

Rapport

De hydrografiske forhold i Aabenraa Fjord

Dato: 17. februar 2022
Forfatter(e): Morten Holtegaard Nielsen
Rekvirent: LandboSyd, Aabenraa Kommune og Arwos via SEGES Innovation P/S
Udarbejdet for: (Underleverandør til) SEGES Innovation P/S
Klientens rep.: Flemming Gertz
Klientens projekt-nr.: 4325
Klientens projekt: Aabenraa Fjord- og oplandsanalyse
Version: Endelig
Status: Rekvirentens ejendom

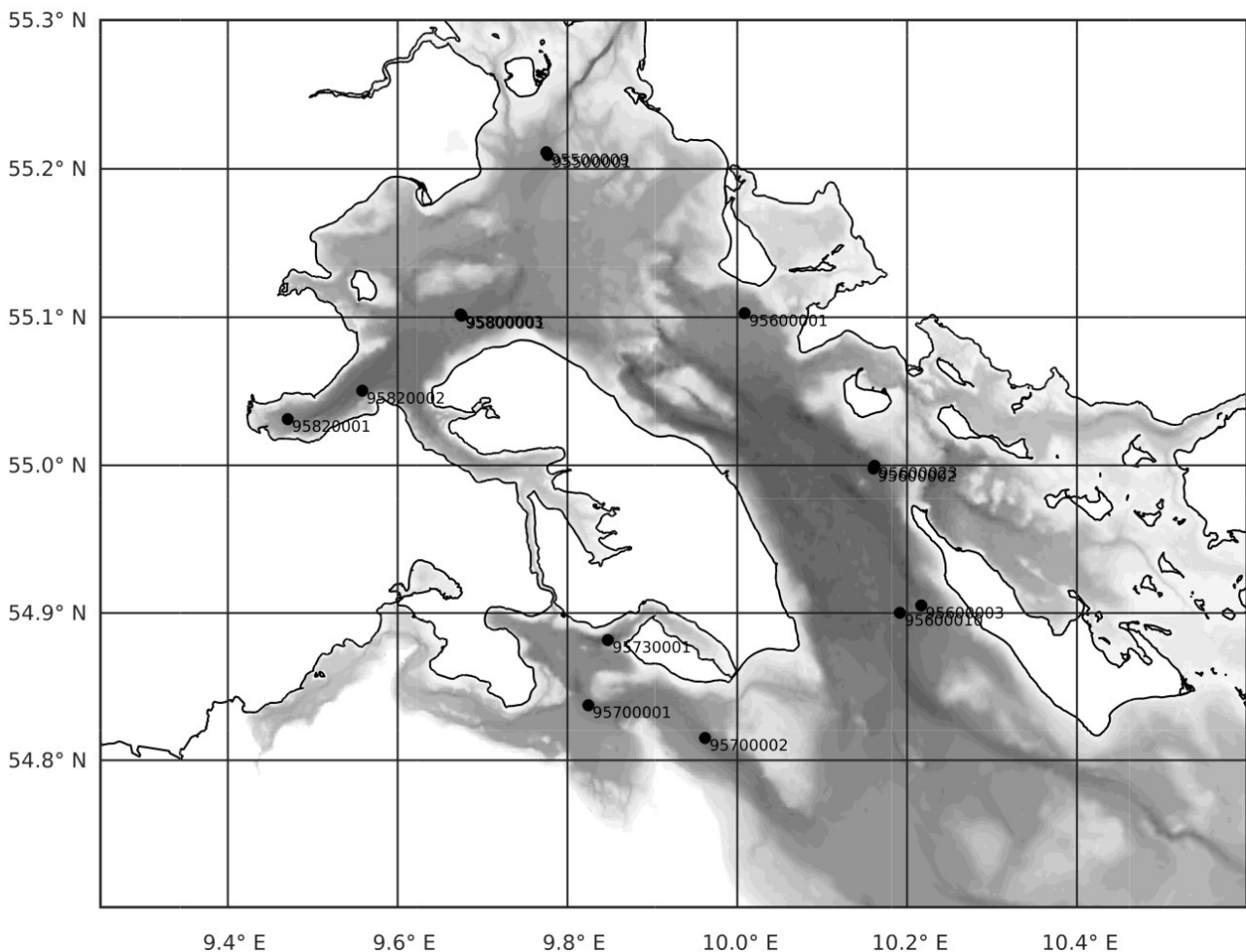
Marine Science & Consulting ApS
Peder Lykkes Vej 8, 4. th.
2300 København S

P: +45 5369 0888
E: info@msandc.dk
W: <http://www.msandc.dk>
CVR-nr: 39987082

1. Indledning

Denne rapport beskriver arbejdet med undersøgelse af de hydrografiske forhold i Aabenraa Fjord ifølge underleverandøraftale mellem SEGES og Marine Science & Consulting ApS i forbindelse med aftale, som SEGES har indgået med LandboSyd, Aabenraa Kommune og Arwos. Arbejdet er foretaget udelukkende med udgangspunkt i eksisterende observationer og eksisterende viden, som er tilgængelig i den videnskabelige litteratur. Det nærværende arbejde er udført samtidigt med et lignende arbejde vedrørende Als Fjord og Augustenborg Fjord. De pågældende problemstillinger er meget lig hinanden, og derfor er synergien udnyttet til at gøre en ekstra indsats for at forstå de hydrografiske forhold i det sydlige Lillebælt og den vestligste del af Østersøen. Disse spiller en meget vigtig rolle for udskiftningen af vandmasser og dynamikken i såvel Aabenraa Fjord som Als Fjord og Augustenborg Fjord.

De hydrografiske forhold i et givent havområde, herunder også mere eller mindre velafgrænsede områder som de danske fjordsystemer, er styret af områdets dybdeforhold, dets forbindelse til det tilstødende havområde, tilførslen af ferskvand fra land samt blandingen i området, som igen er betinget af vinden og tidevandet. Derfor vil man ofte se meget store variationer mellem forskellige fjorde. I mange tilfælde vil man også se meget store variationer i en given fjord hvis man betragter forholdene til forskellige tidspunkter og under forskellige omstændigheder.



Figur 1: Kort over det sydlige Lillebælt og den vestligste del af Østersø, herunder Aabenraa Fjord, med angivelse af dybder og stationer hvor CTD-profiler er målt.

Aabenraa Fjord med tilstødende havområder er vist i Figur 1. Aabenraa Fjord udgør den inderste halvdel af et langstrakt, relativt dybt bassin, som strækker sig et stykke ud i den nordlige del af det sydlige Lillebælt. I Aabenraa Fjord optræder der dybder indtil ca. 35 m, hvorimod bassinets ydre del

er ujævnt med dybder mellem knap 10 og godt 25 m. Man kan derfor forvente at Aabenraa Fjord i nogen grad opfører sig som en tærskelfjord. Til gengæld udgør bassinets ydre del en bred åbning ud mod det sydlige Lillebælt. Dermed kan udvekslingen af vandmasser forventes i nogen grad at foregå uhindret, drevet af dels vinden, dels densitetsforskellene mellem vandmasserne i den nordlige del af det sydlige Lillebælt og Aabenraa Fjord. Tidevand findes ikke i den vestlige del af Østersøen, men pga. vinden forekommer der variationer i vandstanden, som bidrager til udvekslingen af vandmasserne. Syd for Aabenraa Fjord mellem Jylland og Als optræder dels Als Fjord, dels det smalle, lange og relativt lavvandede Alssund med forbindelse til Sønderborg Bugt i syd. På trods af at strømningshastigheden i Alssund, ifølge den Danske Havnelods, til tider kan nå ca. 3 knob (ca. 1.5 m s^{-1}), er udvekslingen gennem Alssund af meget lille betydning for de hydrografiske forhold i Aabenraa Fjord.

Oplandet til Aabenraa Fjord er relativt lille, og det samme gælder afstrømningen af ferskvand fra land. I månedsmiddel er ferskvandsafstrømningen typisk mindre end $2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, men i nedbørsrige perioder kan den stige til knap $5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (data er leveret af Aarhus Universitet, jævnfør nedenstående). Endvidere kan der i nogen grad ske tilstrømning af ferskvand til Aabenraa Fjord fra oplandene til Als Fjord, Alssund og Augustenborg Fjord. I månedsmiddel er ferskvandsafstrømningen til disse områder omkring $2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, men i nedbørsrige perioder kan den stige til ca. $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

I den sydlige del af Lillebælt er forholdene præget af dels den åbne forbindelse til Østersøen med en stabil saltholdighed på omkring 10 promille, dels forbindelsen til Kattegat via den snævre del af Lillebælt mod nord, hvor indstrømning til Østersøen kan føre vandmasser med relativt høje saliniteter med sig (Nielsen et al., 2017). Det sydlige Lillebælt og den vestligste del af Østersøen er karakteriseret ved en række større eller mindre bassiner af forskellig dybde, som er forbundet via tærskler og smalle render. Disse forhold har stor indflydelse på hvordan de lavsaline vandmasser fra Østersø og de højsaline vandmasser fra Kattegat kan bevæge sig ind i og gennem det sydlige Lillebælt og den vestligste del af Østersøen. I perioder af forskellig varighed kan der være enten udstrømning af vand fra Østersøen eller indstrømning af vand fra Kattegat gennem de indre danske farvande. Disse forhold har også stor betydning for dannelsen og udviklingen af iltsvind i de dybe bassiner, som igen kan påvirke Aabenraa Fjord (Nielsen og Hansen, 2020; Hansen et al., 2021). Pga. den brede åbning til det sydlige Lillebælt må man på forhånd forvente at vandmasserne i Aabenraa Fjord og udskiftningen af disse i meget høj grad er præget af vandmasserne i det sydlige Lillebælt. Til gengæld må man forvente at de relativt små dybder langs den ydre del af det dybe bassin vil fungere som en tærskel, som kan reducere både indstrømning til og udskiftning af vandmasserne i den dybe del af Aabenraa Fjord. Man må forvente at strømninger drevet af forskelle i densitet spiller den primære rolle overalt, dvs. at relativt lette vandmasser strømmer i den ene retning i øvre del af vandsøjlen, mens relativt tunge vandmasser samtidigt strømmer i den anden retning i den nedre del af vandsøjlen. Det betyder også at strømninger drevet af forskelle i vandstand nok er relativt små. Endvidere må man på forhånd formode at vinden kan bidrage betragteligt til blanding af vandmasserne.

2. Data

Undersøgelserne af de hydrografiske forhold i Aabenraa Fjord er baseret på eksisterende CTD-data som er tilgængelige via Overfladevandsdatabasen (ODA), som er Miljøministeriets og Aarhus Universitets (DCE) fælles database.

Der er hentet data for perioden mellem 1990 og 2020, begge år inklusive, hvor datadækningen generelt har været god i både tid og sted. Dog er der siden 2007 sket et betydeligt fald i antallet af både målestationer og gange pr. år hvor observationer er blevet foretaget. Dengang blev amterne nedlagt, og den marine overvågning overgik til Miljøstyrelsen/Naturstyrelsen. I perioden 1990-2020 blev der foretaget CTD-profiler på i alt ca. 42 stationer i en stor del af det sydlige Lillebælt,

herunder Aabenraa Fjord, og den vestligste del af Østersøen. En stor del af disse stationer er besøgt ganske få gange, og en række af stationerne er i perioder kun besøgt i iltsvindssæsonen, dvs. omtrent juli-november. Her fokuseres der på stationer som dels dækker mest muligt af undersøgelsesområdet, dog især Aabenraa Fjord, dels er besøgt ofte. Dette reducerer antallet af stationer til 14, jævnfør Bilag 1 og Figur 1. De angivne stationsnumre svarer til oplysningerne i ODA.

Generelt er der i perioden mellem 1999 og 2003 den bedste datadækning i både tid og sted, med et CTD-profil om ugen eller hver anden uge på en stor del af stationerne. Dette giver god mulighed for at observere ændringer i både tid og sted, herunder strømninger og dynamik, udveksling af vandmasser mellem de forskellige områder og bassiner og ændringer i vandmassernes karakteristika. I nærværende rapport har vi undersøgt ændringer i primært saltholdighed og temperatur, for disse karakteristika kan afsløre meget om udveksling og udskiftning af vandmasserne. Endvidere har vi i et begrænset omfang undersøgt ændringer i iltkoncentration og klorofyl-fluorescens, som er et mål for mængden af fytoplankton. For at undersøge variationer i tid og sted bedst muligt over hele området bestående af det sydlige Lillebælt, herunder Aabenraa Fjord, og den vestlige Østersø er der benyttet data for 2000, hvor syv stationer er blevet besøgt med 1-2 ugers mellemrum gennem næsten hele året (heriblandt de tre stationer i Aabenraa Fjord og området lige nord for Als), fire stationer er blevet besøgt med 2-4 ugers mellemrum hele året, og de resterende tre stationer er kun blevet besøgt få gange. Observationer som er foretaget næsten samtidigt, dvs. indenfor for 2-4 dage og i enkelte tilfælde syv dage, er plottet på samme side, men i forskellige plots, så forholdene på alle stationer til næsten samme tid kan ses på engang. Disse plots fremgår af Bilag 2. Dermed kan udviklingen i forholdene som funktion af både tid og sted ses i højst mulig detaljeringsgrad. Ved at betragte observationer fra alle de pågældende stationer kan man få indsigt i de hydrografiske forhold i dels Aabenraa Fjord, dels det sydlige Lillebælt og den vestligste Østersø. Da de hydrografiske forhold i det sydlige Lillebælt spiller en vigtig rolle for Aabenraa Fjord, er dette helhedsindtryk meget væsentligt for forståelsen af de dynamiske forhold og udskiftningen af vandmasserne i Aabenraa Fjord.

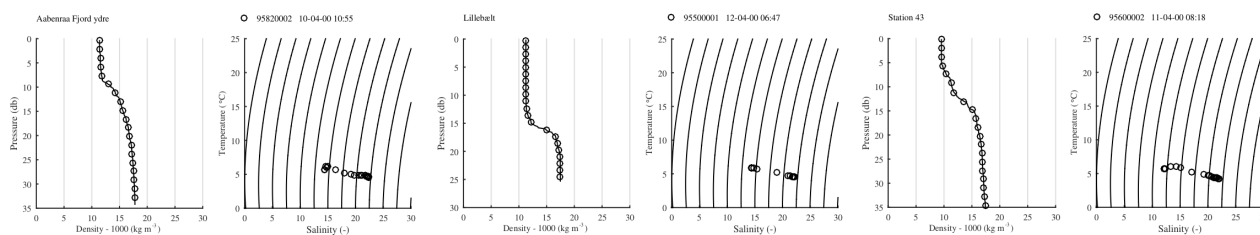
For at undersøge hvordan både ilt og fytoplankton opfører sig i Aabenraa Fjord, er observationer for 1999 også analyseret. Denne analyse er dog udelukkende foretaget på fire stationer, hvoraf tre udgør et transekt fra den indre del af Aabenraa Fjord til området nord for Als, og hvor den fjerde befinder sig i den centrale del af det sydlige Lillebælt, jævnfør Figur 1. Tidsmæssigt sammenhørende CTD-profiler er plottet på samme side, jævnfør beskrivelsen ovenfor samt de viste plots i Bilag 4.

Dybde data for hele det nævnte område, som er vist i Figur 1, er leveret af DCE. Data for afstrømningen, i form af månedsmiddelværdier, af ferskvand til Aabenraa Fjord er ligeledes leveret af DCE.

3. Analyse

Når vandmassers oprindelse, transport og blanding skal undersøges, kan man i mange tilfælde lære meget af at se nøje på vandmassernes salinitet og temperatur. For en given vandmasse vil det være sådan at mængden af salt ikke ændrer sig. Det skyldes at salt er et konservativt stof, som under normale omstændigheder i naturen hverken forsvinder eller bliver tilført. Derimod kan temperaturen af en given vandmasse ændres pga. udveksling af varme med atmosfæren. Men over et relativt kort tidsrum, som afhænger af volumenet og dybden af det pågældende havområde, kan man ofte godt antage at temperaturen ikke ændrer sig væsentligt.

Tilstedeværelsen af ilt og fytoplankton er meget variabel, for disse kan både produceres og forbruges af processer i vandsøjlen og, for ilts vedkommende, også ved havoverfladen og i havbunden. Ilt og fytoplankton udgør til gengæld vigtige variable, som kan fortælle meget om eutrofieringen i et givent havområde.

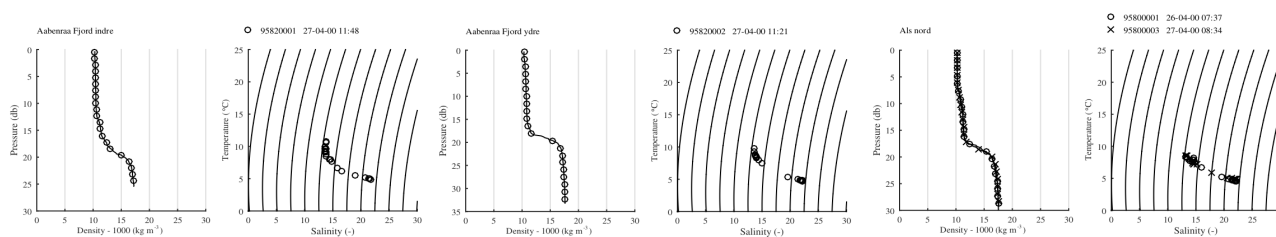


Figur 2: CTD-profiler målt i den ydre del af Aabenraa Fjord, i den nordlige del af det sydlige Lillebælt og på Station 43 d. 10 – 12. april 2000.

Figur 2 viser tre eksempler på CTD-profiler målt i den ydre del af Aabenraa Fjord (station 95820002, til venstre), i den nordlige del af det sydlige Lillebælt, syd for Årø (95500001, i midten) og på Station 43, nordvest for Ærø (95600002, til højre) d. 10 – 12. april 2000. Disse data fremgår også af Bilag 2. For hvert af profilerne er i diagrammet til venstre vist densiteten (beregnet ifølge UNESCO, 1981) som funktion af dybden, og til højre er alle data indtegnet i et saltholdighed-temperatur-diagram. Konturlinjer for densiteten, dvs. hvor densiteten er konstant, er vist med krumme linjer i ST-diagrammerne.

Hvis man først sammenligner densiteten for de tre CTD-profiler, er det tydeligt at der er væsentlige forskelle, men også væsentlige ligheder. (Bemærk at der er forskel på dybderne på de tre stationer.) Overalt er vandsøjlen kraftigt lagdelt. På stationen i den ydre del af Aabenraa Fjord optræder der et øvre, homogent lag med en tykkelse på knap 10 m. Derunder stiger densiteten jævnt nedefter. På stationen i den nordlige del af det sydlige Lillebælt består vandsøjlen af to næsten fuldstændigt homogene lag med en skilleflade mellem de to lag i en dybde på godt 15 m. På Station 43 ses en skilleflade i en dybde på knap 15 m, og både derover og derunder sker der en mere eller mindre jævn stigning i densiteten.

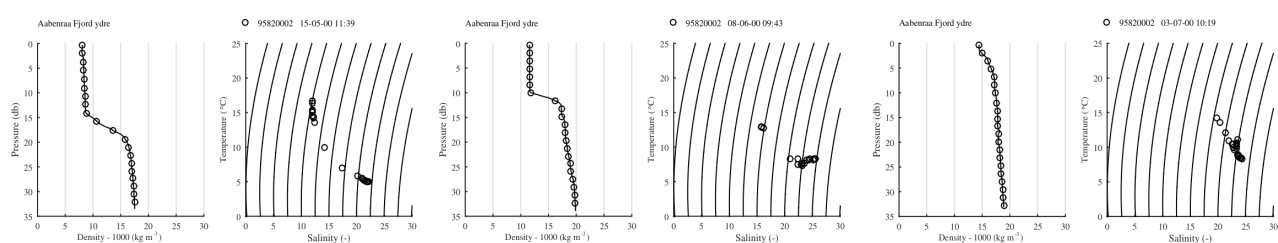
Hvis man derefter kigger på, hvordan data fra de tre CTD-profiler fordeler sig i ST-diagrammerne, er følgende tydeligt. Det øvre lag i den ydre del af Aabenraa Fjord har en saltholdighed på ca. 14 promille og en temperatur på ca. 6 °C, mens den nedre del af vandsøjlen har saltholdigheder og temperaturer som ændrer sig lineært til ca. 22 promille og ca. 4 °C. Det lineære forløb viser at hele vandsøjlen mellem de to yderpunkter er en blanding mellem de to vandmasser med de pågældende karakteristika. De to yderpunkter genfinder man tydeligt på stationen i den nordlige del af det sydlige Lillebælt, hvor de to vandmasser optræder næsten uden blanding. På Station 43 genfinder man karakteristika for den dybtliggende vandmasse, dvs. ca. 22 promille og ca. 4 °C, mens man i den øvre del af vandsøjlen ser et ikke-lineært forløb. Man ser ganske vist stadig en del af vandsøjlen som har en saltholdighed ca. 14 promille og en temperatur på ca. 6 °C, svarende til vandmasserne øverst i vandsøjlen på de to andre stationer. Men på Station 43 optræder øverst i vandsøjlen en ny vandmasse med en saltholdighed ca. 12 promille og en temperatur på godt 5 °C. Denne lavsaline, tredje vandmasse er en indstrømning af vand fra Østersøen, som foreløbigt kun har nået den centrale del af det sydlige Lillebælt, men ikke den nordlige og den vestlige del.



Figur 3: Transekt bestående af de to stationer i Aabenraa Fjord og stationen i området nord for Als, jævnfør Figur 1, observeret d. 26 – 27. april 2000.

I Figur 3 betragter vi et transekt, dvs. en række CTD-profiler som er målt nogenlunde samtidigt på stationer beliggende langs en linje. Transektet omfatter de to stationer i Aabenraa Fjord og stationen

i området nord for Als, jævnfør Figur 1. Transektet er observeret d. 26 – 27. april 2000, dvs. ca. to uger efter de tre profiler vist i Figur 2. På de tre stationer finder man nogenlunde de samme vandmasser, dvs. dels en højsalin vandmasse i den nedre del af vandsøjlen med en saltholdighed på ca. 22 promille og en temperatur på ca. 4 °C, dels en lavsalin vandmasse i den øvre del af vandsøjlen med en saltholdighed på ca. 13 promille og en temperatur på omkring 10 °C. Den højsaline vandmasse i den nedre del af vandsøjlen genkender man tydeligt fra alle tre CTD-profiler observeret ca. to uger tidligere, vist i Figur 2. Den lavsaline vandmasse i den øvre del af vandsøjlen er en del af den indstrømning af vand fra Østersøen som blev identificeret i den centrale del af det sydlige Lillebælt ca. to uger tidligere, jævnfør CTD-profilet til højre i Figur 2. I mellemtiden er denne lavsaline vandmasse nået frem til Aabenraa Fjord og har udfyldt den øvre del af vandsøjlen næsten fuldstændigt og har kun efterladt et svagt spor efter den tidligere lavsaline vandmasse. Endvidere er der tydelige tegn på at der i den mellemliggende periode er foregået både en blanding og en opvarmning. Dette ses af dels den lidt højere saltholdighed, dels den noget højere temperatur på de to stationer i Aabenraa Fjord d. 26 – 27. april sammenlignet med Station 43 d. 11. april. Især opvarmningen kan meget vel være foregået i den relativt lavvandede, nordlige del af det sydlige Lillebælt, som det indstrømmende vand fra Østersøen skal passere på sin vej til Aabenraa Fjord, jævnfør nedenstående.



Figur 4: CTD-profiler målt d. 15. maj, d. 8. juni og d. 3. juli 2000 på stationen i den ydre del af Aabenraa Fjord.

I Figur 4 har vi sammenlignet tre CTD-profiler observeret med en periode på godt 3 uger på samme station i den ydre del af Aabenraa Fjord. De tre CTD-profiler kan sammenholdes med dels profilet til venstre i Figur 2, dels profilet i midten i Figur 3, som tilsammen giver et forløb på knap 3 måneder. I løbet af den samlede periode ses flere meget karakteristiske forhold. D. 15. maj observeres i den nedre del af vandsøjlen den samme højsaline vandmasse som også var til stede både d. 10. og d. 27. april. Denne vandmasse optræder i en lang periode i stort set uændret form i hele det sydlige Lillebælt og den vestligste del af Østersøen, jævnfør Bilag 2 og 3. Indstrømningen af lavsalignt vand fra Østersøen som blev observeret først d. 11. og derefter d. 26 – 27. april (se Figur 2 og 3) er fortsat og observeres d. 15. maj tydeligt i den øvre del af vandsøjlen i Aabenraa Fjord. D. 8. juni dukker en ny indstrømning af højsalignt vand op i den nedre del af vandsøjlen, med en lidt højere saltholdighed og en lidt højere temperatur, og fortrænger den eksisterende, højsaline vandmasse. Denne nye vandmasse observeres også meget tydeligt d. 3. juli, og som vist i Bilag 2 og 3 varer denne vandmasse ved i den nedre del af vandsøjlen i det sydlige Lillebælt og den vestligste del af Østersøen med næsten uændrede karakteristika indtil slutningen af oktober. D. 3. juli er der endda svage tegn på endnu en ny, men mindre indstrømning, som har en lidt lavere saltholdighed og en lidt højere temperatur. I den øvre del af vandsøjlen ses d. 8. juni og d. 3. juli den tidligere indstrømmede vandmasse fra Østersøen. I løbet af perioden er der dog sket en gradvis stigning af både saltholdigheden og temperaturen, hvilket skyldes vind-genereret blanding.

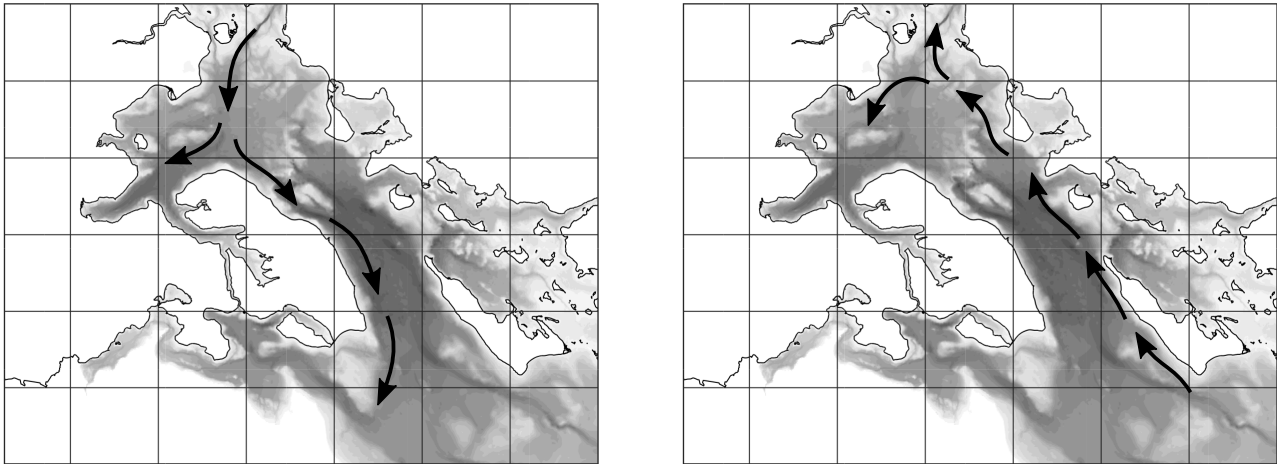
Bemærk at observationerne i den ydre del af Aabenraa Fjord også giver et fint billede af forholdene i den indre del af Aabenraa Fjord, jævnfør Figur 3. Men pga. den lidt mindre dybde i den ydre del optræder her af og til en dybtliggende vandmasse som ikke trænger ind i den indre del af fjorden, jævnfør Bilag 2 og 3.

4. Eksisterende viden og resultater

Pga. den brede, ydre del af Aabenraa Fjord må man forvente en tæt forbindelse mellem dynamikken og vandudskiftningen i Aabenraa Fjord og de hydrografiske forhold i det sydlige Lillebælt og den vestligste del af Østersøen. Derfor gives først en beskrivelse af disse hydrografiske forhold med udgangspunkt i dels teoretisk og eksisterende viden, dels den viden som kan udtrages af de analyserede data.

Kendetegnende for de hydrografiske forhold i hele det sydlige Lillebælt og den vestligste del af Østersøen er dels indstrømninger af relativt højsaline vandmasser fra Kattegat mod nord eller relativt lavsaline vandmasser fra Østersøen mod øst, dels de processer som foregår lokalt i området. Indstrømningerne er primært styret af vejrforholdene, idet længerevarende perioder med vestenvind eller østenvind giver anledning til indstrømning fra hhv. Kattegat eller Østersøen. Vinde fra vestlige retninger medfører opstuvning af vandstanden i Kattegat og sænkning af vandstanden i den vestlige Østersø, hvilket igen medfører indadgående strømninger gennem de danske farvande drevet af forskellen i vandstand. Sådanne strømninger betegnes barotrope. Disse strømninger er dominerende i de snævre dele af de danske farvande, dvs. Lillebælt, Storebælt, Øresund mv., hvor de ofte kan give anledning til strømningshastigheder på $1 - 2 \text{ m s}^{-1}$. Omvendt medfører vinde fra østlige retninger opstuvning af vandstanden i den vestlige del af Østersøen og sænkning af vandstanden i Kattegat, som igen medfører udadgående, barotrope strømninger i de snævre dele af de danske farvande. Korterevarende vindhændelser giver også anledning til barotrope strømninger ind eller ud af de danske farvande. Men da det tager tid for vandmasserne i enten Kattegat eller Østersøen at nå frem til det sydlige Lillebælt og den vestligste del af Østersøen, giver vindhændelser af kort varighed ikke anledning til indstrømninger af en størrelse som kan observeres.

Processer som foregår lokalt i det sydlige Lillebælt og den vestlige del af Østersøen, er præget af at området er stort og relativt dybt. Her spiller barotrope strømninger en lille rolle. En udskiftning af vandmasserne i området vil derfor i høj grad være drevet af en forskel i densitet, som afgøres primært af saltholdigheden, hvilket giver anledning til såkaldte barokline strømninger. Typiske barokline strømningshastigheder er mindre end 0.5 m s^{-1} , afhængigt af bl.a. forskellen i densitet. Forskellen i densitet betyder endvidere at indstrømmende vand fra Kattegat normalt vil indfinde sig i den nedre del af vandsøjlen, mens indstrømmende vand fra Østersøen normalt vil indfinde sig i den øvre del af vandsøjlen. Pga. områdets størrelse spiller Jordens rotation endvidere en vigtig rolle. Jordens rotation medfører at strømningerne afbøjes mod højre og forløber langs en kyst eller en stejl bathymetri i form af en Kelvin-bølge i en bredde svarende til en såkaldt Rossby-radius (Gill, 1982). For de densitetsforskelle som optræder i det sydlige Lillebælt og den vestligste del af Østersøen, er Rossby-radius typisk omkring 5 km. En indstrømning af højsalint, relativt tungt vand fra Kattegat vil derfor foregå i den nedre del af vandsøjlen og dels bevæge sig i dybe og snævre render som i den nordlige del af det sydlige Lillebælt, dels følge de stejle sider rundt i de dybe bassiner, jævnfør Figur 1. Indstrømmende vand fra Kattegat vil derfor relativt hurtigt kunne nå frem til den dybe del af Aabenraa Fjord. En indstrømning af lavsalint, relativt let vand fra Østersøen vil tilsvarende foregå i den øvre del af vandsøjlen langs kysterne rundt i bassinerne og i lille grad være påvirket af den komplicerede bathymetri. Til gengæld vil en indstrømning af vand fra Østersøen skulle bevæge sig en relativ lang distance inden den når frem til den øvre del af vandsøjlen i Aabenraa Fjord. Disse strømningsmønstre er skitseret i Figur 5.



Figur 5: Skitsering af indstrømning af vandmasser til den sydlige del af Lillebælt og den vestligste del af Østersøen. Indstrømning af højsaline vandmasser fra Kattegat (til venstre) sker i den nedre del af vandsøjlen og følger de dybe render og de dybe bassiner. Indstrømning af lavsaline vandmasser fra Østersøen (til højre) sker i den øvre del af vandsøjlen og foregår langs kyster og lavvandede områder. Pga. Jordens rotation sker strømningerne i begge tilfælde med den stejle bathymetri eller kysten på højre side.

Områdets størrelse betyder endvidere at blanding pga. vinden vil kunne spille en betydelig rolle. Vind-genereret blanding medfører at den øvre del vandsøjlen gøres homogen, og at der gradvis medrives vand fra den underliggende del af vandsøjlen, som har en højere densitet pga. en højere saltholdighed og/eller en lavere temperatur. Derfor medfører vind-genereret blanding generelt en stigning af saltholdigheden i den øvre del af vandsøjlen. Samtidigt vil der ske en opadgående transport af næringsalte fra den nedre del af vandsøjlen til den øvre del, hvor næringsaltene kan give anledning til opblomstring af fytoplankton. Til gengæld er det svært at sige på forhånd hvordan vind-genereret blanding vil påvirke temperaturen i den øvre del af vandsøjlen, for denne er endvidere kraftigt påvirket af udvekslingen af varme med atmosfæren. Omvendt betyder dette at dybtliggende vandmasser, som ikke er i kontakt med atmosfæren, kan beholde deres karakteristika ganske længe.

Endeligt er det lagdelte system, som ofte optræder i området, præget af den samme dynamik som er beskrevet ovenfor i forbindelse med indstrømninger af vandmasser fra Kattegat eller Østersøen, jævnfør Figur 5. Det betyder at når der sker påvirkninger af systemet udefra, primært i form af vindens påvirkning af overfladen, kan der i de forskellige dele af vandsøjlen opstå strømninger i forskellige retninger, som endvidere påvirkes af Jordens rotation. Dette kan flytte rundt på vandmasserne, så der opstår forskelle på tværs af området. I Aabenraa Fjord kan dette f.eks. føre til at dybtliggende vandmasser lokalt kan løftes op i vandsøjlen. Er de dybtliggende vandmasser i forvejen ramt af iltsvind, hvilket man ofte kan opleve i løbet af sommeren eller efteråret, vil det betyde at store dele af havbunden rammes kortvarigt af iltsvind.

I det følgende tages der udgangspunkt i observationer foretaget i 2000, som er vist dels i uddrag i Figur 2 – 4, dels i deres fulde omgang i Bilag 2. Der henvises til den detaljerede, kvalitative gennemgang af observationerne foretaget i Bilag 3.

Analysen af observationerne viser at indstrømningerne fra Kattegat eller Østersøen kan ske i større eller mindre omfang, og at disse indstrømninger er karakteriseret ved hhv. høje eller lave saltholdigheder. Pga. deres hhv. relativt høje eller relativt lave densiteter strømmer de ind i området i hhv. den nedre del eller den øvre del af vandsøjlen. Indstrømningerne har et omfang, så de er i stand til fylde hele området op i større eller mindre grad. Gennemgangen af observationerne, som er foretaget i Bilag 3, viser at der i 2000 er foregået fem indstrømninger fra Kattegat, og at der ligeledes er foregået fem indstrømninger fra Østersøen.

To bemærkelsesværdige, men typiske eksempler på indstrømninger i observationerne er følgende. Dels sker der en stor indstrømning af vand fra Kattegat i perioden mellem slutningen af maj og midten af juni. Denne vandmasse, med en saltholdighed på ca. 25 promille og en temperatur på ca. 8 °C, optræder i de dybe bassiner indtil slutningen af oktober, hvor den bliver fortrængt af og blandet med en ny indstrømning af vand fra Kattegat. Dels sker der en stor indstrømning fra Østersøen fra slutningen af marts til midten af maj. Denne indstrømning, som fylder den øvre del af vandsøjlen op i alle områder, ender med en saltholdighed på ca. 10 promille. Da denne vandmasse befinder sig øverst i vandsøjlen, sker der efterfølgende en ændring i temperaturen pga. udvekslingen af varme med atmosfæren. Samtidigt foregår der en vind-genereret blanding, som medfører en gradvist stigende saltholdighed. Denne vandmasse kan identificeres indtil midten af august, hvor den har nået en saltholdighed på 17 – 19 promille, og hvor den bliver fortrængt af en ny indstrømning fra Østersøen.

Analysen viser at i området som helhed kan vandmasserne have en opholdstid på flere måneder, inden de bliver fortrængt af eller blandet med andre vandmasser. Dette skyldes områdets ret store volumen i forhold til hvor hurtigt vandmasser fra enten Kattegat eller Østersøen er i stand til at strømme ind og fylde området op.

Observationerne viser endvidere at det typisk tager 2 – 4 uger før en indstrømning har fyldt op i enten den nedre del eller den øvre del af vandsøjlen i hele området. Observationernes frekvens er ikke høj nok til at man rigtigt kan følge de indstrømmende vandmassers vej til Aabenraa Fjord. Men observationerne ser umiddelbart ud til at være i fin overensstemmelse med det som kan forventes. Dvs. at en indstrømning af højsalint vand fra Kattegat kan nå fra den nordlige del af det sydlige Lillebælt til Aabenraa Fjord i løbet af et par dage, og at en indstrømning af lavsalint vand fra Østersøen kan nå fra den sydlige del af Ærø til Aabenraa Fjord i løbet af en lille uges tid.

Data fra 2000 som er genstand for nærværende analyse, viser at udskiftningen af vandmasserne i den sydlige del af Lillebælt og den vestligste del af Østersøen er forbundet med meget stor dynamik, betinget af bl.a. de meteorologiske forhold. Derfor må man i høj grad forvente variationer fra år til år. Disse variationer vil komme til udtryk i bl.a. udbredelsen og varigheden af iltsvind. En analyse af flere års data vil kunne kaste lys over hvor store disse variationer er. Til gengæld ved man at den vind-genererede blanding ofte er langt kraftigere i vinterhalvåret end i sommerhalvåret. Dette fremgår tydeligt af de analyserede observationer, som både først og sidst på året viser velblandede vandsøjler næsten overalt i området.

Transektet gående fra den indre del af Aabenraa Fjord til området nord for Als, som er vist i uddrag i Figur 3 og som fremgår af Bilag 2 i sin helhed for 2000, viser tydeligt at Aabenraa Fjord står i meget nær forbindelse med det sydlige Lillebælt. Det betyder at vandmasserne og lagdelingen som man finder i det sydlige Lillebælt, ofte optræder stort set uforandrede i Aabenraa Fjord. Det betyder også at sker der ændringer i forholdene i det sydlige Lillebælt og den vestligste del af Østersøen, f.eks. i forbindelse med indstrømning af høj- eller lavsaline vandmasser, slår disse ændringer ret hurtigt igennem i Aabenraa Fjord. En anden vigtig ting som man bemærker, er at der i de analyserede observationer ikke optræder nogen spor efter lavsaline vandmasser nær overfladen noget sted, som kunne tyde på lokal afstrømning af ferskvand. Dette gælder for observationerne lavet i både 2000 og 1999, jævnfør Bilag 2 og 4. Dette betyder at i forhold til både blandingen og udskiftningen af vandmasserne med det sydlige Lillebælt er afstrømningen af ferskvand og næringssalte fra oplandet i almindelighed så lille, at den nok ikke har målelig indflydelse på forholdene i Aabenraa Fjord. I perioder med både meget kraftig nedbør og relativ svag vind kan man dog forvente at den lokale afstrømning vil kunne observeres og have en vis indflydelse på forholdene i Aabenraa Fjord.

Pga. den store udveksling med det sydlige Lillebælt giver det i almindelighed ikke mening at tale om en opholdstid for vandmasserne i Aabenraa Fjord. Skal man forstå dynamikken og udskiftningen af vandmasserne, er det derimod væsentligt at betragte det sydlige Lillebælt og den

vestligste del af Østersøen i sin helhed, jævnfør beskrivelsen og analysen ovenfor. Det samme gælder udbredelsen af iltsvind i vandmasserne i den nedre del af vandsøjlen, som ofte vil indtræde i et stort og nogenlunde sammenhængende område på engang. De uorganiske næringssalte som i givet fald vil blive frigivet fra sedimentet i forbindelse med iltsvindet, vil tilsvarende blive transporteret rundt og fordelt i den nedre del af vandsøjlen over et stort område. Ved efterfølgende vind-genereret blanding kan næringssaltene blive ført op i den øvre del af vandsøjlen og bidrage til en vækst af fytoplankton i et endnu større område.

Imidlertid kan man godt forestille sig situationer hvor den dybeste del af Aabenraa Fjord indeholder en tung vandmasse, som pga. den knap så dybe, ydre del af bassinet er afskåret fra den dybe, centrale del af det sydlige Lillebælt. En sådan situation vil kunne opstå hvis en indstrømning af højsalint vand fra Kattegat ikke er stor nok til at trænge ind i Aabenraa Fjord, men strømmer videre til den centrale del af det sydlige Lillebælt. Et eksempel på denne situation ses i observationerne for 1999, vist i Bilag 4. Her sker der i sidste halvdel af juni en indstrømning af højsalint vand fra Kattegat som først observeres i den centrale del af Lillebælt. Omkring d. 1. juli ses denne indstrømning også i Aabenraa Fjord, hvor den i øvrigt fortrænger en tidligere indstrømmet, nu iltsvindsramt vandmasse nederst i vandsøjlen. Efterfølgende sker der en ny indstrømning af en vandmasse fra Kattegat, med en endnu højere saltholdighed, som når frem til til den nederste del af vandsøjlen i den centrale af det sydlige Lillebælt, men som ikke dukker op i Aabenraa Fjord. I Aabenraa Fjord forbliver den højsaline vandmasse nederst i vandsøjlen indtil begyndelsen af oktober, hvor den fortrænges af en ny indstrømning af højsalint vand fra Kattegat. I løbet af den mellemliggende periode bliver vandmassen nederst i vandsøjlen i Aabenraa Fjord hurtigt ramt af iltsvind, som fra slutningen af juli indtil begyndelsen af oktober medfører iltkoncentrationer tæt på nul. I samme periode optræder der også iltsvind i den dybe vandmasse i den centrale del af Lillebælt. Men her sker faldet i iltkoncentrationen noget langsommere, formentligt pga. at volumen af vandmassen er relativt stort. Først i midten af september er iltkoncentrationen i den nedre del af vandsøjlen i den centrale del af det sydlige Lillebælt tæt på nul.

Observationerne for 1999 og 2000 viser at opholdstiderne for de forskellige vandmasser styres af frekvensen og størrelsen af indstrømningerne fra dels Kattegat, dels Østersøen og vejrforholdene. Hvis indstrømningerne fra Kattegat er tilpas små, kan en vandmasse i den dybe del af Aabenraa Fjord åbenbart afskæres fra vandmasserne i det dybe bassin i den centrale del af det sydlige Lillebælt. Dermed bliver volumen af vandmassen begrænset, hvilket formentligt betyder, at den hurtigt kan blive ramt af iltsvind, som udvikler sig anderledes end i andre dele af området. Dette viser at udbredelsen af iltsvind i et område som det sydlige Lillebælt er dynamisk meget kompliceret, subtelt og umiddelbart svært at gennemskue og beskrive. Da iltsvind fører til frigivelse af store mængder næringssalte fra sedimentet, er en tilførsel af næringssalte fra sedimentet til vandsøjlen, ligeledes svært at gennemskue og kvantificere. Eksemplet fra 1999 viser at den dybe, iltsvindsramte vandmasse i Aabenraa Fjord havde en opholdstid på ca. 3 måneder. I løbet af den periode er der med sikkerhed blevet frigivet meget store mængder næringssalte til vandsøjlen. En nærmere undersøgelse af dels iltomsætningen, dels koncentrationerne af næringssalte i det dybe lag kunne formentligt kaste lys over hvor store mængder næringssalte, der kan frigives i en sådan situation.

Observationerne af klorofyl-fluorescens, som er foretaget som en del af CTD-profilerne, og som vi har plottet i Bilag 4 for 1999, er analyseret for at undersøge om væksten af fytoplankton i den indre del af Aabenraa Fjord er større end i de åbne områder i den centrale del af det sydlige Lillebælt. En eventuel forskel kunne skyldes flere ting, primært tilstedeværelsen af flere uorganiske næringssalte, uanset hvor de disse måtte komme fra, og/eller en lagdeling af vandsøjlen som er gunstig for planktonets vækst. En sådan tilførsel af uorganiske næringssalte kunne ske lokalt fra oplandet, fra det tilstødende havområde eller ved medrivning af en næringsrig vandmasse i den nedre del af vandsøjlen. På det forhåndenværende grundlag er det svært at sige hvilken eller hvilke af disse forklaringer som kunne være rigtige. Men sikkert er det at iltsvind medfører frigivelse af meget

store mængder uorganiske næringssalte fra sedimentet til den nedre del af vandsøjlen. Endvidere er der tegn på at selvom der er sket en generel nedgang i tilførslen af næringssalte til de danske farvande, er iltsvindshændelserne i halvåbne områder som Aabenraa Fjord ikke blevet mindre i hverken omfang eller hyppighed (Hansen et al., 2021). Dette tyder på at hvis der faktisk sker en relativ stor, lokal vækst af fytoplankton i et sådan område, kunne iltsvind meget vel være en stor del af forklaringen.

Uanset hvilken forklaring er korrekt, vil en relativ stor, lokal vækst af fytoplankton medføre en relativ stor, lokal sedimentation af organisk materiale, som vil tilføre både organisk materiale og næringssalte til sedimentet i Aabenraa Fjord. Når der samtidigt sker indstrømninger af højsaline vandmasser fra Kattegat, som formodentligt medbringer uorganiske næringssalte fra andre dele af de danske farvande, vil et delvist åbent og dybt område som Aabenraa Fjord kunne fungere som en fælde for både organisk materiale og næringssalte. Så selvom der måtte ske en reduktion af koncentrationerne af næringssalte i store dele af de danske farvande, kan områder som f.eks. Aabenraa Fjord forventes fortsat at lide under en stor, intern pulje af næringssalte med tilbagevendende perioder med iltsvind. Hvis tilførslen af næringssalte udefra reduceres, vil der bestemt ske en gradvis udtømmning af en sådan intern pulje af næringssalte i sedimentet. Hvor hurtigt en sådan udtømmning vil foregå, er imidlertid svært at svare på. Det afhænger af bl.a. omsætningen af organisk stof og næringssalte i sedimentet og de komplicerede hydrografiske forhold i området, som vi har beskrevet og diskuteret ovenfor.

Ved analysen af fluorescens-data skal man dog først bemærke at de forskellige CTD-profiler kan være målt med forskellige instrumenter, og at der kan være forskelle på de resultater, som de forskellige instrumenter leverer. Dette gør en sammenligning vanskelig. Et tydeligt eksempel ses d. 17. marts 1999, hvor der er foretaget to separate CTD-profiler på den samme position i løbet af mindre end 2 timer. De to CTD-profiler er formodentligt lavet fra to forskellige overvågningskibe med to forskellige sæt af instrumenter. De to fluorescens-profiler har ganske vist samme relative forløb ned gennem vandsøjlen. Men det ene profil indeholder overalt værdier som er mindst dobbelt så store som værdierne i det andet profil. Afvigelse kan skyldes at der ikke er foretaget kalibrering af de data, som er lagt ind i ODA. En analyse af de tilhørende vandkemiske data samt korrespondance med Miljøstyrelsen kunne kaste lys over dette spørgsmål. Dette samt en mere dybtgående undersøgelse af en eventuel gradient i væksten af fytoplankton ligger dog uden for rammerne for det nærværende arbejde. Det skal også bemærkes at en sammeligning vanskeliggøres af, at forskellige arter af fytoplankton har forskellige forhold mellem mængderne af klorofyl og biomasse.

Når man betragter observationerne vist i Bilag 4, er der imidlertid nogle situationer som tyder på, at der faktisk kunne være en større vækst af fytoplankton i Aabenraa Fjord end udenfor fjorden. Et godt eksempel ses d. 18. marts 1999, hvor CTD-profilerne i Aabenraa Fjord og nord for Als formentligt alle er lavet med det samme sæt af instrumenter, og hvor vandmasserne og sikkert også den dominerende fytoplankton-art er ens overalt. Her observeres der en svag, men tydelig stigning i fluorescensen i retning mod den indre del af Aabenraa Fjord. Man skal bemærke at i den centrale del af det sydlige Lillebælt er fluorescensen på denne dag meget mindre end i Aabenraa Fjord. Men dette skyldes nok primært at der her optræder en helt anden vandmasse i den øvre del af vandsøjlen, og at denne vandmasse ikke kan sammenlignes direkte med vandmassen i den øvre del af vandsøjlen i Aabenraa Fjord. I Bilag 4 optræder der en lang række andre observationer som ikke tydeligt viser en forskel mellem Aabenraa Fjord og området udenfor fjorden, og hvor fluorescensen i øvrigt er meget lavere end i det nævnte eksempel. Det vil derfor kræve en nøjere analyse af et stort data-sæt at undersøge den nævnte hypotese. En sådan analyse bør have fokus på bl.a. forårsopblomstringen, som ses i det nævnte eksempel, og som kunne være af stor betydning for den samlede, årlige vækst. Men det skal bemærkes at selv en lille forskel mellem væksten i fytoplankton i og udenfor et område som Aabenraa Fjord på lang sigt sagtens kan føre til den mekanisme, som er foreslået her, dvs. området fungerer som en fælde for både organisk materiale og næringssalte.

5. Konklusion

Undersøgelserne har omfattet dels det sydlige Lillebælt og den vestligste del af Østersøen i sin helhed, dels Aabenraa Fjord. Analysen har vist at det sydlige Lillebælt og den vestligste del af Østersøen er præget af indstrømning af højsaline vandmasser fra Kattegat, som indfinder sig i den nedre del af vandsøjlen, og lavsaline vandmasser fra Østersøen, som indfinder sig i den øvre del af vandsøjlen. Disse indstrømninger foregår skiftevis og sker i forbindelse med længerevarende strømninger gennem de danske farvande drevet af vandstandsforskellen mellem Kattegat og den vestlige Østersø. Analysen har også vist at de indstrømmede vandmasser typisk har en opholdstid i det sydlige Lillebælt på flere måneder. Hvis de indstrømmede vandmasser befinder sig i den øvre del af vandsøjlen, kan der ske en langsom ændring af deres karakteristika pga. vind-genereret blanding. Disse vandmasser strækker sig ofte uændret ind i Aabenraa Fjord, som står i nærmest åben forbindelse med den centrale del af det sydlige Lillebælt. Derfor giver det ikke mening at tale om en opholdstid for eller en udskiftning af vandmasserne i Aabenraa Fjord som sådan. Observationerne viser at der i Aabenraa Fjord ikke er spor efter den lokale afstrømning af ferskvand fra land. Derfor må man konkludere at i almindelighed er tilførslen og omsætningen af næringssalte primært styret af den store udveksling med den centrale del af det sydlige Lillebælt. I perioder med ekstrem nedbør og svage vinde kan man imidlertid godt forestille sig at den lokale afstrømning af ferskvand kan observeres og kan have en målelig indflydelse på forholdene i Aabenraa Fjord. Men sådanne perioder hører bestemt til sjældenhederne.

Analysen viser imidlertid hvor subtile og dynamisk komplicerede de hydrografiske forhold er i det sydlige Lillebælt og den vestligste del af Østersøen, herunder Aabenraa Fjord. Observationerne for 1999 viser nemlig et fint eksempel på hvordan en indstrømning af højsalint vand fra Kattegat trænger ind i den nedre del af Aabenraa Fjord og forbliver der i ca. 3 måneder. I den periode sker der en ny indstrømning af en højsalin vandmasse fra Kattegat, som når frem til den centrale del af det sydlige Lillebælt, men som ikke er stor nok til at nå Aabenraa Fjord. I disse forskellige vandmasser udvikler der sig gradvist iltsvind. Men i Aabenraa Fjord indtræder iltsvindet hurtigst, hvorefter der i en periode på ca. 2,5 måneder optræder næsten iltfrie forhold ved bunden med tilhørende frigivelse af uorganiske næringssalte fra sedimentet. De meget dynamiske forhold betyder altså at man må forvente variationer fra år til år, som vil komme til udtryk i omfanget af iltsvind.

Analysen har også omfattet observationer af klorofyl-fluorescens for 1999, foretaget sammen med CTD-profilerne. Den indikerer at der i et halvåbent havområde som Aabenraa Fjord lokalt kunne ske en større vækst af fytoplankton end udenfor fjorden. En væsentlig del af forklaringen kunne meget vel være en stor frigivelse af næringssalte fra sedimentet i forbindelse med iltsvindshændelser. En sådan relativ stor, lokal vækst af fytoplankton ville betyde en relativ stor, lokal sedimentation, som på lang sigt ville medføre ophobning af både organisk materiale og næringssalte i sediment i fjorden. En nærmere undersøgelse af denne hypotese forudsætter dog dels analyse af en lang tidsserie, dels metoder til at omgå vanskeligheder med data-materialet.

Referencer

Gill, A.E. (1982) *Atmosphere–Ocean Dynamics*. Academic Press, London. 680 pp.

Hansen, J. W., Høgslund, S., Nielsen, M. H., Rytter, D., og Carstensen, J. Iltsvind – en joker i forvaltningen af det danske havmiljø. *Vand & Jord*, 3, pp. 141–145, 2021.

Nielsen, M. H., og Hansen, J. W.: Ny viden om iltsvind – dynamik, dybe bassiner og vandmasser. *Vand & Jord*, 3, pp. 92–96, 2020.

Nielsen, M. H., Vang, T., and Lund-Hansen, L. C.: Internal hydraulic control in the Little Belt, Denmark – observations of flow configurations and water mass formation. *Ocean Science*, 13, 1061–1075, 2017.

Bilag

Vedlagt som separate filer i PDF-format er følgende bilag.

1. Datadækning for i alt 17 stationer i ODA omfattende Als Fjord, Augustenborg Fjord, Aabenraa Fjord, det sydlige Lillebælt og den vestlige Østersø for perioden fra 1990 til 2020. Positionerne for de pågældende stationer er vist i Figur 2. De angivne stationsnumre svarer til oplysningerne i ODA.
2. Plots af alle CTD-profiler fra de 17 stationer vist i Figur 2 for 2000. Hele perioden er inddelt i korte perioder, jævnfør de lodrette, røde streger på første side, og for hver af disse korte perioder er CTD-profilerne plottet enkeltvist. For hvert CTD-profil er densiteten som funktion af dybden vist til venstre, mens sammenhørende værdier af saltholdighed og temperatur er vist til højre. Den midterste række af CTD-profiler omfatter stationerne på et transekt fra den ydre del af Aabenraa Fjord gennem Als Fjord til Augustenborg Fjord. Den øverste række af CTD-profiler omfatter stationerne fra området nord for Als (to forskellige stationsnumre) via Lillebælt syd for Årø (to forskellige stationsnumre) via Helnæs til området nordvest for Ærø, kaldet Station 43 (to forskellige stationsnumre). Den nederste række af CTD-profiler omfatter de tre stationer i Sønderborg Bugt og i den vestligste del af Østersøen samt en station i den centrale del af det sydlige Lillebælt vest for Ærø (to forskellige stationsnumre).
3. Kvalitativ beskrivelse af de hydrografiske forhold i området baseret på data fra 2000.
4. Plots af alle CTD-profiler fra de fire stationer på transektet fra den ydre del af Aabenraa Fjord gennem Als Fjord til Augustenborg Fjord for 1999, jævnfør Figur 1. Hele perioden er inddelt i korte perioder, jævnfør de lodrette, røde streger på første side, og for hver af disse korte perioder er CTD-profilerne plottet enkeltvist. For hvert CTD-profil er densiteten som funktion af dybden vist til venstre, mens sammenhørende værdier af saltholdighed og temperatur er vist til højre.