-koncentrationen i Sempachersee sällan under 4 mg/l, även på botten. Det medförde att de koncentrationer som tidigare funnits av svavelväten inte längre hittades i sjön. Syrekoncentrationen i Baldeggersee varierade mellan hypoxisk och 10 mg/l på botten efter att syresättningen började jämfört med konstant under 2 mg/l på botten innan syresättningen. I båda sjöarna sjönk den totala fosfornivån men det sammankopplades med minskade utsläpp och inte syresättningen (Gächter och Wehrli 1998).

I en senare undersökning av Lake Senpach av Bürgi och Stadelmann (2002), såg de att syresättningen främjade bioturbation i sedimenten och stimulerade tillväxt av vilande ägg, fröer och sporer. De menar dessutom, till skillnad från Gächter och Wehrli (1998), att den kontinuerliga syresättningen bidrog till de minskade fosforkoncentrationerna och att syresättningen ökat fastläggningen av fosfor i sjön. Detta då syresättningen kan ha lett till ökad kapacitet av fosforfastläggning då bioturbationen förstört den typiska skiktade strukturen i sedimentet som fanns innan restaureringen vilket ledde till en större kontaktyta mellan sediment och vatten.

### **5.2.7. Aurora Reservoir, USA Colorado, DOIS**

Aurorareservoaren ( $V = 38,2 \text{ Mm}^3$ ,  $Z_{\text{max}} = 27,4 \text{ m}$ ) i Colorado används som vattenkälla till två städer. För att hålla god vattenkvalitet installerades 2015 två diffusorrör med total längd 700 m och en kapacitet på 2,3 ton  $\text{O}_2$  per dag. Systemet skulle opereras så att syrgasnivån i hypolimnion hölls över 7 mg/l. Målet uppnåddes med undantag för sommaren 2017 då syrgasnivån sjönk till under 2 mg/l i hypolimnion. Intern fosforbelastning minskade och löst fosfor som innan syresättningen var över 130  $\mu\text{g/l}$  mättes till 40–50  $\mu\text{g/l}$  år 2016, 2018 och 2017 mättes det till 100  $\mu\text{g/l}$  troligtvis då den fallande syrenivån på sommaren ledde till återtillförsel av fosfor från sedimentet. (Mobley et al. 2019)

### **5.3.8. Tegeler See, Tyskland, DOIS**

Tegeler See ( $V = 38,2 \text{ Mm}^3$ ,  $A = 3,06 \text{ m}^2$ ,  $Z_{\text{max}} = 16 \text{ m}$ ) är en sjö som har haft hög extern belastning av fosfor från otillräckligt renat avloppsvatten. Detta ledde till extrem eutrofiering

med fosforkoncentrationer på 730 µg/l i medelvärde år 1984 och en omfattande syrebrist i sjön. Åtgärder som sattes in var ett reningssteg innan sjön för fosfor och syresättning av bottenvatten. Ett DOIS installerades 1984 men först 1989 började syresättningen dokumenteras. Det hittades inget samband mellan fosforreduktionen och syresättningen i sjön (Schauser och Chorus 2007).

Rapporten visade inga data för syrgaskoncentrationen i sjön innan/efter syresättningen så det är väldigt svårt att bedöma betydelsen av resultaten. Dessutom har pumparna varit avstängda periodvis sedan installationen för att förhindra omblandning i sjön (Schauser och Chorus 2007).

### **5.3.9. Lake Casitas, USA Kalifornien, DOIS**

Lake Casitas ( $V = 293,3 \text{ Mm}^3$ ,  $Z_{\text{max}} = 70 \text{ m}$ ) är en reservoar i Kalifornien som används som vattenkälla till bland annat ett reningsverk som förser vatten till jordbruk och hushåll. Maxkapaciteten med ett djup på 70 m kunde inte användas på grund av att vattenkvaliteten blev för låg, bland annat ledde det till klagomål om smak och lukt från allmänheten. Det innebar att reservoaren kunde fyllas till max 50 m. Tre diffusorrör med en total längd på 1650 m installerades 2015 i reservoaren på olika djup med en total kapacitet på ca. 30 ton  $\text{O}_2$  per dag. DO höjdes till att aldrig gå under 1,5 mg/l och var  $>8 \text{ mg/l}$  nära dammen. På två år (2015–2017) sänktes halten av löst fosfor från 350 µg/l till 50 µg/l. Inga klagomål om smak och lukt på vattnet förekom under syresättningsperioden (Mobley et al. 2019).

### **5.3.10. Douglas Dam, USA Tennessee, DOIS**

Douglas Dam ( $V = 1700 \text{ Mm}^3$ ,  $Z_{\text{max}} = 38 \text{ m}$ ) är en reservoar intill ett vattenkraftverk med fyra turbiner. En kraftig termoklin bildas på somrarna och bottenkiktet är hypoxiskt. Det innebär att vattnet som förs ut från turbinerna sommartid kan ha en nivå av DO nära noll. 1993 installerades ett DOIS i dammen med ambitionen att hålla syrenivån högre än 2 mg/l med alla turbiner i-gång. DOIS var designat med en väldig kapacitet på 108 ton per dag. Konstruktionen syftade till att pumpa ned syrgas genom ett rör till 16 kvadrater placerade vid botten av dammen. Kvadraterna var 30 m x 36 m och bestod av rör försedda med totalt 80 diffusorer per kvadrat för att släppa ut syrgasen. De förankrades i botten och flöt ungefär 6 meter ovanför botten. Systemet visades vara mycket effektivt med OTR på över 90 % och målet att endast syresatt vatten skulle släppas ut genom turbinerna uppnåddes (Mobley och Brock 1995).

## **5.4. Energiåtgång**

DBCS energiåtgång styrs till störst del av vattenpumpens energiåtgång. I Camanche Reservoir hade vattenpumpen en effekt på 127 kWh vilket stod för ungefär 80 % av den totala energiförbrukningen för hela systemet. Det krävdes 470 kWh/ton  $\text{O}_2$  för hela systemet varav vattenpumpen stod för 380 kWh/ton  $\text{O}_2$  (Horne et al. 2022). Kvarvarande 88 kWh/ton  $\text{O}_2$  kan ha använts till bland annat kompression av syrgas för tillförsel till bottenvattnet.

Då DOIS använder sig av direkt injektion av ren syrgas krävs det inte att vatten pumpas av något slag. De flesta DOIS köper syre i flytande form. Vid evaporationen av syrgasen från flytande till gasform ökar volymen markant vilket ger upphov till ett mycket högt tryck. Detta tryck räcker för att forsla ned syrgasen till diffusorerna vilket innebär att systemet kan operera helt utan kompressorer eller pumpar (Mobley et al. 2019). Kostnaden för nedförslin kommer alltså bero på det flytande syrets kostnad. För att kunna göra en jämförelse med DBCS antas att syrgasframställningen görs på plats och trycksätts med kompressorer. Med Atlas Copcos kompressorer beräknas det vid 100 m djup uppgå till en energikonsumtion på 67 kWh/ton  $\text{O}_2$  (Karlsson et al. opublicerat material). Vid jämförelse med DBCS i Camanche Reservoir verkar

det möjligt att de 88 kWh/ton O<sub>2</sub> som inte användes till vattenpumpen användes till bland annat kompression.

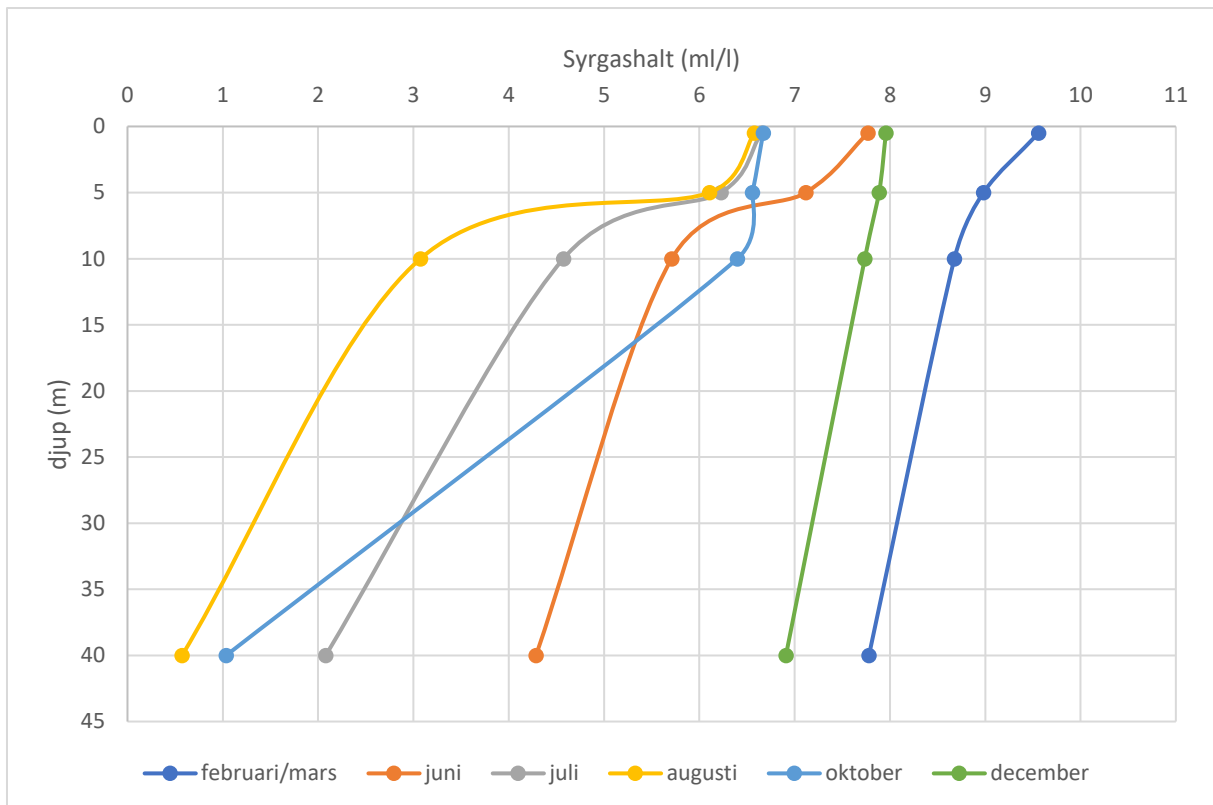
## 6. Resultat för Slätbaken som studieområde

För att undersöka om en pilotanläggning är lämplig att installera i Slätbaken undersöktes de biogeokemiska förhållandena i fjärden. Resultaten presenteras i detta avsnitt.

### 6.1. Vattenkemiska förhållanden

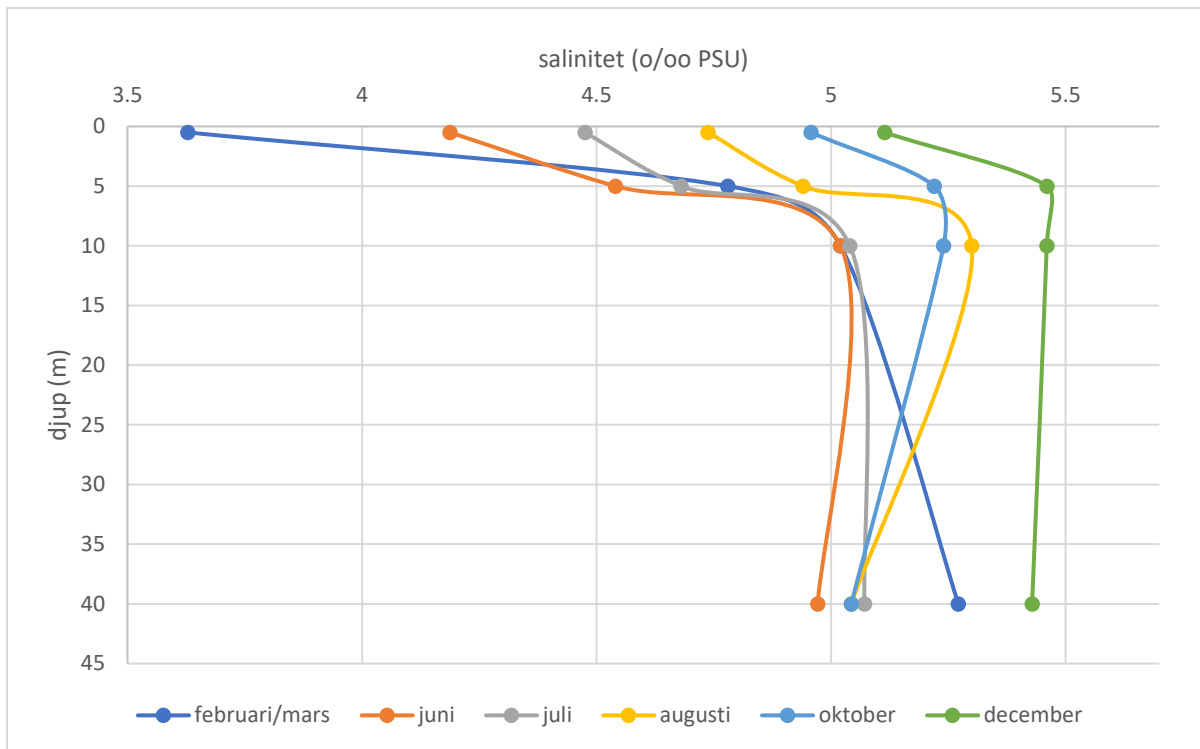
I perioden juni-oktober finns en kraftig skillnad i DO mellan 5 och 10 meters djup (Figur 9). Det tyder på att det finns en skiktning någonstans i det djupintervallet. Salinitetsmätningarna styrker detta då det även där i samma djupintervall sker stora förändringar av salthalten (Figur 10). En haloklin kan finnas i fjärden någonstans mellan 5 och 10 meters djup delar av året eller vissa år. Osäkerheten i mätvärdena för salinitet var stora vilket innebär att resultaten är svårtolkade och att en säsongsmässig haloklin inte kan antas (Bilaga E, Tabell 9). En omblandning verkar ske i fjärden vår och höst som påverkar haloklinen december och februari/mars (figur 10). Omblandningen är mest tydlig i djup-temperaturgrafan där en tydlig termoklin syns under sommarmånaderna mellan 5 och 10 meters djup (vilket sammanfaller med haloklinen) men en jämn temperatur i vattenprofilen syns i december och februari/mars (Figur 11).

Alla undersökta ämnen visade säsongsvariationer som gick att följa från månad till månad (se standardavvikelse i Bilaga E, Tabell 9). DO var som högst i februari/mars och minskade gradvis från juni till augusti där även halterna kring skiktningen i intervallet 5–10 meter skiljde sig mer och mer. I oktober var DO något högre vid 10 meter men nådde fortfarande hypoxiska nivåer på djupare vatten (Figur 9). Det är rimligt att DO sjunkit under sommaren och kan förklaras med att nedbrytningen i bottenvattnet av dött, nedsjunket, organiskt material ökar med ökad produktion i ytvattnet. Eftersom nedbrytningen är en syrekrävande process sjunker också DO. Att DO sedan ökat under vinterhalvåret bör ha varit en reaktion på att syrebehovet i bottenvattnet minskat och att en omblandning av fjärden skett höst och vår. Omblandningen verkar inte ha varit tillräckligt omfattande för att jämna ut DO i hela vattenprofilen. Troligtvis är det endast under sommarmånaderna då syrgashalten varit låg i bottenvattnet som en syresättningsanordning kan motiveras vara igång (Figur 9).



Figur 9. Profil i vattenmassan för månadsmedelvärden (2014–2021) med avseende på syrgashalt i Slätbaken.

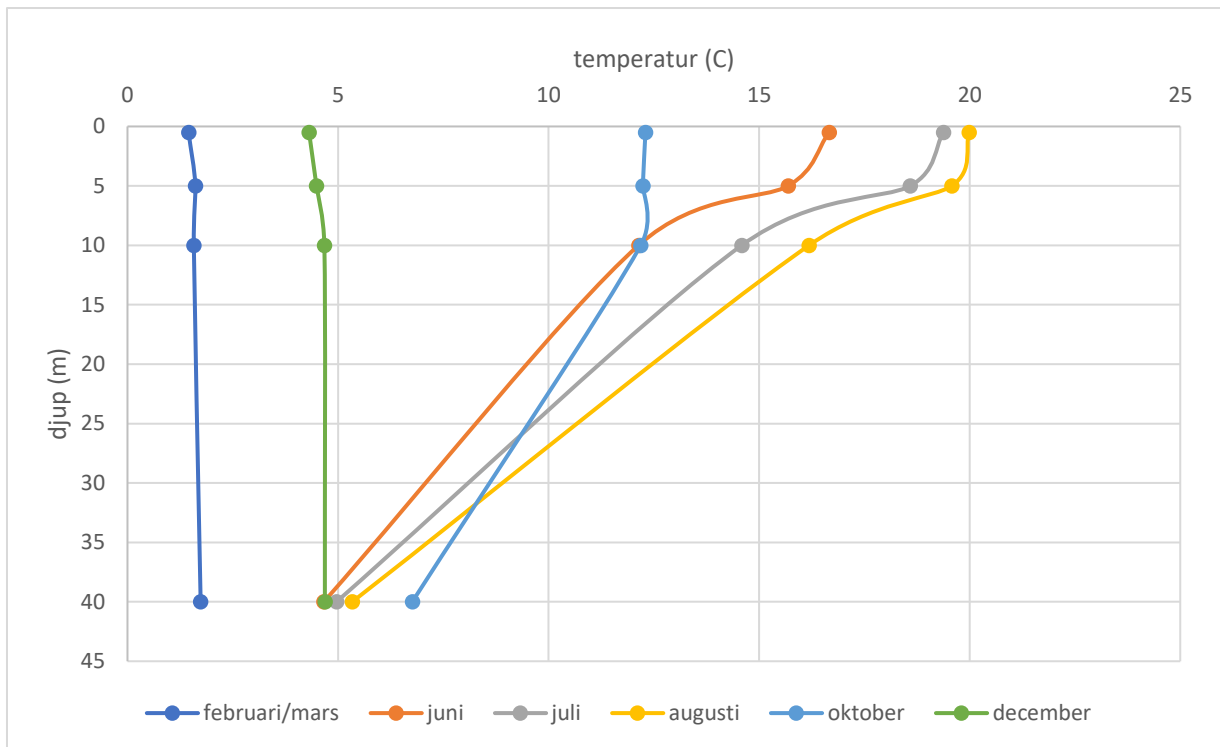
Saliniteten är mest intressant ur synpunkten att syrgasnedpumpning i Egentliga Östersjön kommer att bli representerad på ett mer relevant sätt i simuleringarna om fjärden har liknande egenskaper vilket i salinitetsfallet är en haloklin. Mellan februari/mars och augusti har det funnits en haloklin i vattenprofilen och det ger goda förutsättningar för Slätbaken som studieområde (Figur 10). Standardavvikelsen för dessa punkter varierade mellan 0,32–0,95 och stora osäkerheter fanns i hela vattenprofilen (Bilaga E). Därav är haloklinförekomsten inte säker även om det flera år definitivt funnits en haloklin.



Figur 10. Profil i vattenmassan för månadsmedelvärden (2014–2021) med avseende på salinitet i Slätbaken.

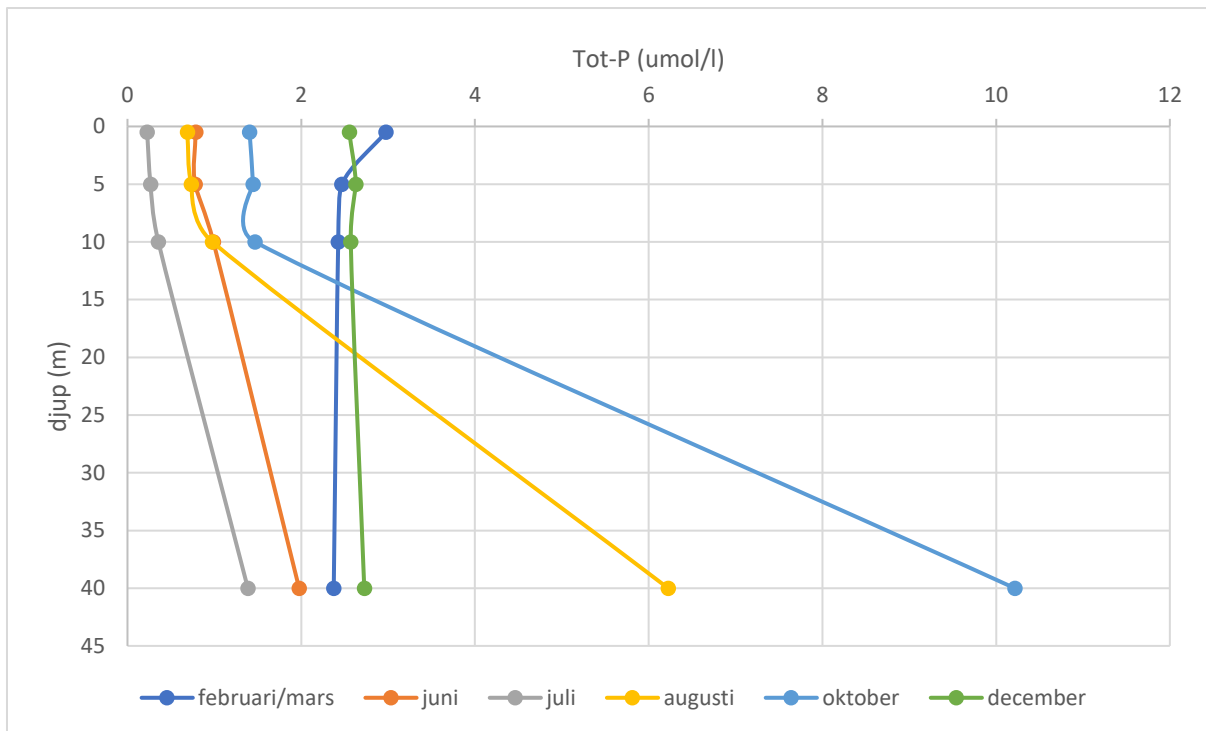
Temperaturen var lägst i februari/mars och jämn genom hela profilen. Under juni, juli och augusti värmdes sedan ytvattnet successivt upp medan bottenvattnet förblev kallare. En termoklin verkar ha bildats på samma djup som haloklinen under juni-augusti, som försvagats, i oktober och sedan blivit omblandad till december då vattnet som i februari/mars hållit en jämn temperatur i hela profilen (Figur 11). Om fjärden haft en termoklin eller inte har inte så stor betydelse för om fjärden är ett lämpligt studieområde eller inte. Däremot kan det vara intressant att notera om förändringar sker i termoklinen under en framtida pilotanordning då det skulle tyda på att syresättningen leder till en omblandning av vattenprofilen. Temperaturprofilen var också en viktig del i modellens indata (Tabell 3).





Figur 11. Profil i vattenmassan för månadsmedelvärden (2014–2021) med avseende på temperatur i Slätbaken.

Tot-P i vattenprofilen var som lägst i juli, vilket indikerar att det mesta hade assimilerats i biologiskt material till följd av kraftig växtlighet under vår och tidig sommar. Näringsbristen tycks sedan ha lett till lägre växtlighet under sommarmånaderna. Koncentrationen i ytvattnet var relativt jämförbar med koncentrationen i bottenvattnet fram till augusti då koncentrationen i bottenvattnet ökade kraftigt, från 1,4  $\mu\text{mol/l}$  i juli till 6,2  $\mu\text{mol/l}$  i augusti och sedan ännu mer, till 10,2  $\mu\text{mol/l}$  i oktober (Figur 12). Detta tyder på en internbelastning av fosfor från sedimentet, särskilt då de högsta koncentrationerna av fosfor i djupvattnet korrelerar med de lägsta syrekoncentrationerna, alltså i augusti och oktober. Vid en eventuell pilotanläggning kan det alltså vara en intressant aspekt att se om denna interna belastning kan motverkas genom att höja DO i bottenvattnet med hjälp av syresättning.



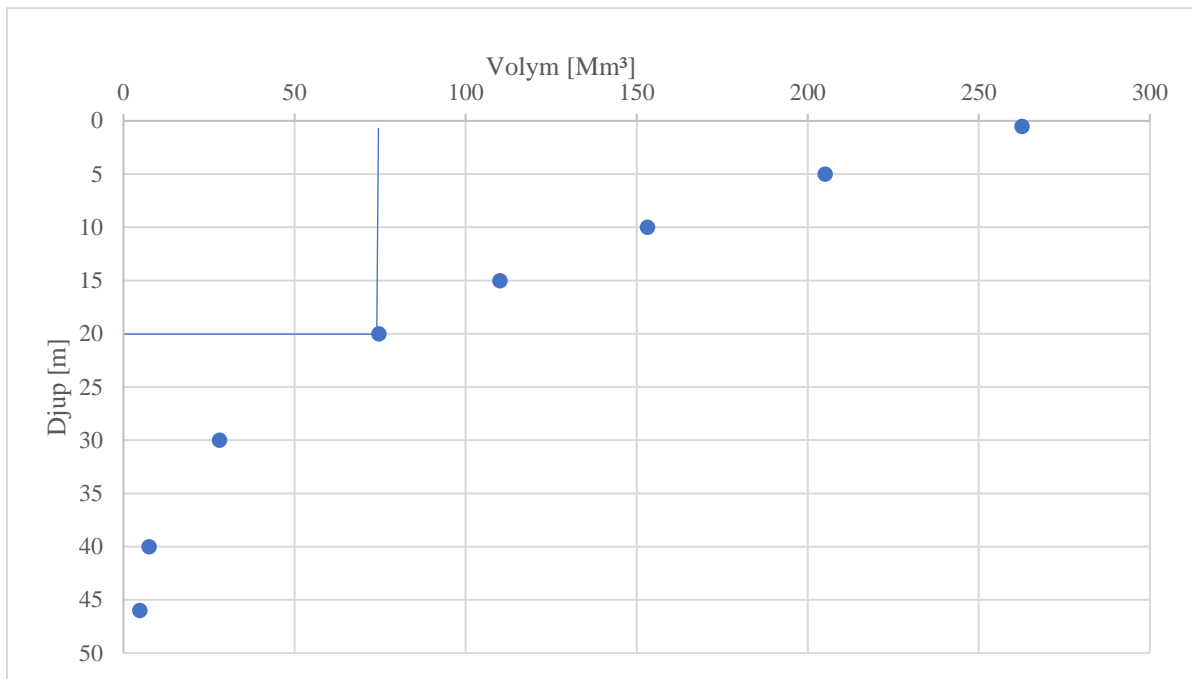
Figur 12. Profil i vattenmassan för månadsmedelvärden (2014–2021) med avseende på temperatur i Slätbaken.

Fjärdens fysikaliska förhållanden liknar Östersjön då den har en tröskel som begränsar utbytet med Östersjön, därav den långa omsättningstiden på 170 dagar som har visats tillräckligt lång för att hypoxiska nivåer ska uppnås periodiskt (Figur 9). Fjärden har ett medeldjup på 17,5 meter och ett maxdjup på 46 meter, och i kombination med en haloklin under sommaren ger detta goda möjligheter för en pilotanläggning att testas på djup över 40 meter i liknande förhållanden som Egentliga Östersjön (Tabell 4).

Tabell 4. Slätbakens fysikaliska egenskaper

<i>Area<sub>BV</sub> (Bottenarea)</i>	5,7 Mm <sup>2</sup>
<i>Omsättningstid</i>	170 dagar
<i>Volym i syrebehov</i>	75 Mm <sup>3</sup>

Utifrån ett antagande att syrebristen uppstår vid 20 meters djup i Slätbaken, har volymen bottenvatten som behöver syresättas beräknats till 75 Mm<sup>3</sup> utifrån Figur 9 och sedan lästs av i hypsografen (Figur 13).

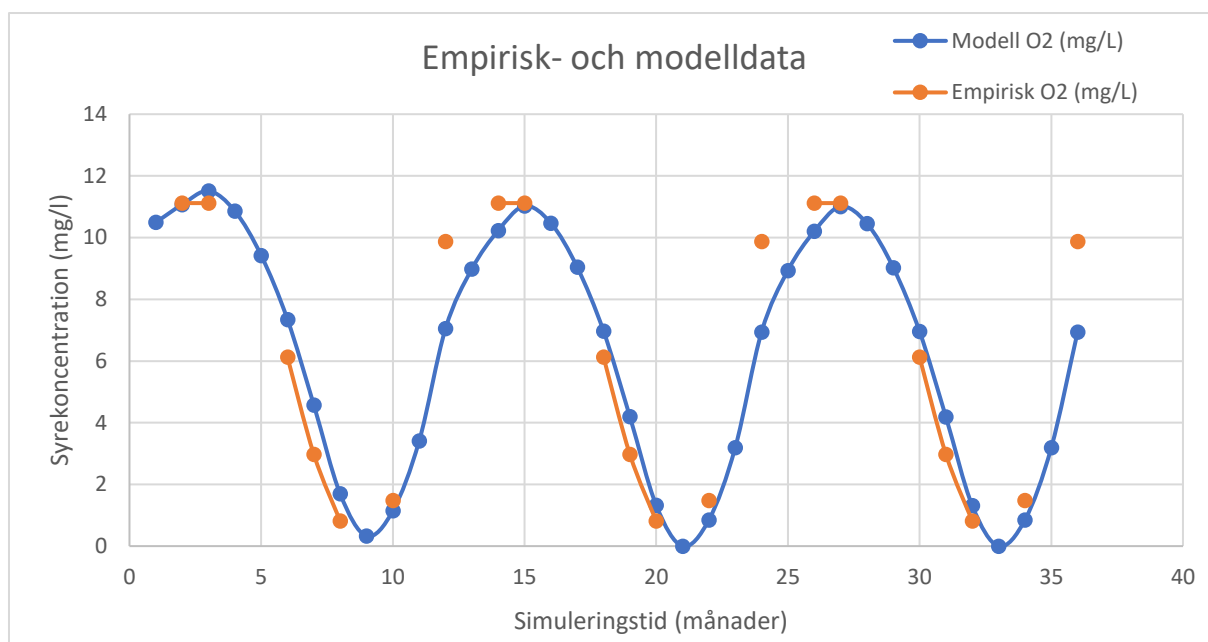


Figur 13. Hypsografisk kurva över Slätbaken med volymen 75 Mm<sup>3</sup> i syrebehov markerad vid 20 meters djup.

## 7. Modellresultat

Modellen simulerade i fem år (60 månader) men efter tre år (36 månader) nåddes en jämvikt vilket innebar att det varje år upprepades samma värden. Därför presenteras endast de tre första åren i Figureerna 14 och 15.

Medelvärden för modellerade och empiriska data jämfördes med varandra. Modellen uppnådde mycket lika värden som de empiriska (Figur 14). Den delen av året som modellen var sämst på att simulera var mätpunkten i december (simuleringssteg 12, 24 och 36) då syrekoncentrationen höjdes mer drastiskt i de empiriska mätningarna än vad modellen uppnådde. Trots detta presterade modellen mycket bra under sommarmånaderna alla simuleringsår och sammanföll väl med empiriska mätvärden i februari/mars.



Figur 14. Empiriska data (orangea punkter) och modelldata utan syrgasinjicering (blåa punkter) plottat mot DO och simulerings-tid. Resultaten avser botten-vatten (>20 m) i Slätbaken.

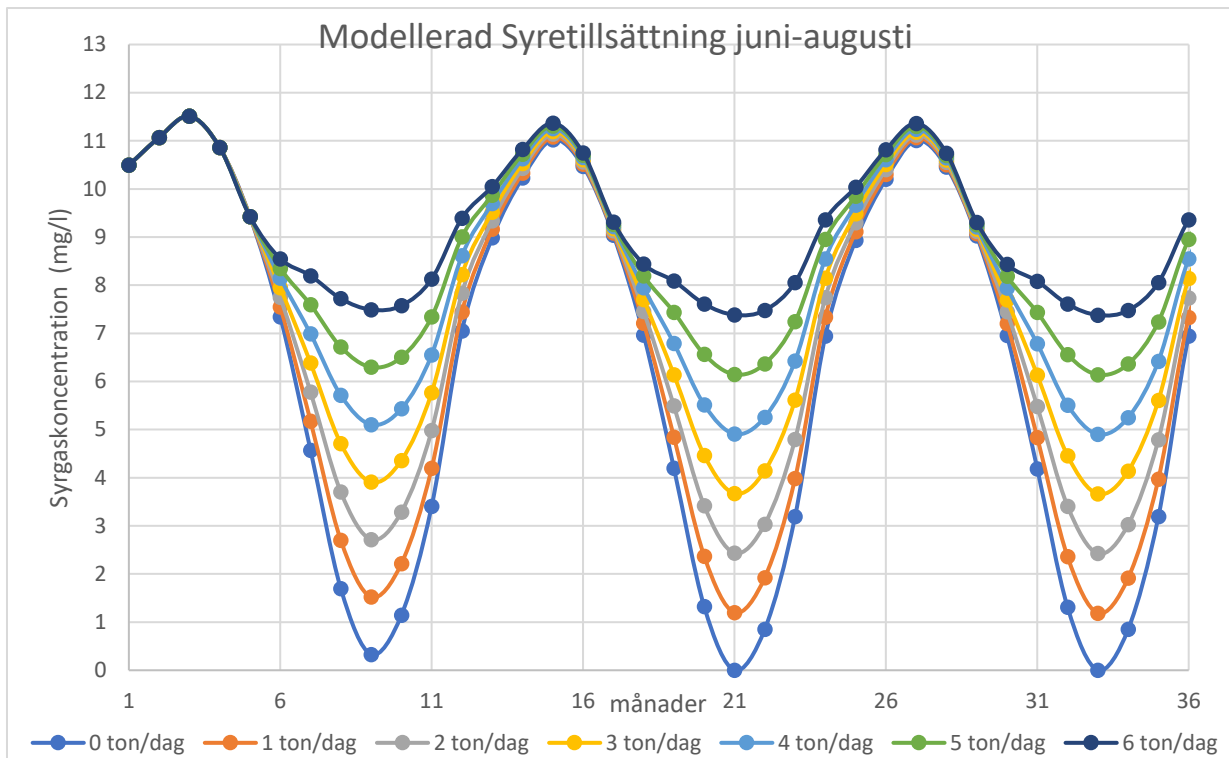
Årsmedelvärden för de tre simulerings-åren jämförda med de empiriska årsmedelvärdena gav ett absolut fel på under 1 mg/l under alla månader förutom juli och december. Det absoluta medelfelet var 0,96 mg/l och felet för årsmedelvärdena var 1,27 %. Modellens  $R^2$ - värde var 0,92 vilket tyder på en bra överrens-stämmelse mellan modellerade och empiriska data (Tabell 5).

Tabell 5. Empiriska och modellerade årsmedelvärden utan syreinjicering, fel i % och  $R^2$ - värde.

Datum	Modell O2 årsmedel (mg/l)	Empirisk O2 årsmedel (mg/l)	Absolut fel (mg/l)	Fel (%)	$R^2$ värde
feb	10,38	11,12	0,74		
mar	11,11	11,12	0,01		
jun	7,04	6,13	0,91		
jul	4,26	2,97	1,29		
aug	1,70	0,82	0,88		
okt	1,41	1,48	0,07		
dec	7,05	9,87	2,82		
Årsmedel	6,14	6,21	0,96	1,27	0,92

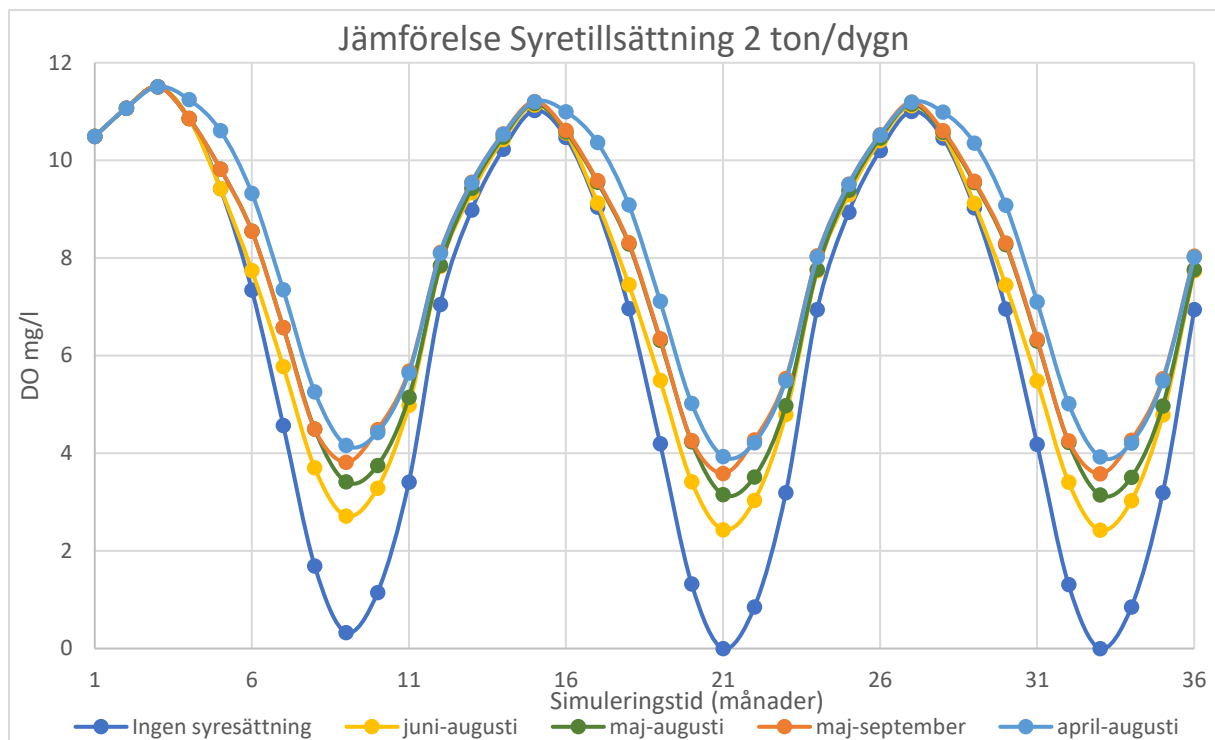
### 7.1. Dimensionering av syrgasdosing

Det skedde en tydlig ökning i bottenvattnets DO med ökad mängd tillsatt syrgas (Figur 15) och även en tydlig ökning i DO när syresättningen pågick under en längre period (Figur 16). Med syresättning i perioden juni-augusti krävdes 2 ton  $O_2$ /dygn för att höja lägsta syrekonzentrationen till över 2 mg/l och 4 ton  $O_2$ /dygn för att säkerställa att syrekonzentrationen aldrig gick under 4 mg/l i bottenvattnet (Figur 15).



Figur 15. Modellerad syresättning juni-augusti, koncentration i förhållande till mängd tillsatt syre från 0–6 ton/dygn.

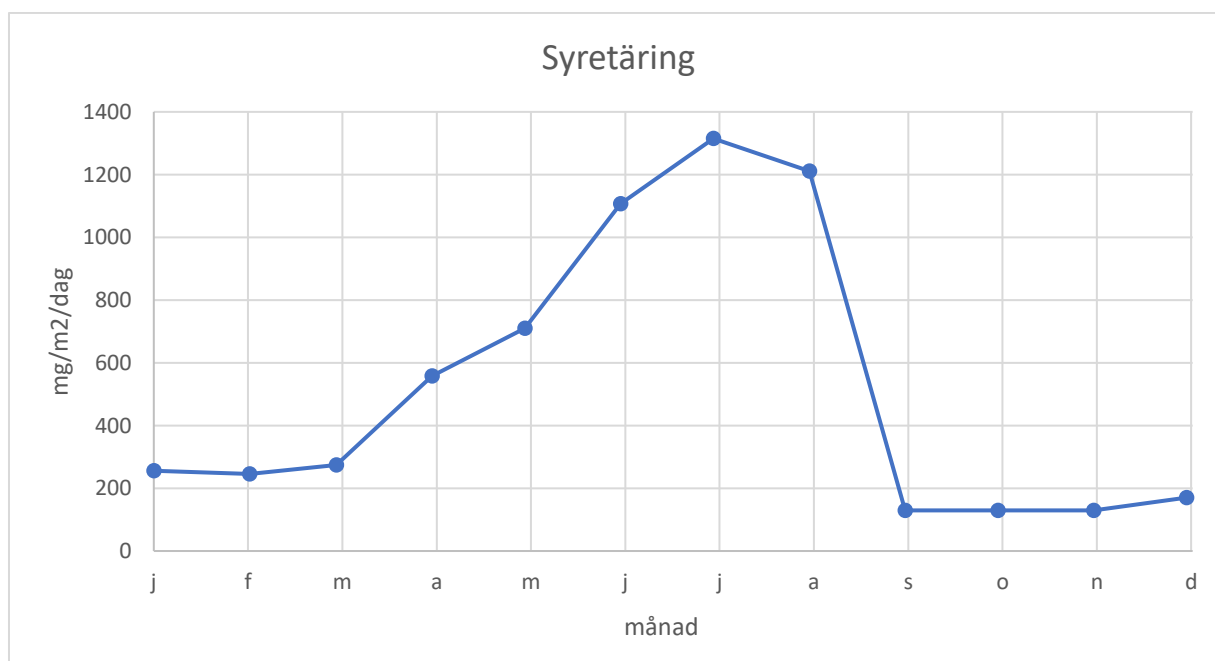
Av de två simuleringar med syresättning under fem månader (april-augusti och maj-september) gynnade den tidigare starten, april-augusti, syreförhållandena mest (Figur 16). Möjligheten att bygga ett system med lägre effektivitet finns om man räknar med att kunna hålla syresättningen igång under längre perioder om året. Kapacitetsskillnaden mellan att ha systemet igång tre eller fyra månader och hålla DO konstant över 4 mg/l var 4 ton  $O_2$ /dygn mot 3 ton  $O_2$ /dygn (Bilaga A). Vid fem månaders syresättning kunde kapaciteten reduceras till strax över 2,2 ton  $O_2$ /dygn och säkerställa samma resultat. Den slutliga dimensioneringen beror således på hur många månader och vilka månader syresättningen kan pågå. Med ett restriktivt tankesätt som tillåter problem som kan hindra systemet från att operera konstant används ett minimifall på tre månaders syresättning om året. En säkerhetsmarginal med en faktor två tillämpas dessutom vilket ger att systemet dimensioneras till 8 ton  $O_2$ /dygn.



Figur 16. Jämförelse av syresättning (2 ton O<sub>2</sub>/dygn) i olika tidsintervall. Ingen syresättning (blå), juli-augusti (gul), maj-augusti (grön), maj-september (orange) och april-augusti (ljusblå).

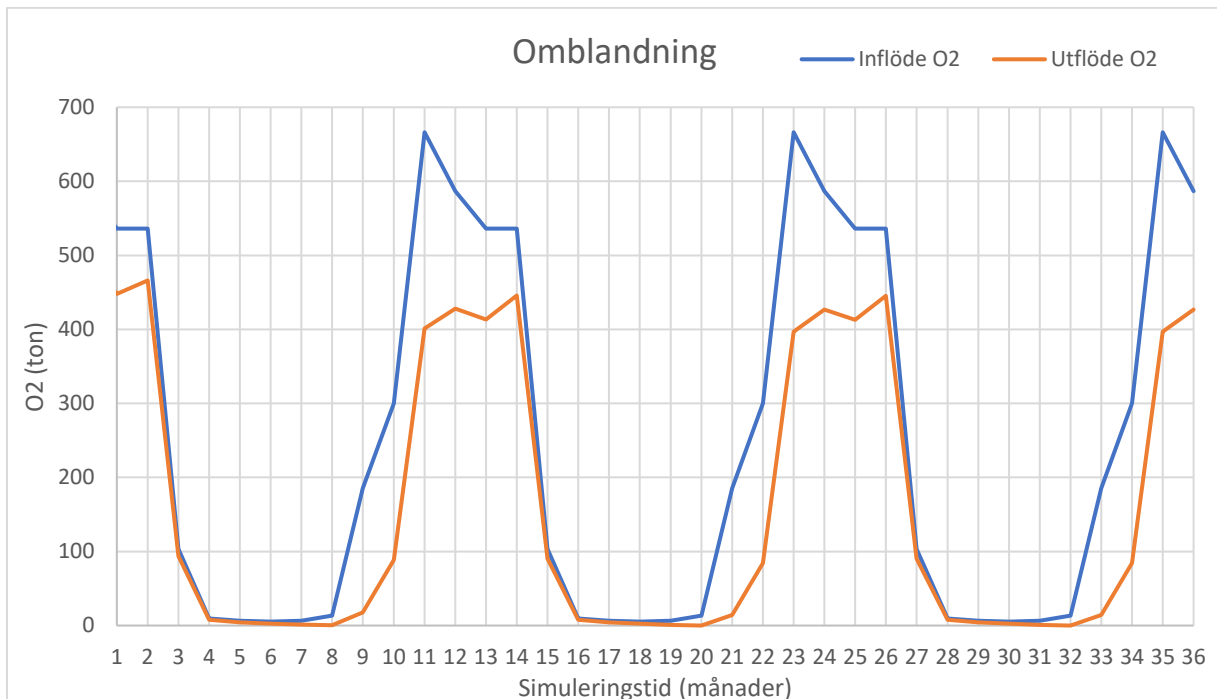
## 7.2. Syretäring och omblandning

Den i modellen inkalibrerade syretäringen var som högst under sommarmånaderna juni-augusti med ett maximum i juli på 1300 mg/m<sup>2</sup>/dygn (3 mg/l/dygn) och lägst september–oktober på 130 mg/m<sup>2</sup>/dygn (0.3 mg/l/dygn). Det skiljde alltså en tiopotens mellan lägsta och högsta värde på syretäringen (Figur 17).



Figur 17. Kalibrerad syretäring i Slätbakens bottenvatten, januari-december.

Omblandningen var i modellen som störst i november och var fortfarande omfattande genom hela vintern, och mellan mars och augusti skedde i princip ingen omblandning (Figur 18).



Figur 18. Antal ton syrgas som flödar in- och ut ur bottenvattnet genom omblandning med ytvattnet.

## 8. Diskussion

### 8.1. Syresättningsanordningar

Alla tre systemen DBCS, SSPS och DOIS har i flera fall visats vara effektiva för att höja syrgashalterna i bottenvattnet (Tabell 3). Den teknik som utmärker sig kapacitetsmässigt och därav troligtvis är den mest relevanta tekniken för syresättning av stora vattenmassor i Östersjön är DOIS. Pilotprojektet i Slätbaken bör alltså inrikta sig på samma teknik. I Russel Lake och Douglas dam har tekniken haft kapacitet på över 100 ton O<sub>2</sub> per dag och syresatt mycket stora vattenvolymer 1300 respektive 1700 Mm<sup>3</sup> (Beutel och Horne 1999; Mobley och Brock 1995). DOIS har också i flertalet fall haft hög OTR, exempelvis i Spring Hollow där man uppskattade OTR till 95–98 % och även i Douglas dam där OTR var cirka 90 % (Mobley och Brock 1995; Gantzer et al. 2009). Styrkan som beskrivs av DBCS är just att OTR i teorin kan bli väldigt hög (nära 100 %), men med denna höga effektivitet i DOIS som dessutom har använts i mycket högre kapacitet tycks DOIS vara ett bättre alternativ. DBCS har som högst dimensionerats till 13,2 ton O<sub>2</sub> per dag vilket är långt lägre än systemen som använts i Russel Lake och Douglas dam. SSPS har använts med goda resultat för att höja syrgashalten och reducera fosfor och kväve bland annat i Canning River, men saknar tidigare försök i djupare vatten. Därför bör den ses som ett osäkert alternativ för försök i Östersjön.

Näringsreduktion har haft blandade resultat avseende syrgashalt. Hupfer och Lewandowski (2008) beskriver hur ett tidigare paradig, där syrgas har ansetts haft en direkt korrelation med intern fosforbelastning, nu har skiftats till att ha ett mer komplext samband. Denna komplexitet kan förklara varför syresättningen inte alltid leder till minskade halter av fosfor då flertalet

andra faktorer också spelar in. Något att notera är att i många fall då näringsreduktionen misslyckats har syresättningen bedömts som otillräcklig, exempelvis i San Antonio och Lake Calaveras där systemet var inställt på att öka syrgastillförseln först när hypoxiska nivåer redan uppnåtts (Mobley et al. 2019) eller i Lake Thunderbird där kostnaden för det fullt dimensionerade systemet blev för hög och det i stället installerades ett underdimensionerat system (OWRB 2019).

Syresättningen har varit mycket effektivt när det gäller att eliminera svavelväten och därav också lett till fiskåtervandring (Camanche Reservoir) samt förbättrat och utökat fiskhabitat (Lake Calaveras, Newman Lake). Dessa system har installerats på många platser med huvudsakligt syfte att utöka fiskhabitat (Mobley et al. 2012). Klumb et al. (2004) noterade att planktonätande fisk var limiterad till vatten med DO > 4 mg/l, så syresättning ledde till ökat fiskhabitat men även nya skyddsplatser för plankton i områden där DO var lägre än 4 mg/l efter syresättningen, men som tidigare varit anoxiska.

De försök som tidigare gjorts i Östersjön har inte tagits upp i litteraturstudien då de inte använt sig av ren syrgas som resurs. Tekniken de har använt sig av gav upphov till omblandning av vattenmassan då syrerikt ytvatten pumpades ned till bottenvattnet (Naturvårdsverket 2012). Detta kritiserades av vissa forskare då det försvagade haloklinen (Conley et al. 2009). De nya förutsättningarna i och med planerad vätgasproduktion till havs innebär en helt ny förutsättning där ren syrgas både energieffektivt och med minimalt koldioxidavtryck kan ledas ned på djupet. Detta är hela grunden till varför den artificiella syresättningen av Östersjön nu är aktuell igen.

## 8.2. Slätbakens lämplighet som studieområde

Slätbaken som studieområde kräver att fjärden har rätt biogeokemiska egenskaper som gör den jämförbar med Östersjön. Att syrgashalten sjunker under sommaren innebär i det aktuella fallet att det finns hypoxiska förhållanden, vilket är grundförutsättningen för att installera pilotanläggningen. Det är rimligt att syrgashalten sjunker under sommaren och kan förklaras med att nedbrytningen i bottenvattnet av dött, nedsjunket, organiskt material ökar med ökad produktion i ytvattnet (Figur 9). Enligt VISS (2023) har fjärden bestående av anoxiska förhållanden på de djupaste platserna där varken fisk eller bottendjur påträffats de senaste åren. Vid en eventuell syresättning skulle det därför vara mycket intressant att se om bottendjur ockuperar ytan samt om fiskhabitatet utökas. Orio et al. (2018) modellerade torsk och skrubbskädda i Östersjön och noterade en lägre sannolikhet att de skulle påträffas redan då syrgashalten sjönk under 3–4 mg/l, så en ökning av syrgashalten i Slätbaken över 4 mg/l skulle därför potentiellt kunna leda till ett ökat fiskhabitat. Om det finns en haloklin eller inte i Slätbaken varierar med åren, i genomsnitt har det funnits en haloklin men de höga osäkerheterna innebär att slutsatsen av resultatet har mycket hög osäkerhet.

Länsstyrelsen (2014) beskriver att tidigare åtgärder för näringsreduktion har gjorts i Slätbaken genom lokala vattenvårdsprojekt och information till jordbrukare inom avrinningsområdet. Åtgärder i kombination av syresättning har visats ge problem för utvärderingen av syretillförseln, exempelvis i Baldeggersee och Sempachsee, där fosforreduktion efter syresättning bedömdes bero av minskade utsläpp, men i en senare studie bedömdes syresättningen ha bidragit till fosforreduktionen (Gächter och Wehrli 1998; Bürgi och Stadelmann 2002). Slätbaken har inte (till författarens kännedom) haft några ingrepp med kemikalier för att binda fosfor vilket är en fördel då systemet blir mer isolerat för åtgärden. Fosforreduktion vid syresättning är omdiskuterat, men i Slätbaken är det tydligt att



fosforkoncentrationen i bottenvattnet varit som högst i augusti och oktober, alltså i slutet av sommaren efter en period av hypoxiska förhållanden (Figur 12). Syretillförsel har visats leda till fastläggning av fosfor i Östersjöns sediment efter MBI:s där fosforkoncentrationen i bottenvattnet sjunkit markant för att sedan återgå till tidigare koncentration när syrgasen utarmats (Meier et al. 2018). Samma process sker troligtvis i Slätbaken varje år, med fosforläckage från sedimentet under den hypoxiska perioden och fastläggning under den oxiska perioden. Ett intressant område att uppfölja är alltså om fosfor kan fortsätta vara bunden till sedimentet med en pilotanläggning.

Syretäringen vid Östersjöns botten har sedan 1990-talet ökat vilket förklaras med att en syreskuld har byggts upp vid sedimenten (Naumov et al. 2023). Sedimentprover i Slätbaken visar på mångårig syrebrist i fjärden (Karlsson et al. 2010). Dessa botten kan eventuellt ha byggt upp en syreskuld i Slätbaken. Vid en flerårig syresättning i Slätbaken finns därför potential att undersöka om syreskulden kan bearbetas och på så sätt sänka syretäringen. Detta har redan visat sig vara möjligt i Camanche Reservoir där syretillförseln sänktes med över 50 % efter 10 år av bruk utan försämrad verkan (Horne et al. 2019). I Spring Hollow minskade syretäringen redan efter ett år av bruk (Gantzer et al. 2008).

## 8.3. Modelldiskussion

### 8.3.1. Syretäring

Flertalet studier har gjorts i sjöar och Östersjön där syreförbrukning har undersökts. Wilander och Sonesten (2006) sammanställde litteratur över 16 sjöar runt om i världen och fann att genomsnittliga syretäringen i sjöarna varierade mellan 70–1080 mg/m<sup>2</sup>/d. Medelsyreförbrukningen i Slätbaken kalibrerades till 500 mg/m<sup>2</sup>/d vilket ligger ungefär i mitten av spannet av de sjöar som Wilander och Sonesten (2006) undersökte. Gantzer et al. (2008) uppmätte syretäringen i Spring Hollow till i genomsnitt 1.22 mg/l/månad, medan Stigebrandt och Liljebladh (2011) estimerade grafiskt syretäringen i Byfjorden till 1 mg/l/månad. Båda dessa värden stämmer väl med Slätbakenmodellen där medelsyretäringen uppgick till 1.16 mg/l/månad (500 mg/m<sup>2</sup>/d). Carlsson et al. (1998) fann att syretäringens årsvariation i Östersjön är som högst under sommarmånaderna med ett maximum i augusti och upp till en åttondel så lågt under vintermånaderna december-mars. Även i Hinnasjön uppmättes årsvariationer, då syretäringen varierade mellan 100–810 g/m<sup>2</sup>/d, också där en ökning med 8 gånger från lägsta till högsta värde (Wilander och Sonesten 2006). Även Slätbakens syretäring varierade över året, mellan 130–1300 mg/m<sup>2</sup>/d vilket är en ökning med 10 gånger mellan högsta och lägsta värde (Figur 17), mycket likt de tidigare observationerna i Östersjön och Hinnasjön. I Egentliga Östersjön, Bornholmsbassängen och Östra Gotlandsbassängen sammanställde Meier et al. (2018) resultat från olika studier som visade en syretäring mellan 14–205 mg/m<sup>2</sup>/d. Dessa värden är betydligt lägre än de som estimerades för Slätbaken men de är framtagna från betydligt djupare botten, mellan 50 och 230 meter. Att syretäringen är högre i en fjärd än ute i öppna havet är också rimligt på grund av en större mängd tillförsel av näringsämnen och organiskt material, särskilt i Slätbakens fall som under många år mottagit näringsrikt vatten från Söderköpingsån (Karlsson et al. 2010). Jämförelsen med Byfjorden och sjöar bör därför vara av högre relevans än jämförelsen med Egentliga Östersjön, Östra Gotlandsbassängen och Bornholmsbassängen.

### 8.3.2. Isläggning

Isläggning har inte hanterats i massbalansmodellen i någon särskild funktion vilket kan vara en brist i modellen, särskilt då Slätbaken i alla fall delvis är täckt av is på vintrarna (SMHI 2023). Omblandningsekvationen beror starkt på temperaturskillnader kring skiktningdjupet, det sker alltså en hög omblandning under vinterhalvåret eftersom temperaturprofilen är mer eller mindre jämn då (Figur 12, Figur 18). Att omblandningen är hög på vintern är orimligt under isläggning som skulle hämma den genom att stoppa mekanisk omblandning från vind. En annan risk är att ett lägre inflöde av syre skulle ske under isläggningsperioden och därmed innebära överskattade syrekoncentrationer under vinterhalvåret. Det finns emellertid mycket som talar för att detta inte är ett problem. Eftersom modellen är kalibrerad mot empiriska data har detta problem troligtvis löst sig genom den kalibrerat låga syretäringen under vinterhalvåret. Wilander och Sonesten (2006) föreslår att syretäringen vid modellering ska sänkas vid låga temperaturer och vid isläggning, vilket bekräftar tesen att en eventuell isläggnings påverkan redan är inbakad i modellen eller åtminstone inte ger upphov till problem för modellens syfte. Modellens syfte hindras inte av isläggning då den ska undersöka DO under sommarmånaderna. Så länge modellen uppnår en rimlig DO på våren bör sommarmånaderna simuleras med god precision vilket är det viktiga för dimensioneringen av en pilotanläggning.

### 8.3.3. Modellens pålitlighet

Valet av en massbalansmodell gjordes då det är en metod som är välbeprövad för den här typen av modellering och dessutom lätt att kalibrera (Carlsson et al, 1999; Håkanson et al, 2004; Håkanson, 2009). En stor fördel med massbalansmodellen som konstruerades var att indata som krävdes för att få ett bra resultat var mycket lättillgänglig. Mer avancerade modeller fordrar detaljkunskap om bottenströmmar och diffusorernas spridarförmåga för att få ett meningsfullt resultat, vilket i nuläget inte är realistiskt att få tag på. Då modellen är specifikt kalibrerad till Slätbaken är det inte möjligt att använda den på andra vatten utan särskilda modifikationer.

Data som ligger till grund för modellens input samt kalibrering bestod av 8 mätpunkter per månadsmedelvärde. Provtagning i Slätbaken från SMHI:s SHARKweb gick endast att hämta för februari/mars (antingen eller), juni, juli, augusti, oktober och december. Det innebar en relativt stor osäkerhet i de empiriska data som modellen grundar sig på. Eftersom bättre data inte fanns tillgängliga vid modellbygget fanns få andra alternativ att använda. Modellen beskriver alltså de genomsnittliga förhållanden som Slätbaken har haft sedan 2014.

Beroende på var gränsen mellan syrerikt och syrefattigt vatten sätts kommer olika volymer för vatten med syrebehov att beräknas. Vid vidare analys av Figur 9 tycks det rimligt att välja gränsen vid 20 meter då syrenivån under haloklinen troligtvis sjunker mycket snabbt mot bottenvärdena. Stigebrandt och Gustavsson (2007) visade att syrenivån i Östersjön var väsentligt lägre direkt under haloklinen än direkt ovanför och att en relativt jämn syrenivå hölls i bottenvattnet. Ett alternativt scenario hade varit att sätta gränsen vid 15 meter men då är problemet att DO inte är tillräckligt låg för att motivera en syresättning. Eftersom mätpunkter på fler djup saknas gjordes alltså antagandet att syrebehovet i fjärden finns på platser djupare än 20 meter.

Historiska medelvärdesbildade empiriska värden återkommer varje år i modellens indata vilket gör det rimligt att ett jämviktsläge nås efter en viss tid (Figur 14 och 17). Detta är en svaghet i modellen om värden långt fram i tiden ska simuleras eftersom externa faktorer bör påverkas av tillsatt syrgas, exempelvis ytvattnets syrekoncentration. En ökad syrekoncentration i ytvattnet

skulle leda till ett större inflöde av syre till bottenvattnet och därmed finns en risk att modellen underskattar syrekonzentrationen efter många års simulering. Modellens syfte var att bedöma syredoseringen för en pilotanläggning i Slätbaken. Eftersom anläggningen rimligtvis redan första sommaren ska ha kapacitet att höja syrekonzentrationen till minst 4 mg/l förändrar inte modellens långsiktiga osäkerhet ur dimensioneringssynpunkt den kapacitet som kommer krävas av anläggningen. Det absoluta felet var i genomsnitt 0.96 mg/l samtidigt som årsmedelvärdet hade ett fel på 1.27 % och  $R^2 = 0.92$  (Tabell 5). Med tanke på de rimliga värdena på syretäring och modellens låga fel samt höga  $R^2$  bedöms kalibreringen av  $R_{mixconst} = 3$  vara rimlig. Vid jämförelse av in- och utflödande syre genom omblandning mellan botten- och ytvatten tycks magnituden på flödena vara rimliga vid jämförelse med empiriska data (Bilaga C). Den högre syrgaskonzentrationen i ytvattnet ger upphov till att mer syre flödar in i bottenvattnet än ut under omblandningsmånaderna vilket stämmer väl med empiriska iakttagelser där syrgaskonzentrationen höjs markant i bottenvattnet under vinterhalvåret (Figur 9).

#### 8.3.4. Pilotanläggningens syrgasdosering

Den slutgiltiga rekommendationen för pilotanläggningens kapacitet sattes till 8 ton  $O_2$ /dygn trots att modellen visade 4 ton  $O_2$ /dygn. Grunden till tilltagen säkerhetsmarginal är hämtad från dimensioneringen av systemet i Camanche Reservoir. Där gjordes ett liknande tilltag i kapacitet då syrebehovet beräknades till 6,6 ton  $O_2$ /dygn men med tillagd säkerhetsmarginal dimensionerades systemet till 13,2 ton  $O_2$ /dygn (se avsnitt 3.1.1). Installationskostnad per kapacitet för DOI-system har i tidigare studier varierat från 44–435 dollar/kg/d med ett medel på 200 dollar/kg/d där variationen uppges ha berott mest på områdesspecifika behov (Mobley et al. 2019). En tilltagen säkerhetsmarginal kan alltså vara mycket dyr (miljontals kronor) i slutändan beroende på hur stor installationskostnad studieområdet kräver. Vid jämförelse med andra vatten som syresatts tycks 8 ton/dygn vara en rimlig mängd syre för Slätbakens volym. De sjöarna med en volym närmast Slätbaken ( $265 \text{ Mm}^3$ ) var Camanche Reservoir ( $513 \text{ Mm}^3$ ) med kapacitet 13,2 ton  $O_2$ /dygn, Calaveras ( $118 \text{ Mm}^3$ ) med kapacitet 3,4 ton  $O_2$ /dygn och Lake Casitas ( $293,3 \text{ Mm}^3$ ) med kapacitet 27,3 ton  $O_2$ /dygn (Tabell 3). Kapaciteten skiljer väldigt mycket åt i de olika systemen men notera att DO i Lake Casitas höjdes till  $> 8 \text{ mg/l}$ , alltså mer än dubbelt så högt som målet i Slätbaken. Calaveras är ett bra exempel då sjön är ungefär hälften så stor som Slätbaken och systemet är dimensionerat ungefär hälften så stort som i Slätbaken. Camanche Reservoir hade en volym i behov av syresättning på  $36 \text{ Mm}^3$  vilket är lägre än Slätbakens volym i syrebehov på  $75 \text{ Mm}^3$ . Systemet i Camanche Reservoir beräknades kräva 13,2 ton  $O_2$ /dygn trots en lägre volym vilket tyder på att Slätbakens system inte är överdimensionerat och att den tillagda säkerhetsmarginalen är rimlig. Återstående dilemma är hur många månader det är rimligt att operera en syresättningsanordning per år. Det är mycket viktigt att DO höjs till över 4 mg/l för att ordentliga studier ska kunna göras, då erfarenheter från andra platser har visat att problem kan uppstå, särskilt vid pilotanläggningar där en teknik är helt ny för platsen (Naturvårdsverket 2012). Både kapacitetsjämförelsen med liknande system och osäkerheten kring hur länge systemet kan vara igång gör att den mer restriktiva och säkra rekommendationen på 8 ton  $O_2$ /dygn är mest rimligt. En hög kapacitet kan också vara attraktivt ur forskningssynpunkt för att överlasta systemet och undersöka riskfaktorer som gasblåsesjuka vilket är ett tillstånd likt dykarsjuka hos människor. Fisk som andas löst syrgas på ett högt tryck kan skadas då deras simblåsor kan expandera om trycket ändras mycket hastigt genom stigning till grundare vatten (Horne et al. 2019).

## 8.4. Framtidsutsikter och rekommendationer

Nästa steg i projektet för en pilotanläggning i Slätbaken skulle enligt min rekommendation vara att testa ett DOI-system i Slätbaken för att se huruvida dimensioneringen och syrebehovet ter sig i verkligheten. Detta skulle ge en grund till att stegvis skala upp systemet och ge stor lärdom kring hur artificiell syresättning kommer fungera i Östersjön.

Stigebrandt och Liljebladh (2011) skriver i sin rapport där de modellerar syresättning i Byfjorden att bra fälldata är av mycket hög prioritet och att veckovisa provtagningsintervall hade varit att föredra framför månadsvisa data som de hade att tillgå. En eller flera mätstationer i Slätbaken som kontinuerligt mäter DO, salinitet, temperatur och eventuellt fosfor på flera djup hade alltså varit mycket användbart. Just nu mäts fyra djup sex gånger per år, medan mer högupplösta data skulle gynna framtida studier både i modelleringssyfte och för en säkrare bedömning av fjärden som studieområde.

## 9. Slutsatser

- Syresättning av botten med syrgas som resurs är välbeprövat, huvudsakligen i Nordamerika. Goda resultat har uppnåtts med att höja koncentrationen av löst syrgas i bottenvattnet.
- Fastläggning av fosfor, oxidering av svavelväten, minskat syrebehov, ökat fiskhabitat och återvändande fisk har noterats i några utav studieområdena. Om dessa positiva effekter går att uppnå konsekvent är svårt att säga. Särskilt fastläggning av fosfor kräver många andra förutsättningar än endast förhöjda syrgasnivåer.
- Flertalet tekniska lösningar för syresättning har tidigare använts men tre huvudsakliga system har identifierats: DBCS, SSPS, och DOIS. Alla tre metoder har använts med framgång där geografiska förutsättningar och effektivitetsbehov är avgörande för att bestämma vilket system som passar bäst.
- För djupare platser som kräver hög kapacitet är DOIS det enda som prövats tidigare, och därför är det systemet mest lämpligt i en pilotanläggning i Slätbaken i eventuell förberedelse inför syresättning av hela Egentliga Östersjön.
- Slätbaken tycks vara en bra plats för en pilotanläggning. Den långa omsättningstiden i kombination med stora djupa områden och långvarig syrebrist, en haloklin (hög osäkerhet) och en tröskel som likt de danska sunden begränsar vattenutbytet gör att fjärden representerar Egentliga Östersjön på ett bra sätt.
- En framtida pilotanläggning som dimensioneras med en kapacitet på 8 ton O<sub>2</sub>/dygn bör med säkerhet kunna höja syrgaskoncentrationen i bottenvattnet till över 4 mg/l.

## 10. Referenser

- Aku, P. M. K. och Tonn, W. M. (1999). *Effects of Hypolimnetic Oxygenation on the Food Resources and Feeding Ecology of Cisco in Amisk Lake, Alberta*. Transactions of the American Fisheries Society (1900), 128(1), 17–30. [https://doi.org/10.1577/1548-8659\(1999\)128.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8659(1999)128.0.CO;2)
- Austin, D., Scharf, R., Chen, C.-F., Bode, J. (2019). *Hypolimnetic oxygenation and aeration in two Midwestern USA reservoirs*. Lake and Reservoir Management, 35(3), 266–276. <https://doi.org/10.1080/10402381.2019.1599087>
- Beutel, M., W. och. Horne, A. J., (1999) *A Review of the Effects of Hypolimnetic Oxygenation on Lake and Reservoir Water Quality*. Lake and Reservoir Management, 15:4, 285-297. <https://doi.org/10.1080/07438149909354124>
- Bernes, C. (2005). *Förändringar under ytan*. Uppl. 5000, Värnamo: Fälth och Hässler.
- Bürgi, H. och Stadelmann, P. (2002). *Change of phytoplankton composition and biodiversity in Lake Sempach before and during restoration*. Hydrobiologia, 469(1–3), 33–33. <https://doi.org/10.1023/A:1015575527280>
- Carlsson, L., Persson, J., Håkanson, L. (1999). *A management model to predict seasonal variability in oxygen concentration and oxygen consumption in thermally stratified coastal waters*. Ecological Modelling 119 (1999) 117–134.
- Conley J. D., Humborg C., Rahm L., Savchuk P. O., and Wulff, F. (2002). *Hypoxia in the Baltic Sea and Basin-Scale Changes in Phosphorus Biogeochemistry*. Environmental Science & Technology 2002 36 (24), 5315-5320. DOI: 10.1021/es025763w
- Conley, J. D., Björck, S., Bonsdorff, E., Carstensen, J., Destouni, G., Gustafsson, B. G., Hietanen, S., Kortekaas, M., Kuosa, H., Markus Meier, H. E., Müller-Karulis, B., Nordberg, K., Norkko, A., Nürnberg, G., Pitkänen, H., Rabalais, N. N., Rosenberg, R., Savchuk, O. P., Slomp, C. P., Zillén, L. (2009). *Hypoxia-Related Processes in the Baltic Sea*. Environmental Science & Technology, 43(10), 3412–3420. <https://doi.org/10.1021/es802762a>
- Debroux, J.F., Beutel M.W., Thompson, C.M., Mulligan, S. (2012) *Design and testing of a novel hypolimnetic oxygenation system to improve water quality in Lake Bard, California*, Lake and Reservoir Management, 28:3, 245-254, DOI: 10.1080/07438141.2012.716501
- Department of Water and Environmental Regulation, (2022). *Oxygenating the Canning*. 21220208 (Faktablad) [Oxygenating the Canning River \(www.wa.gov.au\)](http://www.wa.gov.au)
- Díaz, R. J., Rosenberg, R. (2008). *Spreading Dead Zones and Consequences for Marine Ecosystems*. Science (American Association for the Advancement of Science), 321(5891), 926–929. <https://doi.org/10.1126/science.1156401>
- Doke, J.L., Funk, W.H., Juul, S.T.J., Moore, B. C. (1995). *Habitat Availability and Benthic Invertebrate Population Changes Following Alum Treatment and Hypolimnetic Oxygenation in Newman Lake, Washington*. Journal of Freshwater Ecology, 10:2, 87-102, DOI: 10.1080/02705060.1995.9663423
- Dunnette, D. A., Chynoweth, D. P., Mancy, K. H. (1985). *The source of hydrogen sulfide in anoxic sediment*. Water Research, 19:7, 875-884, [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(85\)90146-0](https://doi.org/10.1016/0043-1354(85)90146-0)

- Fast A. W., Overholtz, W. J., Tubb, R. A. (1975). *Hypolimnetic Oxygenation Using Liquid Oxygen*. *Water Resources Research*, 11(2), 294–299. <https://doi.org/10.1029/WR011i002p00294>
- Fast A. W., Overholtz, W. J., Tubb, R. A. (1977). *Hyperoxygen concentrations in the hypolimnion produced by injection of liquid oxygen*. *Water Resources Research*, 13(2), 474–476. <https://doi.org/10.1029/WR013i002p00474>
- Fischer, H. och Matthäus, W. (1996). *The importance of the Drogden Sill in the Sound for major Baltic inflows*. *Journal of Marine Systems*, 9(3), 137–157. [https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(96\)00046-2](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(96)00046-2)
- Gantzer, P. A., Bryant, L. D., Little, J. C. (2009). *Effect of hypolimnetic oxygenation on oxygen depletion rates in two water-supply reservoirs*. *Water Research (Oxford)*, 43(6), 1700–1710. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.12.053>
- Gächter, R. och Wehrli, B. (1998). *Ten Years of Artificial Mixing and Oxygenation: No Effect on the Internal Phosphorus Loading of Two Eutrophic Lakes*. *Environmental Science & Technology*, 32(23), 3659–3665. <https://doi.org/10.1021/es980418l>
- HELCOMa (2023). *Eutrophication*. <http://stateofthebalticsea.helcom.fi/pressures-and-their-status/eutrophication/>. [2023-05-18]
- HELCOMb (2023). *Baltic Sea Action Plan*. [Baltic Sea Action Plan – HELCOM](#). [2023-04-20]
- Horne, A. J. och Faisst, W. K. (2022). *Hypolimnetic oxygenation 6. Improvement in fisheries, hydropower, and drought management with costs of installation and operation in Camanche Reservoir, California, United States*. *Lake and Reservoir Management*, 38(3), 268–285. <https://doi.org/10.1080/10402381.2022.2049404>
- Horne A. J., Jung, R., Lai, H., Faisst, B., Beutel, M. (2019). *Hypolimnetic oxygenation 2: oxygen dynamics in a large reservoir with submerged down-flow contact oxygenation (Speece cone)*. *Lake and Reservoir Management*, 35(3), 323–337. <https://doi.org/10.1080/10402381.2019.1648612>
- Marc W. Beutel & Alex J. Horne (1999) A Review of the Effects of Hypolimnetic Oxygenation on Lake and Reservoir Water Quality, *Lake and Reservoir Management*, 15:4, 285-297, DOI: [10.1080/07438149909354124](https://doi.org/10.1080/07438149909354124)
- Hupfer, M. och Lewandowski, J. (2008). *Oxygen controls the phosphorus release from lake sediments, a long-lasting paradigm in limnology*. *International Review of Hydrobiology*, 93(4-5), 415–432. <https://doi.org/10.1002/iroh.200711054>
- Håkanson, L., Gyllenhammar, A., Brolin, A., (2003). *A dynamic compartment model to predict sedimentation and suspended particulate matter in coastal areas*. *Ecological Modelling* 175 (2004) 353–384
- Håkanson, L. (2009). *Modeling Nutrient Fluxes to, within and from the Kattegat to Find an Optimal. Cost-Efficient Swedish Remedial Strategy*. Department of Earth Sciences, Uppsala University, Sweden Geotryckeriet, Uppsala, ISBN 978-91-633-4819-8
- Isee Systems (2023). *Stella Professional*. [Stella Professional \(iseesystems.com\)](#). [2023 05-10]

- Karlsson, M., Malmaeus, M., Rydin, E., Jonsson, P. (2010). *Bottenundersökningar i Upplands, Stockholms, Södermanlands och Östergötlands skärgårdar 2008–2009*. IVL rapport B1928. Stockholm: Stockholms universitet.
- Klumb RA, Bunch KL, Mills EL, Rudstam LG, Brown G, Knauf C, Burton R, Arrhenius F. (2004). *Establishment of a metalimnetic oxygen refuge for zooplankton in a productive Lake Ontario embayment*. *Eco App* 14(1): 113–131.
- Länsstyrelsen Östergötland (2014). *Åtgärder för att förbättra miljötillståndet i Slätbaken och dess utanförliggande skärgårdsområde*. Länsstyrelsen Östergötland, rapport 2014:23.
- Meier, H.E., Vali, G., Naumann, M., Eilola, K., Frauen, C. (2018). *Recently accelerated oxygen consumption rates amplify deoxygenation in the Baltic Sea*. *Journal of Geophysical Research*. *Oceans*, 123(5), 3227–3240. <https://doi.org/10.1029/2017JC013686>
- Mobley, M. och Brock, W. G. (1995). *Widespread oxygen bubbles to improve reservoir releases*. *Lake and Reserv. Manage.* 11(3):231-234
- Mobley, M., Shallenberger, E., Beutel, M. W., Gantzer, P., Sak, B. (2012). *Oxygen Diffusers to Create and Maintain Summer Fish Habitat*. *American Fisheries Society Symposium* 80:000–000.
- Mobley, M., Gantzer, P., Benskin, P., Hannoun, I., McMahon, S., Austin, D., Scharf, R. (2019). *Hypolimnetic oxygenation of water supply reservoirs using bubble plume diffusers*. *Lake and Reservoir Management*, 35(3), 247–265. <https://doi.org/10.1080/10402381.2019.1628134>
- Moore, B.C., Christensen, D. (2009). *Newman Lake restoration: A casestudy. Part I. Chemical and biological responses to phosphoruscontrol*. *Lake Reserv Manage.* 25(4):337–350
- Moore, B.C., Cross, B.K., Beutel, M., Dent, S., Preece, E., Swanson, M. (2012). *Newman Lake restoration: A case study PartIII. Hypolimnetic oxygenation*. *Lake Reserv Manage.* 28:311–327
- Mortimer H. C., (1941). *The Exchange of Dissolved Substances Between Mud and Water in Lakes*. *Journal of Ecology*, Vol. 29, No. 2 (Aug. 1941), pp. 280-329. <https://www.jstor.org/stable/2256395>
- Motala Ströms Vattenvårdsförbund (2021). *Årsrapport 2021. Årsrapporter – Motala Ströms Vattenvårdsförbund (motalastrom.se)* [2023-05-12]
- Naturvårdsverket (2012). *Artificiell syresättning av Östersjöns djupbottnar genom syrepumpning*. Rapport 6522. ISSN 0282-7298.
- Naumov L, Neumann T, Radtke H and Meier HEM (2023). *Limited ventilation of the central Baltic Sea due to elevated oxygen consumption*. *Front. Mar. Sci.* 10:1175643. doi: 10.3389/fmars.2023.1175643
- Orio, A., Bergström, U., Florin, A-B., Lehmann, A., Šics, I., Casini, M. (2018). *Spatial contraction of demersalfish populations in a large marine ecosystem*. *J Biogeogr.* 2019;46:633–645. <https://doi.org/10.1111/jbi.13510>
- OWRB (Oklahoma Water Resources Board). (2020). *Lake Thunderbird Water Quality 2019 Final Report*. Oklahoma. [Reports and Publications | Oklahoma Water Resources Board](#)

- OWRB (Oklahoma Water Resources Board). (2022). *Lake Thunderbird Water Quality 2021 Final Report*. Oklahoma. [Reports and Publications | Oklahoma Water Resources Board](#)
- Preece, P. E., Moore B. C., Skinner, M. M., Child, A., Dent, S. (2019): *A review of the biological and chemical effects of hypolimnetic oxygenation, Lake and Reservoir Management*, DOI: 10.1080/10402381.2019.1580325. <https://doi.org/10.1080/10402381.2019.1580325>
- Prepas, E. och Burke, J. M. (1997). *Effects of hypolimnetic oxygenation on water quality in Amisk Lake, Alberta, a deep, eutrophic lake with high internal phosphorus loading rates*. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 54(9), 2111–2120. <https://doi.org/10.1139/f97-125>
- Schauser, I. och Chorus, I. (2007). *Assessment of internal and external lake restoration measures for two Berlin lakes*. Lake and Reservoir Management. 23:366-376.
- SMHI (2023). *Havsis Isobservationer*. [Havsis | SMHI](#). [2023-05-09]
- SMHI-SHARKweb (2023). *SHARKweb*. [SharkWeb \(smhi.se\)](#) [2023-02-28]
- SMHI-Vattenwebb (2023). *Modelldata per område*. [Modelldata per område | SMHI - Vattenwebb](#). [2023-02-28]
- Stigebrandt, A., och Gustafsson, B. G. (2007). *Improvement of Baltic Proper Water Quality Using Large-Scale Ecological Engineering*. *Ambio*, 36(2/3), 280–286. <http://www.jstor.org/stable/4315825>
- Stigebrandt, A., och Liljebladh, B. (2011). *Oxygenation of Large Volumes of Natural Waters by Geo-Engineering: with Particular Reference to a Pilot Experiment in Byfjorden*. *Environmental Science and Engineering*. 303–315. DOI: 10.1007/978-3-642-14779-1\_15
- Thomas, J. A., Funk, W. H., Moore, B., C., Budd, W., W. (1994). *Short Term Changes In Newman Lake Following Hypolimnetic Aeration With The Speece Cone*, *Lake and Reservoir Management*, 9:1, 111-113, DOI: 10.1080/07438149409354738
- Vahtera, E., Conley, J. D., Gustafsson, G. B., Kuosa, H., Pitkänen, H., Savchuk P. O., Tamminen, T., Viitasalo, M., Voss, M., Wasmund, N., Wulff F. (2007). *Internal Ecosystem Feedbacks Enhance Nitrogen-Fixing Cyanobacteria Blooms and Complicate Management in the Baltic Sea*. *Ambio*, Apr. 2007, Vol. 36, No. 2/3, Science and Governance of the Baltic Sea (Apr. 2007), pp. 186-194
- VISS (2023). *Inre Slätbaken*. [Inre Slätbaken - Kust - VISS - VattenInformationssystem för Sverige \(lansstyrelsen.se\)](#) [hämtad 2023-02-03]
- Väli, G., Meier M., Elken, J. (2012) *Simulated variations of the Baltic Sea halocline during 1961-2007*. 0283-1112 Report oceanography. Norrköping: SMHI.
- WLDB (World Lake Database). (UÅ). *Amisk Lake*. [Amisk Lake | Amisk Lake | World Lake Database - ILEC](#) [Hämtad 2023-02-01]
- Wilander och Sonesten (2006). *Förslag till bedömningsgrunder för syrgaskoncentration i sjöar*. VISS, Länsstyrelsen.



## Bilaga A

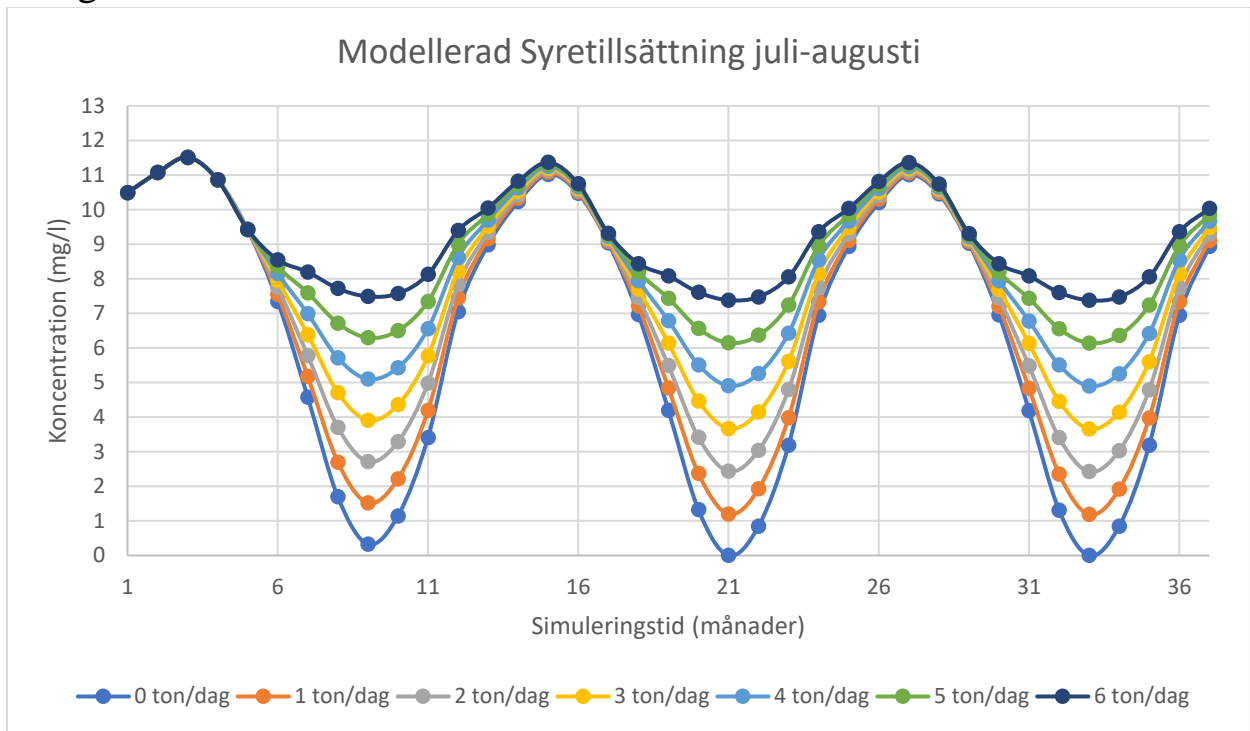
Tabell 6. Salinitethalterna som användes för ytvattnet (Sal\_YV) och bottenvattnet (Sal\_BV) som input i modellens omblandningsekvation. Värden hämtade från SMHI SHARKweb.

Sal_YV	psu	Sal_BV	psu
jan	4,37	jan	5,30
feb	3,63	feb	5,15
mar	3,63	mar	5,15
april	3,91	april	5,07
maj	4,04	maj	5,03
jun	4,19	jun	4,99
jul	4,48	jul	5,06
aug	4,74	aug	5,17
sep	4,85	sep	5,16
okt	4,96	okt	5,14
nov	5,04	nov	5,29
dec	5,11	dec	5,44

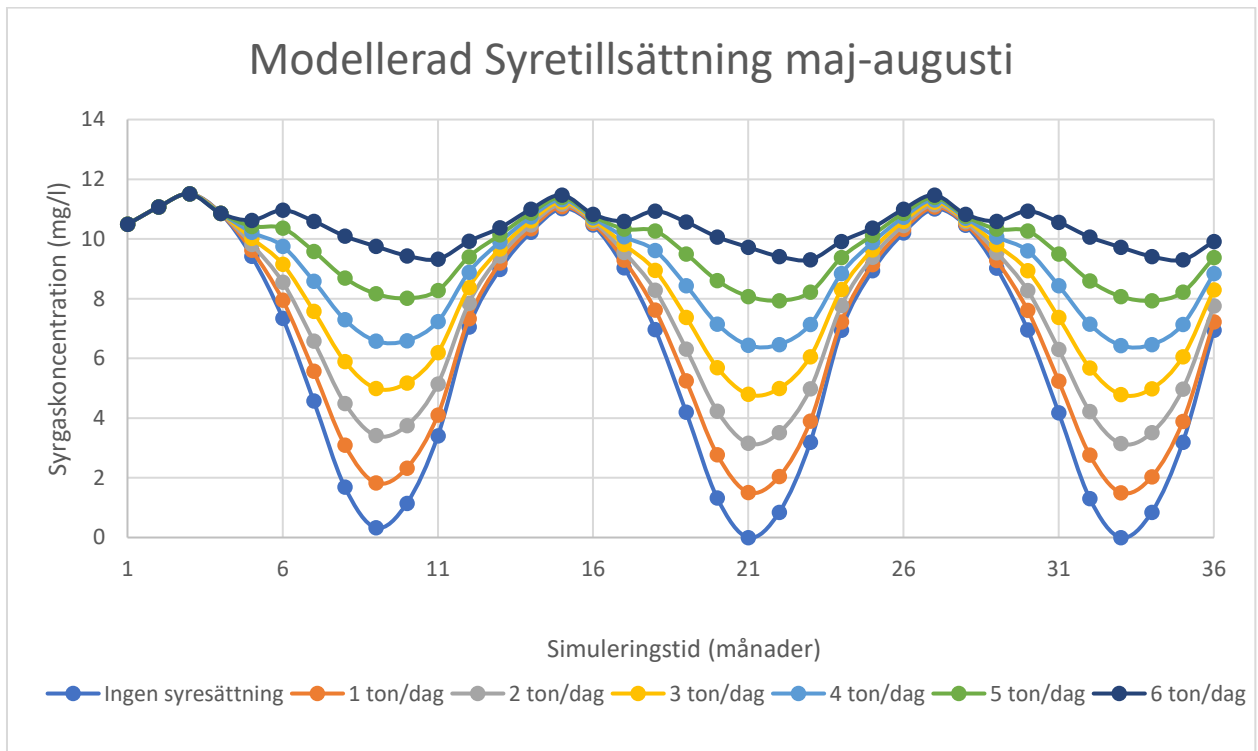
Tabell 7. Temperatur som användes för ytvattnet (YVT) och bottenvattnet (BVT) som input i modellens omblandningsekvation. Värden hämtade från SMHI SHARKweb.

YVT	°C	BVT	°C
jan	2,97	jan	3,13
feb	1,53	feb	1,58
mar	1,53	mar	1,58
april	8,85	april	6,86
maj	12,5	maj	9,60
jun	16,8	jun	12,1
jul	18,9	jul	14,6
aug	19,8	aug	16,2
sep	16,0	sep	14,2
okt	12,3	okt	12,9
nov	8,33	nov	8,43
dec	4,4	dec	4,68

## Bilaga B



Figur 19. Modellerad syresättning juli- augusti i Slätbaken med olika flöden.



Figur 20. Modellerad syresättning maj- augusti i Slätbaken med olika flöden.

## Bilaga C

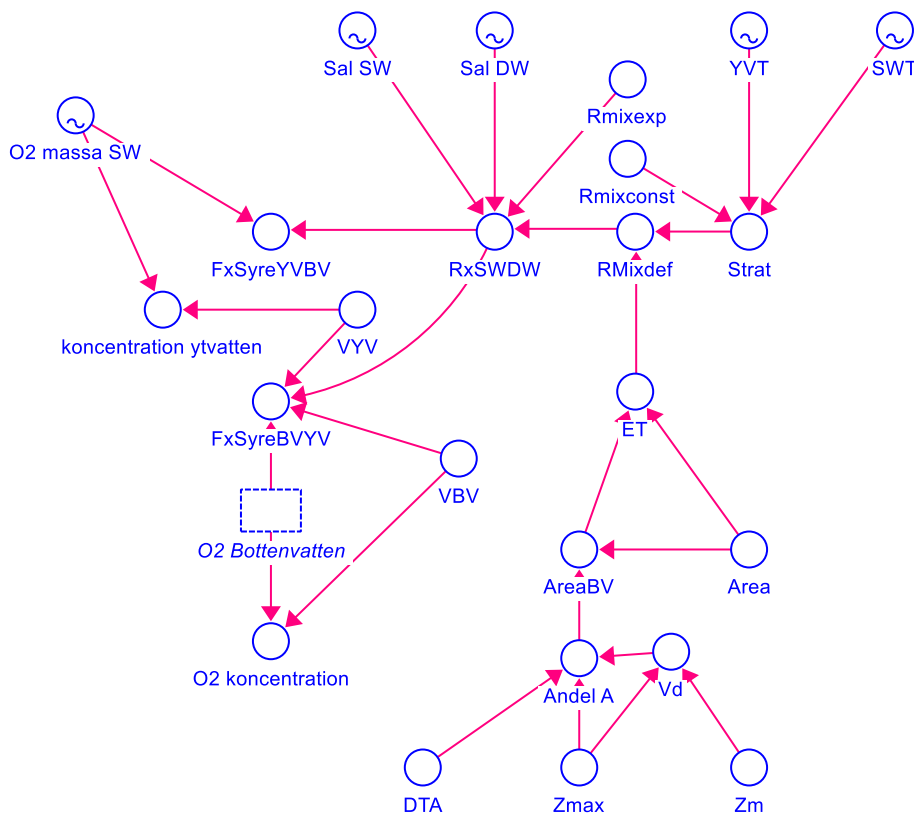
Tabell 8. Tabell över empiriska mätvärden från Slätbakens ytvatten och bottenvatten i olika enheter.

Ytvatten	februari/mars	juni	juli	augusti	oktober	december
O2 konc. [ml/l]	9,30	7,44	6,44	6,34	6,61	7,92
O2 konc. [mg/l]	13,2	10,6	9,20	9,06	9,45	11,3
O2 konc. [g/m3]	13,2	10,6	9,20	9,06	9,45	11,3
O2 konc. [ton/m3]	1.32E-05	1.07E-05	9.2E-06	9.06E-06	9.45E-06	1.14E-05
Ton O2	2525	2027	1753	1727	1801	2157

Bottenvatten	februari/mars	juni	juli	augusti	oktober	december
O2 konc. [ml/l]	7,78	4,28625	2,08	0,572	1,04	6,91
O2 konc. [mg/l]	11,1	6,13	2,972424	0,81	1,48	9,87
O2 konc. [g/m3]	11,1	6,13	2,972424	0,81	1,48	9,87
O2 konc. [ton/m3]	1,1E-05	6,13E-06	2,97E-06	8,18E-07	1.48E-06	9.87E-06
Ton O2	834	459	223	61	111	741

## Bilaga D

Ombländningsekvationen som den såg ut i Stella Professional där först bottenarean beräknas och sedan FxSyreYVBV och FxSyreBVYV som beskriver syreombländningen upp och ned i mellan yt- och bottenvatten.



Figur 21. Fullständig illustration av ombländningsekvationen i programmet Stella Professional.

## Bilaga E

Standardavvikelse beräknades från de mätpunkter som använts mellan år 2014–2021. I salinitetsberäkningarna var standardavvikelsen stor nog att utgöra en stor osäkerhet för resultatet att en haloklin finns i Slätbaken (Tabell 9).

Tabell 9. Beräknad standardavvikelse för de olika djup- och månaderna för syrgashalt, salinitet, temperatur och totalfosfor.

### *Syrgashalt standardavvikelse*

<i>djup (m)</i>	<i>februari/mars</i>	<i>juni</i>	<i>juli</i>	<i>augusti</i>	<i>oktober</i>	<i>december</i>
0,5	0,81	1,06	0,31	0,47	0,52	0,43
5	0,41	0,63	0,54	0,11	0,51	0,40
10	0,46	1,20	1,30	1,27	0,66	0,58
40	1,21	0,79	0,16	0,37	1,77	1,34

### *Salinitet standardavvikelse*

<i>djup (m)</i>	<i>februari/mars</i>	<i>juni</i>	<i>juli</i>	<i>augusti</i>	<i>oktober</i>	<i>december</i>
0,5	0,96	0,81	0,69	0,61	0,49	0,71
5	0,53	0,70	0,56	0,49	0,31	0,46
10	0,32	0,28	0,31	0,31	0,32	0,46
40	0,44	0,58	0,35	0,32	0,61	0,39

### *Temperatur standardavvikelse*

<i>djup (m)</i>	<i>februari/mars</i>	<i>juni</i>	<i>juli</i>	<i>augusti</i>	<i>oktober</i>	<i>december</i>
0,5	1,08	2,34	1,84	1,23	0,93	1,25
5	0,92	2,07	1,75	1,04	0,94	1,17
10	0,89	1,62	2,14	0,79	0,95	1,17
40	0,89	1,89	1,95	2,02	2,17	1,35

### *Tot-P standardavvikelse*

<i>djup (m)</i>	<i>februari/mars</i>	<i>juni</i>	<i>juli</i>	<i>augusti</i>	<i>oktober</i>	<i>december</i>
0,5	0,98	0,16	0,20	0,13	0,31	0,32
5	0,41	0,29	0,14	0,19	0,30	0,38
10	0,39	0,34	0,29	0,13	0,31	0,33
40	0,79	1,04	0,81	2,19	3,89	0,75