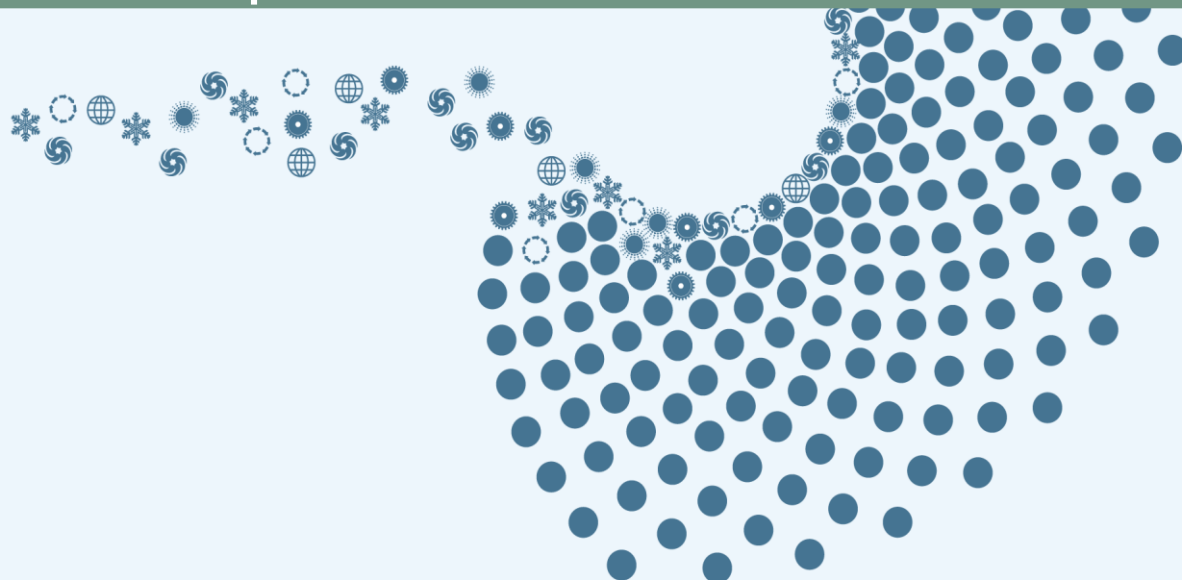


Havforsuring

Forsuring av havet. Kunnskapsstatus for norske farvann

TA
2575
2010



Utført av:

Forsuring av havet. Kunnskapsstatus for norske farvann.

Knut Yngve Børsheim og Lars Golmen

Forord

Forsuring av havet står høyt på dagsordenen både forskingsmessig og politisk, nå også i Norge. Fenomenet skyldes utsleppa av fossilt CO₂ til atmosfæren. Store mengder av gassen blir oppløst i havvannet som karbonsyre. Rapporten søker å belyse fakta om fenomenet og forventet utvikling over tid samt å peke på hvilke økologiske effekter forsuringa vil kunne medføre. Viktige aspekter ved overvåking og behov for kompetanse blir behandlet , og det er lagt vekt på forhold som særpreger norske farvann. Rapporten er skrevet av seniorforsker Knut Yngve Børsheim på Havforskningsinstituttet og seniorforsker Lars Golmen ved Norsk Institutt for vannforskning i nært samarbeid med forskere på Geofysisk institutt, Universitetet i Bergen, Bjerknessenteret for klimaforskning og Universitetet i Oslo.

Denne rapporten er en del av kunnskapsgrunnlaget i arbeidet med forvaltningsplanen for Nordsjøen.

Innhold

Forord.....	3
Sammendrag.....	7
1. Bakgrunn.....	10
1.1 Opptak av CO ₂ i havet	10
1.2 Historisk utvikling	11
1.3 Litt om CO ₂ kjemien i havet.....	13
2. Temporære særtrekk, naturlig variasjon	17
2.1 Døgnvariasjon.....	17
2.2 Årstidsvariasjon	19
3. Globale og regionale særtrekk	23
3.1 Norske farvann	25
4. Forventet utvikling fram mot 2100	33
4.1 Barentshavet og Polhavet	34
4.2 Norskehavet	38
4.3 Nordsjøen.....	38
5. Forventede effekter av forsurening på arter og økosystem.....	41
5.1 Organismer som danner kalkskall	41
5.2 Krepsdyr	45
5.3 Pigghuder.....	48
5.4 Blekksprut.....	49
5.5 Fisk	50
5.6 Sammenlignende studier av dyregrupper	52
5.7 Sjøpattedyr.....	53
5.8 Sjøfugl	53
5.9 Kalkalgene (<i>Emiliana huxleyi</i>).....	57
5.10 Økosystemeffekter	58
5.11 Oversikt?	62
5.12 Klimaendring, adderte effekter temperatur og pH.	66
6. Lagring av CO₂.....	67
6.1 Lagringsprosjekter	70
6.2 Lagringskapasiteten	71
6.3 Lagring og lekkasje	72
6.4 Risiko og effekt	73
7. Sosioøkonomiske effekter. Kystsamfunn og nasjonaløkonomi	75
7.1 Fiskerinæringa	75
7.2 Havbruksnæringen.....	76
7.3 Kystbasert reiseliv, turisme	77
8. Kunnskapsbehov	79
8.1 Biologisk kunnskap	79
8.2 Regional variasjon	80
8.3 Modellering	82
9. Konklusjoner med forslag til overvåkning og mulige tiltak.....	84
10. Referanser	89

Sammendrag

Økning av CO₂ i atmosfæren fører til forsuring av havet som langt overgår variasjonene vi kjenner til de siste 25 millioner år. Estimert av forsuringen de siste 200 år er basert på beregninger, men for Nordsjøen, Norskehavet og Barentshavet finnes presise målinger av karbonsystemet i sjøvann som viser forsuringen de siste 30 år.

En rekke eksperimentelle studier viser skadevirkninger på dyr og planter allerede ved moderat senking av pH. Dannelse av kalkskall blir vanskeligere, men i tillegg er det påvist et bredt spekter av skadevirkninger som ikke kan tilskrives løseligheten av kalk. Særlig er det grunn til å legge merke til at reproduksjonsstadier som egg og larver fra en rekke dyregrupper viser tegn til skader ved eksponering for moderat forsuring.

Det er viktig å komme i gang med forskning av effekter på flora og fauna fra våre egne farvann. Mesteparten av publisert materiale om biologiske effekter av forsuring omhandler arter fra varmere strøk.

Videre er det klart at det eneste kjente tiltak mot havforsuring er å bremse det globale antropogene utslippet av CO₂ til atmosfæren. Teknologiutvikling på energiområdet vil være en viktig global oppgave. Lagring av CO₂ under havbunnen er et kjent tiltak som er påbegynt, og i denne sammenheng har vi oppsummert aspekter som er relevant for havforsuring. Lekkasje fra slike depoter vil i hovedsak gi lokale effekter.

Det vil være viktig for forvaltningen å kunne overvåke havforsuringen. Denne oppgaven er særlig krevende på grunn av den store variabiliteten. Vi har et utall av fjorder, flere sokkelhav og dyphavsområder som Norskehavet innenfor forvaltningsområdene. Overvåkingen bør ta utgangspunkt i forskningsmiljø som allerede innehar spisskompetanse og erfaring med analyse av karbonkjemien i sjøvannet. En første fase av et slikt arbeid bør inkludere en analyse av historiske data, samt en utdypende diskusjon om strategi for optimal overvåking i framtiden. Videre er det viktig at overvåkningsdata blir bearbeidet og inkludert i havmodeller slik at resultatene kan anvendes sammen med data fra prosessstudier samt kunnskap om vår flora og fauna. Kombinert med havmodeller vil være viktig for gjøre det mulig å vurdere effekten av forsuring langs fiskens vandringsveier, gyteplasser, samt baner for egg og larvedrift, for i gi noen eksempler.

Det er noe prematurt å gi en full analyse av sosioøkonomiske konsekvenser av havforsuring, men de kan bli betydelige, og det er klart at det er viktig å komme i gang med forskning på bred front innen en rekke fagområder for å møte utfordringen og forvaltningens behov for beslutningsgrunnlag i framtiden.

English summary

Increasing concentration of CO₂ in the atmosphere leads to ocean acidification far exceeding variations that has occurred during the last 25 million years. Estimates of ocean acidification for the last 200 years are based on calculations, but for the North Sea, The Norwegian Sea and the Barents Sea precise measurements of the seawater carbon system exist, demonstrating the acidification that has happened the last 30 years.

Several experimental studies show harmful effects on animals and plants at already at moderate decrease in pH. The generation of calcified shells becomes more difficult, but in addition there has been demonstrated a large spectrum of harmful effects that cannot directly be ascribed to the solubility of chalks. Especially noteworthy is the observation that reproduction stages like eggs and larvae from a range of animal categories show signs of harm after being exposed to moderate acidification.

Further it is clear that the only known action against ocean acidification is to decelerate release of CO₂ to the atmosphere from human activities. The development of technology in the area of energy sources will be an important global task. Storage of CO₂ under the ocean floor is one kind of action that has been started, in this connection we have summed up aspects of such depots which are relevant for ocean acidification. Leakage from such depots will mainly have local effects.

For the governmental bodies it will be of importance to monitor ocean acidification. This task is especially demanding because of natural variability. We have a large number of fjords, several shelf areas and deep oceans like the Norwegian Sea within Norwegian jurisdiction. Monitoring should take advantage of research groups that already are in possession of cutting edge competence and experience with analysis of seawater carbon chemistry. In an early phase of the work analysis of historical data should be included, along with in depth

discussions about strategies for optimal monitoring in the future. It will be important to incorporate measurements in models in such a way that the results can be used together with data from process studies and other knowledge about our flora and fauna. Combination with ocean models will be important to evaluate the effects of ocean acidification along the migration routes of fishes, on the spawning grounds, and along the drift patterns of eggs and larvae, just to give a few examples.

It seems premature to attempt in-depth analysis of socio-economical consequences of ocean acidification, but clearly such consequences may prove to be considerable, and clearly it is important to initiate research on a broad range of subjects to meet with the challenges and the need for a sound knowledge basis for future decisions.

1. Bakgrunn

Etter starten på den industrielle revolusjon for vel 200 år siden har fossilt materiale som kull, olje og naturgass har blitt brent til CO₂ i et stadig økende tempo. Karbondioksid i atmosfæren gir drivhuseffekt som påvirker klimaet på jorda, men en mindre påaktet konsekvens er at tilførsel av CO₂ til atmosfæren fører til forsuring av havet. En rekke rapporter fra internasjonale tverrfaglige grupper av forskere har påpekt at havforsuring kan få negative konsekvenser for viktige deler av livet i havet. Norskspråklige oppsummeringer av de viktigste rapportene fram til slutten av 2007 er allerede tilgjengelige (Børsheim 2008, Golmen 2008).

Man kan i dag fastslå og forutsi klart og konsist sammenhengen mellom CO₂ utslipp til atmosfæren og forsuring av havet (Orr et al. 2005, Caldeira og Wickett 2005). Videre er det vist med sikkerhet at fortsatt utslipp vil forverre problemet, og at der finnes ingen kjent teknologi til å bøte på forsuringseffekten. Begrensing av utslipp av CO₂ til atmosfæren er det eneste kjente tiltak som kan virke globalt til å bremse forsuringen. Hovedhensikten med den herværende rapporten er å legge fram de viktigste funn fra den aller nyeste forskningen, samt å identifisere viktige særtrekk ved norske farvann i forhold til den globale gjennomsnittlige situasjonen.

1.1 Opptak av CO₂ i havet

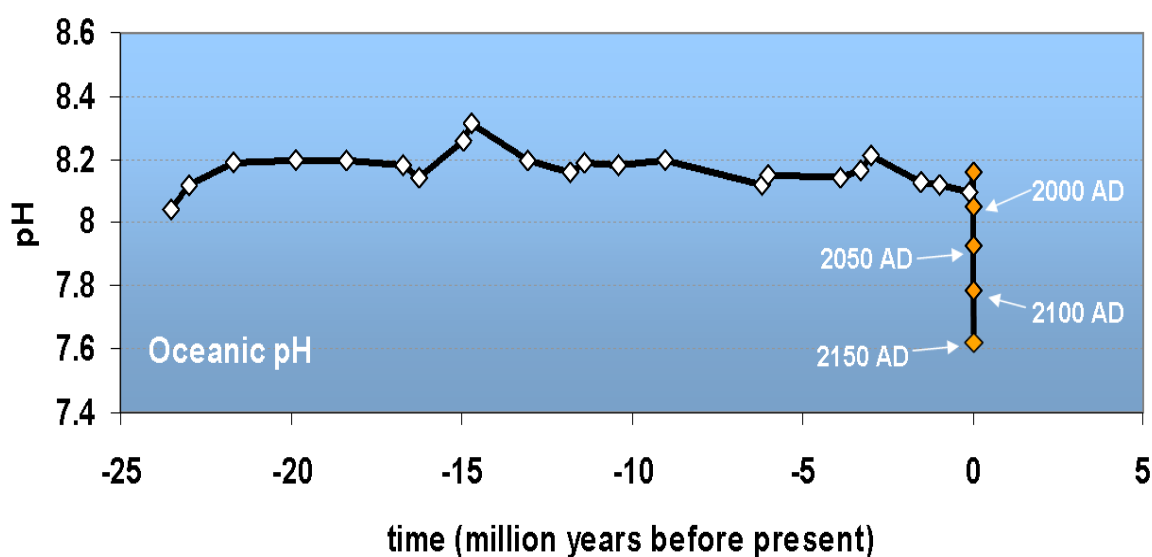
Antropogent utslipp av CO₂ har ført til akkumulering av CO₂ både i atmosfæren og i havet. Etter den industrielle revolusjon har havet tatt opp omtrent fjerdeparten av mengden CO₂ som stammer fra bruk av fossilt brensel i kraft- og sementproduksjon. Dette opptaket har samtidig ført til forsuring av overflatelaget av havet (Soetart et al. 2007).

Nøyaktige målinger av pH i havet fra over hundre tilbake finnes ikke. Imidlertid har vi gode estimat av hvor mye CO₂ som er sluppet ut i atmosfæren, og mengden som har akkumulert i atmosfæren er kjent fra analyser av iskjerner, samt direkte målinger i luft etter 1958. Når vi vet hvor mye CO₂ havet har tatt opp, og tar hensyn til fysikk og vannbevegelser, kan forandringene i pH beregnes (Caldeira og Wickett 2003). Forandringene i pH er ikke jevnt fordelt på alle havområder. Forsuringen øker fortest nærmest polene, og sprer seg nedover i

vannsøylen og mot ekvator (Orr et al. 2005, Steinacher et al. 2009). Også for framtidsscenarier for CO₂ utslipp kan utviklingen av pH i havet beregnes. Enkelte usikkerheter er knyttet til hvordan klima kan påvirke sirkulasjonsmønstre og lagdeling, men forsuringen forventes å aksellerere, og i våre norske farvann forventes en nedgang på ca. 0.5 pH enheter de neste hundre år (Steinacher et al. 2009). Uansett hvilket framtidsscenario som blir realisert, vil det være et stort behov for øket kunnskap om effektene av et surere hav.

1.2 Historisk utvikling

For vel 30 millioner år siden gjennomgikk klodens karbonkjemi en stor forandring med synkende karbondioksid i atmosfæren, og på denne tiden ble isdekket i Antarktis dannet (Pearson et al. 2009). I de siste 25 millioner år har havets pH mest sannsynlig holdt seg over 8. Med de nåværende utslipp av CO₂ til atmosfæren vil pH i havet synke drastisk de neste 100 år (Figur 1.1).



Figur 1.1 Sannsynlig forhistorisk utvikling av pH i havets overflatevann kombinert med beregninger og scenarier for nåtid/framtid. Fra Turley et al. (2006).

For flere hundre millioner år siden kan atmosfærekonsentrasjonen av CO₂ ha vært over 1000 ppm CO₂ (Brooker og Peng 1998), og pH i havet langt lavere enn i dag. Gradvis forvitring og utvasking av kalk- og silikatbergarter som binder CO₂ og andre prosesser bidro til gradvis å redusere atmosfærekonsentrasjonen. Etter hvert fikk fotosyntesen bedre vilkår og bidro til økt opptak av CO₂ fra atmosfæren samt produksjon av oksygen i biosfæren, mens store mengder

død biomasse i havet sedimenterte på havbunnen og endte opp langtidslagret i form av fossilt kull, olje og gass. Denne utviklingen brakte til slutt CO_2 konsentrasjonen i atmosfæren ned mot et historisk nivå på 200-400 ppm. Deler av de fossile hydrokarbonene henter vi nå ut og forbruker slik at CO_2 fra forbrenning blir tilbakeført til atmosfæren og det aktive karbonkretsløpet.

Midlere pH i havet har altså lagt i overkant av 8.0 i mange millioner år (Figur 1.1). Dette er et resultat av en naturlig og stabil likevekt i utvekslinga av CO_2 mellom hav og luft balansert med mineraltilførsler fra land. Karbonsyre i nedbør og overflate/grunnvann bidrar naturlig til forvitring av fjell som til dømes basalt og granitt. Når silikatbaserte mineraler blir løst i vann, blir også kalsium (Ca) frigitt og ført mot havet der den blir anvendt i kontinuerlig produksjon av kalkskall og skelett hos marine organismer. Denne produksjonen konsumerer karbonat (CO_3^{2-}) og på denne måten har geologisk forvitring og marin biologisk produksjon holdt de forhistoriske CO_2 utslippene i sjakk og bidratt til tilnærmet konstant pH de siste millioner år. Den økende konsentrasjonen av atmosfærisk CO_2 som skjer nå, innebærer imidlertid økt fluks av denne gassen ned i havet. Dette medfører endring av karbonkjemien i sjøvannet, med økning i $p\text{CO}_2$ (deltrykk av CO_2) og reduksjon i pH og karbonatkonsentrasjon.

Det er stadig utslipp av ”ny” CO_2 fra jordas indre, gjennom vulkaner og sprekker i jordskorpa. Et anslag for denne fluksen er 500 mill tonn CO_2 /år. Denne CO_2 bidrar til drivhuseffekten på same måte som menneskeskapte utslipp, i en likevekt mellom konsentrasjoner og utveksling mellom atmosfære, land og hav. Dagens antropogene utslipp av CO_2 er på ca 25 milliarder tonn CO_2 (GtCO_2 , tilsvarende 9.5 GtC), m.a.o. mange ganger større enn den naturlige fluksen gjennom jordskorpa, og langt større enn det forvitring av bergarter og marin kalkproduksjon kan balansere. Disse utsleppene gir opphav til raskt økende CO_2 -konsentrasjon i atmosfæren med akselererende drivhuseffekt og havforsuring.

Det har blitt beregnet at pH i havets overflatelag siden begynnelsen av industrialiseringen har avtatt med ca 0.1 (Haugan og Drange 1996). Dette motsvarer en 30% økning i H^+ konsentrasjonen. Nye prognoser indikerer 0.45 reduksjon i pH i Arktis innen utgangen av dette århundret (Steinacher et al. 2009), noe som vil representere nivå som sannsynligvis ikke har eksistert de siste 20 millioner år (Figur 1.1). Dersom de verste prognosene for CO_2 utslipp slår til vil pH nivået i havet snart nå lavere enn noen gang de siste 300 millioner år. Menneskearten som har levd på jorda de siste ca 1 millioner år, vil bli eksponert for denne

raske endringen. Det er for lengst påvist at det antropogene CO₂ signalet har nådd djupvatnet i Nordatlanten/ Norskehavet (Körtzinger et al. 1998). Det pågår mest sannsynlig allerede endringer i økosystemene i havet som skyldes økt CO₂ og forsuring, men uten at vi på det nåværende tidspunkt har tilstrekkelig kunnskap og teknologi til å kunne avdekke og kvantifisere endringene.

Trass tidligere advarsler (Bolin og Erikson 1959; Fairhall 1973) er det først de siste ti åra eller så at det har blitt satt fokus på havforsuring som et mulig globalt miljøproblem. De grunne korallreva i varme farvann har vært gjenstand for flere studier og med rapport om forvitring og bleking og der både havforsuring og temperaturøkning har vært trukket fram som årsaker. Slike korallrev er kompliserte økosystem med høy artsdiversitet. Ytre påvirkninger kan redusere arts mangfoldet og dermed også bane vegen for opportuniste som konkurrerer med korallene om plassen eller næringa, og dermed akselerere negativ utvikling. Endringene i karbonkjemi som følge av havforsuring innebærer først og fremst mindre karbonat og litt økning av bikarbonat. Dette går ut over skallbygging til både mikrop plankton og større marine organismer. I tillegg vil endring i CO₂ og pH ha effekter på respirasjon og fysiologi, samt på kjemiske likevekter i og mellom sjøvann og sediment.

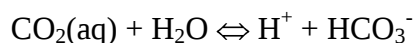
1.3 Litt om CO₂ kjemien i havet

Karbondioksid som tilføres sjøvann inngår i følgende system av likevekter:

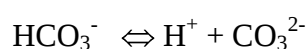
Karbondioksid løses i vann:



der g står for gass, og aq for løst i vann. Karbondioksid i vann vil danne det vannløste ionet bikarbonet, som igjen kan dissosiere til det vannløste ionet karbonat under dannelsen av hydrogenioner:

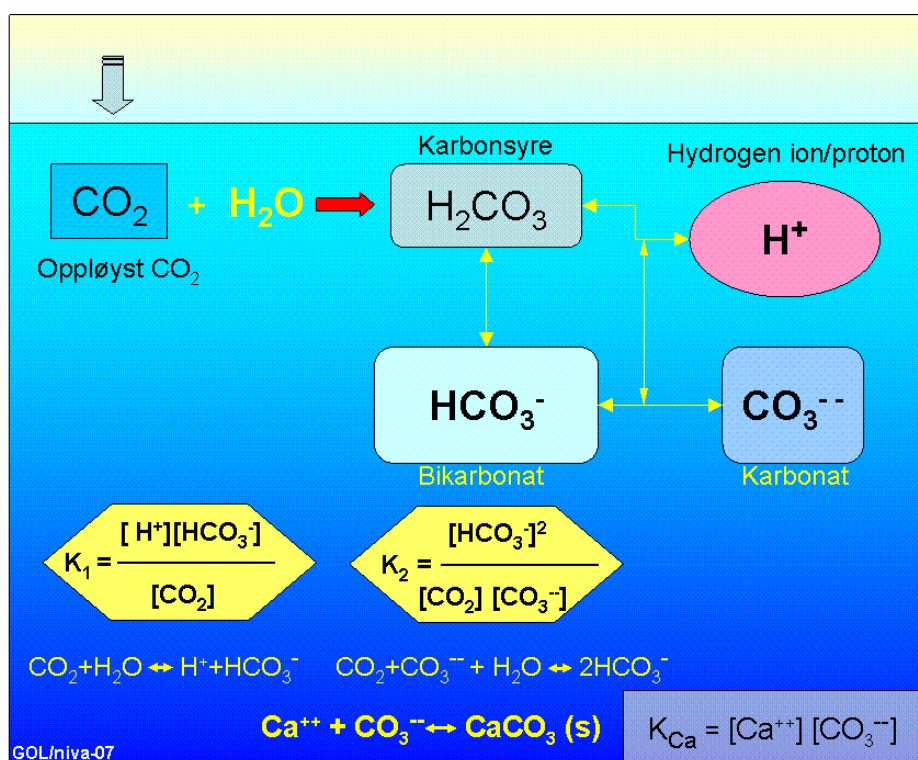


og



Dette betyr at havet tilføres stadig mer hydrogenioner og følgelig synker pH. Når pH synker blir konsentrasjonen av karbonat mindre, og dette har konsekvenser for dannelse av kalk (Figur 1.2)

Karbon utgjør kun en liten del av sjøvannskjemien og konsentrasjonen av kalsium (Ca) er mye større (100X) enn konsentrasjonen av karbonat ved normal pH. I øvre lag er det m.a.o. ingen mangel på kalsium. Det er derfor først og fremst konsentrasjonen av karbonat som bestemmer hvor mye fast kalsiumkarbonat som kan dannes i mineral og skall eller skjelett. Karbonatkonsentrasjonen minker med forsuringen slik at det kan oppstå underskudd på biologisk tilgjengelig kalsiumkarbonat.

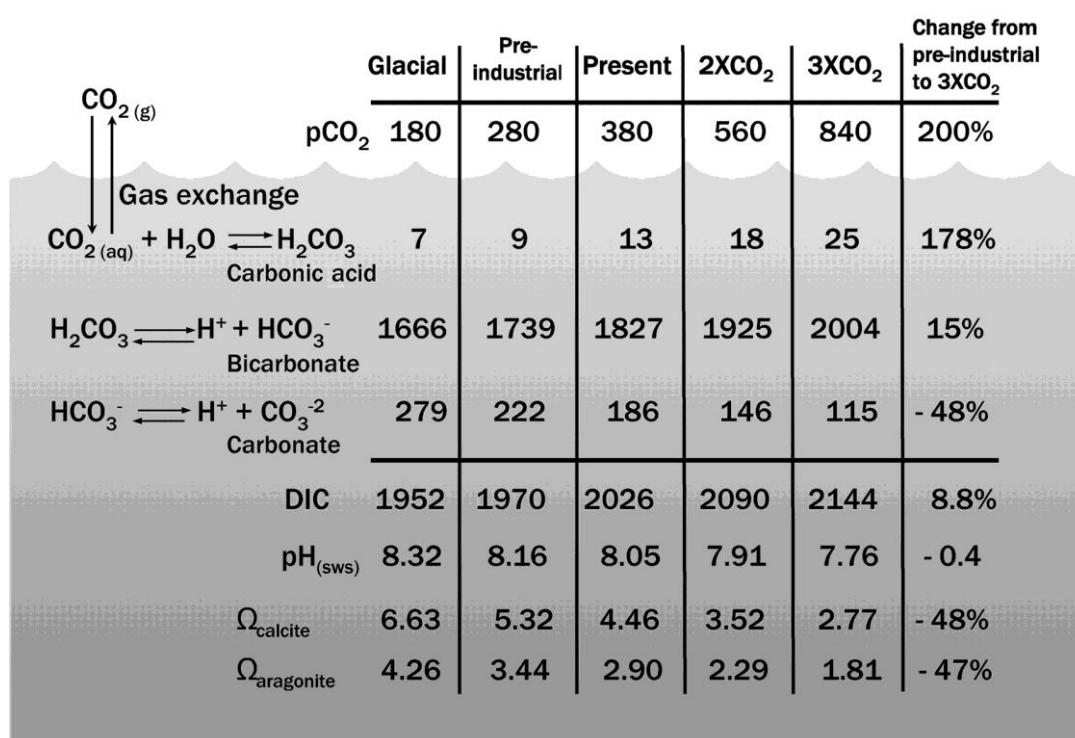


Figur 1.2 Reaksjonene mellom CO₂ og sjøvann, med karbonsyre som dissosierer videre gjennom to likeviktsreaksjoner. Kalsium-reaksjonen illustrerer forholdene ved lysoklinen hvor det pr. definisjon foreligger metnings-likevekt.

Karbonbalansen innebærer at havet har svært stor bufferkapasitet og kan ta opp langt mer CO₂-gass enn ferskvatn. Litt forenklet kan en si at summen av konsentrasjonene av de fem komponentene H⁺, Ca²⁺, CO₂, HCO₃⁻ og CO₃²⁻ er konstant i havet, og likevekten mellom formene er bestemt av et sett likevektskonstanter. Konsentrasjonen av en komponent vil

dermed påvirke konsentrasjonen av en eller flere andre komponenter for å beholde den totale ionelikevekten.

Ved normal pH i sjøvannet er forholdet mellom likevektskonsentrasjonene av CO_2 , HCO_3^- og CO_3^{2-} på ca 1:100:10. Etter hvert som det minker på fritt karbonat i sjøen samtidig som H^+ konsentrasjonen øker så vil også bufferkapasiteten i forhold til ytterligere CO_2 tilførsel minke (Figur 1.3). Forandringene i bikarbonat blir prosentvis mindre, sagt på en annen måte: forandringene er langt fra lineære. Et relativt komplisert sett av ligninger er tilgjengelig for å beregne hvordan systemet oppfører seg.



	Glacial	Pre-industrial	Present	2XCO ₂	3XCO ₂	Change from pre-industrial to 3XCO ₂
pCO ₂	180	280	380	560	840	200%
CO ₂ (g) ↔ CO ₂ (aq) + H ₂ O ↔ H ₂ CO ₃ Gas exchange Carbonic acid	7	9	13	18	25	178%
H ₂ CO ₃ ↔ H ⁺ + HCO ₃ ⁻ Bicarbonate	1666	1739	1827	1925	2004	15%
HCO ₃ ⁻ ↔ H ⁺ + CO ₃ ⁻² Carbonate	279	222	186	146	115	- 48%
DIC	1952	1970	2026	2090	2144	8.8%
pH _(sws)	8.32	8.16	8.05	7.91	7.76	- 0.4
Ω _{calcite}	6.63	5.32	4.46	3.52	2.77	- 48%
Ω _{aragonite}	4.26	3.44	2.90	2.29	1.81	- 47%

Figur 1.3 Konsentrasjoner av komponenter i karbonatsystemet (angitt i enheten micromol kg⁻¹), pH verdier, og aragonitt og kalsitt metningsgrad for gjennomsnittlig overflatevann i havet for deltrykk av karbondioksid, pCO₂ (gitt som ppmv) i løpet av glacial-, preindustriell- og nåtid, samt framtid med to ganger pre-industriell CO₂, og tre ganger pre-industriell CO₂ i atmosfæren (basert på Feely et al. (2004) og Kleypas et al. (2006)).

I havoverflaten er det normalt større naturlig variasjon i pH enn dypere nede. Enda større naturlig variasjon er det i brakkevann i fjordene der påvirkningen fra land er stor. pH varierer også med dypet. Rundt termoklinen i havet fins ofte et oksygenminimum koblet med vertikalt minimum i pH som følge av naturlige remineraliseringsprosesser fra nedfall av organisk materiale som frigjør CO₂ (Tabell 1.1). Lignende prosesser skjer også på havbunnen men der

bidrar ansamling av kalkskall som har sedimentert fra de øverste vannlagene til å redusere pH-endringen. Langs noen kyster finnes oppstrømningsområder for dypvann som er rikt på næringsalter og følgelig gir grunnlag for høy produksjon. Dette vannet er i utgangspunktet naturlig surere enn vanlig overflatevann, fordi det har vært anriket med CO₂ under oppholdstiden i dypet, og denne oppholdstiden er for dyphavet flere tusen år.

Tabell 1.1 Sammenligning av dybdefordelingen for pH i Atlanterhavet og Stillehavet.

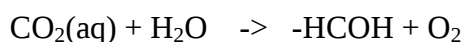
	Atlanter- havet	Stille- havet
Overflaten	8,15	8,15
Rundt 1000 m	7,95	7,61
3-5000 m	8,12	7,97

Kilde: Millero, Frank J. Chemical Oceanography.
Marine Science Series. CRC Press, Inc.,
 Boca Raton, Florida, USA, 1996.

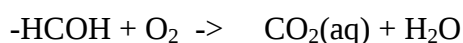
2. Temporære særtrekk, naturlig variasjon

Veksling mellom fotosyntese og respirasjon kan gi pH-variasjoner som er store i forhold til de systematiske forandringene som kommer av langsiktig forandring i mengde CO₂ i løst i sjøvannet. Biologisk aktivitet vil enten forbruke eller produsere karbondioksid, og de biologiske prosessene vil sette opp svingninger både over året og gjennom døgnet. Årstidsvariasjonene blir aksentuert i Arktis på grunn av den store forskjellen mellom den lyse og den mørke årstiden. Observerte svingninger vil være bestemt av forholdet mellom fotosyntese og respirasjon:

Fotosyntese



Respirasjon



Der: -HCOH står for organisk materiale

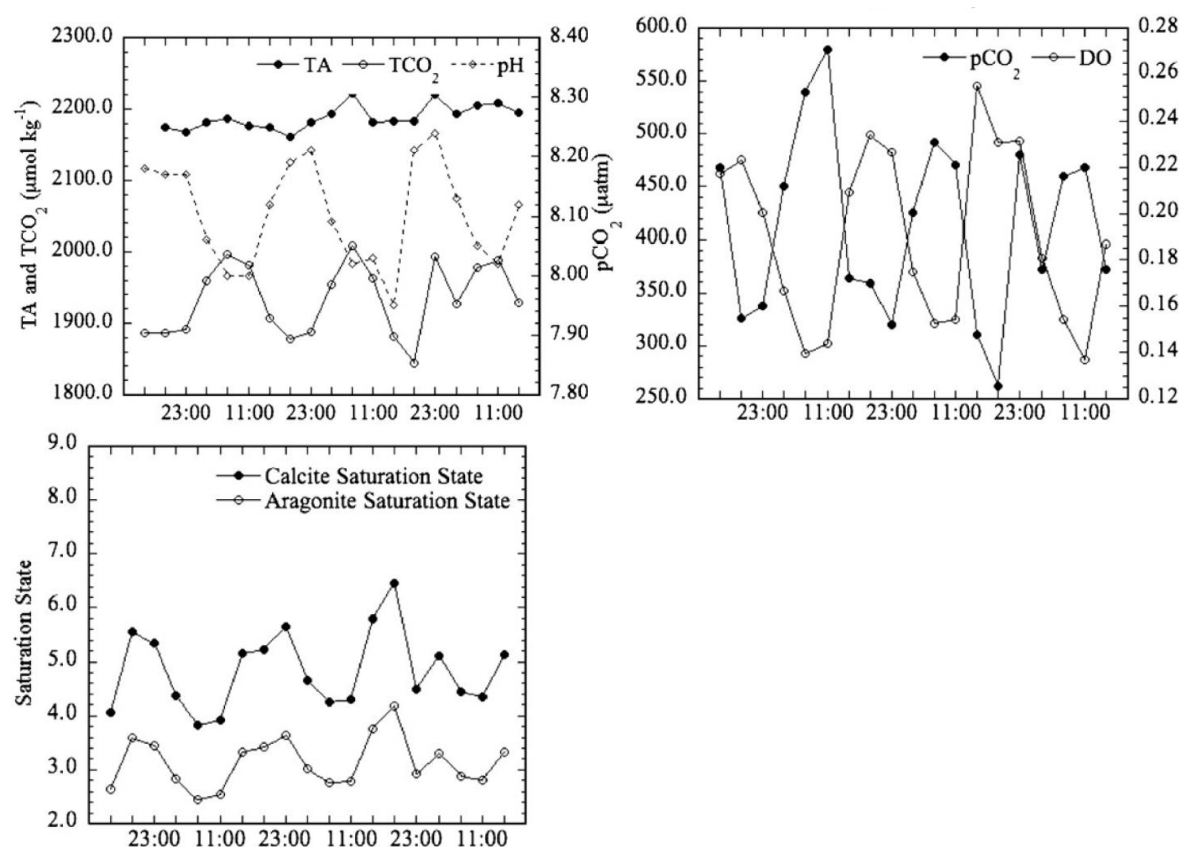
2.1 Døgnvariasjon

I den lyse årstid vil de jevne og store svingningene i CO₂ konsentrasjon i sjøen gjennom døgnet være forårsaket av biologisk aktivitet ved at netto karbondioksid blir konsumert i fotosyntese om dagen, og netto produsert ved respirasjon om natten.

Figur 2.1 viser et eksempel fra en kystnær lokalitet i Florida. Her ble hele karbonatsystemet karakterisert, slik at man kan se hele dynamikken i praksis. I øverste panel til venstre ser man at pH og totalt uorganisk karbon (TCO₂) svinger i motfase, slik man vil forvente. I samme panel ser man en viss variasjon i TA på grunn av kalsifiserende organismer knyttet til bunnfloraen på denne lokaliteten. I åpent hav vil TA vanligvis holde seg konstant.

Respirasjonen produserer CO_2 om natten og senker pH. Ut på dagen begynner fotosyntesen og dominere og pH stiger samtidig som totalt uorganisk karbon (TCO_2) synker. Videre vil deltrykket av CO_2 og oksygen svinge i motfase, som en ser i øverste panel til høyre i Figur 2.1. Tradisjonelt oppgis disse to oppløste gassene i enheter som ikke umiddelbart innbyr til sammenligning. Regnes de om til molare mengder vil en se at for hvert molekyl CO_2 som tas opp produseres et molekyl oksygen. Til slutt i eksempelet fra Tampa Bay kan man i nederste panel se at også metningsgraden for kalk-mineralene vil variere gjennom døgnet.

Når pH stiger, vil dette øke opptaksraten av CO_2 fra atmosfæren, så vann med høy produksjon vil også ha potensiale for øket opptak av CO_2 . Den omvendte prosessen, respirasjon eller nedbrytning av organisk materiale, vil produsere CO_2 og forårsake tilsvarende senkning av pH.

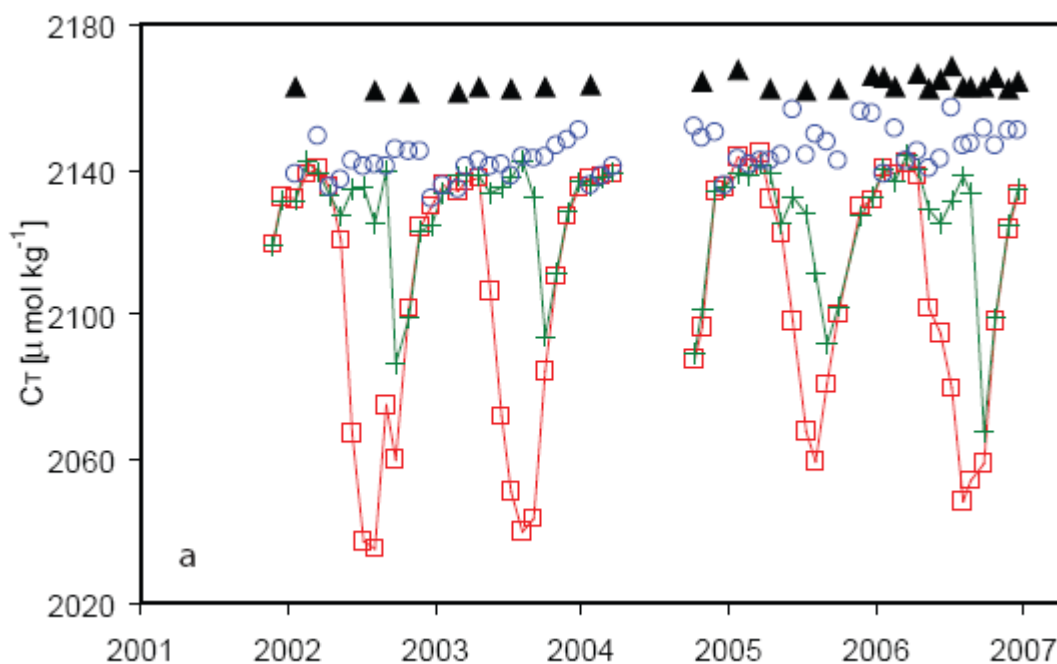


Figur 2.1 Døgnvariasjon i karbonatsystemet i Tampa Bay, Florida 7-10 oktober 2003. Venstre panel øverst: Total alkalinitet (TA), total konsentrasjon karbonat (TCO_2) og pH. Til høyre: Deltrykk av CO_2 (pCO_2) og konsentrasjon av oksygen (DO). Nederst: Metningsgrad for kalsitt og aragonitt. Fra Yates et al. (2007).

Deltrykket av CO_2 er mål for oppløst karbondioksidgass i vannet og DO står for oppløst oksygen. For hvert molekyl som blir assimilert av fotosyntesen, dannes et molekyl oksygen. Derfor svinger pCO_2 og oksygenkonsentrasjonen (DO) i motfase.

2.2 Årstidsvariasjon

I den eufotiske sonen, det vil si den delen av vannsøylen som sollyset når ned i, vil en i tillegg til døgnvariasjonen finne en markant årstidsvariasjon. I tidsrommet 2001 til 2007 ble det samlet en tidsserie av relevante data for karbonatsystemet fra værskip M på 66°N , 2°Ø i Norskehavet (Skjelvan et al. 2008). Figur 2.2 viser årstidsvariasjonen fra utvalgte deler av vannsøylen for dette tidsrommet. Nær overflaten var forskjellen mellom sommer og vinter i størrelsesorden $125 \mu\text{mol C kg}^{-1}$, og dette gir en betydelig variasjon i pH.



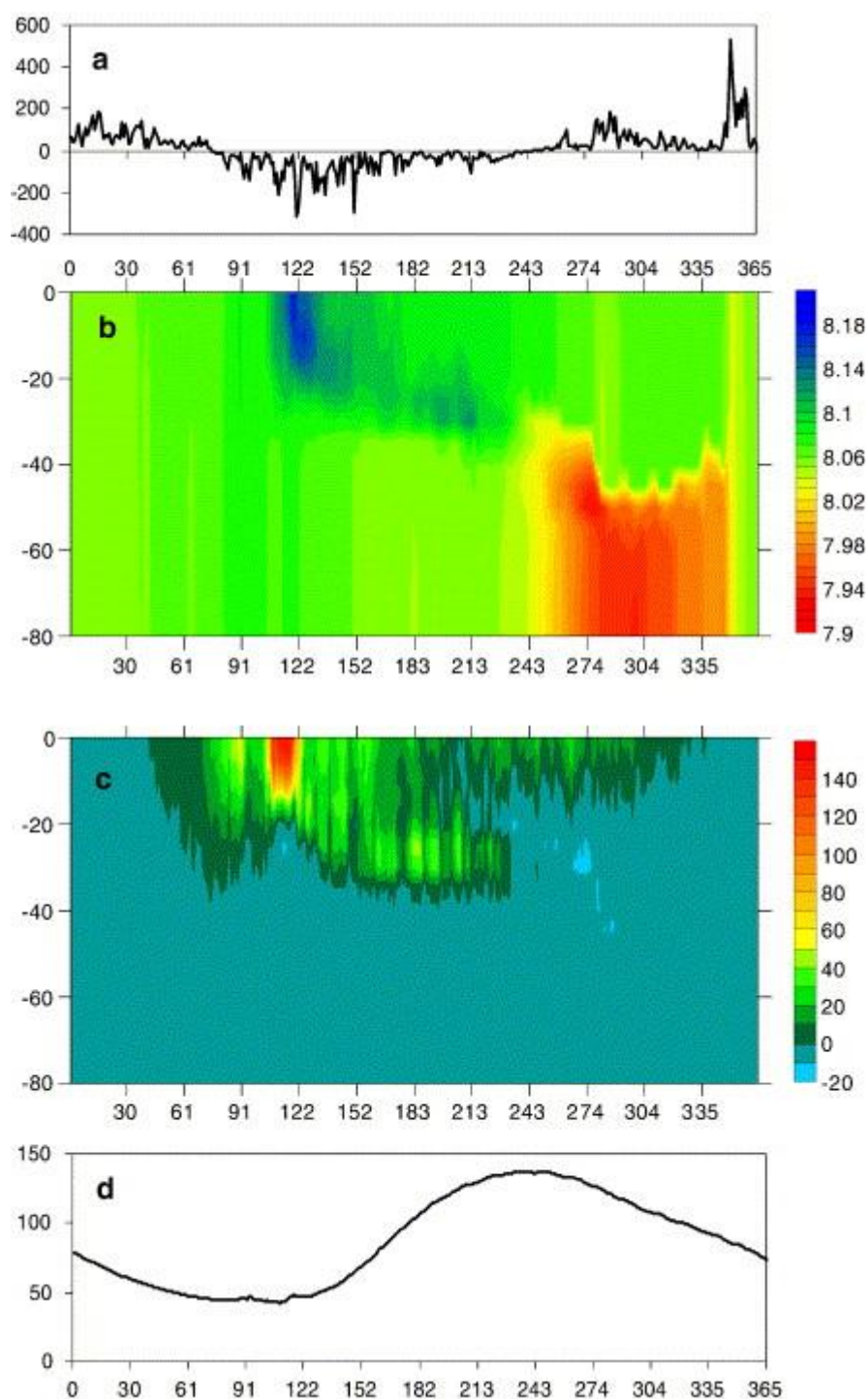
Figur 2.2 Årstidsvariasjon av C_T (total konsentrasjon av karbonater) i forskjellige dyp ved stasjon M. Røde firkanter: 10 meters dyp. Grønne kors: 50 m. Blå sirkler: 200 m. Svarte trekanter: 2000 m. Fra Skjelvan et al. (2008).

I perioden 2001 til 2007 steg C_T med $1,3 \pm 0,7 \mu\text{mol kg}^{-1} \text{ år}^{-1}$ i overflaten ved stasjon M (Skjelvan et al. 2008). Hele vannsøylen var påvirket av antropogent CO_2 , og i dypvannet steg C_T med $0,57 \pm 0,24 \mu\text{mol kg}^{-1} \text{ år}$, og hele 85 % av økningen i dypvann kommer fra antropogent CO_2 . Resten av økningen skyldes en periode med innstrømming av gammelt C_T -

rikt vann fra Polhavet. Total C_T i dypvann var $2163 \mu\text{mol kg}^{-1}$. I overflatevannet var vinterkonsentrasjonen av C-T typisk $2140 \mu\text{mol kg}^{-1}$, mens sommerværdien gikk helt ned til $2040 \mu\text{mol kg}^{-1}$.

Når overvåkningsprogram skal utformes er det viktig å være oppmerksom på variasjonene gjennom året, og i tillegg kommer den variasjonen gjennom døgnet. Primærproduksjonen konsumerer CO_2 og bidrar til øket pH, respirasjonen produserer CO_2 og senker pH. For havområdet ved Stasjon M vil man i våroppblomstringen ha en primærproduksjon tilsvarende $1,0\text{-}1,7 \mu\text{mol kg}^{-1} \text{ dag}^{-1}$, noe mindre i resten av den lyse årstiden, mellom $0,2$ og $0,8 \mu\text{mol kg}^{-1} \text{ dag}^{-1}$ (Vedernikov og Dedinov 1997; Skogen et al. 2007). Med andre ord, i løpet av et døgn i april-mai vil pH variere like mye som størrelsesordenen av den årlige forsureningen.

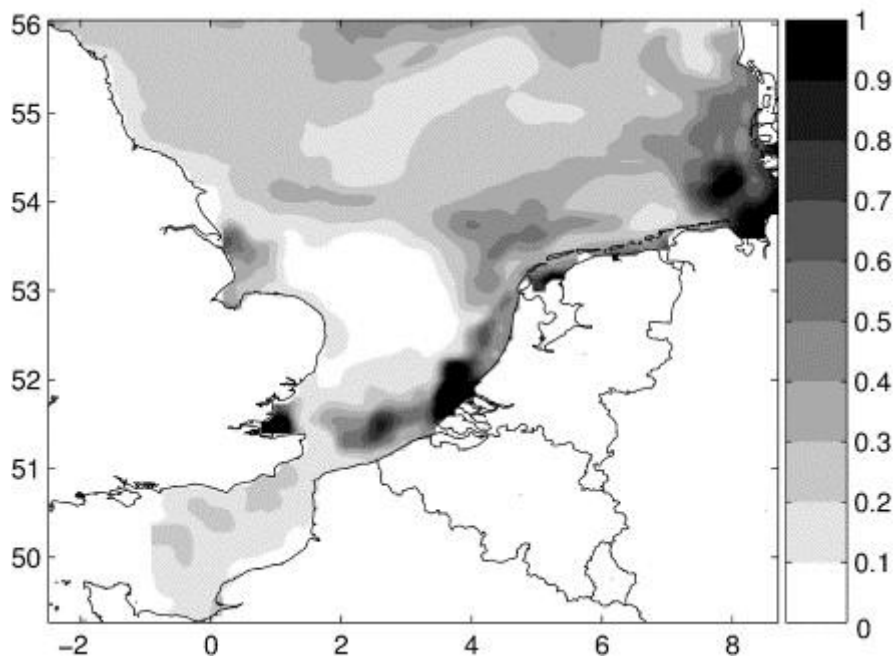
I dype hav som Norskehavet vil årstidsvariasjonene ikke være detekterbare i dyphavet, men i de grunne sokkelhavene som Barentshavet og Nordsjøen vil hele vannsøylen være involvert i utveksling med atmosfæren. Modellering av karbonsyklus i den sørlige Nordsjøen har vist hvordan pH forandrer seg gjennom året ved en 80 meter dyp lokalitet på grunn av biologisk aktivitet (Blackford og Gilbert 2007). Simulering fra stasjon CS (Central Station, hvor også empiriske data er tilgjengelige for biologi og hydrografi) viser viktige egenskaper ved årsvariasjonen (Figur 2.3). Våroppblomstringen forårsaker en økning i pH først ved overflaten og senere dypere nede i vannsøylen, og økningen er på opp til $0,15$ pH enheter. Økningen i pH kommer av at fytoplankton bruker CO_2 til vekst. Om høsten vil nedbrytning av organisk materiale i den nederste delen av vannsøylen produsere CO_2 , og pH synker. Senhøstes brytes lagdelingen av vannsøylen ned, og vannet som har vært anrikt med CO_2 vil bli blandet med overflatevannet. Sør i Nordsjøen resulterer dette at det på høsten blir en netto fluks av CO_2 fra havet til atmosfæren, mens i nord i Nordsjøen er vannet undermettet hele året (Omar et al. 2009).



Figur 2.3 Modellert årsvariasjon i Nordsjøen ca 60 nautiske mil øst for Tweed, det vil si i innstrømmende Atlanterhavsvann. (a) Fluks av CO_2 i mg C m^{-2} mellom hav og atmosfære, negative verdier representerer netto fluks til vannkollonnen. (b) Dybdefordeling av pH-utviklingen gjennom året. (c) Primærproduksjon–pelagisk respirasjon i mg C m^{-3} . (d) Ut-gassing av CO_2 fra benthos i mg C m^{-2} (Fra Blackford og Gilbert 2007).

Nordsjøen har komplisert hydrografi og innslag av flere forskjellige vannmasser, derfor vil fordelingen av den årlige variasjonen også være komplisert. Figur 2.4 viser at i de sterkt gjødslede områdene ved elvemunningene i Europa er variasjonsbredden på grunn av

primærproduksjon størst. I tillegg til døgnvariasjoner og årstidsvariasjoner som skyldes biologisk aktivitet er det geografiske forskjeller for pH i overflatevann. Kystnære farvann påvirkes av avrenning fra land, og dette vil påvirke pH i sterkt varierende grad.

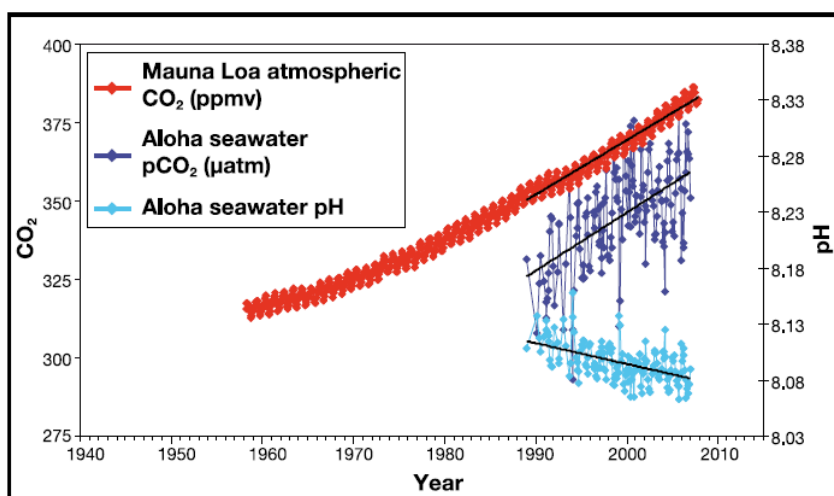


Figur 2.4 Fordeling av modellert årlig variasjonsbredde for pH i overflatevann i den sørlige Nordsjø. Fra Blackford og Gilbert 2007.

3. Globale og regionale særtrekk

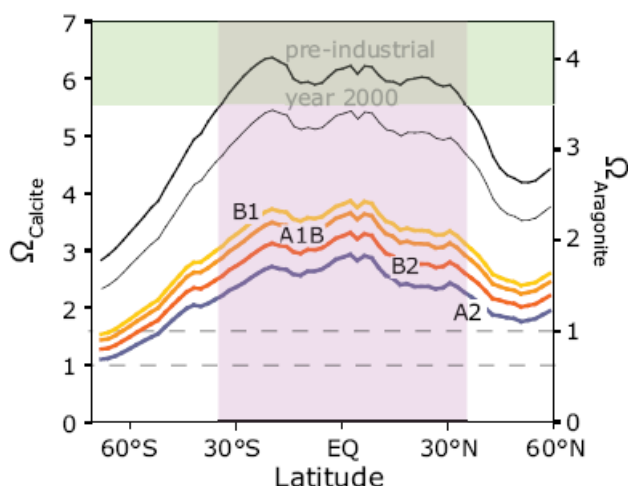
Normal historisk pH verdi ved havets overflate er antakelig på 8.1 – 8.2. Standard sjøvann (SWS) som blir produsert for nøyaktig kalibrering av vannprøver, skal m.a. holde pH på 8.1 basert på pH skalaen for sjøvann: $[H^+]_{SWS} = ([H^+] + [H_2SO_4^-] + [HF])$ (Millero et al. 2008). Det er påpekt at forsuringa i dag er på om lag -0.1 i pH, relativt til førindustriell tid (Haugan og Drange 1996, Wallace 2001). Dermed er gjennomsnittet i dag trolig redusert til 8.0 – 8.1.

Det finnes relativt få tidsserier med målinger av de relevante variablene som kan dokumentere havforsuring direkte, men på en stasjon i nærheten av Hawaii har man en slik tidsserie (Figur 3.1). På den inaktive vulkanen Mauna Loa ligger også målepunktet for den lengste måleserien av CO_2 i atmosfæren (data fra 1958 til nå). Den direkte sammenligningen viser at deltrykket av CO_2 i overflatevannet følger økningen av CO_2 i atmosfæren tilnærmet lineært. Følgelig synker også pH. En tilsvarende måleserie for åpent hav er også tilgjengelig for Atlanterhavet fra målinger et stykke sørøst for Bermuda og den samme utviklingen har funnet ved denne lokaliteten.



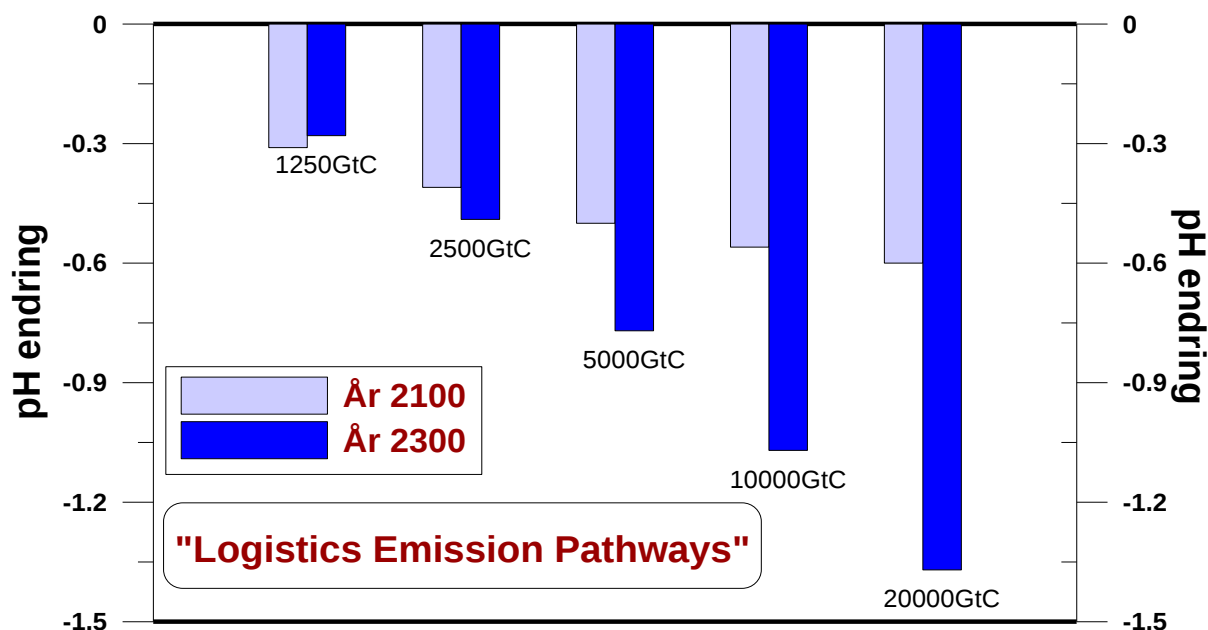
Figur 3.1 Utviklingen av deltrykket av CO_2 i luft og i sjøvann og forsuringen i overflatevann ved Hawaii i Stillehavet. Fra Royal Society policy Document 12/05, Juli 2005, ISBN 0 85403 617 2.

Forsuringen globalt fører til at metningsgraden for kalkmineralene synker (Figur 3.2). Metningsgraden er lavest på høye breddegrader, og konsekvensene av forsuring ventes derfor å gjøre seg gjeldende tidligst i arktiske farvann.



Figur 3.2 Metningsgraden for aragonitt og kalsitt (begge kalsiumkarbonat) fra sør til nord i havets overflate til ulike tidspunkt; før-industriell tid, i år 2000 og i år 2100 for fire framtidige utslipps-scenarier for CO₂. Aragonitt er vanlig byggemateriale for koraller, mens kalsitt er mest vanlig for plankton. Øvre deler av havet er naturlig overmetta for begge karbonatmineralene, noe som er et kriterium for opptak i organismene. Det vertikalt skraverete området viser områdene rundt ekvator der koraller hatt sine voksesteder opp til nå. Horisontalt skravert felt indikerer motsvarende metningsgrader som dette representerer. Kurven for år 2000 lå allerede under denne vekstgrensen (Ω ca 5.5 for kalsitt og 3.5 for aragonitt), og de framtidige kurvene ligger vesentlig lenger unna nødvendig metningsgrad. Fra Caldeira (2007).

Calderia og Wickett (2005) foretok detaljerte framtidsstudier over utviklingen på global skala, med fokus på relativt nær framtid, heholdtvis år 2100 og 2300. De la til tre grunn ulike beregningsbaner for CO₂ utslipp. Bane 5 som er vist i Figur 3.3 representerer framskriving på forbrenning av fossil brensel basert på et maksimum uttak relatert til sannsynlige tilgjengelige fossile ressurser som er estimert til å være mellom 1250 og 20000 gigatonn karbon. Bane 1 kan representere en nøktern framskriving, med store reduksjonstiltak og markert overgang til andre energikilder. Bane 5 representerer bruk av "all" tilgjengelig fossil brensel, også det som ligg lagret i havbunnen og permafrosten som biogent metan, og med lite eller ingen CO₂-rensing eller tiltak. Disse scenariene viser betydelig pH reduksjon, til dels mer enn 1.0 om 200 år.



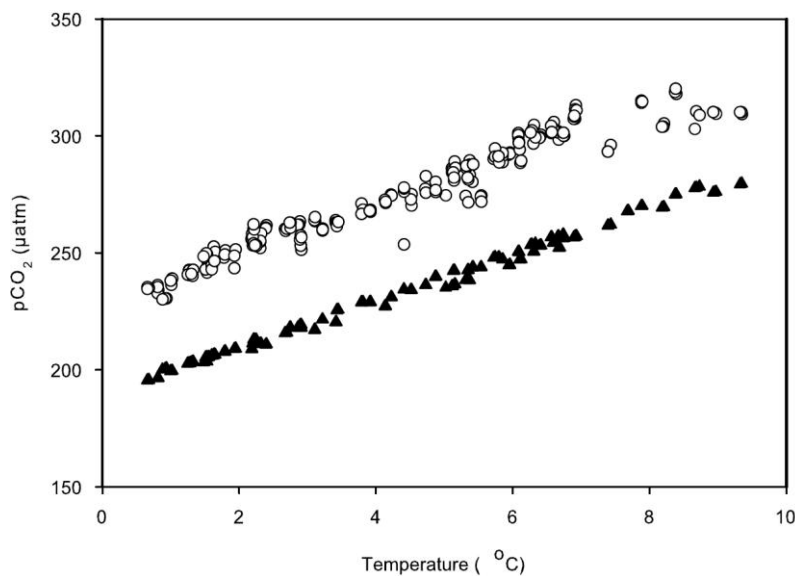
Figur 3.3 Forventede endringer i pH i havets overflate i år 2100 og 2300, basert på fem ulike scenarier for akkumulert forbruk og forbrenning av fossil brensel de neste 500 år, fra et moderat og gradvis svinnende uttak på 1250 gigatonn karbon til 20000 GtC som representerer maksimalt uttak. Etter Caldeira og Wickett (2005).

3.1 Norske farvann

Ved Geofysisk institutt (UiB og senere Bjerknessenteret for klimaforskning) har det vært utført feltnålinger av karbonatsystemet i havet på en rekke tokt med forskningsfartøyer de siste 20 år, og også om bord kommersielle båter (såkalte Voluntary Observation Ships (VOS)) i de siste fem år (Omar et al. 2003; Olsen et al. 2005; Omar et al. 2007; Skjelvan et al. 2008; Olsen et al. 2008, Omar et al., 2009). I tillegg har våre havområder vært besøkt av internasjonale ekspedisjoner. Disse målingene dokumenterer opptaket av antropogent CO₂ i havet, og kan også benyttes til å beregne forsureningen.

3.1.1 Barentshavet

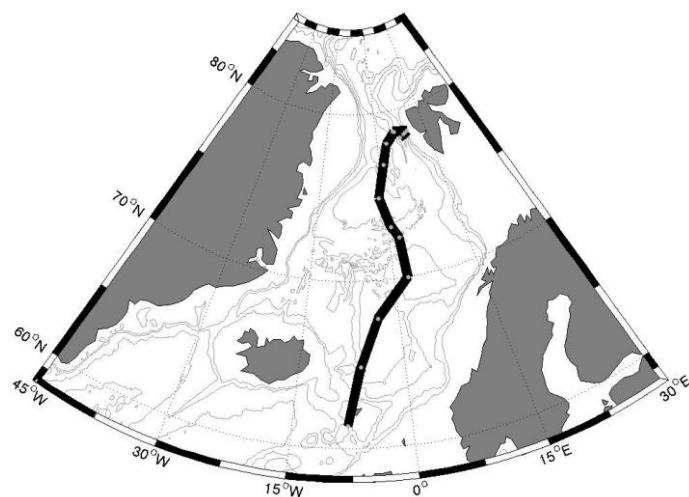
Barentshavet har vært kartlagt for relevante variable både i 1967 og 2000-2001 (Kelly 1970; Omar et al. 2003; Omar et al. 2007). Det totale innholdet av oppløst uorganisk karbon (DIC) økte i dette tidsrommet, og konsentrasjonen av karbonationet sank, og følgelig minket også metningsgraden for aragonitt (Figur 3.4). Deltrykket av CO₂ steg gjennomsnittlig med 42 ± 31 μatm gjevnt fordelt over Barentshavet i denne perioden (Omar et al. 2003).



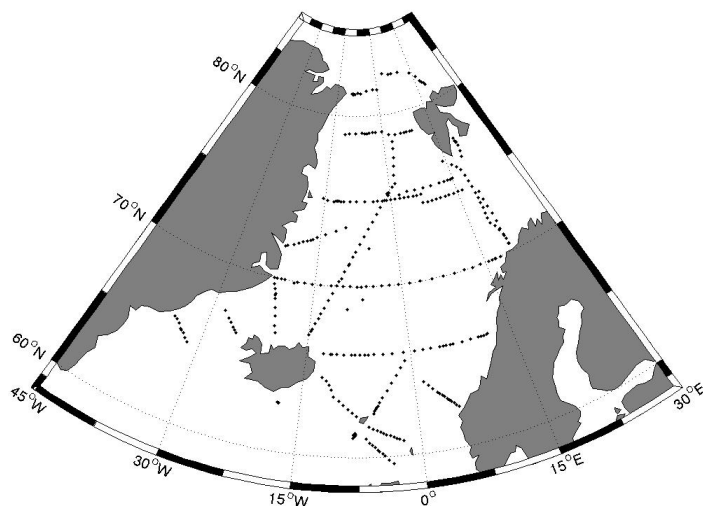
Figur 3.4 Målt økning i deltrykk av CO_2 i barentshavet i tidsrommet 1967 til 2000-2001. Sorte trekanter: 1967. Åpne sirkler: 2002. Fra Omar et al. (2003).

3.1.2 Norskehavet og Grønlandshavet

Bjerknessenteret har også publisert en rekke studier om utviklingen av mengde antropogent karbon i Norskehavet, Grønlandshavet og Islandshavet. Dette området omtales kollektivt som De nordiske hav, og figurene (Figur 3.5 og Figur 3.6) viser stasjonsnettene som ble besøkt i 1981 av en amerikansk ekspedisjon, og omkring år 2002 av Bjerknessenteret.



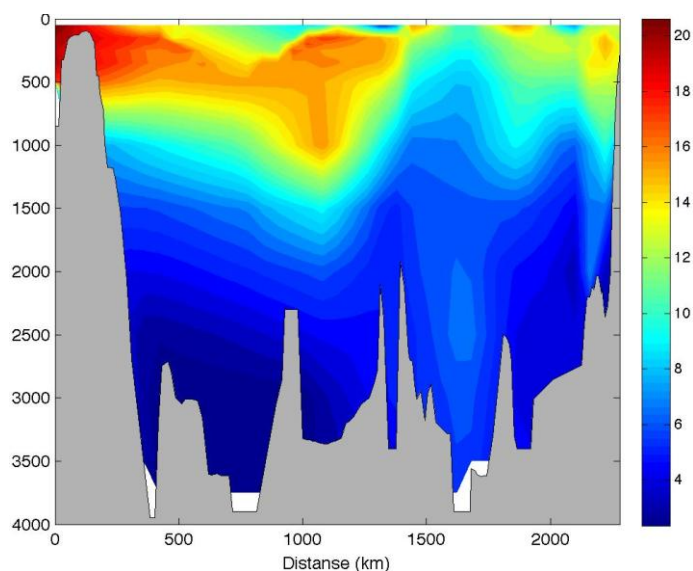
Figur 3.5 Stasjoner besøkt av programmet "Transient Tracers in the Ocean, North Atlantic Study (TTO-NAS)" i 1981. Grafikk og data fra Bjerknessenteret.



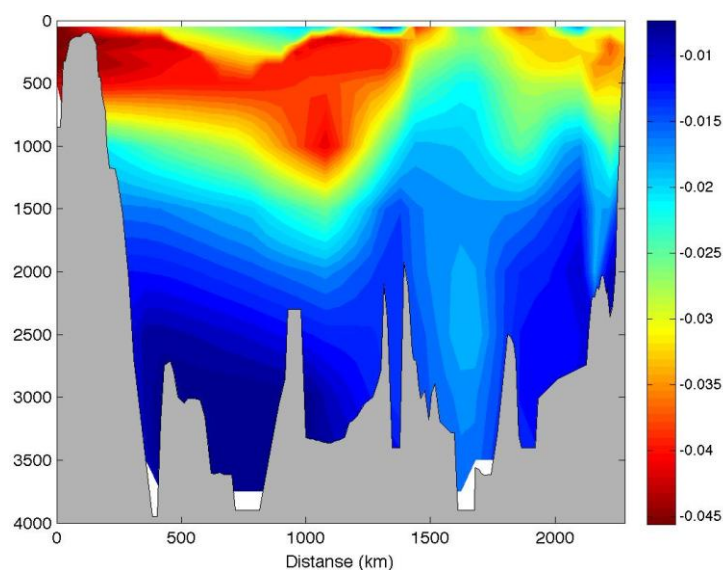
Figur 3.6 Stasjoner besøkt av Bjerknessenteret i 2002. Grafikk og data fra Bjerknessenteret.

Både i Grønlandshavet og Norskehavet økte innholdet av totalt uorganisk karbon, og signalet er detekterbart i hele vannsøylen (Figur 3.7, omarbeidet etter Olsen et al. 2006). Det er verd å merke at selv om forsurenningen starter ved at CO_2 løses i overflatevann, vil nedblanding av forsuret vann etter hvert gi effekter i hele vannsøylen, også i dype havområder som Norskehavet og Grønlandshavet. Lengst sør i Norskehavet økte innholdet av oppløst uorganisk karbon med over $18 \mu\text{mol kg}^{-1}$ fra 1981 til 2002 særlig som følge av import av vann anrikt med antropogent CO_2 fra lenger sør (Olsen et al. 2006). Videre forandringer er størst mellom 800 og 1200 meters dyp i Norskehavet. Grønlandshavet ble også tydelig anrikt på grunn av opptak av CO_2 .

I og med at karbonsystemet ble tilstrekkelig karakterisert både i 1981 og 2002, kan forsurenningen i hele vannsøylen beregnes for dette tidsintervallet (Figur 3.8). Lengst sør i Norskehavet sank pH med 0,045 enheter fra 1981 til 2002.

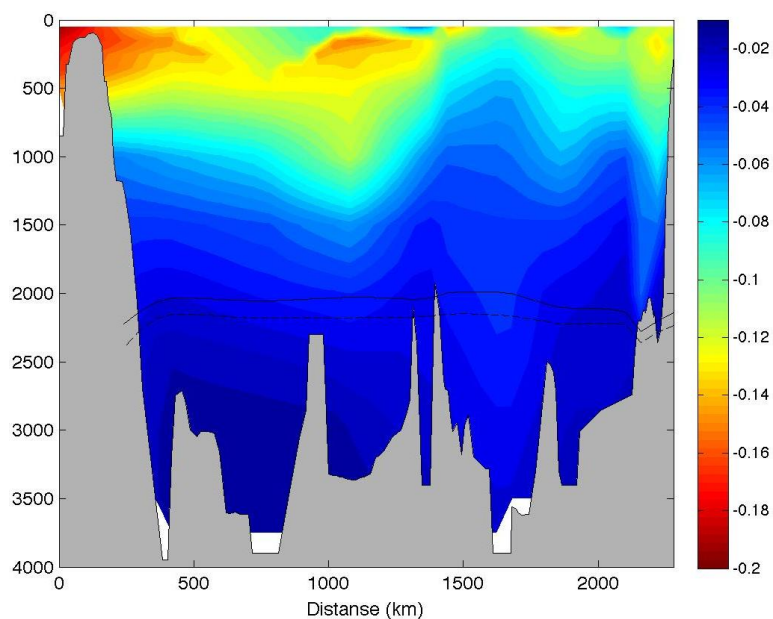


Figur 3.7 Forandringen (målt) i konsentrasjon av oppløst uorganisk karbon langs snittet vist i Figur 3.5 i tidsrommet 1981 til 2002. Norskehavet til venstre og Grønlandshavet til høyre. Beregninger og grafikk fra Bjerknessenteret.

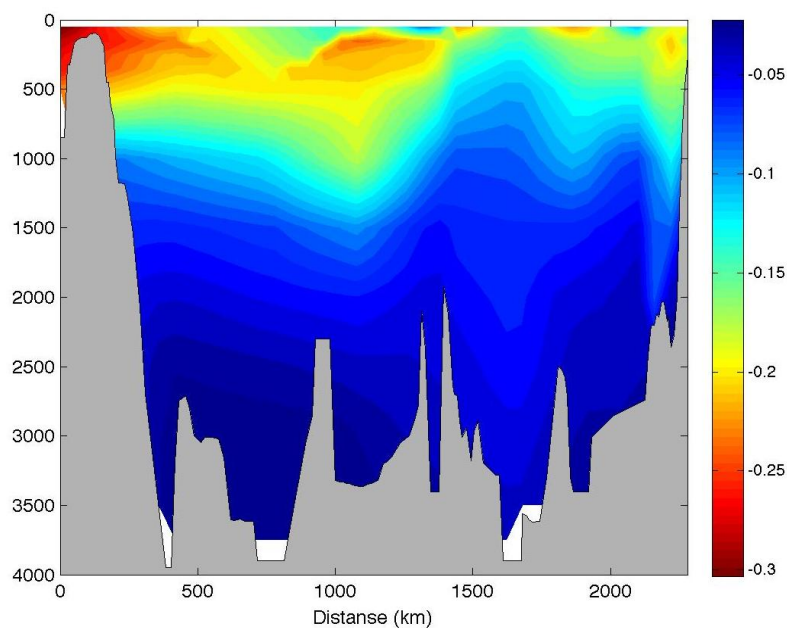


Figur 3.8 Forandringen (målt) i pH i Norskehavet (til venstre) og Grønlandshavet (til høyre) i tidsrommet 1981 til 2002. Beregninger og grafikk fra Bjerknessenteret.

Konsekvensen av forsuring kan også framstilles som metningsgrad (Ω) av kalsiumkarbonater (Figur 3.9 og Figur 3.10). Metningshorisonten tilsvarer det dyp hvor $\Omega=1$, og under dette dypet er vannet undermettet. For aragonitt ble metningshorisonten grunnere med over 100 meter. Kalsitt er mindre oppløselig enn aragonitt og hele vannsøylen er fremdeles overmettet med hensyn til kalsitt.



Figur 3.9 Forandringen i metningsgraden for aragonitt (Ω_{arag}) i Norskehavet (til venstre) og Grønlandshavet (til høyre) i tidsrommet 1981 til 2002, basert på målinger. Den stiplede linjen viser metningshorisonten i 1981, den heltrukne linjen viser 2002. Beregninger og grafikk fra Bjerknessenteret.



Figur 3.10 Forandringen i metningsgraden for kalsitt (Ω_{cal}) i Norskehavet (til venstre) og Grønlandshavet (til høyre) i tidsrommet 1981 til 2002, basert på målinger. Beregninger og grafikk fra Bjerknessenteret.

3.1.3 Nordsjøen

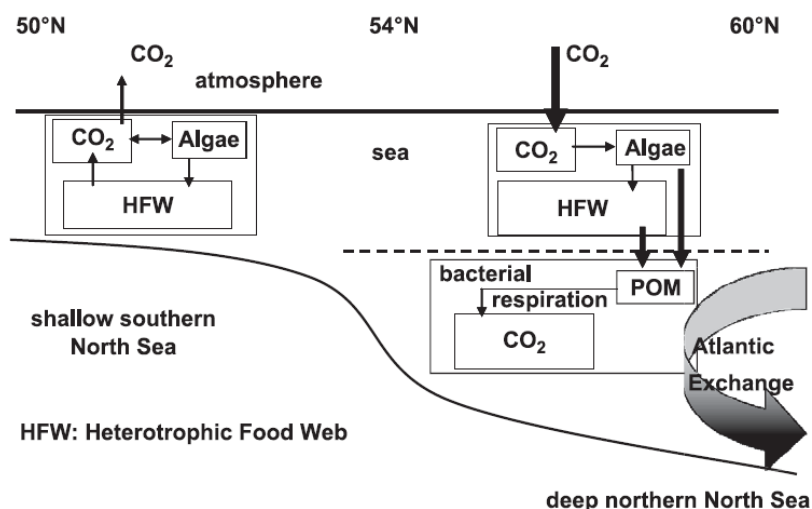
Der finnes en rekke studier av karbonsyklus i Nordsjøen (Pegler og Kempe 1988; Kempe og Pegler 1991; Bozec et al. 2005; Thomas et al. 2005; Bozec et al. 2006; Omar et al. 2009).

Nordsjøen er sammensatt av en rekke forskjellige vannmasser (Tabell 3.1). Karbonsyklus er vil være influert av dybde og sirkulasjonsforhold, og den grunne sørlige delen vil være preget av mer direkte utveksling med havbunnen, mens i de dypere nordlige områdene vil heterotrofe bakterielle prosesser i bunnvannet være en sentral del av vannsøylens karbonsyklus (Figur 3.11).

Tabell 3.1 Karakterisering av de tre hovedvannmassene som påvirkerfordelingen av karbondioksid i overflaten av Nordsjøen på sensommeren.

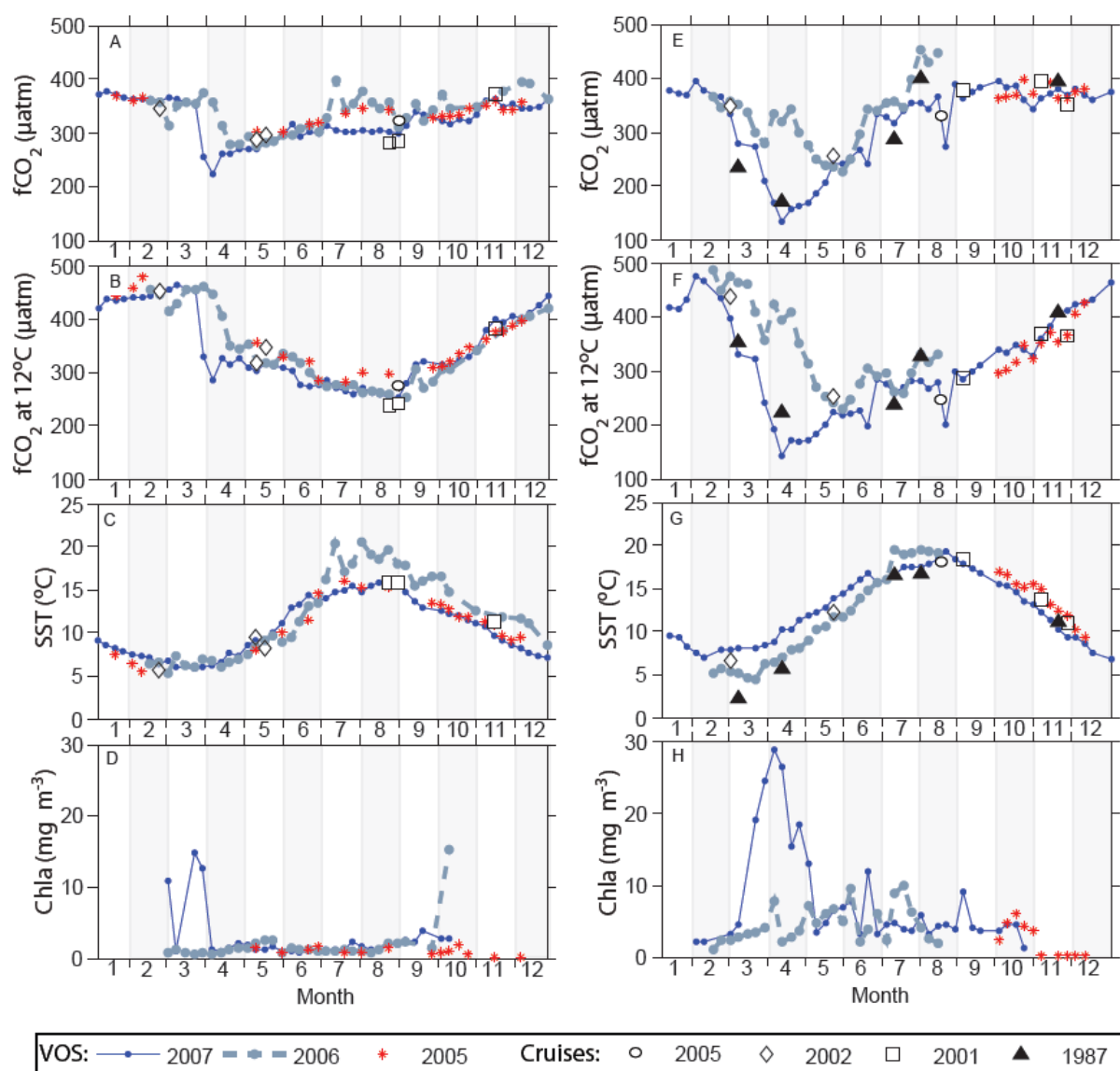
	Tyske- bukta	Sentral området	Skagerrak
Salinitet	31,2-34,5	≈35	27,2-34,5
Temperatur	14,0-19,2	11,0-16,0	16,5-19,0
DIC ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	2060-2130	2000-2070	1930-2030
pCO ₂ (μatm)	290-490	220-350	190-300
NO _{3/2} (μM)	0-4,70	0-0,20	0-0,20
PO ₄ ²⁻ (μM)	0-1,00	0-0,05	0-0,04

For hver variabel er grenseverdiene i overflatevannet fra 97 undersøkte stasjoner angitt. Tabellen er oversatt fra Bozec et al. (2005).



Figur 3.11 Skjematisk framstilling av karbonsyklus i den sydlige og den nordlige Nordsjøen. I de grunne sydlige områder er vannsøylen netto heterotrof og eksporterer CO₂ om sommeren, i de dypere nordområdene er vannsøylen netto autotrof, og disse vannmassene representerer et netto sluk av CO₂ fra atmosfæren om sommeren. Fra Bozec et al.(2005).

I følge Bozec et al. (2005) absorberer den nordlige delen mer CO₂ fra atmosfæren enn den tar opp i løpet av sommeren, men i den sørlige delen er det omvendt. Dette var basert på målinger fra sommersesongen, men data fra hele året samlet inn fra målinger av deltrykk av CO₂ i overflatevann målt kontinuerlig i vanninntaket på skip i rutetrafikk gir et mer detaljert bilde. Figur 3.12 viser resultater fra målinger og beregninger basert på hyppige målinger i områder både sør og nord i Nordsjøen.

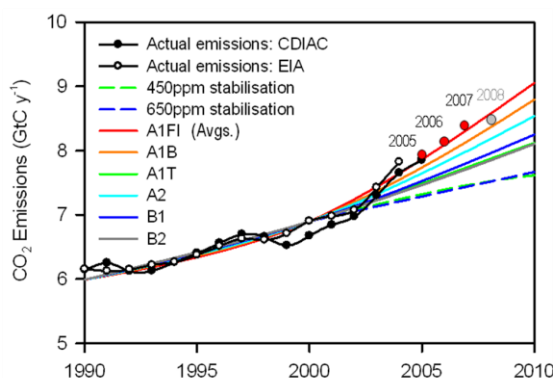


Figur 3.12 Årstidsvariasjoner i Nordsjøen. Paneler til venstre: Den sørlige Nordsjøen. Paneler til høyre: Den nordlige Nordsjøen. Øverst deltrykk karbondioksid ($f\text{CO}_2$). Nest øverst: temperaturnormalisert deltrykk. Nest nederst: Sjøvannstemperatur ved overflaten (data fra satellitt). Nederst: Klorofyll i overflatevann (data fra satellitt). Fra Omar et al. (2009).

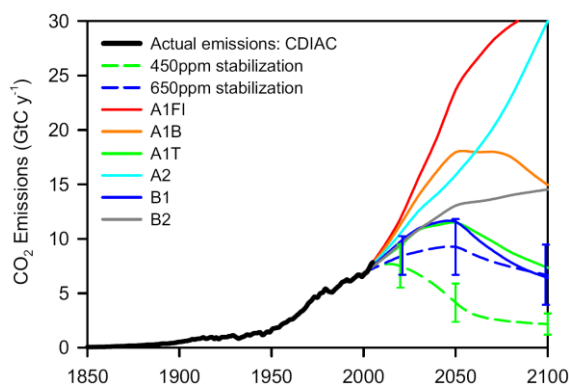
Årsgjennomsnitt for hele Nordsjøen viste undermetning med hensyn på $f\text{CO}_2$, dette viser at Nordsjøen som helhet tar opp netto CO_2 fra atmosfæren. I sør er imidlertid områder som i sommersesongen fremviser overmetning og derved utgassing.

4. Forventet utvikling fram mot 2100

De siste årene har de reelle utslippene av CO₂ til atmosfæren vært større enn det mest pessimistiske scenarioet for utslipp som har vært anvendt av IPCC (Special Report on Emissions Scenarios-SRES 2000), bortsett fra 2008 hvor global finanskriser dempet veksten i utslippshastigheten (Figur 4.1). Opptaket av karbon i havet i framtiden vil være avhengig av hvilket utslippsscenario som blir realisert (Figur 4.2).

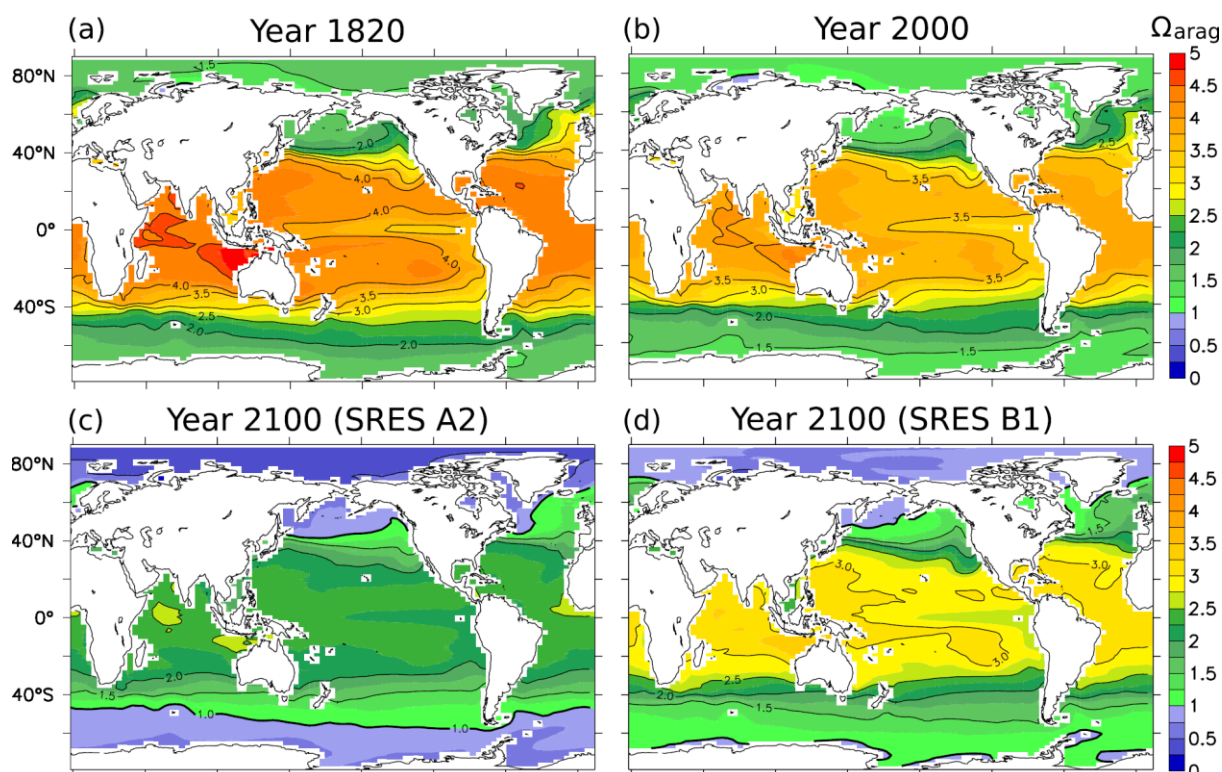


Figur 4.1 Globalt utslipp av CO₂, sammenlignet med modellerte framtidsscenarier. Kilde : http://www.grida.no/publications/other/ipcc_sr/?src=/climate/ipcc/emission/.



Figur 4.2 Modellerte framtidsscenarier basert på forskjellige forutsetninger om utvikling og tiltak. Fra Raupach et al. (2007).

Steinacher et al. (2009) har simulert framtidig global utvikling av forsuring og metningstatus for aragonitt og har lagt særlig vekt på utviklingen i polare farvann. Figur 4.3 viser den globale utviklingen for metningsgrad av overflatevann. Vi ser at fram til nåtid har vi hatt moderat overmetning med Ω_{arag} verdier i området 2 til 2,5 i nordiske farvann, men i år 2100 forventes undermetning nord for Lofoten under begge utslippsscenarioer.



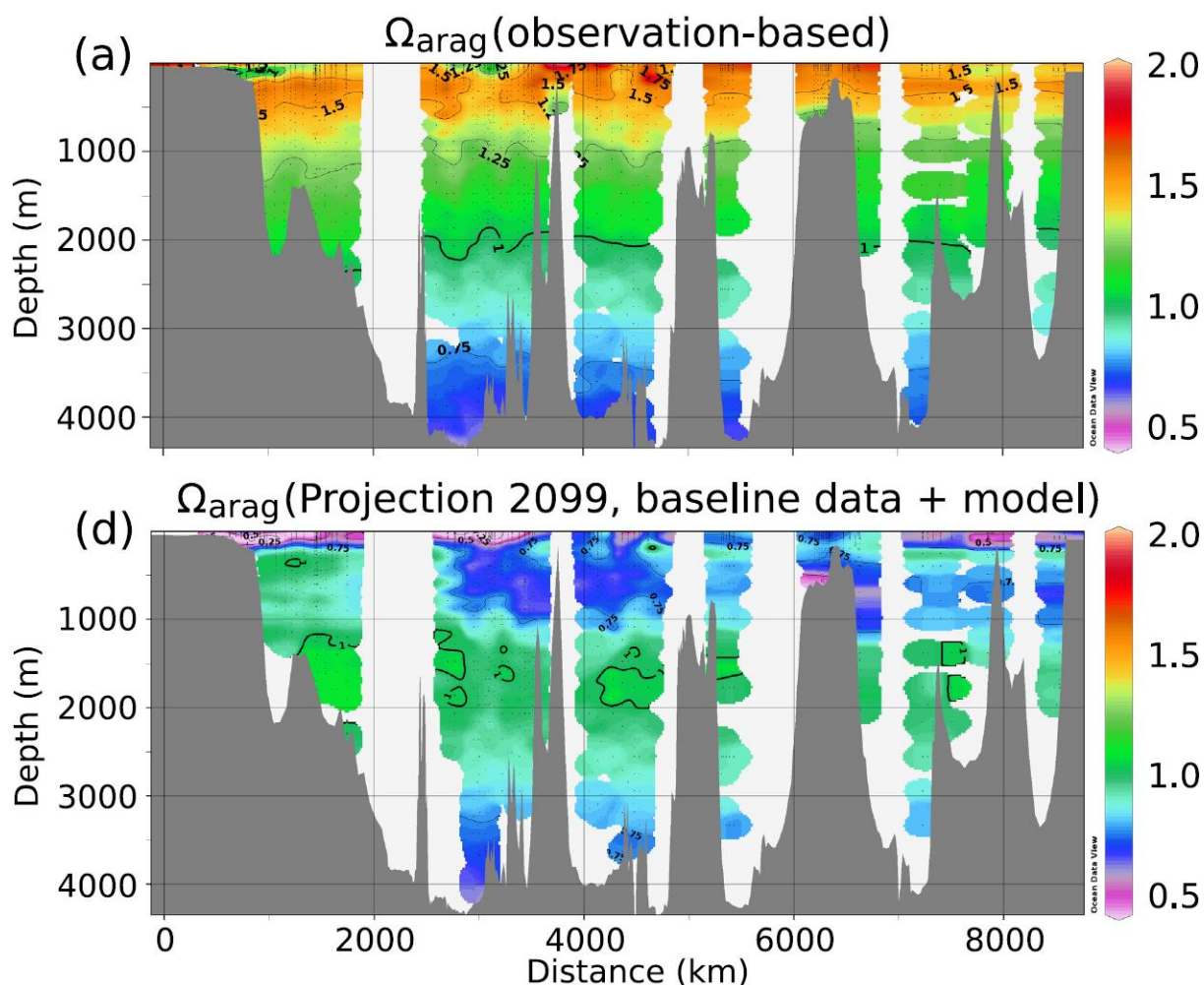
Figur 4.3 Metningsgrad for aragonitt i overflaten av havet. Øverst: Utvikling fra førindustriell tid til i dag. Nederst prognose for 2100 under to utslippsscenarier. Fra Steinacher et al. (2009).

4.1 Barentshavet og Polhavet

Kaldt sjøvann kan løse større mengder CO_2 og andre gasser enn varmt vann. Slikt vann er mindre overmetta enn varmt sjøvann for de vanlige formene av kalsiumkarbonat og polare og subpolare områder slik som Norskehavet og Barentshavet vil derfor være særdeles sårbare i høve til CO_2 /forsuring. Det er gjort modellstudier ved Universitetet i Bergen (Bergen Climate Model) som inkluderer framtidig utvikling i CO_2 og pH i Norskehavet med framskriving for CO_2 i atmosfæren basert på en økning i konsentrasjon på $1\% \text{ år}^{-1}$, slik at doubling i forhold til år 2000 blir nådd innen år 2075. Simuleringene viser at reduksjonen i pH kan bli størst i vestlige del av våre havområder, 0,34 enheter i Grønlandshavet, og noe lavere sør for Island-Færøyane ryggen, ($< 0,3$ reduksjon). Dette harmonerer med projeksjonene for Arktis med reduksjon på 0,45 pH-enheter innen utgangen av det inneværende hundreåret (Steinacher et al. 2009).

Simuleringene foretatt av Steinacher et al. (2009) viser at Polhavet vil være det havområdet hvor de største pH endringene vil finne sted i inneværende århundre. Den nåværende pH i

overflaten er per i dag 0.06 pH enheter over globalt gjennomsnitt, men vil falle med -0,45 enheter i A2-scenariet og med -,23 enheter i B2, og ved slutten av århundre vil pH ligge lavere enn globalt gjennomsnitt, med 0.09 enheter i A2.



Figur 4.4 Øverste panel viser aragonitt metningsgrad basert på observasjoner fra den svenske isbryteren Oden langs en serie transekter i Polhavet. Ruten starter i Beringstredet (0 km) passerer over Nordpolen (2500 km) og fortsetter til Svalbard (3750 km). Derfra til Laptev havet (8600 km) i en sikk-sakk rute som krysser Det Eurasiske bassenget tre ganger. Nederste panel viser prognosen langs den samme ruten i 2099. Fra Steinacher et al. (2009).

Forandringene vil være sterkest i overflatevann, men hele vannsøylen vil bli berørt. Polhavet er dag overmettet for aragonitt ned til 2000 meters dyp, mens prognosen for 2099 gir undermetning i nesten hele vannsøylen (Figur 4.4). Simuleringen av metningsgrad ble fortatt langs en toktrute hvor empiriske data var tilgjengelige, og dekker tre transekter over det eurasiske bassenget samt et transekt i Laptev havet.

Simuleringene viser at undermetning for kalsiumkarbonater ikke blir jevnt geografisk fordelt over hele havoverflaten, heller ikke jevnt fordelt over året. Resultatene i

Tabell 4.1 viser at allerede i neste tiår vil periodevis deler av overflatevannet i Polhavet være undermettet for aragonitt. Hastigheten for utviklingen er selvsagt avhengig av hvilket utslippsscenario som blir realisert, og

Tabell 4.1 demonstrerer forskjellen mellom SRES A2 og SRES B1 for utviklingen i Polhavet.

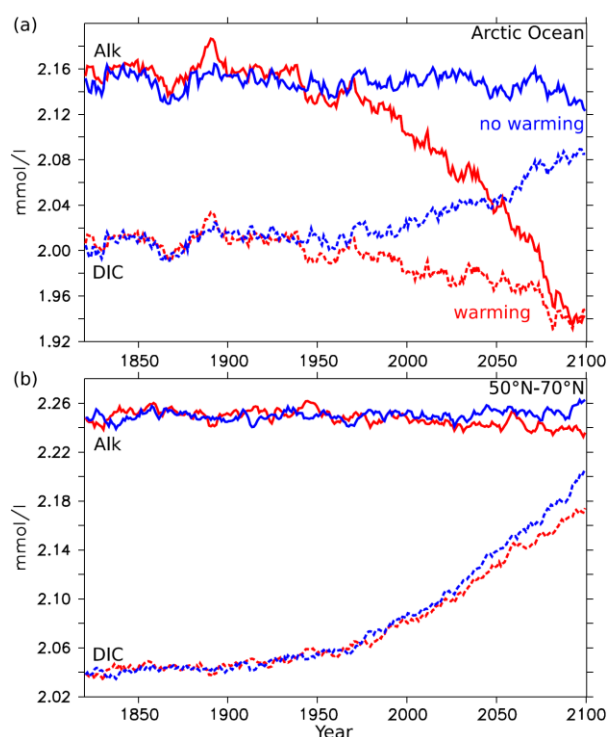
Tabell 4.1 Arktis: Eksempel på nivåer av aragonitt undermetning ($\Omega_{\text{arag}} < 1$) og CO₂ konsentrasjon i atmosfæren samt årstallet for realisering av eksemplene under IPCC scenario A2 og B1. Nivå ble definert som andel av havarealet hvor overflatevannet vil være undermettet en angitt del av året. Fra Steinacher et al. (2009).

Nivå (fraksjon havareal og andel av året med undermetning)	CO ₂ (ppm)	Årstall A2	Årstall B1
10%, ≥ 1 måned	409	2016	2018
10%, hele året	450	2029	2034
50%, ≥ 1 måned	520	2047	2068
50%, hele året	552	2054	-
100%, ≥ 1 måned	634	2070	-
100%, hele året	694	2080	-
Hele vannsøylen	765	2090	

Ved Bjerknessenteret for klimaforskning er det foretatt modellering av utviklingen i nordområdene med som også gir mer detaljer om den geografiske fordelingen av forsuringen. Rundt 2060 vil alle sokkelhavene rundt i Arktis være undermettet på aragonitt. Dette gjelder også det nordlige og østlige Barentshav.

Det er ikke bare forsuringen som er relativt sterkere i Arktis enn i resten av verdenshavene, dette gjelder også økningen i sjøtemperatur. Oppvarmingen i seg selv vil forsterke senkingen av Ω_{arag} og pH i overflatevannet med respektivt 22% og 27% (Figur 4.5). I simulering uten oppvarming vil alkaliniteten nesten ikke forandres i Polhavet, men løst uorganisk karbonat vil øke på grunn av opptak av antropogent CO₂ fra atmosfæren. Oppvarmingen fører til at både

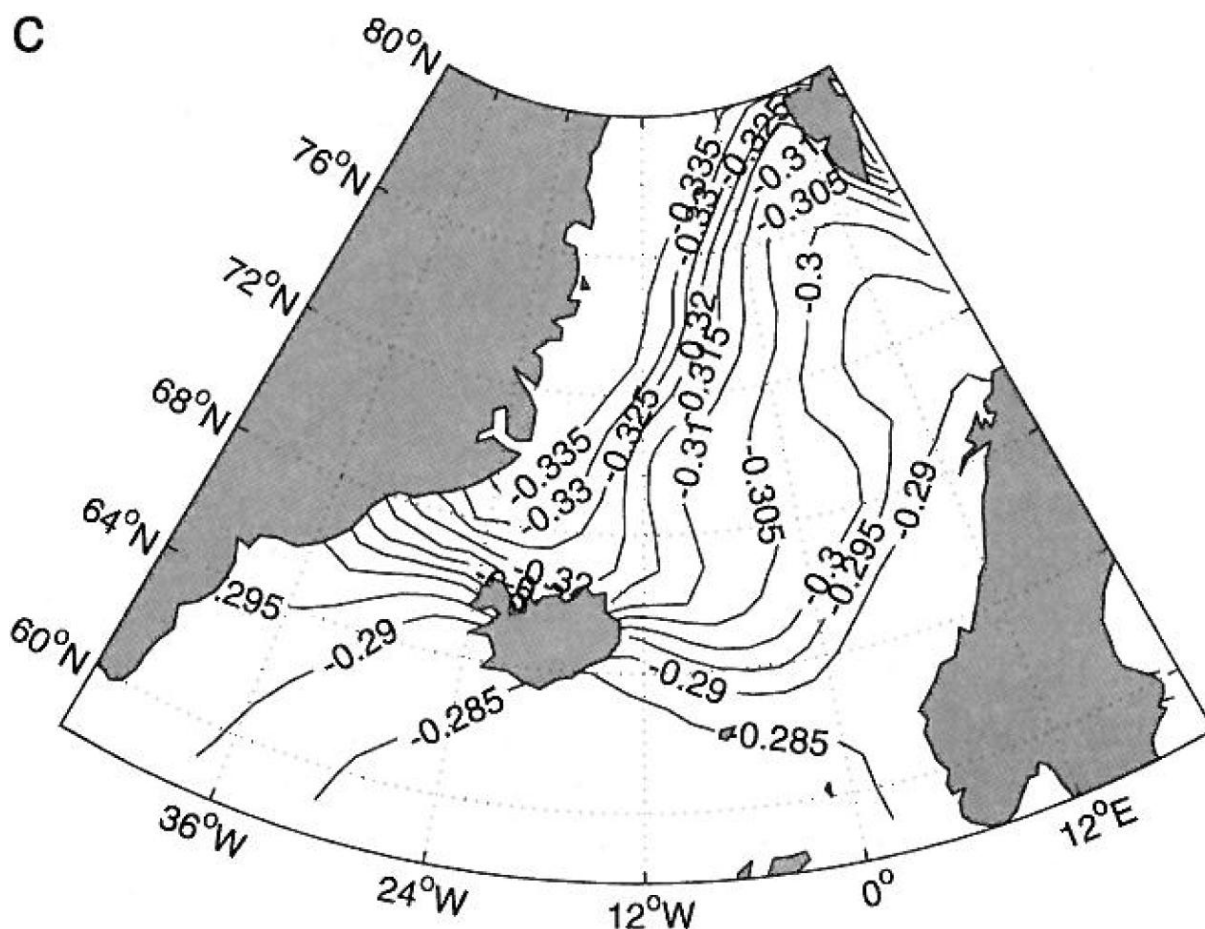
alkalinitet og DIC minker, og dette er forsterket av øket fortynning av sjøvannet med øket ferskvannstilførsel. Tilførsel av antropogen CO_2 fører til at DIC synker mindre enn alkaliniteten, og denne forskjellen er bestemmende for CO_3 konsentrasjonen som minker mer i simulering med oppvarming enn uten, noe som igjen fører til at undermetningen forsterkes i simuleringen med oppvarming i forhold til simuleringen uten oppvarming (Figur 4.5, øverste panel). Denne effekten er omtrent neglisjerbar i sydligere farvann (Figur 4.5, nederste panel).



Figur 4.5 Simulert årlig middel for alkalinitet og oppløst uorganisk karbon (dissolved inorganic carbon, DIC) som konsentrasjon i overflatevann fra år 1820 til år 2100. Øverste panel: Polhavet. Nederste panel: Havområder mellom 50°N og 70°N. Uten oppvarming er utviklingen svært lik i begge områder (blå grafer). I Nordatlanten og det nordlige Stillehavet er forskjellen mellom alkalinitet og DIC tilnærmet lik med og uten oppvarming (røde grafer). Denne forskjellen er omtrent proporsjonal med konsentrasjonen av CO_3^{2-} . I Arktis reduseres alkalinitet betydelig og forskjellen mellom alkalinitet og DIC blir i praksis null ved slutten av dette århundre (fra Steinacher et al. 2009).

4.2 Norskehavet

I Norskehavet går det ikke fullt så fort som lenger nord i følge modellene, og undermetning er ikke spådd for overflatevannet i dette århundre. Vannet vil imidlertid bli surere og metningshorisonten vil stige (Figur 4.6). De tallrike kaldtvannskorallrevene som står langs Norskekysten vil bli stående i undermettet vann om utviklingen fortsetter. Røstrevet, som er det største kjente kaldtvannskorallrevet i verden, vil bli utsatt for vann undermettet for aragonitt omkring 2080, i følge simuleringer utført av Richard Bellerby ved Bjerknessenteret.



Figur 4.6 Forandringen av pH i overflatevann i de Nordiske hav som følge av en dobling av CO_2 konsentrasjonen i atmosfæren i forhold til 371 ppm som var verdien i år 2000. Fra Skjelvan et al. (2005).

4.3 Nordsjøen

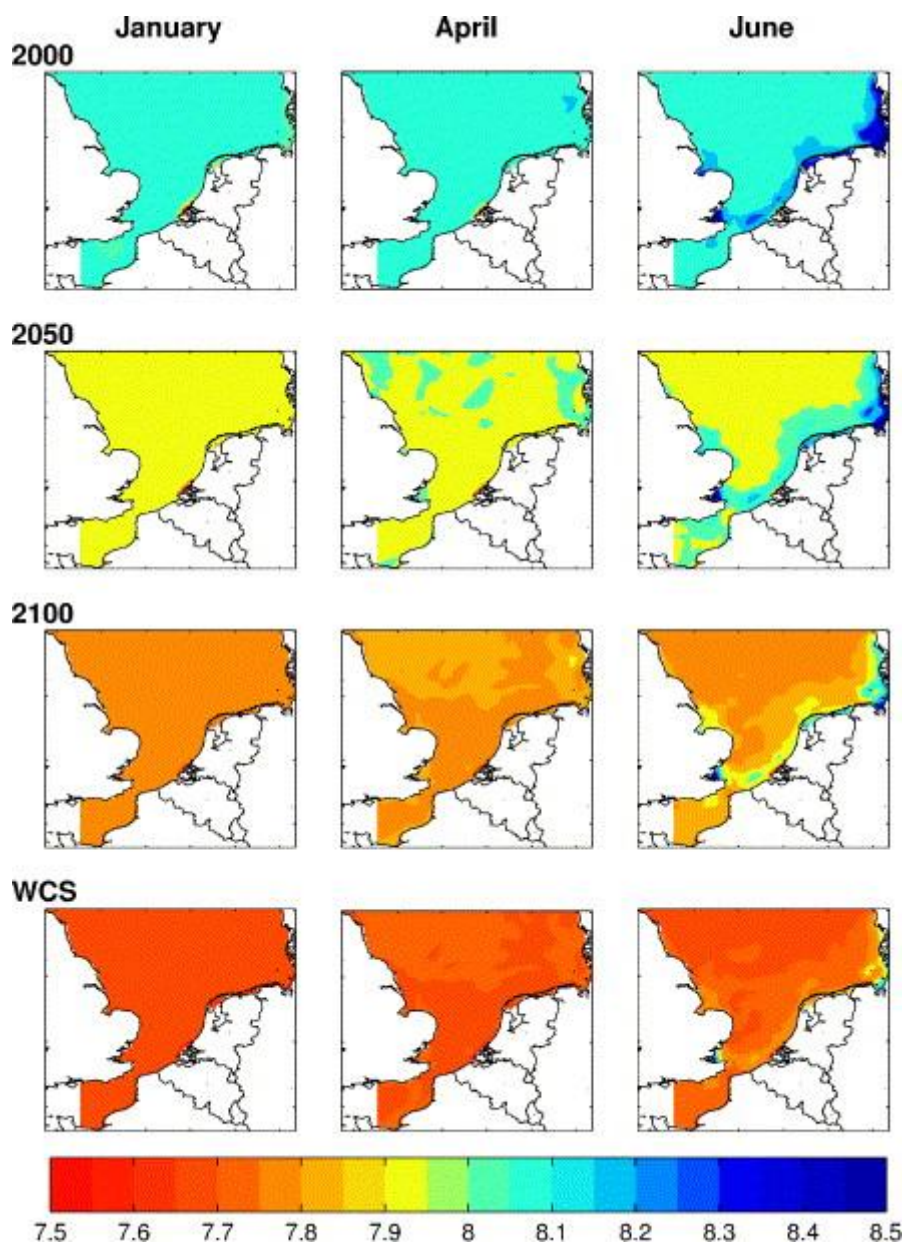
Det er publisert prognoser for forsuring i den sørlige del av Nordsjøen (Blackford og Gilbert 2007). Under middels optimistiske utslippsscenarioer vil pH synke med vel 0,1 enhet fram til midten av dette århundre (Tabell 4.2).

Tabell 4.2 Middel simulert pH i den sørlige Nordsjøen (Fra Blackford og Gilbert 2007).

CO ₂ i atmosfæren (ppm)	År (ca)	Middel pH	Standardavvik	Forskjell til før-industriell pH
375	2000	8.06	0.06	0.10
500	2050	7.95	0.06	0.21
700	2100	7.82	0.06	0.35
1000	2100-wcs [*]	7.67	0.06	0.49

^{*}wcs: worst case scenario

For den sørlige del av Nordsjøen finnes prognoser for utvikling av forsuringen (Figur 4.7). Forsuringen vil være betydelig uansett hvilken utslippscenario man tar utgangspunkt i. Allerede ved midten av inneværende århundre forventes pH å være lavere enn 8 hele året. Områdene influert av de store elvene vil ha en noe forskjellig dynamikk på grunn av at primærproduksjonen her vil bli stimulert av tilgangen på næringssalter. Tilsvarende silmuleringer fra den nordlige delen av Nordsjøen er enda ikke tilgjengelige, men det burde være av interesse å sette i gang arbeid med slik modellering. I dette området vil injeksjon av brakkvann fra Østersjøen være av vesentlig betydning, og dette vannet er allerede i dag undermettet med hensyn på kalsiumkarbonater om vinteren (Tyrrell et al. 2008).



Figur 4.7 Månedlig middel for pH i overflatevann for januar, april og juni i simuleringer. Fra øverst og nedover: år 2000 (CO_2 i atmosfæren = 375ppm), år 2050 (CO_2 i atmosfæren = 500ppm), år 2100 (CO_2 i atmosfæren = 700 ppm) samt år 2100 dersom utslippene fortsetter som i dag, "worst case scenario" (CO_2 i atmosfæren = 1000ppm). Fra Blackford og Gilbert (2007).

5. Forventede effekter av forsuring på arter og økosystem

Et generelt trekk er at vi har hatt lite kunnskap om effekter av forsuring i området av de pH-forandringene som forventes i de kommende 10 til 100 år, men i det siste er det blitt publisert en del studier (også norske) av effekter av moderat forsuring.

5.1 Organismer som danner kalkskall

Både blant dyr og alger finnes grupper som danner skall som hovedsakelig består av kalk (CaCO_3). Blåskjell, rur, strandsnegl og kråkeboller er velkjent fra fjæresonen. Kalkalger som for eksempel *Emiliana huxleyi* danner årvisse oppblomstringer for eksempel i Barentshavet og i enkelte norske fjorder. Blant dyreplankton med kalkskall kan vi nevne foraminiferene og pteropodene, som alle er viktige aktører i næringskjedene i våre farvann.

Løseligheten av kalk er avhengig av pH, trykk og temperatur. Når en kalkpartikkel synker, vil den ved et visst dyp begynne å gå i oppløsning. Dette dypet kalles metningsdypet for kalken. Over dette dypet er sjøvannet overmettet med hensyn til kalk, under dette dypet er det undermettet. Kalk løses lettere i kaldt vann enn i varmere vann. Derfor ligger metningsdypet grunnere etter hvert som man nærmer seg polarområdene (Orr et al. 2005, Steinacher et al. 2009).

Mineralogien skiller mellom to hovedtyper av kalk, kalsitt og aragonitt. Forskjellen er krystallstrukturen, og kalsitt er mer stabilt bygget enn aragonitt, og løseligheten er tilsvarende forskjellig. Følgelig ligger metningshorisonten for kalsitt dypere enn for aragonitt. I tillegg vil den kjemiske sammensetningen av biologisk dannet kalkskall variere i forhold ren kalsitt og aragonitt. For eksempel vil mengden innblandet magnesium variere, og større innslag av magnesium øker løseligheten av disse

Effekter av at sjøvannet tar opp karbonsyre

- pH synker
- Konsentrasjonen av karbonat går ned
- Løselighet av kalk øker

Kalk inngår i skallet til mange marine organismer.

Det er to krystallinske hovedformer av kalk: **Aragonitt** og **kalsitt**. Den første krystallformen er omtrent dobbelt så løselig som kalsitt.

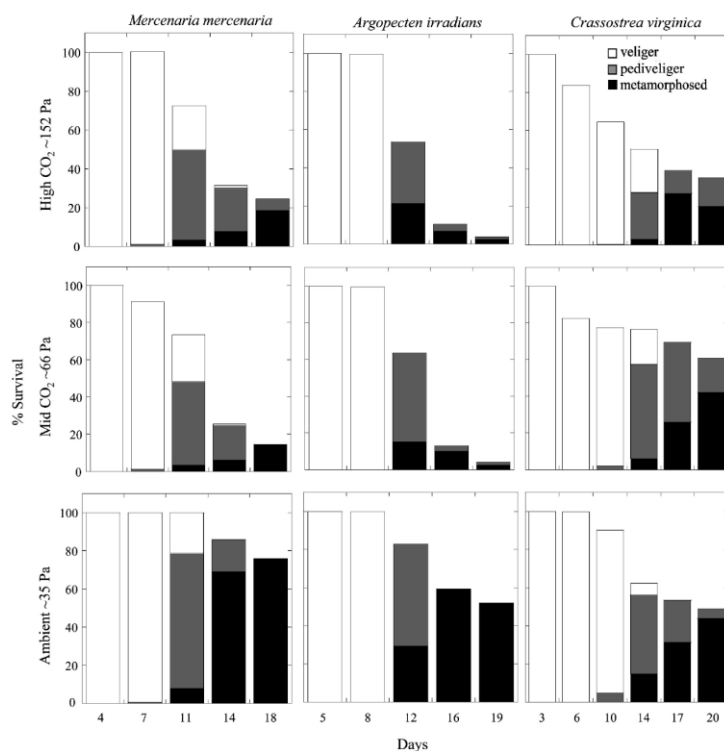
Stabiliteten til kalk kan angis som metningsgraden, Ω (omega).

$\Omega < 1$ betyr at vannet er undermettet. Dyr som danner kalkskall lager ikke rene mineraler, skallene har ofte innslag av organisk materiale og andre kationer enn Ca^{2+} , for eksempel magnesium.

mineralene. I tillegg vil kalk dannet av organismer kunne inneholde varierende innslag av organisk materiale. Konsekvensen av forskjellene fra rent mineralsk kalk er at det blir umulig å klart forutsi løselighetshastigheter ut fra data fra rene krystaller. Derfor må man bruke empiriske data for å lage prognoser om løselighetshastigheter av biogent kalk (f. eks. Anderson et al. 2007). Når vannet blir undermettet for kalk, vil kalken løse seg, men hvor fort dette går vil være avhengig av mange faktorer.

5.1.1 Blåskjell, østers og andre skalldyr

Skalldyr er sterkt sensitive for forsuring, og målt som reduksjon i skallvekst er det klart vist at økende forsuring fører til redusert veksthastighet og redusert størrelse på voksne dyr i oppdrett (Gazeau et al. 2007). Dette vil føre til nedsatt lønnsomhet i skalldyrnæringen, men nyere rapporter viser i tillegg sterk negativ effekt av forsuring på reproduksjonsstadier hos en rekke kommersielle skalldyrarter (Talmage et al. 2009). Artene viser forskjellig følsomhet (Figur 5.1). Skalldyrfisket i USA har i dag en verdi på ca 750 millioner dollar, dette vil være 10-25% lavere om femti år basert på de rapporterte fall i vekst av skalldyr (Cooley og Doney 2009). I dette estimatet er ikke problemene med reproduksjonsstadiene tatt med, så det må regnes som prematurt å sette opp slike regnskap før flere aspekter ved utviklingen er kjent.

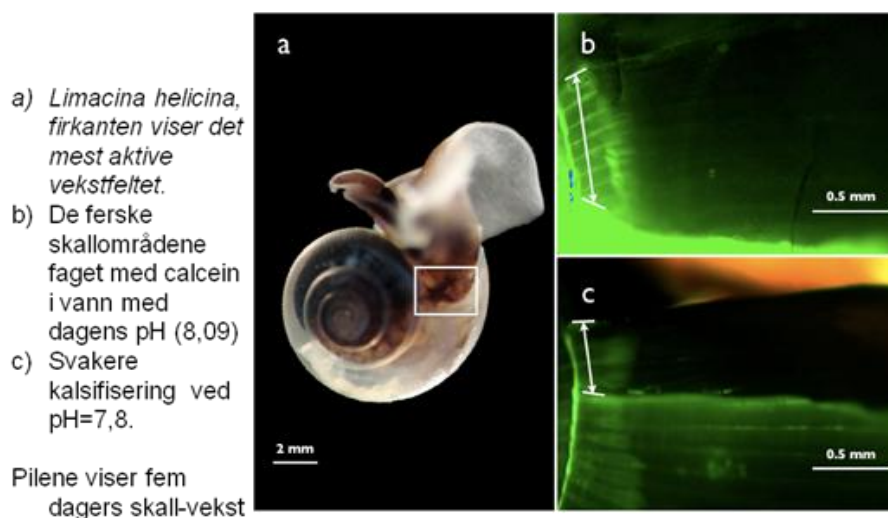


Figur 5.1 Effekt på overlevelse av forsuring gjennom tre uker og tre nivåer av CO₂ på tidlige livsstadier av tre amerikanske skjell ("clams", en kamskjellart og en østersart). Øverste panel: pH ca. 7,5; Midterste panel pH ca. 7,85, nederste panel: Nåværende CO₂, pH ca 8,05. Fra Talmage et al. (2009).

5.1.2 Vingesnegler (Pteropoder)

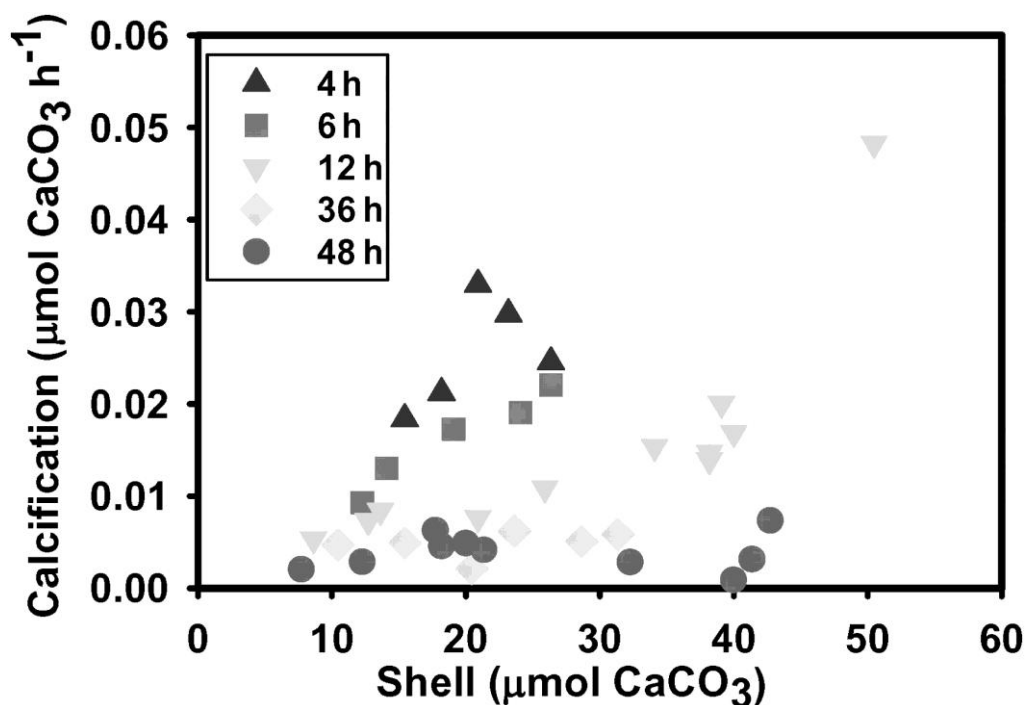
Vingesneglene spiller en betydelig rolle i marine næringsnett, særlig på høye breddegrader (Smetacek et al. 2004). Vingesneglene danner skall av aragonitt. Forringelse av disse bestandene vil være en betydelig forandring av økosystemet, og med totalt uforutsigbare konsekvenser. Skulle en så stor gruppe bli sterkt svekket, er det grunn til å ta det alvorlig. Det finnes lite forskning på den utbredelse, fødeinntak og generell økologi og fysiologi hos vingesneglene og det er derfor grunn til å øke forskningsinnsatsen. Hvilke effekter en forverring av vingesneglenes konkurranseevne for eksempel i Barentshavet kan medføre er et viktig spørsmål å utrede, ikke minst med tanke på fiskeressursene som står på spill.

Vingesnegl



Figur 5.2 Effekten av senket pH på sneglehusets vekstområder hos individ fra Kongsfjorden. Fra Comeau et al. (2009).

Vingesnegler fra Kongsfjorden ved Ny Ålesund viste svakere daglig skallvekst når de ble dyrket i vann med pH 7,8 (Figur 5.2). Undersøkelser av vingesnegler fra Stillehavet viste tilsvarende resultater når skjellvekst ble målt kjemisk som dannelsen av kalsiumkarbonat (Figur 5.3).



Figur 5.3 Netto kalsifiseringshastighet som funksjon av individstørrelse og inkuberingstid for den subarktiske euthecosomate pteropoden *Clio pyramidata* fra Stillehavet. Dyrene ble sortert etter størrelse og inkubert i en lukket beholder i forskjellig tid, og CO_2 fra deres egen metabolisme surgjorde vannet. Fra Fabry et al. (2008).

5.1.3 Kaldtvannskoraller

Kaldtvannskorallene er økosystemer av stor betydning som habitat for en rekke fisk og mange andre dyr. Det har i de siste årene blitt oppdaget stadig nye rev, særlig i norske farvann (Mortensen et al. 2001). Dette skyldes først og fremst forskningsinnsats og ny metodikk. Slike rev er antagelig fremdeles underestimert, ikke minst i farvann der havforskningen er mindre intensiv enn ellers i Europa. Ved Røst finnes verdens største kjente kaldtvannsrev, disse oasene på en ellers ugjestmild havbunn er en biologisk ressurs som det kunne være vel verdt å ta vare på (Figur 5.4).

Kaldtvannskorallrev

Røstrevet er verdens største kjente kaldtvannskorallrev

En rik biotop

Yngleplass for en rekke marine organismer

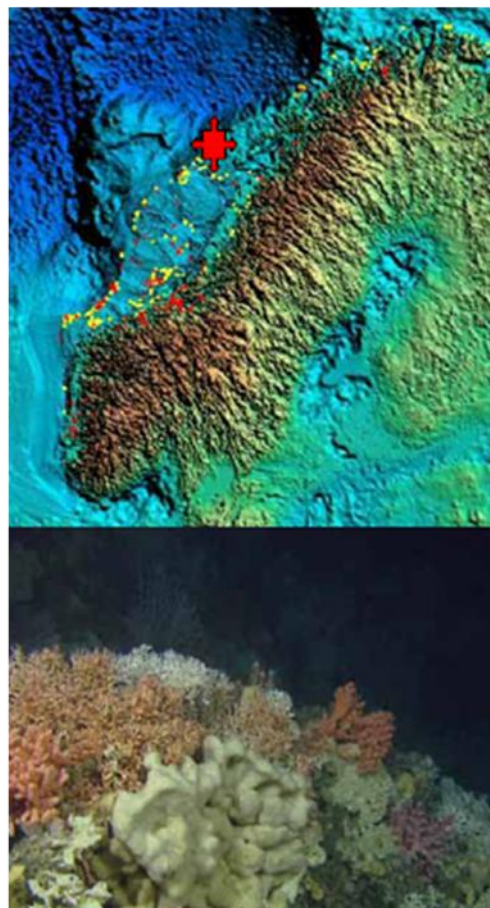
Vernet mot bunntråling

Røstrevet vil bli eksponert for korroderende sjøvann rundt 2040 om ikke dagens CO₂ utslipp reduseres kraftig



Røstrevet

Andre korallrev er vist med røde og gule markører.



Figur 5.4 Utbredelse av korallrev langs Norskekysten.

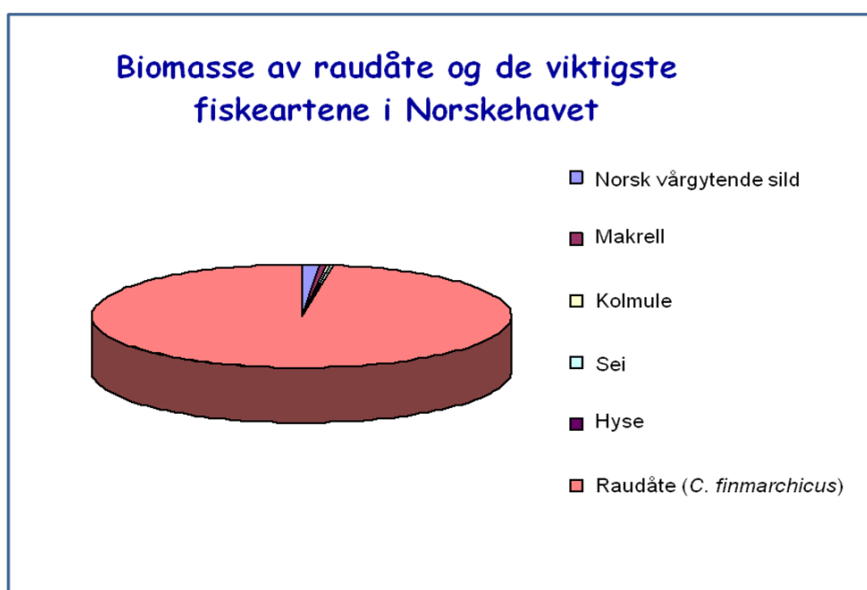
Korallrevene er bygget opp av aragonitt, og når forsuringen bringer metningshorisonten for dette mineralet til dypene for kaldtvannskorallene, vil forvitring som følge av ren kjemisk oppløsning av fundamentet for revene kunne føre til at de forsvinner i sin helhet (Turley et al. 2007). Det vil i en slik situasjon være lite hjelp i om korallene selv kan klare å vokse og tilpasse seg et liv ved lav pH. Dersom de døde kalkmassene forvitrer vil revet som økosystem uvegerlig gå tapt.

5.2 Krepsdyr

5.2.1 Raudåte

Raudåte er antatt å være det viktigste leddet mellom primærproduksjon og fiskelarver i våre farvann, og betydningen kan illustreres ved å sammenligne den totale biomassen av dette krepsdyret med biomassen av kommersielle fiskesorter (Figur 5.5) I tillegg finnes der et utall andre grupper av krepsdyr, og felles for alle er et eksoskjelett av kitin. Dette skallet er

riktignok hovedsakelig laget av organisk materiale, men det inneholder også kalsiumkarbonat som herdende faktor. Hvordan disse skallene vil reagere på forsuringen vites enda ikke, men dessverre er det vist at eggene til denne nøkkelarten i vårt økosystem vil ha dårligere overlevelse i en verden med høyt CO₂ innhold i atmosfæren (Mayor et al. 2007). Forsøkene rapportert av Mayor et al. (2007) var imidlertid utført ved urealistisk høye CO₂ konsentrasjoner, det er derfor viktig å gjenta lignende forsøk med realistiske scenarioer av både temperatur og CO₂, og i Norge burde vi ha et særskilt ansvar for iverksette realistisk forskning på denne og andre nøkkelarter i våre marine økosystem (Figur 5.5).



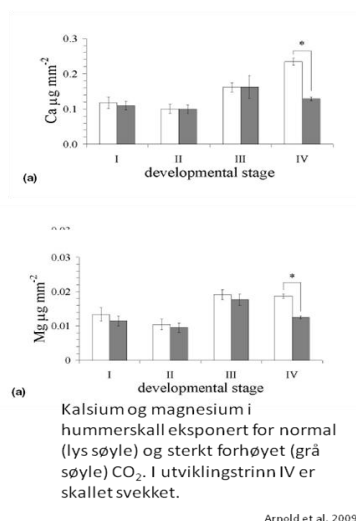
Figur 5.5 Raudåte er en nøkkelart i det marine økosystemet i norske farvann.

5.2.2 Hummer

Hummeren kan riktignok ikke sammenlignes med krill og raudåte når det gjelder kvantitativ betydning for økosystemet som helhet, men er likevel en art av betydning både økologisk og kulturelt. Det foregår forskning på mange aspekter ved dette dyret, og nylig er det vist at forsuring kan svekke styrken på skallet i tidlige livsstadier (Figur 5.6).

Styrken på hummerskall er avhengig av kalk, og svekkes ved forsurening.

Dette kan redusere hummerens konkurranseevne.



Figur 5.6 Forsøk med tidlige livsstadier av hummer viste at forsurening svekker kalsifisering av skallet i enkelte tidlige livsstadier.

5.2.3 Krabbe

Et eksempel på hvordan pH kan påvirke krepsdyr er rapportert fra studier av pyntekrabber fra Helgoland i Tyskebukta. Forskerne brukte hjerterefrekvens som indikator på fysiologisk respons, og fant at når pH ble senket i forhold til normalt sjøvann, ble varmetoleransen hos krabben nedsatt (Figur 5.7). En kombinasjon av varmere vann og lavere pH vil derfor innskrenke leveområdet for denne krabben. Effekten ble påvist ved en CO_2 konsentrasjon på 750 ppm, og ble forsterket ved 3000 ppm, men det siste er ikke noen realistisk atmosfære.

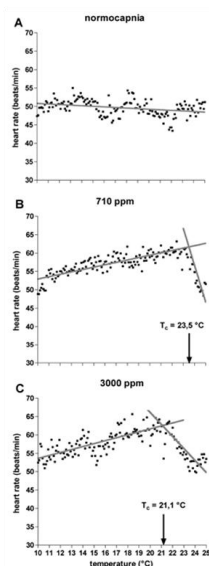


Eksempel: Fysiologiske forandringer hos krepsdyr

Figuren viser hjerterefrekvens som funksjon av temperatur hos *Hyas araneus* (sandpyntekrabbe).

Ved forhøyet CO_2 synker hjerterefrekvens over en "kritisk temperatur".

Walther et al. 2007



Figur 5.7 Ved sterk forsurening ble temperaturtoleransen hos sandpyntekrabben redusert. Fra Walther et al. (2007).

5.3 Pigghuder

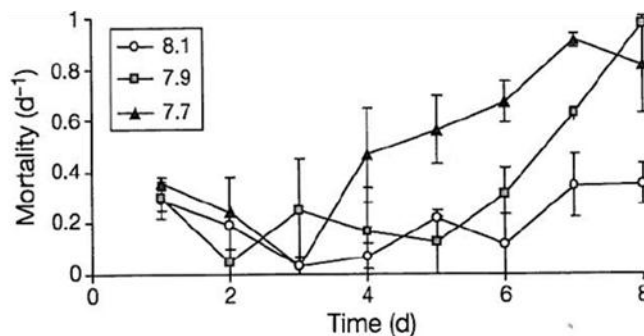
Pigghudene mangler oksygentransporterende pigment, har dårlig evne til ioneregulering og er avhengige av aragonitt i skallet både som voksne og som juvenile. Alle disse egenskapene gjør denne gruppen sårbar for forsuring, og for en art er øket dødelighet både hos voksne individer og på larvestadiet rapportert (Figur 5.8)

Pigghuder

Sjöstjernen *Ophiothrix fragilis* tåler dårlig forsuring.

Dødeligheten økte sterkt ved pH 7,7, i forhold til pH 7,9 og 8,1.

I tillegg var larvene mindre og hadde øket frekvens av deformiteter ved laveste pH.



Dupont S, Havenhand J, Thorndyke W, Peck L, Thorndyke M (2008) Near-future level of CO₂-driven ocean acidification radically affects larval survival and development in the brittlestar *Ophiothrix fragilis*. Marine Ecology-Progress Series 373:285-294

Ophiothrix fragilis (Hårstjerne)

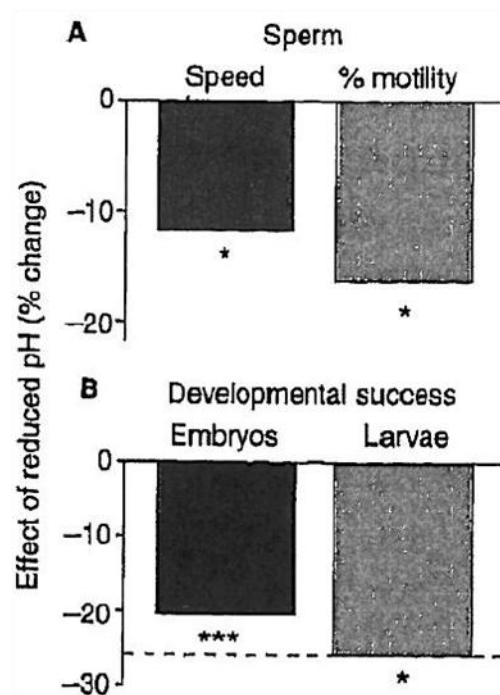
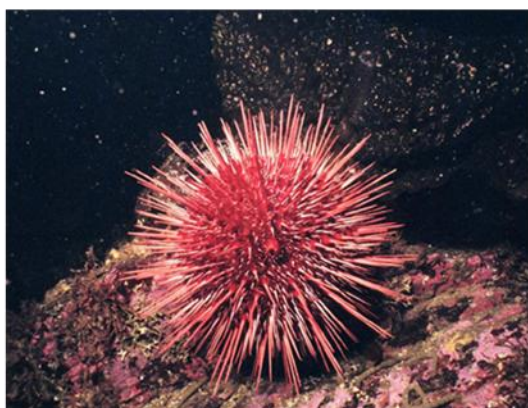
Figur 5.8 Økt dødelighet hos en sjøstjerne ved som effekt av moderat forsuring. Fra Dupont et al. (2008).

Det er demonstrert letalitet hos voksne kråkebolles har ved langtidseksponering allerede ved pH=7.9 for arter fra Stillehav, mens den vanlige norske arten kan være mer robust. Imidlertid ser det ut til at reproduksjonsstadiene er sårbare for forsuring (Figur 5.9). Nedsatt svømmehastighet hos spermier samt nedsatt embryonal utvikling ble påvist ved pH senkning på 0,4 enheter.

Tidlige livsstadier hos kråkeboller (*Hellocidaris erythrogramma*).

Effekter på kråkeboller av eksponering for sjøvann forsuret 0.4 pH enheter med CO₂

- A. Spermienes svømmehastighet som hastighet og bevegelighet.
- B. Avvik fra normal utvikling hos embryo og larver



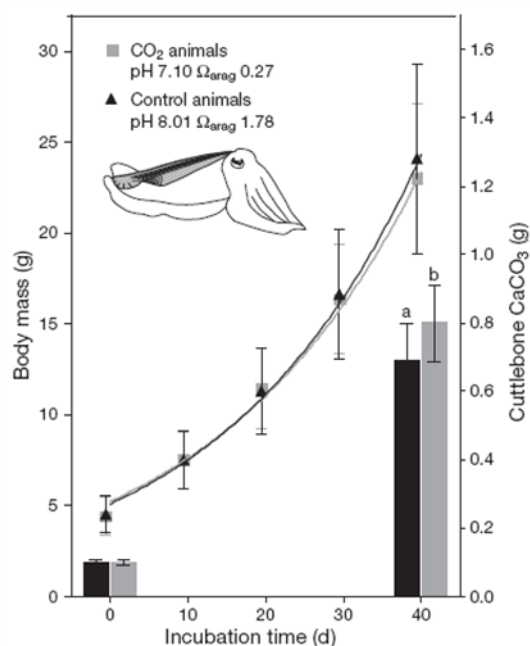
Fra Havenhand, J.N., Butler, F.-R., Thorndyke, M.C., Williamson, J.E. (2008) Near-future levels of ocean acidification reduce fertilization success in sea urchins. *Current Biology* 18, no 15:R651-R652

Figur 5.9 Effekt av forsurening på spermier og embryonale stadier av en kråkebolle.

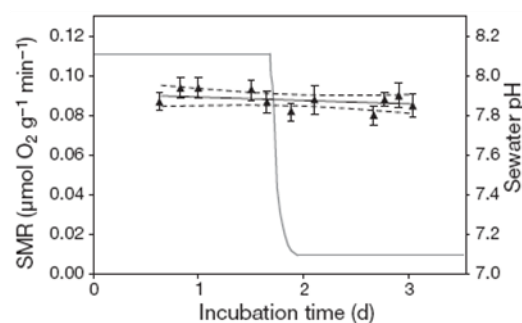
5.4 Blekksprut

I mye av litteraturen som rapporterer effekter av forsurening har man studert grupper hvor det faktisk forventes negative effekter, så som skalldyr og snegler. Det må forventes at en etter hvert får et noe klarere bilde av hvilke grupper som faktisk tåler forsurening, og som til og med kan få et konkurransemessig fortrinn i et surere hav. Slik informasjon vil være høyst nødvendig for å forutsi noen ting som helst om forsureningseffekter på økosystemnivå. Den tiarmede blekkspruten *Sepia officinalis* har vært testet for respons ved sterkt forhøyet CO₂ og viste full toleranse både når det gjaldt metabolisme og vekst (Figur 5.10). Dannelse av den indre kalsifiserte strukturen som har en skjelettfunksjon hos disse dyrene ble heller ikke hemmet i denne behandlingen. Disse dyrene ser derfor ut til å være tilpasset forhold med forhøyet CO₂, i alle fall fra juvenil til voksent stadium.

Blekkspruten (*Sepia officinalis*) ser ut til å tåle forsuring



Vekst (venstre akse) og kalsifisering (søylediagram) hos blekksprut, utsatt for normal (grå symboler) og sterkt forhøyet CO₂ (svarte symboler)



Sepia officinalis. Metabolisme hos individer utsatt for akutt forhøyet CO₂ (6000 ppm).

Figur 5.10 Vekst og metabolisme hos tiarmet blekksprut utsatt for sjøvann med sterkt forhøyet CO₂ (6000 ppm). Fra Gutowska et al. (2008).

5.5 Fisk

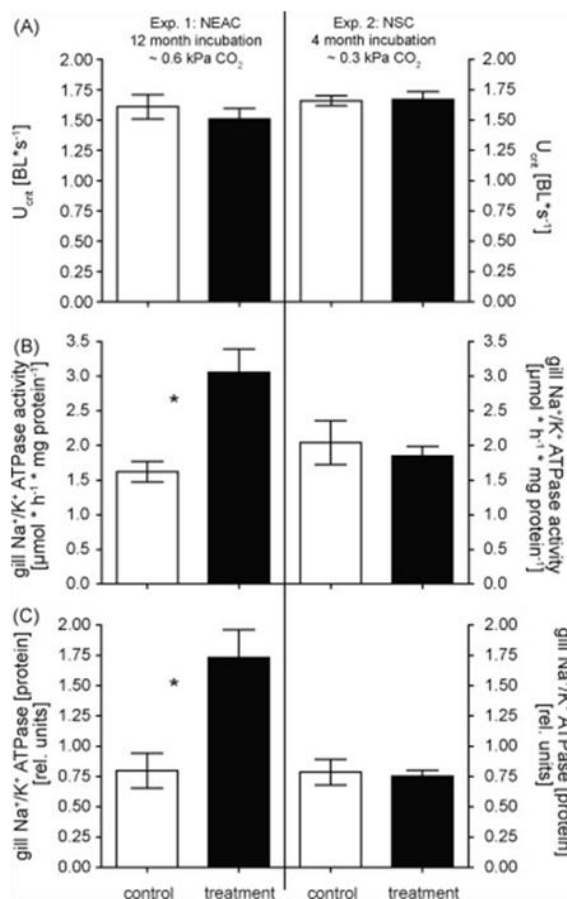
Det er kjent fra oppdrettsanlegg at sterkt forhøyet CO₂ er ugunstig for fisk, men de forandringene som forventes i havet i de neste hundre år er langt mindre enn det som finnes i tett befolkete oppdrettsanlegg. Mer subtile effekter er imidlertid rapportert. Voksen atlantisk torsk viser ikke respons målt som svømmeaktivitet, men fysiologiske forandringer tyder på at forsuring utgjør en stressfaktor (Figur 5.11). Langt mer foruroligende er det at luktesansen hos fisk kan bli påvirket av forsuring. Studier av klovnefisk har vist at luktesansen hos denne arten svekkes selv ved moderat forsuring (Figur 5.12). Fisk bruker denne evnen både til å orientere seg i terrenget og å kjenne igjen sine slektninger.

Atlantisk torsk

Svømmeevne ikke påvirket i langtidssforsøk (4-6 måneder i 600 ppm CO₂)

Gjellenes Na/K ATPase aktivitet doblet, tyder på øket stress

Melzner F, Gobel S, Langenbuch M, Gutowska MA, Portner HO, Lucassen M (2009) Swimming performance in Atlantic Cod (*Gadus morhua*) following long-term (4-12 months) acclimation to elevated seawater P-CO₂. *Aquatic Toxicology* 92:30-37



Figur 5.11 Atlantisk torsk har blitt undersøkt i langtidssforsøk med øket CO₂.

Klovnefisk

Luktesansen er viktig for mange fiskeslag, blant annet for å finne tilbake til gyteplassen der formeringen skal foregå.

Klovnefisken mister evnen til å kjenne igjen sine egne foreldre og å finne tilbake til gyteplassen allerede ved moderat forsuring (pH 7,8).

Munday PL, Dixon DL, Donelson JM, et al. (2009) Ocean acidification impairs olfactory discrimination and homing ability of a marine fish. *PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE UNITED STATES OF AMERICA* 106 no6: 1848-1852

Men om vekst av larvene:
Consequently, these results suggest that levels of ocean acidification likely to be experienced in the near future might not, in isolation, significantly disadvantage the growth and performance of larvae from benthic-spawning marine fishes.

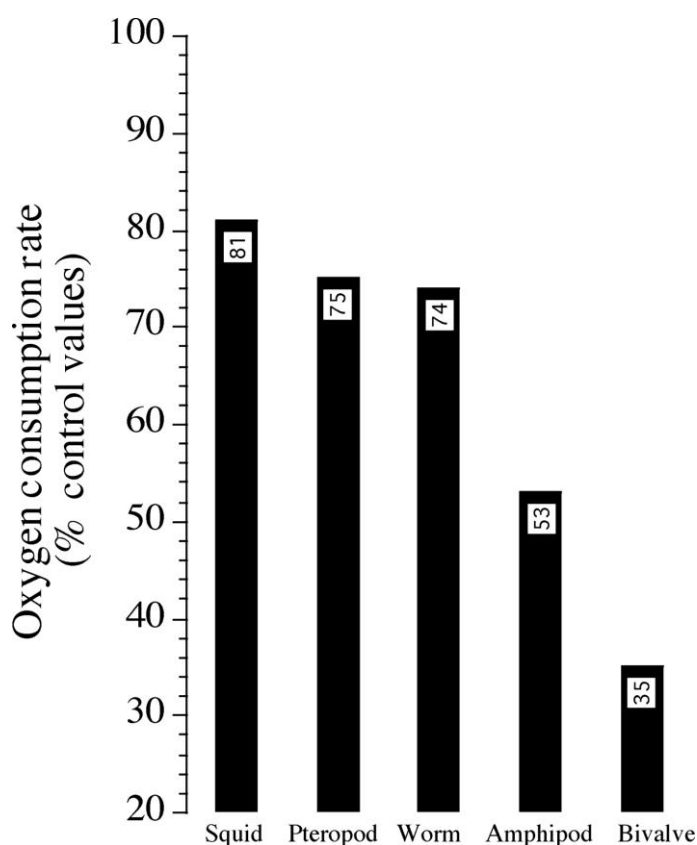
Munday PL, Donelson JM, Dixon DL, Endo G, GK (2009) Effects of ocean acidification on the early life history of a tropical marine fish. *PROCEEDINGS OF THE ROYAL SOCIETY B-BIOLOGICAL SCIENCES* Volume: 276 no1671: 3275-3283



Figur 5.12 Forsøk med klovnefisk har påvist effekt av økt CO₂ på luktesans.

5.6 Sammenlignende studier av dyregrupper

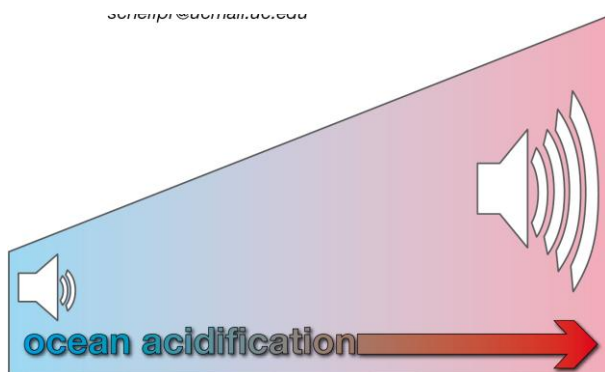
Det har i de to siste årene kommet en rekke rapporter om effekter av forsurening på vekst, reproduksjon og fysiologi på mange arter. Til tross for at informasjonsmengden er økende, er det for tidlig å sammenstille resultatene til noen holdbar syntese. Artene som har vært utvalgt for studier er i første rekke de man kan forvente å være følsomme for forsurening, for eksempel skalldyrene. I tillegg har tilgjengelighet i akvarier vært førende for hvilke arter som er undersøkt. Responsen har vært målt med de metoder som har vært innarbeidet ved hvert enkelt laboratorium, hvilken i og for seg har gitt et interessant konglomerat av observasjoner, men helheten er enda ikke i sikte. Det finnes få sammenlignende studier, men forsøk på å sammenstille resultater finnes (Fabry et al. 2008). Det er viktig at slike sammenstillinger blir publisert, men det er verd å legge merke til at forsøksbetingelsene er så forskjellige at en skal være forsiktig med å trekke vidtrekkende spesifikke konklusjoner (Figur 5.13). Foreløpig ser det ut til at skalldyrene er mest sensitive, mens blekksprutene fra Middelhavet tåler forsurening bra. Det er en lang vei fra denne innsikten til en tolkning som kan brukes til å forutsi forandringer i økosystemene.



Figur 5.13 Respons på forsurening målt som oksygenforbruk i forsuret miljø i forhold til i sjøvann med normal pH. Blekkspruten ble eksponert for 1000ppm. Pteropoden (*Limacina helicina antarctica*): 789 ppm. Rundormen (*Spinculus nudus*) og amphipoden (*Phronima sedentaris*): 10000 ppm. Bivalven (blåskjell): 5000 ppm. Referanser til hvert enkelt forsøk finnes i Fabry et al.(2008).

5.7 Sjøpattedyr

Det er liten grunn til å tro at varmblodige dyr som hval og sel vil ha direkte problemer med å leve i et moderat forsuret sjøvann, da de allerede i dag dykker til dyp hvor høye CO_2 konsentrasjoner er normalt. Mattilgangen kan imidlertid forandres, og hvordan dette vil slå ut er for tidlig å gi gode prognoser for. Imidlertid er det et annet fenomen forbundet med forsurening av havet som kan ha betydning for dyr som benytter akustiske signaler til å kommunisere og orientere seg under vann (Figur 5.14). Forplantning av lavfrekvent lyd i vann blir påvirket av forsurening via dissosiasjonsgraden av borat, og lyden vil bli sterkere forplantet i et surere hav. Det er beregnet at lyd under 10 hertz i dag når 10% lenger under vann enn for to hundre år siden. Om femti år kan lavfrekvent lyd i Atlanterhavet komme til å forplante seg 70% lenger enn i dag. Hvordan dyrelivet vil reagere på øket støynivå vet vi ikke, men det er klart at fenomenet vil være av betydning både for vitenskapelig og militær akustikk og alle andre områder der lyd under vann spiller en rolle.



Figur 5.14 Forsuring øker forplantning av lavfrekvent lyd i sjøvann. Fra Royal Society policy document 12/05, Juni 2005.

5.8 Sjøfugl

Sjøfugl er per definisjon tett knyttet til det marine miljøet og den marine næringskjeden, og er avhengige av fødetilgang fra havet. Det er derfor naturlig å vurdere om sjøfugl kan bli berørt av en økende havforsuring slik den omtales i denne utredningen, og eventuelt hvorledes og i hvor stor grad. Sjøfugl oppholder seg på land, i lufta, på havoverflata og (de fleste artene) også nede i sjøen. De er således eksponert for miljøfaktorer fra flere ulike sfærer, ulikt andre dyr, og det kan medføre at sjøfugl er ganske robuste i forhold til mange fysiske/kjemiske

miljøendringer. De henter imidlertid det aller meste av maten fra havet, og vil således kunne være sårbare for endringer i næringstilgang.

Det er mange sjøfuglkolonier og arter av sjøfugl, også i norske farvann (Figur 5.15), med ulik levemåte og utbredelse, slik at eventuelle effekter vil kunne variere fra art til art. Spørsmålet er da om det er arter som er spesielt følsomme og som i så fall kan fungere som indikatorarter i overvåking.

Sjøfuglene tilbringer ikke hele sitt liv i havet, og de puster i atmosfæren. Likeledes har de hud og en godt utviklet fjærdrakt. Dette gjør at sjøfuglene ikke kommer i kontakt med havet på samme måten som for eksempel fisk og havlevende evertebrater. De blir trolig heller ikke direkte (fysiologisk) berørt av endringer i havtemperatur og salinitet, siden de fleste arter har et utbredelsesområde hvor temperaturen i havet varierer mye.

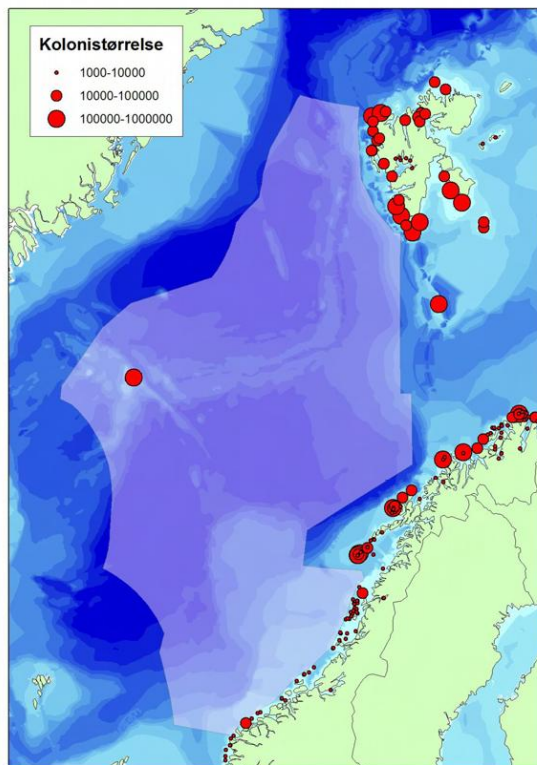
Vi har gjennomgått mye presumptivt sentral og viktig litteratur om sjøfugl og omgivende miljø. Det har ikke framkommet referanser til studier om effekter havforsurningen har eller kan ha på sjøfugl.

Det finnes imidlertid utallige studier som viser effekten av næringstilgang for reproduksjonssuksessen. I den grad forsurenningen av havet fører til endringer av vitale næringsforekomster for sjøfuglene, vil også bestandene av sjøfugl endre seg. Imidlertid, fugler lever lenge, og de produserer forholdsvis få unger pr år, noe som igjen betyr at bestandenes vekstrate er mer følsom for årlig overlevelse til de voksne individene.

5.8.1 Hekkeforekomster av sjøfugl i forvaltningsområdet

Figur 5.15 viser utbredelsen av sjøfugl (kolonier) i norske havområder nord for Stad. Det framgår at alle større kolonier er i Nord-norge eller lenger nord. Runde, Jan-Mayen og Bjørnøya framtrer som ekstremer m.h.t. beliggenhet eller avstand til nabokolonier. Det må bemerkes at det også finnes betydelige sjøfuglkolonier på Grønland, i Nord-Amerika og Russland.

Det at forsureninga først kan framtre med tydelige effekter i arktiske og sub-polare farvann peker mot en mulighet for at store mengder sjøfugl i de nordlige koloniene kan bli eksponert for endringer i næringskjeda der (evt. svikt i næringstilgang).



Figur 5.15 Kart som viser sjøfuglkolonier i Norskehavet med mer en 1000 hekkende par, samt kolonier der størrelsen ikke er kjent. (Ottersen og Auran (red.) 2007: Arealrapport med miljø og ressursbeskrivelse. Fisken og Havet 6/2007).

5.8.2 Næringstilgang

Det framgår av Tabell 5.1 at de fleste avhengige av energirike fiskeslag som sild, lodde og tobis, og dersom byttedyrene får en negativ effekt på grunn av endringer i havet, vil trolig også sjøfuglene bli berørt i negativ retning. De er ofte avhengig av bestemte aldersklasser av fisken, og således kan det gå flere år før negative effekter på byttedyrene registreres som nedganger i sjøfuglbestandene.

Mange av de observerte endringene i sjøfuglbestander som har blitt satt i forbindelse med klimaendringer, har blitt knyttet opp mot endringer i næringstilgangen. Positive verdier for NAO blir satt i forbindelse med mindre zooplankton (Planque og Taylor (1998)), og resultatet kan bli mindre rekruttering av tobis (Arnott og Ruxton (2002)).

Tabell 5.1 Utvalgte sjøfuglarter og deres hovednæring. Artene i tabellen er helt avhengig av havet for å finne føde, og faktorer som reduserer næringstilgangen vil være negative for en sjøfuglbestand.

Art	Viktige næringsemner
Havhest	Variert marin meny fra havoverflaten
Havsule	Stimfisk som sild, lodde, makrell
Storskarv	Fisk
Toppskarv	Fisk
Tyvjo	Stjeler fisk fra bl.a. terner
Storjo	Dreper andre sjøfugler
Krykkje	Sild, tobis, planktoniske krepsdyr
Makrellterne	Mest småfisk, men også planktoniske krepsdyr
Rødnebbterne	Mest småfisk, men også planktoniske krepsdyr
Lomvi	Sild, lodde, tobis
Alke	Sild, lodde, tobis, torskefisker
Teist	Fisk, krepsdyr, bløtdyr
Lunde	Sild, lodde, tobis, yngel av torskefisker

5.8.3 Konklusjon

Sjøfugl blir trolig ikke direkte (fysiologisk) berørt av endringer i havtemperatur og salinitet, siden de fleste arter har et utbredelsesområde hvor temperaturen i havet varierer mye. De lever lenge, og de produserer forholdsvis få unger pr år, noe som igjen betyr at bestandenes vekstrate er mer følsom for årlig overlevelse til de voksne individene.

Men havforsuringens negative påvirkning på karbonat-avhengige arter, for eksempel koraller, kan påvirke alle ledd i næringskjeden, og til slutt også de største dyrene i næringskjeden, for eksempel sjøfuglene.

Sjøfuglene kan være budbringere og tidlige varslere om effekter av havforsuringen. Sjøfugl bør derfor inkluderes både i overvåkinga og forskinga om havforsuring i norske farvann som snarest bør startes opp.

5.9 Kalkalgene (*Emiliana huxleyi*)

Siden de viktigste kalkalgene danner skall av kalsitt, vil de antagelig være mer motstandsdyktige mot mild forsurening enn vingesneglene. På et tidspunkt vil effekten på dannelsen av disse skallene være parallell med den som allerede er påvist hos vingesneglene. I tillegg har forsøk vist andre effekter som bør taes alvorlig. Eksperimentelt økt CO_2 -konsentrasjon for mikroalger i sjøvann fører for eksempel til økt produksjon av ekstracellulære polysakkarider (Engel et al. 2004). Polysakkarider påvirker aggregering og derved sedimentasjon, dette er effekter som kan ha betydelige konsekvenser for både total produksjon og næringskjededynamikk. I tillegg vil økt konsentrasjon av CO_2 i sjøvann føre til økt C/N forhold i alger (Riebesell et al. 2007). Å forutsi kvantitative effekter av disse responsene vil kreve kombinasjoner av litteraturstudier og empiriske undersøkelser.

De kalsifiserende planktonalgene vil i tillegg til å danne organisk cellemateriale ved fotosyntese også lage kalk fra CO_2 og Ca^{2+} , en prosess som gir netto produksjon av CO_2 og følgelig bidrar til forsurening. Denne tosidigheten i forhold til total balanse i deres CO_2 -budsjett har gjort at det er noe uklart hvorvidt disse algene bidrar positivt eller negativt i forhold til transport av CO_2 til de dypere vannmasser. En vanlig oppfatning er at vekten av kalkskallene gjør at kalkalgene synker relativt effektivt når de dør (Beaufort et al. 2007). *In situ* studier av effektiviteten av den såkalte biologiske pumpen med og uten kalkalger er mangelfull. Derved blir det ren spekulasjon hvorvidt en forringet konkurransedyktighet og medfølgende nedsatt utbredelse og suksess hos kalkalgene, vil representere en positiv eller negativ tilbakekobling i forhold til havets evne til opptak av CO_2 .

Planteplankton kan reagere med økt primærproduksjon som følge av økt $p\text{CO}_2$ hos noen arter. Dette stimulerer den biologiske CO_2 -pumpa med mer sedimenterende materiale slik at oksygenbehovet til nedbrytning av organisk materiale i dypvatnet vil øke. Forekomsten av både kalkflagellater og kiselalger kan bli redusert med store endringer i det mikrobiologiske økosystemet som resultat. For makroalger (brunalger m.m.) tyder forsøk på at økt $p\text{CO}_2$ medfører økt produksjon men samtidig kan nedbrytingsprosessen i plantene og dermed den sesongmessige gjenvæksten bli redusert. Redusert forekomst av kalkalger og lettere/tynnere skall eller skjelett vil medføre redusert tyngde og nedfall av dødt materiale til dypvannet og derved svekke den biologiske karbonpumpen i havet (Golmen, 2009).

5.10 Økosystemeffekter

Med den fragmentariske kunnskap vi har om effekter av realistiske framtidscenarier for forsuring på de enkelte grupper av organismer i økosystemet, er det klart at spådommer om effekter på økosystemet vil bli langt fra sikre. Det finnes imidlertid lokaliteter i havet hvor forsuring har foregått over lang tid på grunn av vulkansk aktivitet. En slik lokalitet finnes ved øya Ischia sørvest for Napoli i Middelhavet. Her lekker ren CO₂ ut fra havbunnen i jevn strøm, og har gjort det i hundrevis kanskje tusenvis av år. Lekkasje setter opp en gradient av forsuring langs en flere hundre meter lang strekning, og bunnsamfunnet i denne gradienten har vært undersøkt av zoologer og botanikere (Hall-Spencer et al. 2008). Nær hovedutslippet er pH helt nede i 6.7, men 300 meter bortenfor, er pH som normalt for Middelhavet, dette er definert som 0 meter i Figur 5.16.

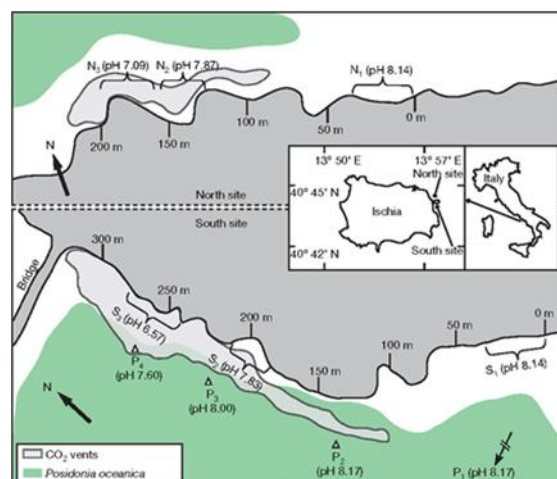


Et naturlig laboratorium

Det finnes naturlige lokaliteter der CO_2 -forsuring har vært normalt tilstand over lang tid (100-1000 år)

Ved øya Ischia sørvest for Napoli lekker nesten ren CO_2 fra vulkanske sprekker.

Spencer-Hall et al. (2008) undersøkte vegetasjon og fauna i forskjellig avstand fra hovedkilden til CO_2 , altså i en gradient av pH og kalsitt-metning.



Øya Ischia sørvest av Napoli, plassering av prøvetakingstasjoner i en naturlig gradient av pH

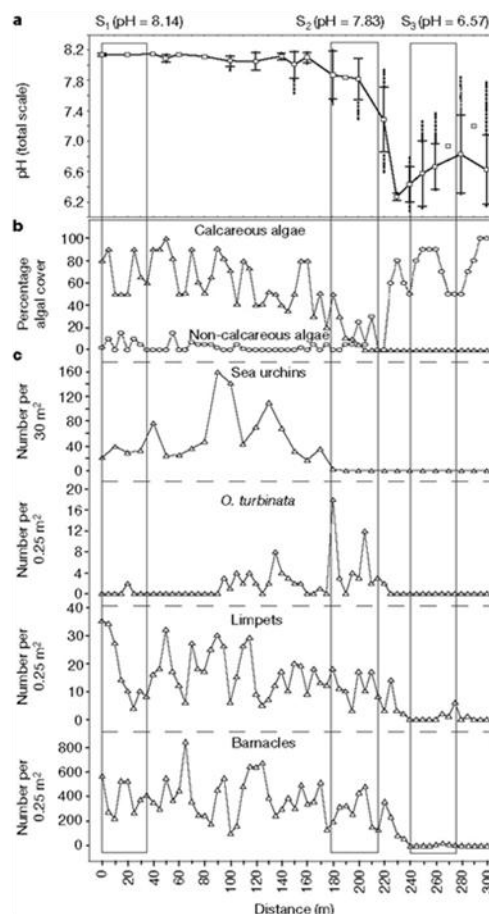
Jason M. Hall-Spencer, Riccardo Rodolfo-Metalpa, Sophie Martin, Emma Ransome, Maoz Fine, Suzanne M. Turner, Sonia J. Rowley, Dario Tedesco & Maria-Cristina Buia (2008) Volcanic carbon dioxide vents show ecosystem effects of ocean acidification. Nature 454, 96-99

Figur 5.16. Feltlokalitet i Middelhavet hvor det er dannet en naturlig pH gradient. Merk at stasjonen nærmest utslippet noteres som 300 meter, og 0 meter er lokaliteten der sjøvannets pH er normal og som altså ikke er påvirket av det vulkanske utslippet.

Resultater fra naturlig pH gradient.

Øverst: pH som funksjon av avstand til CO₂ kilden
 b: Grønnalger med og uten kalkavleiringer
 c: Sjøpølser
 d: *Osilinus turbinata*
 e: Albuskjell
 F: Rur

Friske eksemplarer av *Osilinus turbinata*



Figur 5.17 Effekter på utbredelse av noen grupper av dyr og planter i en naturlig pH gradient.

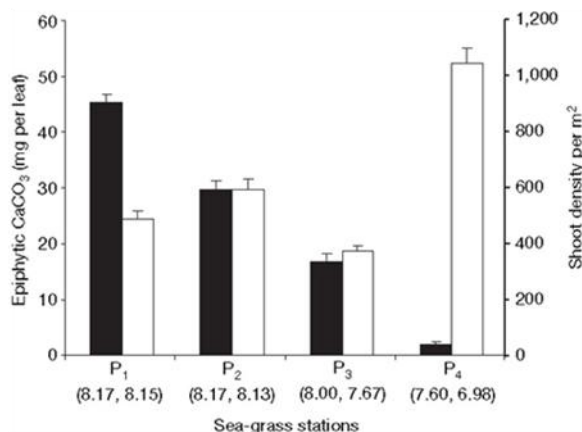
I gradienten ved Ischia ble det funnet klare effekter av forsureningen. Ikke uventet var organismer med kalkskall fraværende ved lav pH (Figur 5.17). I dette området trivdes vannplanter godt (Figur 5.18).

Italienske og norske forskere har studert de undersjøiske CO₂-strømmene fra havbunnen ved øya Panarea nord for Sicilia (Voltattorni et al. 2009, Espa et al. 2009). Her kommer det opp CO₂ som har noe % H₂S og andre gasser innblandet. Det er gjort målinger av utstrekningen på det forsurede området og foretatt diverse biologiske og geokjemiske målinger. Studiene er ledd i arbeidet med å verifisere effekter av eventuell lekkasje fra undersjøiske CO₂ deponier men gir også viktige spinoff data til havforsurings-problematikken.

1) Påvekst av kalkdannende epifytter ble sterkt påvirket av senket pH

2) Sjøgress trives godt ved lavere pH

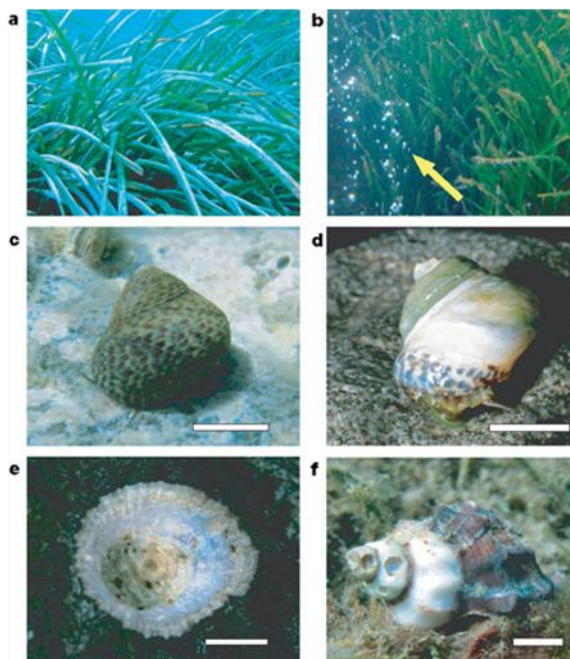
Posidonia oceanica (et sjøgress i Middelhavet)



Sjøgress med og uten epifytter med kalkskall
 Sorte søyler: Mengde kalkdannende epifytter på bladene
 Åpne søyler: Produksjon av sjøgress målt som tetthet av friske skudd

Kalkskall i oppløsning

- a: *Posidonia oceanica* med påvekst (pH 8.2)
- b: *Posidonia oceanica* uten påvekst (pH 7.6)
- c: Intakt *Osilinus turbinata* ved pH 8.2
- d: *Osilinus turbinata* ved pH 7.2, erodert i eldste skaldeler
- e: *Patella caerulea* (et albuskjell) ved pH 7.4, dyret er i live men skjellet er skadet
- f: *Hexaplex trunculus* ved pH 7.4, med store skader på skallet



Friskt eksemplar av *Hexaplex trunculus*

Figur 5.18 Effekter på forskjellige organismer i en naturlig pH gradient.

5.11 Oversikt?

Ovenfor er gitt en rekke eksempler på biologiske effekter av forsurening. Eksemplene gir skremmende informasjon, fordi effektene i nesten alle refererte arbeider er negative for de undersøkte artene. For balansens skyld bør det nevnes at forskningen i første rekke har konsentrert seg om organismer der man vil forvente en negativ effekt, for eksempel skalldyr. Det er imidlertid foruroligende at det er vist negative effekter over et langt spekter av fysiologiske responser. Fabry et al. (2008) gjør forsøk på en oppstilling av de relevante forsøk som var tilgjengelig i litteraturen for vel et år siden (Tabell 5.2). Listen er dominert av arter fra subtropiske og tempererte strøk, og viser at vi ligger noe etter med undersøkelser av våre hjemlige arter og responser hos kaldtvannssarter. For å kunne få kunnskap om framtidig utvikling i våre hjemlige farvann er det viktig å sette i gang forskning på de artene som er relevante her.

Tabell 5.2 Eksempler på responser hos marin fauna på havforsuring.
Oversatt fra Fabry et al. (2008).

Art	Beskrivelse	CO ₂ system parametre	Sensitivitet	Referanse
Planktoniske foraminiferer				
<i>Orbulina universa</i>	Med symbiont	pCO ₂ 560–780 ppmv	8–14% reduksjon i skallmasse	Spero <i>et al.</i> (1997); Bijma <i>et al.</i> (1999, 2002)
<i>Globigerinoides sacculifer</i>	Med symbiont	pCO ₂ 560–780 ppmv	4–8% reduksjon i skallmasse	Bijma <i>et al.</i> (1999, 2002)
Cnidaria				
Scyphozoa Hydrozoa	Maneter	Nordsjøvann, pH nedsatt fra 8.3 til 8.1	Økning i frekvens malt med CPR fra 1958 til 2000	Attrill <i>et al.</i> (2007)
Mollusca				
<i>Clio pyramidata</i>	Vingesnegl med skall	Ω _{arag} <1	Forvitring av skall	Feely <i>et al.</i> (2004); Orr <i>et al.</i> (2005); this work

<i>Haliotis laevigata</i>	Abalone skjell	pH 7.78; pH 7.39	5% og 50% vekst reduksjon	Harris <i>et al.</i> (1999).
<i>Haliotis rubra</i>	Abalone skjell	pH 7.93; pH 7.37	5% og 50% vekst reduksjon	
<i>Mytilus edulis</i>	Blåskjell	pH 7.1 / 10 000 ppmv	Forvitring av skall	Lindinger <i>et al.</i> (1984)
<i>Mytilus edulis</i>	Blåskjell	$p\text{CO}_2$ 740 ppmv	25% nedgang i kalsifiserings- hastighet	Gazeau <i>et al.</i> (2007)
<i>Crassostrea gigas</i>	Stillehavssøsters	$p\text{CO}_2$ 740 ppmv	10% nedgang i kalsifiserings- hastighet	
<i>Mytilus galloprovincialis</i>	Middelshavs musling	pH 7.3, ~5000 ppmv	Nedsatt metabolisme og veksthastighet	Michaelidis <i>et al.</i> (2005)
<i>Placopecten magellanicus</i>	Stort kamskjell	pH < 8.0	Nedgang i befruktning og embryonal utvikling	Desrosiers <i>et al.</i> (1996)
<i>Tivela stultorum</i>	Pismo clam	pH < 8.5	Nedgang i befruktning	Alvarado- Alvarez <i>et al.</i> (1996)
<i>Pinctada fucada martensii</i>	Japansk perleøsters	pH 7.7 pH >7.4	Forvitring av skall, nedsatt Vekst, øket dødelighet	Reviewed in Knutzen (1981)
<i>Mercenaria mercenaria</i>	Clam	$\Omega_{\text{arag}} = 0.3$	Forvitring av skall hos juvenile med påfølgende øket dødelighet	Green <i>et al.</i> (2004)
<i>Illex illecebrosus</i>	Epipelagisk blekksprut	2000 ppmv	Svekket oksygen transport	Pörtner and Reipschläger (1996)
<i>Dosidicus gigas</i>	Epipelagisk blekksprut	0.1% CO_2 , ~1000 ppmv	Redusert metabolisme/ og potensiale for aktivitet	Rosa and Seibel (unpublished)
Arthropoda				
<i>Acartia steueri</i> <i>Acartia erythraea</i>	Kopepode	0.2- 1% CO_2 , ~2000–10 000 ppmv	Nedsatt klekke suksess; øket mortalitet hos nauplius larver	Kurihara <i>et al.</i> (2004)

Kopepoder	Stillehavet. Dyp- vs. gruntvann	860–22 000 ppmv CO ₂	Øket mortalitet med økt CO ₂ konsentrasjon og lengde på eksponering	Watanabe <i>et al.</i> (2006)
<i>Euphausia pacifica</i> <i>Paraeuchaeta</i> <i>elongata</i>	Krill, Mesopelagisk kopepode	pH < 7.6	Øket mortalitet med økt CO ₂ konsentrasjon og lengde på eksponering og minkende pH	Yamada and Ikeda (1999)
<i>Conchoecia</i> sp.	Ostracod			
<i>Cancer pagurus</i>	Krabbe	1% CO ₂ , ~10 000 ppmv	Nedsatt varme- toleranse, aerob tilstand	Metzger <i>et al.</i> (2007)
Chaetognatha				
<i>Sagitta elegans</i>	Chaetognath	pH < 7.6	Mortalitet økte med økende eksponeringstid and minkende H	Yamada and Ikeda (1999)
Echinodermata				
<i>Strongylocentrotus</i> <i>purpuratus</i> <i>Psammechinus</i> <i>miliaris</i>	Sjøpølse	pH ~6.2– 7.3	Høy følsomhet på grunn av manglende pH regulering og passiv buffring via test dissolusjon under emersjon	cf. Burnett <i>et al.</i> (2002) Spicer (1995); Miles <i>et al.</i> (2007)
<i>Hemicentrotus</i> <i>pulcherrimus</i>	Sjøpølse	~500–10 000 ppmv	Nedsatte befruktnings-rater, effekter på utvikling av larvene	Kurihara and Shirayama (2004)
<i>Echinometra</i> <i>mathaei</i>	Sjøpølse			
<i>Cystechinus</i> sp.	Sjøpølse, dypvanns	pH 7.8	80% mortalitet under simulert CO ₂ oppsamling	Barry <i>et al.</i> (2002)

Sipuncula

<i>Sipunculus nudus</i>	Peanøtt orm	1% CO ₂ , 10 000 ppmv	Hemmet metabolisme	Pörtner and Reipschläger (1996)
			Uttalt mortalitet i 7- ukers eksponeringer	Langenbuch and Pörtner (2004)

Vertebrata

<i>Scyliorhinus canicula</i>	Småflekkt rødhai	pH 7.7 / 0.13%CO ₂	Øket ventilasjon	Reviewed in Truchot (1987)
		7% CO ₂ , ~70 000 ppmv	100% mortalitet etter 72 h	Hayashi <i>et al.</i> (2004)
<i>Sillago japonica</i>	Japansk "whiting"	7% CO ₂ , ~70 000 ppmv	Hurtig mortalitet i 1-trinns eksponering	Kikkawa <i>et al.</i> (2006)
<i>Paralichthys olivaceus</i>	Japansk flyndre	5% CO ₂ , ~50 000 ppmv	100% mortalitet innen 48 timer	Hayashi <i>et al.</i> (2004)
<i>Euthynnus affinis</i>	"Eastern little tuna", en tunfisk	15%CO ₂ , ~150 000 ppmv	100% mortalitet hos egg etter 24 timer	Kikkawa <i>et al.</i> (2003)
<i>Pagrus major</i>	"Red sea bream"	5%CO ₂ , ~50 000 ppmv	>60% mortalitet Hos larver etter 24 timer	Ishimatsu <i>et al.</i> (2005)
<i>Seriola quinqueradiata</i>	"Yellowtail/ Amberjack/ Kingfish"	5% CO ₂ , 50 000 ppmv	Nedsatt hjerterfunksjon; 100% mortalitet etter 8 timer	Ishimatsu <i>et al.</i> (2004)
<i>Sparus aurata</i>	En sjøbrasme (Middelhavet)	pH 7.3, ~5000 ppmv	Nedsatt metabolsk kapasitet	Michaelidis <i>et al.</i> (2007)
<i>Dicentrarchus labrax</i>	Havabbor	pH 7.25, 24 mg l ⁻¹ CO ₂	Nedsatt fødeinntak	Cecchini <i>et al.</i> (2001)

5.12 Klimaendring, adderte effekter temperatur og pH.

Framtidige forandringer i havvannets karbonkjemi vil være akkompagnert av økt temperatur. Noen effekter vil bli forsterket av denne kombinasjonen. Det ble vist ovenfor at en krabbeart fikk innskrenket sin temperaturtoleranse ved senket pH. Det er også kommet informasjon om at enkelte kalsifiserende arter vil tåle kombinasjonen senket pH og økt temperatur svært dårlig (

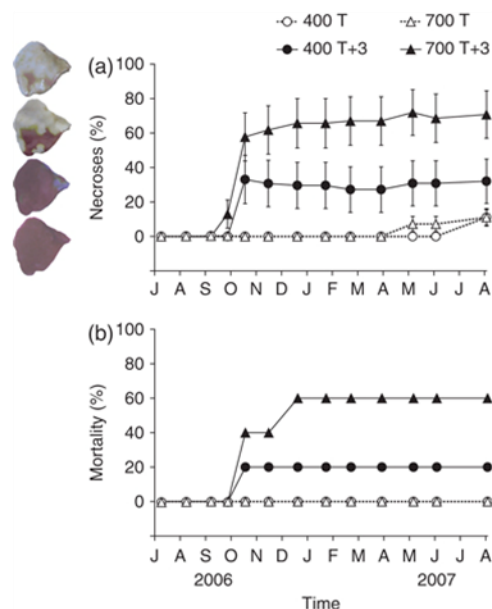
Kombinert effekt av øket temperatur og CO₂

Effekter på grønnauger med kalkskall:

Sammenligning av dagens atmosfære og en fremtidig CO₂ anriket atmosfære, kombinert med tre grader økning i temperatur.

Øverste panel: Utviklingen av nekrose uttrykt som prosent av overflaten på algene

Nederste panel: Mortalitet som prosent døde individer



Fra:
Martin S, Gattuso JP (2009) Response of Mediterranean coralline algae to ocean acidification and elevated temperature. *Global Change Biology* 15:2089-2100

Figur 5.19). Da denne informasjonen er fra Middelhavet er det verd å påpeke at vi har behov for tilsvarende eksperimentelle data for kaldtvannsarter.

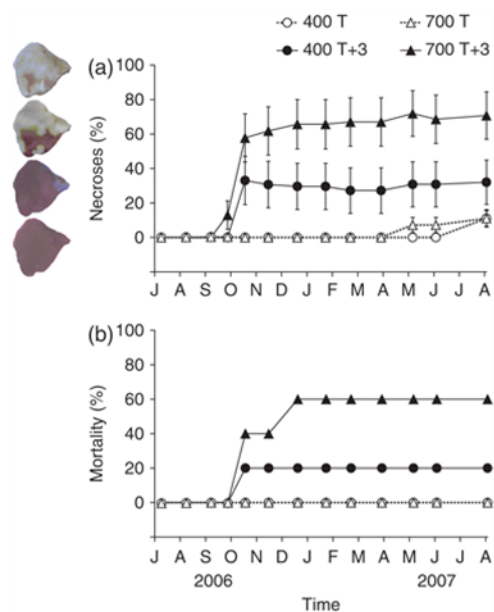
Kombinert effekt av øket temperatur og CO₂

Effekter på grønnalger med kalkskall:

Sammenligning av dagens atmosfære og en fremtidig CO₂ anriket atmosfære, kombinert med tre grader økning i temperatur.

Øverste panel: Utviklingen av nekrose uttrykt som prosent av overflaten på algene

Nederste panel: Mortalitet som prosent døde individer



Fra:
Martin S, Gattuso JP (2009) Response of Mediterranean coralline algae to ocean acidification and elevated temperature. *Global Change Biology* 15:2089-2100

Figur 5.19 Kombinert effekt av senket pH og økt temperatur på en korallalge fra Middelhavet.

6. Lagring av CO₂

For å redusere utslippene av CO₂ til atmosfæren samtidig som en kan opprettholde kraftproduksjon m.m. med fossilt brensel, blir det arbeidet intensivt både i Norge og internasjonalt med såkalte CCS løsninger, d.v.s. karbonfangst fra store utslippskilder og permanent lagring av gassen. Innfanget CO₂ kan injiseres og lagres i ferdig produserte olje-

eller gassreservoar, eller i andre geologiske formasjoner under hav eller land. CO₂ kan også injiseres i olje/gassfelt for å få økt produksjonen der (såkalte EOR eller EGR). Dette er et klimatiltak som blir vurdert av offshore industrien og også for flere gassterminaler og gasskraftverk på land i Norge.

CCS er et tiltak som vil bidra til å redusere havforsuringa. Grunnen til at det er tatt med kortfatta i denne rapporten, er at en viss lekkasje fra CO₂ reservoarer under havbunnen opp til havet ikke helt kan utelukkes. I så fall vil det representere en lokal forsuringseffekt. Flere detaljer om teknologien og regelverk m.m. finnes i rapporten om havforsuring i Norskehavet (Golmen m.fl. 2007). Oljedirektoratet er for øvrig i føringen når det gjelder vurderinger og beslutninger for lagringsløsninger, med støtte fra NVE og andre offentlige etater og med innspill fra industrien og konsulent/forskingsmiljøene.

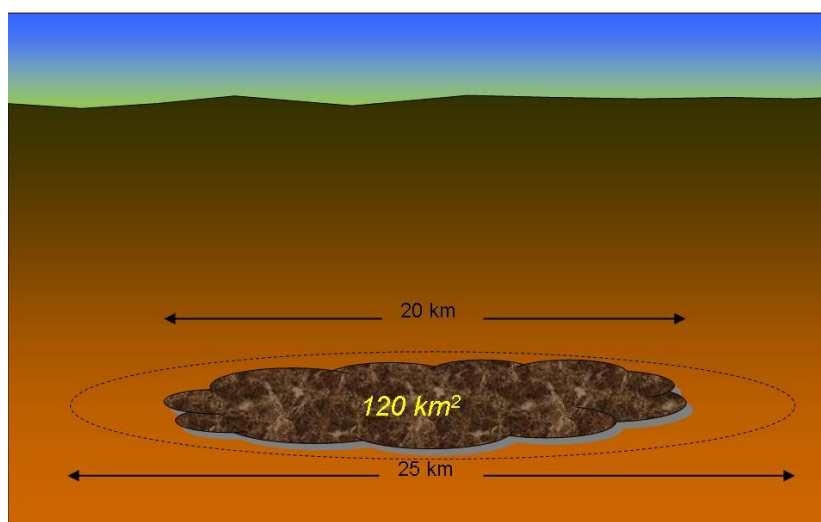
FNs Klimapanel sin spesialrapport om lagring av CO₂ (IPCC 2005) oppsummerte kunnskapsstatus på feltet og ga tilrådinger m.o.t. valg av lagringssted og prosedyrer for verifisering av prosessen m.m. Rapporten framhever den store kapasiteten som geologisk lagring kan representere men understreker samtidig behovet for grundige forhåndsanalyser av aktuelle reservoarområder slik at risiko for eventuelle lekkasjer kan verifiseres og minimeres, og eventuelle miljøeffekter p.g.a. dette kan vurderes og reduseres. Siden 2005 er det kommet flere vedtak og reguleringer, bl.a. EUs direktiv for geologisk lagring av CO₂ (2009) og Londonkonvensjonen vedtok å godta lagring under havbunnen, og nylig også transport av CO₂ over landegrenser for formål lagring. OSPAR har også gitt åpning for å tillate lagring under havet.

Fangst av CO₂ fra store punktkilder som varmekraftverk som er mest aktuelle prosjekter internasjonalt. Et stort kraftverk som er basert på kull, olje eller gass slipper ut flere millioner tonn CO₂ per år. Gass gir minst utslipp pr produsert MWh mens kull gir størst utslipp. Gamle kraftverk representerer over 1000 kg CO₂ pr MWh produsert, mens nye verk ligger på under det halve av dette og et gasskraftverk kan ligge rundt 200-300 kg/MWh, m.a.o. rundt det halve av det for kullkraft. For industri i Norge og Norskehavet er nok CO₂ fra gasskraftverk mest aktuelt å vurdere mengdemessig, i forhold til kvantum som må deponeres. I tillegg da til reinjeksjon av CO₂, slik som på Sleipner.

Utslipp fra installasjoner på norsk sokkel utgjør 2,5 - 3 mill. tonn CO₂/år. Mye av dette er CO₂ fra gassfyrte turbiner o.l. Et 150 MW anlegg på en plattform representerer utslipp, eventuelt fangst av størrelsesorden 700 000 tonn CO₂/år (OD 2008). Deler av utslippene på sokkelen kan elimineres ved elektrifisering fra land (forutsatt at den elektrisiteten er CO₂-fri).

Ved etablering av gassfyrte kraftverk på land i Midt-Norge eller andre steder som sokner til Norskehavet vil mengdene CO₂ bli større enn for enkeltutslipp offshore. En kan regne med et par millioner tonn CO₂ fra et middels stort kraftverk.

Areal extent of a CO₂ pool from a 1 GW power plant



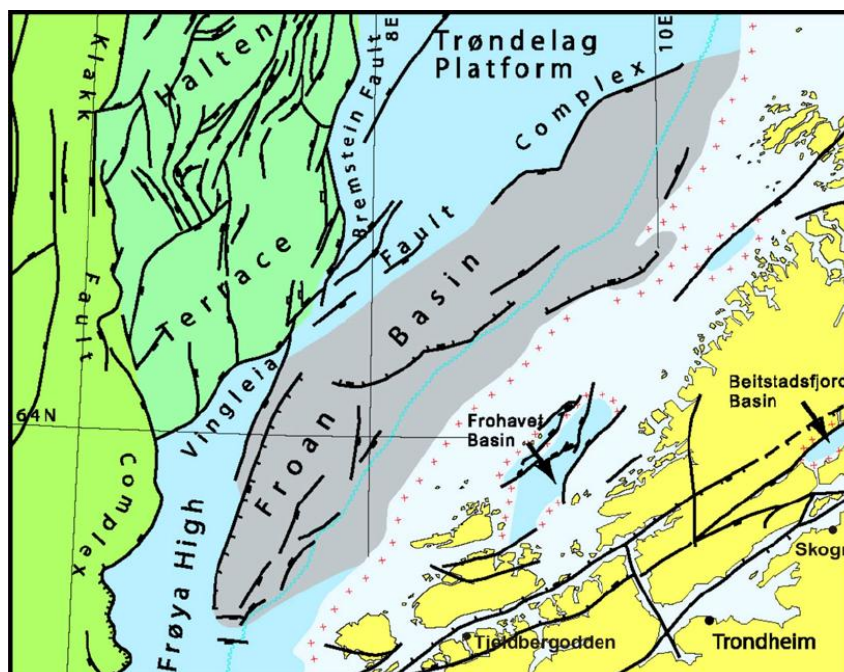
Figur 6.1 Horisontal utstrekning av et geologisk CO₂ lager etter 30 år med injeksjon fra et 1 GW kraftverk.

Over 30-50 års drift kan mengdene lagret CO₂ fra et større gasskraftverk (0,5-1 GW) alene komme opp i flere hundre millioner tonn. Det er regnet at slike mengder vil motsvare et horisontalt areal av den geologiske strukturen på over 100 km² (Figur 6.1, Wilson et al. 2007). Dette illustrerer også arealomfanget på havbunnen for den langtidsovervåkinga av reservoaret som kan bli påkrevd.

6.1 Lagringsprosjekter

Det er først og fremst i tilknytting til petroleumsindustrien at det pågår eller foreligger planer om lagring av CO₂ i Norge/norske farvann. Det er utelukkende offshore lokaliteter det er tale om og i alle havområdene som foreliggende rapport omhandler, foregår det lagring eller er planer om dette. Sleipnerprosjektet i Nordsjøen (vanndyp ca 80 m) har vært i gang i tretten år, og lagring på Melkøya/Snøhvit nord av Finnmark (vanndyp ca 330 m) begynte for halvannet år siden. Sleipner innebærer lagring av ca 1 mill tonn CO₂ pr år i et område av Utsiraformasjonen nær gassfeltet. CO₂-en stammer fra naturgassen, etter separering fra denne. Prosjektet i regi av Statoil og har fått mye internasjonal oppmerksomhet som et pionerprosjekt innen lagring av CO₂. For noen år siden presenterte regjeringen en plan om å etablere en såkalt ”verdikjede” for transport og injeksjon av CO₂ på norsk sokkel. Det blei skissert at for felt i Norskehavet kunne 4.5 – 5 mill tonn CO₂ fanges og injiseres i en ”verdikjede” kontekst, som inkluderte EOR. SINTEF publiserte nylig beregninger for lagringskapasiteten i Utsiraformasjonen i Nordsjøen på 40 gigatonn CO₂, ved et injiseringsperspektiv på flere hundre år.

Mongstad TCM (St.prp. 49/2007-08) er under bygging, her vil det i første omgang bli fanget ca 100 000 tonn CO₂ pr år. Det er ikke beslutta lagring så i første omgang kan gassen bli sluppet til luft. Det er imidlertid utredet transport og lagring i Johansen formasjonen vest av Florø. På Kårstø er det etablert et gasskraftverk, og det er utarbeidet planer for et fangstanlegg for CO₂ der, som seinere vil få behov for lagring. Det er også planlagt (og etablert) et Gasskraftverk med CO₂-fangst på Tjeldbergodden med eventuell transport av CO₂ til feltene Draugen og Heidrun (Haltenbanken) for bruk til økt oljeutvinning. I nord har Melkøya/Snøhvit prosjektet som nevnt CO₂ lagring inkludert gjennom en 120 km lang ledning fra Melkøya og ut til feltet. CO₂ kommer også der fra naturgassen og som fjernes før denne eksporteres. For Snøhvit er det snakk om lagringskvanta på ca 1 mill tonn CO₂ pr år.



Figur 6.2 Froanbassenget utenfor Midt-norge er aktuelt for lagring av CO₂ (NGU 2004)

6.2 Lagringskapasiteten

Norge har gode geologiske forhold utaskjærs for å lagre CO₂ ved at det eksisterer flere store, vannfylte reservoarer (saltvannsakviferer, f.eks. Utsirabassenget i Nordsjøen og Froanbassenget (Figur 6.2), og ellers flere ferdigproduserte olje- eller gassreservoar som kan egne seg. Lagring i ferdigproduserte felt kan være en god løsning fordi strukturen sannsynlegvis er tett i og med at den har holdt på gass og olje gjennom millioner av år (OED 2007).

I Norskehavet er Haltenbanken med Draugen og Heidrun feltene aktuelle lagringsområder. Lagringskapasiteten i akviferer i dette området (Froanbassenget) kan være på inntil 30 GtCO₂ (NGU 2002), sammenliknbart med kapasiteten i Nordsjøen. Verdien indikerer svært stor lagringskapasitet også sett i forhold til norske utslipp som er ca 50 mill tonn CO₂ eller 0,05 GtCO₂ pr år.

6.3 Lagring og lekkasje

En kan anta at den injiserte gassen først vil foreligge i væskeform, d.v.s. egentlig superkritisk p.g.a. stort trykk og høy temperatur. Etter som tida går vil CO₂ blande seg med omgivende væske og/eller diffundere utover i reservoaret. Prosess og rate vil avhenge av karakteristikken til reservoaret. Gassen vil først kunne stige opp i reservoaret p.g.a. oppdrift, inntil den møter faste sjikt over eller blir oppløst i reservoarvannet. På lang tidsskala kan CO₂-en eventuelt bli mineralisert som karbonat dersom vilkårene for dette er laglige. Lekkasjeerisikoen er dermed sannsynligvis størst i første fase av lagringsprosjektet under injisering/trykkoppbygging og noen ti-år etter at lagring er stanset. Det vil m.a.o. si at lekkasje fra reservoaret kan oppstå ganske tidlig i et prosjekt gjennom uoppdagede sprekksoner i dekkbergartene over reservoaret, eller gjennom defekte brønner og borehull (avstengte eller aktive).

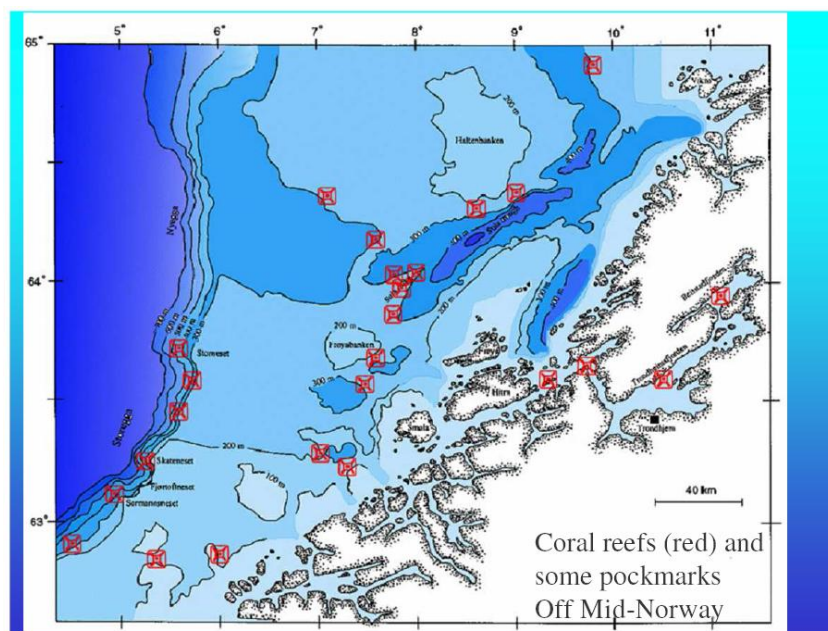
Gjennom risikoanalyser har industrien og andre vurdert ulike lagringsscenarier og risiko for lekkasje. Erfaringstall er hentet fra andre sektorer med gasshandtering/lagring. Kumulativ risiko for lekkasje fra et geologisk CO₂ reservoar kan være på 0,3 – 0,4 over 1.000 år, d.v.s. 30-40 % risiko for lekkasje over en slik tidsperiode. Langsiktige årlige lekkasjerater på 0,1-0,2 % av totalt lagret CO₂ er brukt i europeiske studier (Golmen 2005).

Om en for Norskehavet tar utgangspunkt i foreliggende estimat for lagringsskapasitet i olje og gassfelt på inntil flere titalls Gt CO₂, så vil slik lekkasje over tid tilsvare betydelige mengder CO₂, som enten kan lekke gradvis eller komme som større ”utbrudd”. Ved lagring og lekkasje i ett forvaltingsområde vil CO₂ gass som lekker, teoretisk også kunne bli ført inn i tilstøtende forvaltingsområde med havstrømmene.

Selv om geologisk lagring blir framstilt som både sikker og permanent, er det m.a.o. ikke ubetydelige mengder CO₂ som over tid i realiteten kan unnslippe til havet over og forsure dette lokalt, og evt. eventuelt ende tilbake til atmosfæren. Dette er mye diskutert i internasjonale fora der det blir arbeidet med å vurdere både risikoaspekt og å få formulert metodikk og protokoller for monitorering og rapportering av lekkasjer. Viss det er slik at deler av CO₂-en lekker ut, så får det følger for den rapportering og kreditter etc som er gitt under forutsetning av permanent lagring.

Det kan forventes at lokaliteter for lagring av CO₂ i geologiske strukturer under havbunnen vil bli valt ut fra kriteriet å minimalisere potensialet for lekkasjer. Likevel er det mulig at

lekkasjer kan oppstå over tid. Eventuelle lekkasjer vil først og fremst ha potensial til å påvirke bunndyrsamfunn på og i havbunnen over og nær lageret og påvirket område vil trolig ha begrenset utstrekning. Størrelsen av redusert pH vil imidlertid kunne bli langt større (kanskje 2 pH enheter i nærområdet til en lekkasje) enn for den globale havforsuringa. Det eksisterer lite fakta og informasjon om hva slike potensielle utslipp kan bety for marine organismer og økosystemer, for eksempel korallrev (Figur 6.3) dersom lekkasjen når opp til havet.



Figur 6.3 Felt med dypvannskoraller utenfor Midt-norge.

6.4 Risiko og effekt

Den totale miljørisikoen ved lekkasjer vil være produkt av risikoen for lekkasje og virkningene av slik lekkasje. Vi vurderer ikke risikoen i forvaltingsområdene videre her, men slår fast at det er generell konsensus i fagmiljøene om at det eksisterer en viss risiko for lekkasje fra geologiske lager av CO₂. For mer detaljer henviser vi til andre rapporter om CO₂ lagring slik som IPCC sin spesialrapport om temaet (IPCC 2005).

Dersom CO₂ lekker fra et framtidig deponi under havbunnen så vil både denne (sedimentene) med dyrelivet der, og havvannet over kunne bli påvirket, liknende det som kan skje ved den generelle havforsuringa.

Det er imidlertid sannsynlig at gassen, som sannsynligvis vil være løst i reservoarvæske delvis i alle fall, vil trekke med seg spor av andre stoff slik som tungmetall og ymse mineraler som

har blitt løst opp av CO₂ og den forsura reservoarvæska. Dermed kan spekteret av skadevirkninger på lokal fauna bli større enn dersom kun CO₂ og pH påvirker lokalmiljøet.

Dersom lekkasjen er liten og lokaliteten ligger gunstig til, vil bunnstrømmen kunne tynne ut gassen slik at den raskt når bakgrunnsverdi, og influensområdet blir avgrenset. Ved større lekkasjer kan imidlertid konsentrasjonen av CO₂ bli langt høyere (og pH lagt lavere) enn i det omgivende sjøvannet, slik at virkningene på faunaen kan bli mer akutt.

Det finnes mikroorganismer (s.k. ekstremofile organismer) som lever under høgt trykk og høy temperatur flere hundre meter ned i havbunnen, både i salte akviferer, i olje/gass reservoar og i sediment. Den ekstraordnære metabolismen som disse organismene representerer, er svært lav. De er lite utforska og det kan være vanskelig å måle virkninger av evt. CO₂-lekkasje på kort sikt. Dersom mengdene av disse organismene er så store som det blir hevda (større biomasse enn det som finnes av liv ellers på jorda) så er de neppe å betrakte som spesielt truet eller sårbare, men dette gjenstår å få dokumentert.

Geologisk lagring er uansett vurdert å være en sikker metode med lang virkningstid. Miljøeffekten ved å ta i bruk denne og lignende lagringsmetoder på stor skala kan bli betydelig og vil bidra til å opprettholde akseptabelt naturmiljø inn mot en framtid der bruk av andre/fornybare energikilder vil dominere. CO₂ lagring er m.a.o. regnet for å være en midlertidig overgangsteknologi til et mer eller mindre karbonfritt samfunn. Lagrene vil imidlertid bestå evindeligg, viss de holder tett.

Storskala lagring av CO₂ vil bidra til å redusere global oppvarming og forsuringa av havet. Det er likevel ugunstig viss et lager under havbunnen skulle begynne å lekke CO₂ til havet. For det første vil gassen kunne nå atmosfæren slik at noe av den tilsikta reduksjonen i drivhuseffekten ved lagring uteblir. Dersom slik lekkasje skjer tilstrekkelig langt fram i tid vil dette kunne bety lite dersom antropogene utslipp for øvrig er under kontroll og CO₂ konsentrasjonen i atmosfæren er på veg ned. Slik lekkasje vil da i første rekke kunne bli et lokalt miljøproblem.

7. Sosioøkonomiske effekter. Kystsamfunn og nasjonaløkonomi

Det er ikke gjort noen dyptgående studier om sosioøkonomiske effekter av havforsuring så vidt vi vet, i alle fall ikke for nordiske farvann, men det er nevnt avsnittsmessig i noen rapporter, bl.a. i ESF (2009). Det skilles mellom effekter på høstbare/kommersielle arter som vil påvirke fiskeriene og dermed både næringsliv og mat-tilgang, og på ikke-kommersielle arter (koraller, eksotiske arter), som kan påvirke for eksempel turisme og reiseliv. For havbruk, som er en stor norsk næring, blir det foreløpig mest spekulasjoner.

Havforsuringa og den forventede utviklingen framover slik den er skissert i denne rapporten, peker mot muligheter for merkbare endringer i de marine økosystemene i norske farvann om allerede noen få tiår. Dette vil berøre både kommersielle arter og ikke-kommersielle. Som med effektene av global (og regional) oppvarming er det rimelig å anta at også havforsuringa vil få følger for mennesker, næringer og for nasjonaløkonomien. Oppvarminga vil menneskene til en viss grad kunne tilpasse seg (adaptation). Den vil medføre geografiske skifter i utbredelsen av fangstbare arter i havet, noe som også er observert i norske farvann. Det er ikke tale om at arter nødvendigvis forsvinner p.g.a. dette, men at de forflyttes til områder med lavere temperatur/mer levelige vilkår, og der de fortsatt kan fangstes.

For havforsuringa kan dette bli mer problematisk p.g.a. av den globale dimensjonen og at gradientene horisontalt i karbonkjemien er og blir relativt svake. Kanskje kan trua arter kunne regulere dypet, og vandre dypere til nivå med lavere pH? Men her vil faktorer som næringstilgang, lys og vannkjemi ellers også måtte samvirke positivt for å muliggjøre en slik type forflytting. Slike endringer har preg av evolusjon, d.v.s. det tar mange generasjoner med ”prøving og feiling” før eventuelt en ”vinner-organisme” innenfor arten kan ha oppstått og trives under nye vilkår.

7.1 Fiskerinæringa

Norsk fiskerinæring inkl. havbruk eksporterte for 37 milliarder kroner i 2008, og står for en betydelig sysselsetting og verdiskaping for øvrig. Havbruk og tradisjonelt fiske står i 2009 for om lag like stor eksportverdi, mens fiskeriene og den tilknyttede næringa på land sysselsetter flest personer. De representerer begge desentraliserte næringer, selv om mye av administrasjon og økonomistyring etter hvert skjer fra Oslo eller større byer (spesielt for havbruk). Skulle disse næringene bli betydelig påvirket og redusert p.g.a. havforsuringa, så vil m.a.o. både kysten og Oslo bli ramma. Oslo og de store byene har imidlertid en større buffer i

forhold til jobbskifte, og Staten vil der lettere iverksette tiltak med etablering av nye etater og stillinger, slik at de sosiøkonomiske effektene der blir mindre enn der næringa faktisk drives.

Fiskerinæringa har gjennomlevd og overlevd mange omstillinger og strukturendringer opp gjennom åra, ofte med følge av konflikter og politisk uro. Havforsuringa representerer en ny mulig trussel og er så altovergripende at det er vanskelig å beskrive et verste tenkelig tilfelle, eller et pessimistisk scenario. Vi ser tendenser i analysene av omfanget av forsuringa at norske kalde, subpolare farvann kan bli ramma raskere og i større grad enn farvann lenger sør. I så måte er det et trusselbilde som næringa og myndighetene må ta innover seg. Det må føres spesielt nøye med arter som forventes å kunne reagere først, og eventuelt iverksette strengere fangstkontroll for slike arter. Fangstomfanget vil m.a.o. kunne gå ned, men det er ikke sikkert at det næringsmessige tapet blir proporsjonalt med nedgangen. Prisen på råstoffet vil øke, og redusert gangtid, leting og fangsting medfører også redusert drivstofforbruk, noe som utgjør en større og større del av driftsbudsjettet til fiskefartøy.

Fiskerinæringa må under alle omstendigheter ta innover seg de scenariene og utfordringene som havforsuringa representerer, og engasjere seg i kunnskapsdebatten. Næringa må være forberedt på tiltak og kvoteendringer som direkte eller indirekte følge av dette bare om få år. Det kan her bli tale om å måtte innordne seg internasjonale avtaler selv om relevansen for Norge i enkelte tilfeller kan være ubetydelig. Næringa kan selv påvirke prosessene for å få ned utslippene av CO₂ både gjennom egne og andres tiltak. Og næringa kan bistå forskning og forvaltning både internasjonalt og nasjonalt med innsamling av data og deltaking i felles rådslagninger om evt. reguleringer og tiltak.

7.2 Havbruksnæringen

Havbruk med laks i spissen, kan være relativt robust i forhold til forsuring av havet. I fjorder og kystfarvann er det normalt vesentlig større tidsvariasjoner i pH enn i åpent hav, og laksen i merdene står tett og påvirkes også av CO₂ fra egen respirasjon, og pH endringer som følge av dette.

Oppdrett av yngel foregår på land, er i utgangspunktet ferskvannsbasert med streng kontroll og regulering av vannkvalitet, inklusive pH og CO₂. Der vil det fortsatt eksistere muligheter for å kondisjonere vannet til ønsket kvalitet. Råvannskvaliteten (ferskvannet) ventes heller

ikke å bli vesentlig forringa som følge av mer CO₂ i atmosfæren. Ved den gradvise tilpassinga til livet i sjøen tilføres yngel og smolt gradvis mer sjøvann i karene på land, før den settes ut. Det dreier seg om relativt sett små sjøvannsmengder som vil kunne kontrolleres og eventuelt pH-justeres. Slik sett antas ikke yngelproduksjonen og den næringsmessige aktiviteten rundt dette å bli påvirkta funksjonelt sett av forsuringa. Men det er klart at viss markedet, d.v.s. matfisknæringen svikter, så rammes også yngelprodusentene.

Matfiskproduksjonen er basert på fôr som for største delen er marint basert. Store deler av norsk fangst av pelagiske arter som lodde og kolmule går til produksjon av fiskefôr. Også noe makrell og sild går til dette formålet. Så det er klart av viss forsuringa påvirker fangstene av disse artene så kan det også bli problemer med fôrtilgang til laksen. Noe kan erstattes av vegetabilsk fôr, men laks kan neppe tolerere en vesentlig økning av denne prosenten i høve til den innblandinga som alt skjer i dag. Da måtte en eventuelt vurdere alternative (herbivore) arter inn i havbruket. Norge har imidlertid begrensede dyrkingsareal og en kort vekstsesong på land, slik at en vanskelig kan se for seg at fôr fra land skal kunne erstatte fôr fra havet i overskuelig framtid. Dette forholdet kan være annerledes i land med lengre vekstsesong, mer sollys og høyere vekstrate for planter.

7.3 Kystbasert reiseliv, turisme

Det er nærliggende å først og fremst vurdere deler av næringa som ligger ved kysten, selv om innlandet også indirekte kan rammes av en svikt på kysten. Reiseliv som er knytta til hav og kyst, er etter hvert gått over fra å være basert på passiv observasjon og nytelse til mer opplevelsesbasert og direkte engasjerende aktiviteter. Men fortsatt er kysten et attraktivt reisemål for mange, bare for å se og nyte. Disse vil fortsatt kunne nyte synet av naturen og få full glede av turen i så måte. Men dersom andre tradisjonelle næringer knytta til havet skulle bli redusert, vil en kunne få mindre vitale småsamfunn langs kysten, og slik at de også blir mindre attraktive som reisemål. Dette kan imidlertid slå ut begge veier, at folk fra mer og mer tettbygde regioner i verden som søker ro og fred, fortsatt vil kunne finne Norge attraktivt.

Av opplevelsesbasert reiselivsnæring direkte knytta til havet og kysten kan nevnes bl.a. turistfiske, et fiske som er omdiskutert og kontroversielt men som har positive ringvirkninger på kysten med 3 milliarder i årsomsetning i følge tall fra Innovasjon Norge. Svikter

bestandene av kystfisk, typisk sei, kysttorsk, hyse, lyr, så forsvinner grunnlaget for mye av denne næringa. Sel- og kvalsafari har vokst til å bli en betydelig aktivitet i de nordligste fylka spesielt. Opplever disse dyra redusert fødetilgang som følge av havforsuringa så vil de forsvinne fra kysten, og dermed rammes også denne næringa. Men isolert sett ventes det eventuelt ikke å skape store ringvirkninger, siden samfunna langs kysten har levd godt tidligere, uten denne næringa. Dersom sjøfuglen rammes av havforsuringa (se egen rapport om dette), så bortfaller også deler av besøks/gjestegrunnlaget både av generelt naturinteresserte, og av ornitologer.

Sjømat er en viktig ingrediens i mange deler av den kystbaserte turismen, med tillaging av fisk på gamlemåten, ”slow-food” og spesialiteter innafor restaurantfaget som viktige ingredienser. Skulle matmessige viktige arter forsvinne eller bli desimert, vil dette segmentet av næringa bli vesentlig berørt.

Reiselivsnæringa har gjennom alle tider gjennomlevd svingninger i markedet og strukturendringer. Dersom folk fortsatt kan få reise relativt fritt og til rimelig kostnad over lange avstander i fritid og ferie (det er ikke lenger opplagt), så vil nok reiselivsnæringa i Norge være i stand til å få etablert nye produkter, og dermed leve bra videre i et perspektiv på 50-100 år framover.

8. Kunnskapsbehov

Siden vi til en viss grad er i stand til å forutsi forsuren, er det først og fremst de biologiske responsene det haster mest med å få bedre kunnskap om. Dette gjelder på alle nivå fra reproduksjonsstadier til økosystem. For å sammenstille resultater fra biologisk forskning og overvåkning er det behov for modellering. Med de omfattende utfordringene som foreligger vil det også være nødvendig å begynne å arbeide med rekruttering av neste generasjons forskere ved å få problemstillinger omkring utviklingen i havet på agenda i skolen, og ved å opprette stipendiatstillinger ved universitetene.

8.1 Biologisk kunnskap

Det er umiddelbart behov for empirisk kunnskap om effekter av det som man kan kalle moderate forandringer i pH. Slike eksperimenter vil kreve høy grad av kontroll av pH, samt andre miljøvariable som temperatur og salinitet. For en del biologiske eksperimenter vil det være behov for relativt store mengder vann, for eksempel til forsøk med fisk, gyteprosesser, overlevelse av egg og larver, samt zooplankton og deres forskjellige livsstadier.

I den nåværende situasjon vil det være viktig å generere av ny kunnskap omkring effekter av moderat forurening på økosystemene våre viktige fiskeriområder. Det vil være behov for studier av enkeltarter og deres fysiologiske respons, studier av flerbestands respons, og studier av økosystemrespons. Fysiologiske laboratorier finnes, men det må befolkes med nye studenter som kan ta fatt på framtidens utfordringer. Økosystemrespons vil i første omgang kreve muligheter for eksperimentell manipulering og kontroll av kjemi i store vannvolumer. Eksisterende anlegg som i hovedsak er bygget med tanke på akvakultur kan bli et stort aktivum for denne typen forskning. Når det gjelder studier av bentiske prosesser og dyr har NIVA egnede fasiliteter og instituttet har opparbeidet seg god ekspertise for eksperimentelt arbeid på havforsuring. Noe av dette er i samarbeid med Plymouth Marine Lab, UK. Havforskningsinstituttet har moderne anlegg for fysiologiske eksperimenter i en stor skala, og er i ferd med å installere utstyr for pH kontroll for små og store volumer. De tekniske installasjonene skal være ferdig i slutten av 2009, og eksperimentell virksomhet basert på nytt utstyr vil være i gang på nyåret 2010. Også i dette miljøet er det bygget opp et internasjonalt

nettverk som blant annet inkluderer Universiteter i Hong Kong og Tasmania, samt NOAA i USA.

Forvaltningen vil ha behov konkrete prognoser om hvordan sentrale ledd i næringskjeden vil reagere på forsuringen. Derfor vil det være naturlig å bygge opp kunnskap omkring sentrale beitedyr som *Calanus*, krill, samt bløtdyr som vingesnegler og skalldyr. Ikke minst vil det være viktig å undersøke hvordan reproduksjonsprosesser samt overlevelse av egg og yngel vil påvirkes av forsuringen. I tillegg til dyrene vil man også ønske informasjon om hvordan primærproduksjonen vil bli påvirket. Man kan forestille seg forandringer i artsammensetning og suksesjonsmønstre hos fytoplankton. Dette er store og grunnleggende problemstillinger innen planktonøkologien, og det vil igjen være nærliggende å se for seg en satsing knyttet til eksisterende tilnærming til økosystembasert forvaltning av havets ressurser. Det er viktig å komme i gang raskt, en oppbygging av et kunnskapsgrunnlag og kompetanse som er adekvat til å håndtere behovet for forståelse av forsuringseffekter vil ta mange år.

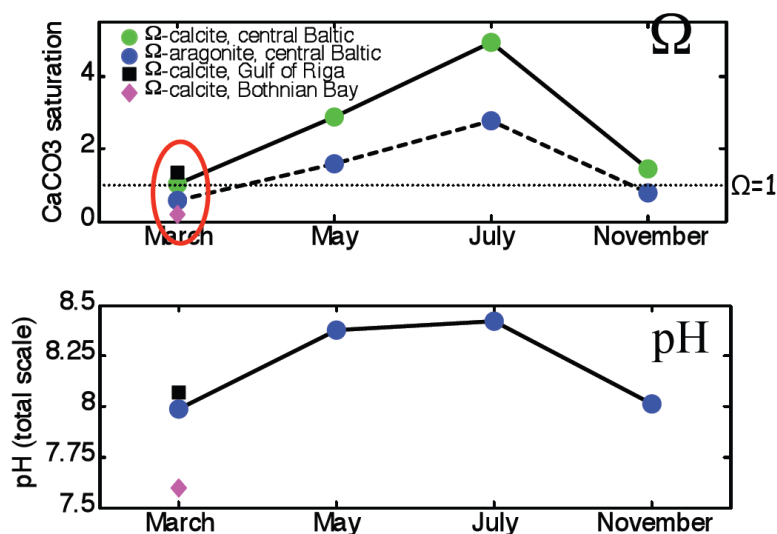
Denne skisserte utviklingen er i praksis umulig å reversere med inngrep på kort sikt. Tiltak som å redusere antropogene utslepp av CO₂ til atmosfæren er viktige og vil hjelpe men det vil ta tid før utslag gjør seg gjeldende nede i havet. Tiltak med kalking som vi kjenner fra forsuring av ferskvatn, vil ikke monne i havet. På sikt kan økt erosjon og avrenning fra land p.g.a. klimaendringene avhjelpe situasjonen noe. I mellomtiden kan vi håpe på at andre (ukjente) modererende miljøfaktorer kan bli aktivert og motvirke eller redusere de framskrevne endringene i havforsuringen.

Forskinga framover vil måtte inkludere både eksperimentelle forsøk og modellering av forsuringseffekter. Det eksisterer modeller som i utgangspunktet kan være gode nok for å gi prognoser for selve forsuringen, mens økosystemmodeller må utvides/omarbeides for å ta inn nye prosesser og komponenter etter hvert som ny eksperimentell kunnskap blir ervervet (ESF 2009).

8.2 Regional variasjon

Kystrømmen har lavere salinitet og alkalinitet enn oseanisk vann, og har sitt opphav delvis i vann fra Østersjøen (Figur 8.1). I Østersjøen er vannet undermettet med hensyn på noen

kalsiumkarbonater om vinteren (Tyrrell et al. 2008). Det mangler data for forsurenningen i kyststrømmen i Skagerrak og nordover langs norskekysten.



DIC and alkalinity measured, by Bernd Schneider and group (IOW)

Figur 8.1 Metningsgrad og pH gjennom året på tre stasjoner i Østersjøen. Fra Tyrrell et al. 2008.

Det trengs flere eksperiment for å undersøke hvordan effektene av de endringene som har kommet fram i mesokosmos-studier av pelagiske økosystem vil påvirke de benthiske økosystemene. Dette kan utføres ved bruk av store flytende mesokosmos eller ved eksperimentell forsurenning av fjorder eller deler av åpent hav. En har behov for kunnskap om forsureningseffekter både på enkeltarter og på samfunnsnivå, og hvordan en øking i CO₂ mengden virker når også andre parametre blir endret (t.d. øket temperatur, endret næringssalttilgang etc.).

Havet som omgir kaldt vannskorallene på den nordre norske kontinentalsokkelen, kan bli undermettet med hensyn på aragonitt ved slutten av dette hundreåret og vil kunne komme ned mot et dødelig nivå for korallene alt innen 50 år. Langtidsovervåking og studier av endringer er nødvendig for å forstå effektene av økt CO₂ på flere marine kalkdannende arter. Det finnes relativt lett tilgjengelige korallrev innaskjærs på Vestlandet som kan fungere overvåkings-lokaliteter.

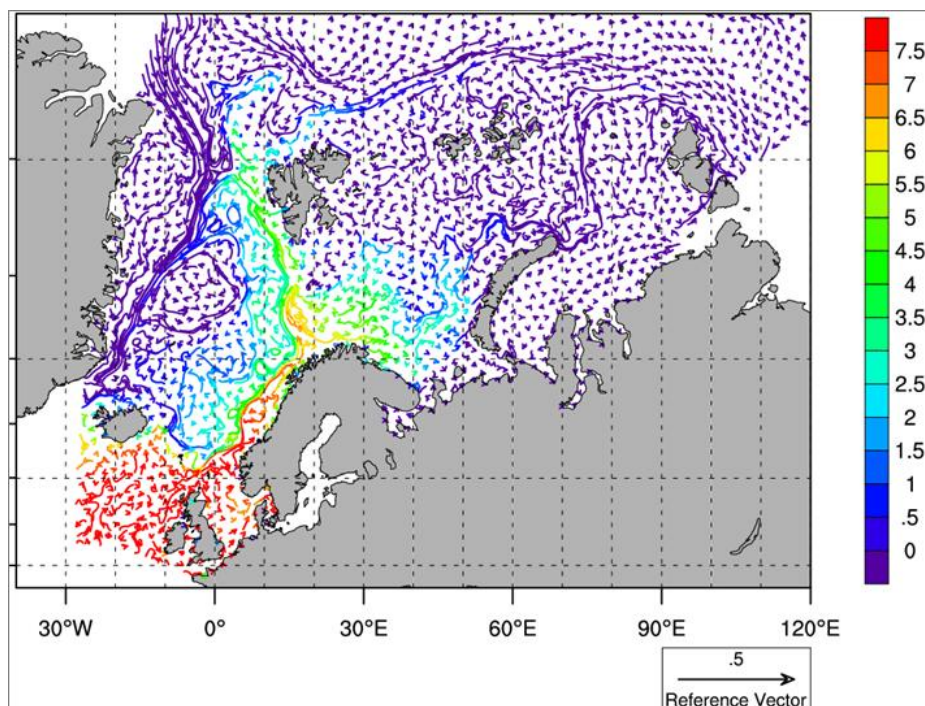
Det er behov for både overvåking og modellering av havet for å få en bedre forståelse av opptaket og endringer i kapasiteten til å holde på antropogent CO₂. For å kunne registrere de endringene som mest sannsynlig vil komme av forsurenningen, er det nødvendig å etablere faste overvåkingsstasjoner for makroalger, bunnfauna m.m. flere steder i forvaltningsområdet.

Stasjonene bør velges ut og etableres snarest for å etablere tidsserier og datasett som gir grunnlag for å vurdere hva som er naturlige variasjoner og hva som er effekt av forsuring og anna klimarelatert endring.

Elver og innsjøer har lenge vært eksponert for forsuring fra svovel og nitrogen. Ferskvann er normalt sterkt eksponert for CO₂ fra tilførsler fra land, bunn og sediment mens påvirkningen fra atmosfæren er relativt sett langt mindre. Derfor er forsuring i ferskvatn p.g.a. CO₂ mindre påaktet enn for havet. Det eksisterer imidlertid bred kunnskap om hvordan økosystemene i ferskvann har reagert på forsuringa der og deler av den kunnskapsbasen samt vitenskapelig metodikk vil kunne nyttes i studier omkring havforsuringa.

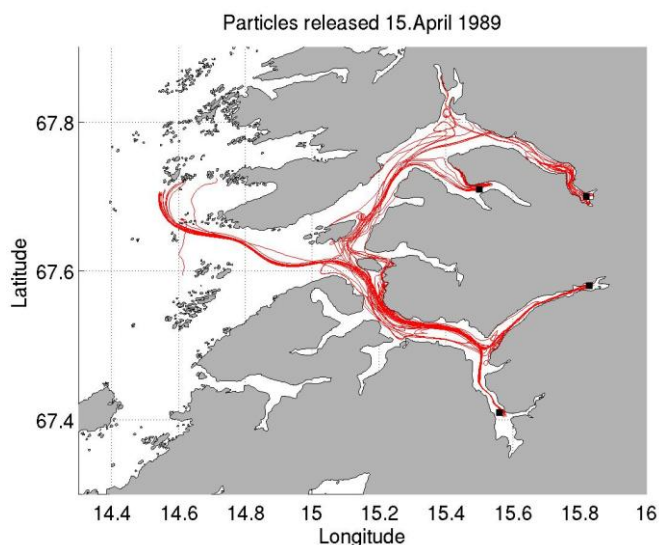
8.3 Modellering

Matematisk simulering er et viktig verktøy i havforskningen (Figur 8.2). Saltholdighet, temperatur og havstrømmer simuleres i dag både rutinemessig til generelle anvendelser samt til bruk i problemstillinger spisset mot spesielle forskningsprosjekter. Slike modeller brukes som grunnlag for biologiske modeller som simulerer primærproduksjon, samt spredning av dyreplankton, egg og fiskelarver (Figur 8.3).



Figur 8.2 Simulering av sirkulasjon + temperatur i 50 meter, februar 2007. Modellen dekker hele Nordiske hav samt deler av Arktis, med oppløsning på 4 km. Denne modellen blir brukt både som grunnlag for biologimodeller (primærproduksjon, Calanus, fiskelarvedrift mm.) og som driver for

finskala modellsimuleringer, f.eks. fjordsimuleringer (Fra Vidar Liens doktorgradsarbeid, Havforskningsinstituttet/UiB).



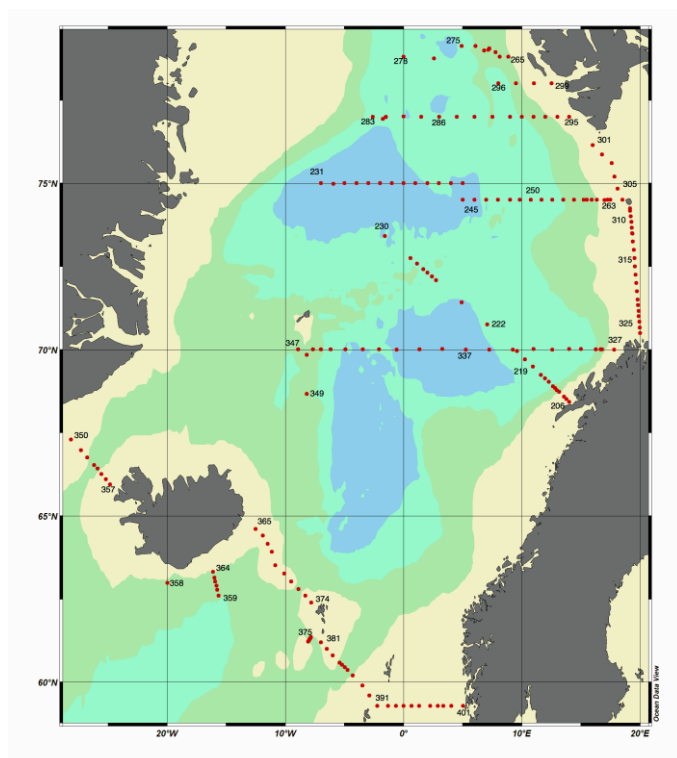
Figur 8.3 Eksempel på bruk av simulering til å beregne drift av torskeegg i Folla fjorden i Nordland . Svarte firkanter viser gyteplasser.

I forsuringsproblematikken vil havmodeller være et viktig verktøy fordi de kan brukes til å ekstrapolere verdier fra måleprogrammer til andre områder. Det er urealistisk å forsøke å bygge opp et overvåkningsprogram med høy nok geografisk oppløsning til å vurdere hvilke forandringer i karbonkjemi de enkelte grupper av marine organismer vil bli utsatt for, med mindre overvåkingen kombineres med havmodeller. Det er bygget opp forsuringsmodeller ved Bjerknessenteret og SINTEF, og disse vil ha en viktig rolle i fremtiden. Imidlertid er det naturlig at modeller som i dag brukes ved Havforskningsinstituttet blir utbygget med karbonkjemi, noe som vil bli en stor oppgave, men som kan gi oss muligheten til å imøtekomme forvaltningens behov i fremtiden. Et samarbeid om denne oppgaven vil antagelig være en god måte å utnytte tilgjengelige ressurser på.

9. Konklusjoner med forslag til overvåkning og mulige tiltak

Karbonkjemien i norske farvann har vært gjenstand for kartlegging og andre undersøkelser i årevis (Omar et al. 2003; Thomas et al. 2005; Olsen et al. 2006; Omar et al. 2007; Skjelvan et al. 2008; Olsen et al., 2009; Olsen, 2009a; Olsen 2009b). Det finnes derfor grunnlagsdata som viser at forsuring har allerede funnet sted, og det er samlet grundig metodisk erfaring som vil være til nytte for framtidig overvåking. Det vil være fornuftig å bygge framtidig overvåking på forskningsmiljø som har erfaring innen dette feltet, det vil si gruppen for biogeokjemi ved Bjerknessenteret for klimaforskning. Det vil være av vesentlig betydning å få utredet historiske data for forsuring i norske farvann, og i herværende rapport har vi samlet en framstilling av utviklingen i Norskehavet i tidsrommet 1981 til 2002 basert på resultater fra Olsen et al. (2006). Tilsvarende utredninger bør lages også for Barentshavet og Nordsjøen, dette krever at institusjonen som har rådataene får tilført midler som gjør dem i stand til å ta på seg en slik oppgave.

Forskningsgruppene Kjemisk oseanografi på GFI (UiB) og Biogeokjemi ved Bjerknessenteret for klimaforskning har lang erfaring med analyse av karbonsystemet i sjøvann. Dette miljøet er med i forskningsfronten på dette feltet internasjonalt og er den eneste forskningsgruppen i Norge i dag som behersker de måleteknikker og som kan måle med den målepresisjon som er nødvendig for å påvise havforsurning. pH er ikke nødvendigvis den mest belysende variabel, men kombinasjonen totalt CO₂ og total alkalinitet gir en meget bedre prosessrelatert forståelse av hvilke prosesser som står bak endringene. Det er derfor naturlig å trekke inn denne forskningsgruppen i planleggingen av strategi for optimal overvåking av forsuringsutviklingen i norske farvann.



Figur 9.1 Oversikt over stasjoner hvor karbonkjemi i de nordiske hav ble målt i profiler fra overflaten til bunns sommeren 2009. Grafikk og data fra Bjerknessenteret.

Eksempelvis har Universitetet i Bergen sammen med Havforskningsinstituttet gjennomført en stor ekspedisjon i de nordiske hav sommeren 2009 (Figur 9.1). Her ble relevant karbonkjemi målt over hele vannsøylen både i transekter tvers over havbassengene, samt i transekter som dekket alle inn- og utstrømningsområder for de nordiske hav. Informasjon fra alle slike ekspedisjoner bør tas med som grunnlag for vurderinger av hvordan framtidig overvåking av forsurening best kan utformes (Tabell 9.1).

Tabell 9.1 Aspekter som er viktig for vurdering av et overvåkningsprogram

Geografisk fordeling

Horisontal og vertikal fordeling

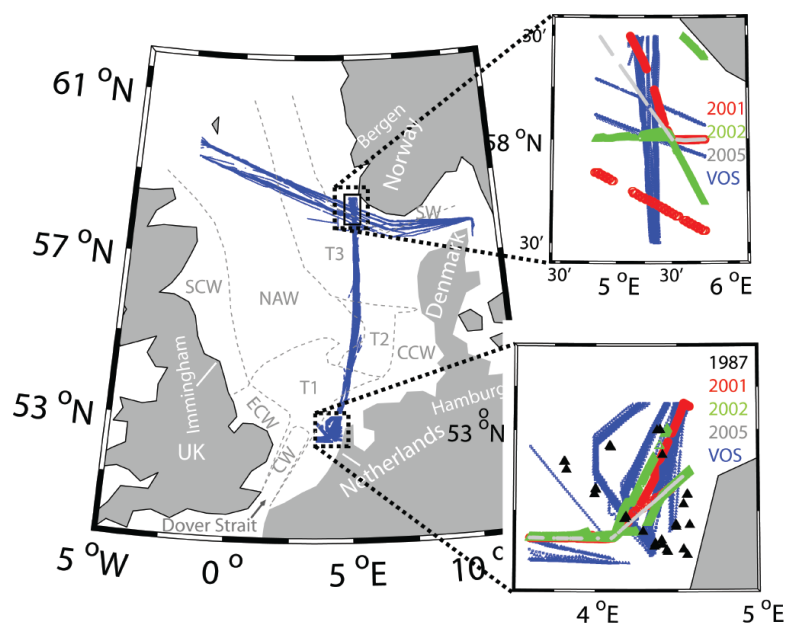
Hyppighet

Vinter

Helårlig

Årlig eller sjeldnere

Det vil være viktig å utforme en overvåkningsstrategi for forsuring som håndterer den naturlige variasjonen i de forskjellige havområdene av interesse. For Nordsjøen har man allerede installert måling av deltrykk CO_2 i inntaksvannet på frakteskuter i rutetrafikk ("Ferrybox"), og disse linjene burde det være interessant å utvide med en variabel i tillegg for overvåking av forsuring (Figur 9.1).

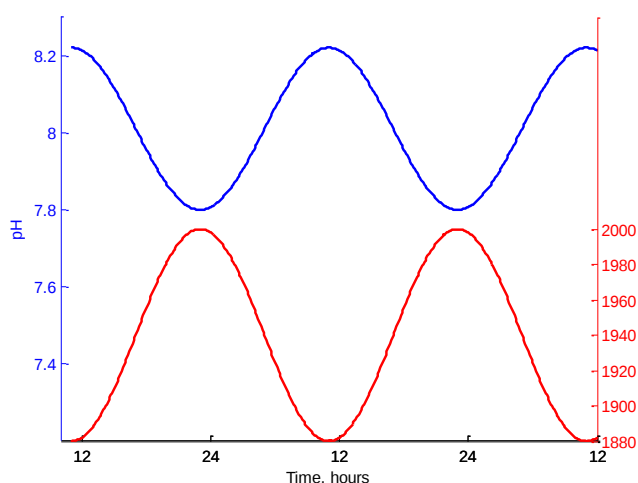


Figur 9.2 Overvåking av overflatevann i Nordsjøen. Kartet viser rutene med best dekning fra 2005 til 2007 med frakteskutene Nuka Arctica og Trans Carrier (blå grafer). Firkanten sørvest av Stavanger viser området hvor rutene krysser. Stiplede firkanter viser hvor mellomårlig variasjon er undersøkt. Rød, grønne og gra grafer viser ruter hvor $p\text{CO}_2$ måles underveis, sorte markører viser stasjoner. Vannmasser er vist ved grå, stiplede grenser. CCW: Kontinentalt kyst vann. NAW: Nordatlantisk vann. SW: Skagerrak. SCW: Skotsk kystvann. ECW: Engelsk kystvann. CW: Engelske kanal. T1-T3: Overgangsområder.

Forventet utvikling av havforsuring er kjent kun i grove trekk. Det er behov for langt mer detaljerte prognoser for norske farvann som kan gi grunnlag for forvaltningsmessige beslutninger. Fra åpent hav i Norskehavet og Barentshavet finnes målinger av karbonsystemet, men datagrunnlag for kyststrømmen og ikke minst fjordene er svakt eller fraværende. Et framtidig overvåkningsprogram bør tilrettelegges med grunnlag i de erfaringer som eksisterer. Som påpekt i denne rapporten må en i tillegg til geografisk fordeling både horisontalt og vertikalt i vannmassene være oppmerksom på den temporære variasjonen som er knyttet til primærproduksjon og respirasjon. I den eufotiske sonen vil signalene fra disse prosessene langt overstige den gjennomsnittlige årlige forsuringsøkningen (Figur 9.3). Gitt at forsuringen går langsomt i forhold til naturlig variasjon kan det tenkes at skipsbasert overvåking som inkluderer prøvetaking av hele vannsøylen bør foretas relativt sjelden, men

med stor intensitet i perioder. For å vurdere utfordringene kan man ta utgangspunkt i målingene fra Stasjon M (Skjelvan et al. 2008, samt kapittel 4.2). Det er klart at for å detektere forandring i C_T på $0,57 \mu\text{mol kg}^{-1} \text{ år}^{-1}$, kreves målenøyaktighet med minst 6 signifikante siffer, men man må i tillegg fjerne støyen fra naturlig variasjon for å oppløse langtidssignalet. I bunnvannet er der ingen døgnvariasjon og heller ikke noen målbar årstidsvariasjon, derfor kan forandringene her detekteres med en relativt lav frekvens av prøvetaking, bare analysemetodene er nøyaktige nok.

I tillegg vil det være naturlig å følge utviklingen av bøyebaserte sensorer nøye, og eventuelt stimulere arbeid med utvikling av slike sensorer, for å legge til rette for kontinuerlige tidsserier på lokaliteter med bøyer, for eksempel slik som utredes for en framtidig stasjon M i Norskehavet.

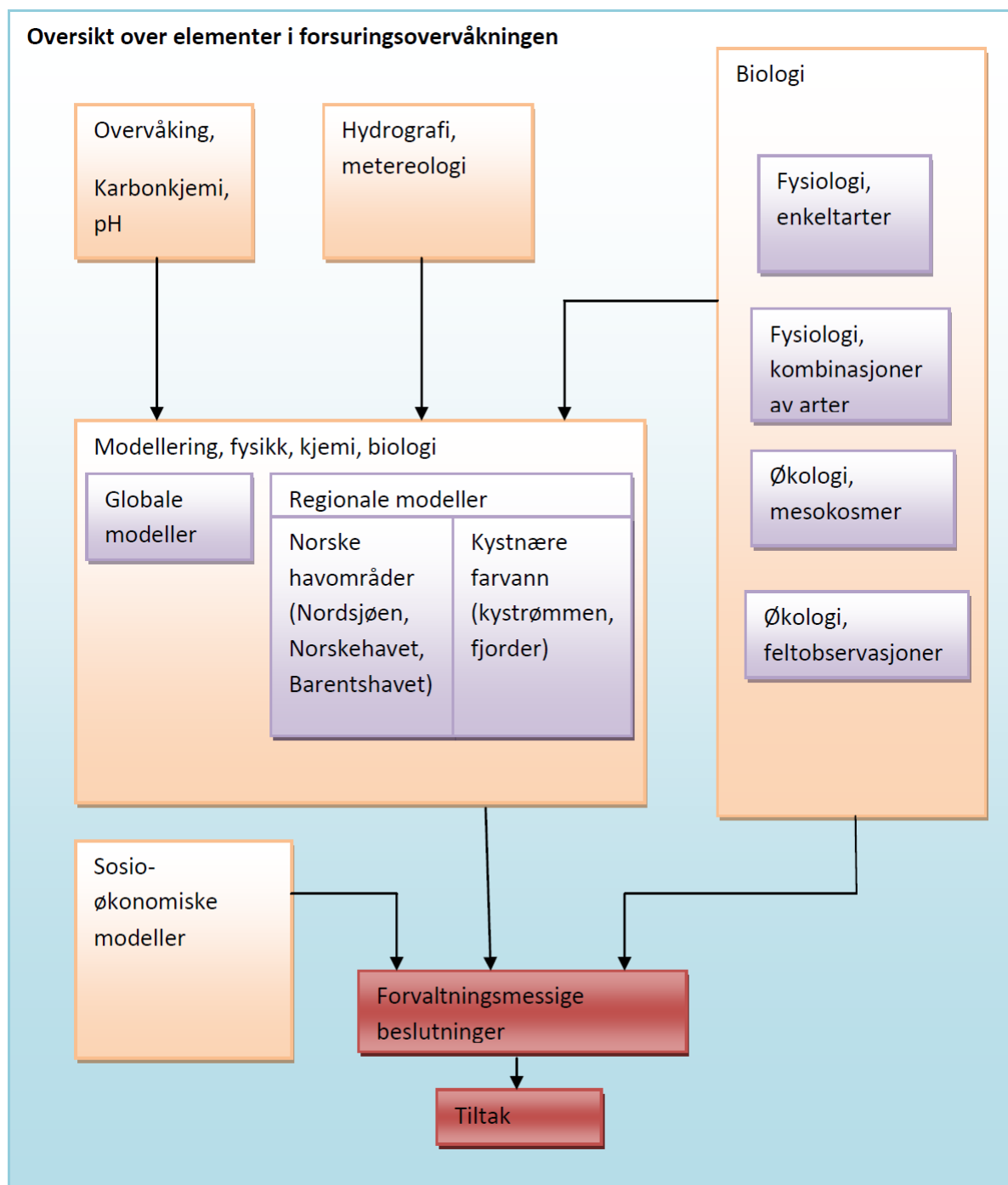


Figur 9.3 Naturlig døgnvariasjon for pH og sum karbonater basert på data fra Tampa Bay, Florida.

Det vil være viktig å etablere baselinje for status i karbonatsystemet i systemer der dette i dag er dårlig karakterisert, slik som fjorder og kyststrømmen.

Det foreligger allerede planer for overvåking av havforsuring i norske farvann, men det er fremdeles behov for å vurdere både metodevalg og strategi for prøvetaking. For å utarbeide en optimal strategi for overvåking bør man få en diskusjon som involverer både forskningsmiljøene og forvaltningen.

Sett i et lengre perspektiv vil vi påpeke at det ikke bare nødvendig å sette i gang et overvåkningsprogram for selve havkjemien, det vil være viktig at kunnskap fra en rekke områder blir syntetisert og benyttet som beslutningsrunnlag for forvaltningen (Figur 9.4).



Figur 9.4 Forslag til flyt mellom innsamling av informasjon, analyse og forvaltning i forsuringsovervåkingen.

10. Referanser

Andersson, A.J., Bates, N.R., Mackenzie, F.T., (2007) Dissolution of carbonate sediments under rising pCO₂ and ocean acidification: Observations from Devil's Hole, Bermuda. *Aquatic Geochemistry* 13 (3): 237-264

Arnold, K.E., Findlay, H.S., Spicer, J.I., Daniels, C.L., Boothroyd, D. (2009) Effect of CO₂-related acidification on aspects of the larval development of the European lobster, *Homarus gammarus* (L.). *Biogeosciences* 6:1747-1754

Arnott, S.A., Ruxton, G.D. (2002) Sandeel recruitment in the North Sea: demographic, climatic and trophic effects. *Marine Ecology Progress Series* 238:199-210

Beaufort, L. Probert, I., Buchet, N., (2007) Effects of acidification and primary production on coccolith weight: Implications for carbonate transfer from the surface to the deep ocean. *Geochemistry Geophysics Geosystems* Art. No. Q08011

Blackford, J.C. og F.J. Gilbert 2007: pH variability and CO₂ induced acidification in the North Sea. *J. Mar. Syst.* 64:229-241.

Bolin, B., E. Eriksson (1959) Changes in the carbon dioxide content of the atmosphere and the sea due to fossil fuel combustion. I: *The Atmosphere and the Sea in motion*, 130-142, Rockefeller inst., N.Y.

Børsheim, K.Y. (2008) Forsuring av havet medfører nye utfordringer for biologisk forskning. *Fisken og havet* nr 3, 2008.

Brooker, W.S. og T-H. Peng 1998: Greenhouse puzzles. Keeling's world, Martin's world, Walker's world. (2. utgåve.) *Eldigio Press*, NY, 260s.

Bozec Y, Thomas H, Elkalay K, de Baar HJW (2005) The continental shelf pump for CO₂ in the North Sea - evidence from summer observation. *Mar Chem* 93:131-147

- Bozec Y, Thomas H, Schiettecatte LS, Borges AV, Elkalay K, de Baar HJW (2006) Assessment of the processes controlling seasonal variations of dissolved inorganic carbon in the North Sea. *Limnol Oceanogr* 51:2746-2762
- Caldeira, K. (2007) What Corals are Dying to Tell Us About CO₂ and Ocean Acidification. *Oceanography* 20:188-195
- Caldeira, K., Wickett, M.E. (2005) Ocean model predictions of chemistry changes from carbon dioxide emissions to the atmosphere and ocean. *J Geophys Res-Oceans* 110
- Caldeira, K.; Wickett, M.E. (2003) "Anthropogenic carbon and ocean pH". *Nature* 425 (6956): 365-365.
- Caldeira, K. og M. E. Wickett, (2005) Ocean model predictions of chemistry changes from carbon dioxide emissions to the atmosphere and ocean. *J. Geophys. Res.*, Vol. 110, No. C9, C09S04, 10.1029/2004JC002671.
- Cooley SR, Doney SC (2009) Anticipating ocean acidification's economic consequences for commercial fisheries. *Environmental Research Letters* 4
- Dickson, A.G., Sabine, C.L., Christian, J.R. (2007) Guide to best practices for ocean CO₂ measurements. Sidney, British Columbia. North Pacific Marine Science Organization (PICES Special Publication , 3)
- Engel, A., Thoms, S., Riebesell, U., Rochelle-Newall, E., Zondervan, I. (2004) Polysaccharide aggregation as a potential sink of marine dissolved organic carbon. *Nature* 428, 929-932
- ESF 2009: Impacts of Ocean acidification. European Science Foundation, Science policy briefing, 12 s.
- Espa S., G. Caramanna, V. Bouche og A.Cenedese (2009) Field study and laboratory experiments of bubble plumes in shallow seas as analogues of sub-seabed CO₂ leakages. *Applied Geochemistry* (in print).

Fabry, V. J., Seibel, B.A., Feely, R.A., Orr, J.C. (2008) Impacts of ocean acidification on marine fauna and ecosystem processes. ICES J. Mar. Sci. 2008 65:414-432

Fairhall, A.W. (1973) Accumulation of Fossil CO₂ in the Atmosphere and the Sea. . Nature: 245:20-23.

Feely, R.A., Sabine, C.L., Lee, K., Berelson, W., Kleypas, J., Fabry, V.J., Millero, F.J. (2004) Impact of anthropogenic CO₂ on the CaCO₃ system in the oceans. Science 305:362-366

Gazeau, F., Quiblier, C., Jansen, J.M., Gattuso, J.P., Middelburg, J.J., Heip, C.H.R.,(2007) Impact of elevated CO₂ on shellfish calcification. Geophysical Research 34 (7): Art. No. L07603

Dupont, S., Havenhand, J., Thorndyke, W., Peck, L., Thorndyke, M. (2008) Near-future level of CO₂-driven ocean acidification radically affects larval survival and development in the brittlestar *Ophiothrix fragilis*. Marine Ecology-Progress Series 373:285-294

Golmen, L.G., J. A. Berge, T. Dale, D. Durand, T. M. Johnsen, E. Lømsland, A. Pedersen, A. Bjørge, S. Christensen-Dalsgaard og N. R. Hareide 2008: Forvaltingsplan for Norskehavet. Deltema forsuring av havet. Rapp. Nr. 5526-2008, NIVA Oslo/Bergen, 75s.

Golmen, L.G. (2005) Sub-seabed CO₂ storage in the North Sea. Nr 5090, NIVA, 30s.

Golmen, L. G. (2009). Forsuring av havet. Vann Nr 4/2009: 355- 366.

Gutowska, M.A., Portner, H.O., Melzner, F. (2008) Growth and calcification in the cephalopod *Sepia officinalis* under elevated seawater pCO₂ Marine Ecology-Progress Series 373:303-309.

Hall-Spencer, J.M., Rodolfo-Metalpa, R., Martin, S., Ransome, E., Fine, M., Turner, S.M., Rowley, S.J., Tedesco, D., Buia M.-C. (2008) Volcanic carbon dioxide vents show ecosystem effects of ocean acidification. Nature 454, 96-99

Haugan, P.M., Turley, C., Poertner, H.O. (2006) Effects on the marine environment of ocean acidification resulting from elevated levels of CO₂ in the atmosphere.

DN-utredning 2006-1

Haugan, P. M. og H. Drange 1996: Effects of CO₂ on the ocean environment. Energy Conversion Mgmt, Vol. 37, 1019-1022.

Havenhand, J.N, Butler, F.-R., Thorndyke, M.C., Williamson, J.E. (2008) Near-future levels of ocean acidification reduce fertilization success in sea urchins. Current Biology 18, no 15:R651-R652

IPCC 2005 (red. Metz et al.): IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Cambridge Press, 443 s.

IPCC 2007c (Caldeira, Akai et al.): IPCC Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage. Kapittel 6: Ocean Storage, 278-318.

Kelley, J.J. (1970) Carbon dioxide in surface waters of North Atlantic Ocean and Barents and Kara Seas. Limnol Oceanogr 15:80-87

Körtzinger, A., L. Mintrop og J.C. Duinker (1998) On the penetration of anthropogenic CO₂ in the North Atlantic Ocean. J. Geophys. Res., 103:18681-18689.

Lewis, E., and D. W. R. Wallace. 1998. Program Developed for CO₂ System Calculations. ORNL/CDIAC-105. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tennessee.

Mayor, D.J., Matthews, C., Cook, K., Zuur, A.F., Hay, S. (2007) CO₂-induced acidification affects hatching success in *Calanus finmarchicus*. Marine Ecology-Progress Series 350:91-97

Melzner F, Gutowska MA, Langenbuch M, Dupont S, Lucassen M, Thorndyke MC, Bleich M, Portner HO (2009) Physiological basis for high CO₂ tolerance in marine ectothermic animals: pre-adaptation through lifestyle and ontogeny? Biogeosciences 6:2313-2331

Melzner, F., Gobel, S., Langenbuch, M., Gutowska, M.A., Portner, H.O., Lucassen, M. (2009) Swimming performance in Atlantic Cod (*Gadus morhua*) following long-term (4-12 months) acclimation to elevated seawater P-CO₂. Aquatic Toxicology 92:30-37

Millero, F.J., R. Feistel, D.G. Wright og T. J. McDougal (2008) The composition of standard seawater and the definition of the reference-composition salinity scale. *Deep Sea Res. I.* 55: 50-72

Monfray, P., Mouchet, A., Najjar, R.G., Plattner, G.K., Rodgers, K.B., Sabine, C.L., Sarmiento, J.L., Schlitzer, R., Slater, R.D., Pearson, P., Foster, G., Wade, B. Atmospheric carbon dioxide through the Eocene/Oligocene climate transition. *Nature* 461, 7267:1110-1114

Mortensen, P.B., Hovland, M.T., Fosså, J.H. Furevik, D.M. (2001) Distribution, abundance and size of *Lophelia pertusa* coral reefs in mid-Norway in relation to seabed characteristics. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 81 (4): 581-597

Munday, P.L., Dixon, D.L., Donelson, J.M., Jones, G.P., Pratchett, M.S., Devitsina, G.V., Doving, K.B. (2009) Ocean acidification impairs olfactory discrimination and homing ability of a marine fish. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 106:1848-1852

Munday, P.L., Crawley NE, Nilsson GE (2009) Interacting effects of elevated temperature and ocean acidification on the aerobic performance of coral reef fishes. *Marine Ecology-Progress Series* 388:235-242

NGU 2002 (Bøe et al.): Storage potential for CO₂ in aquifers in Norway. NGU Rapport 2002.010, 132 s.

Olsen, A., R. M. Key, E. Jeansson, E. Falck, J. Olafsson, S. van Heuven, I. Skjelvan, A. M. Omar, K. A. Olsson, L. G. Anderson, S. Jutterström, F. Rey, T. Johannessen, R. G. J. Bellerby, J. Blindheim, J. L. Bullister, B. Pfeil, X. Lin, A. Kozyr, C. Schirnick, T. Tanhua and D. W. R. Wallace, (2009) Overview of the Nordic Seas CARINA data and salinity measurements, *Earth System Science Data*, 1, 25-34

Olsen A, Omar AM, Stuart-Menteth AC, Trinanes JA (2005) Diurnal variations of surface ocean pCO₂ and sea-air CO₂ flux evaluated using remotely sensed data (vol 31, art no L20304, 2004). *Geophysical Research Letters* 32

Olsen, A. (2009a) Nordic Seas Total Dissolved Inorganic Carbon Data in CARINA, *Earth System Science Data*, 1, 35-43

Olsen, A. (2009b) Nordic Seas total alkalinity data in CARINA, *Earth System Science Data Discuss*, 2, 309--330

Olsen, A., Brown, K.R., Chierici, M., Johannessen, T., Neill, C. (2008) Sea-surface CO₂ fugacity in the subpolar North Atlantic. *Biogeosciences* 5:535-547

Olsen, A., Omar, A.M., Bellerby, R.G.J., Johannessen, T., Ninnemann, U., Brown, K.R., Olsson, K.A., Olafsson, J., Nondal, G., Kivimae, C., Kringstad, S., Neill, C., Olafsdottir, S. (2006) Magnitude and origin of the anthropogenic CO₂ increase and C-13 Suess effect in the Nordic seas since 1981. *Global Biogeochemical Cycles* 20

Olsen, A., Omar, A.M., Bellerby, R.G.J., Johannessen, T., Ninnemann, U., Brown, K.R., Olsson, K.A., Olafsson, J., Nondal, G., Kivimae, C., Kringstad, S., Neill, C., Olafsdottir, S. (2006) Magnitude and origin of the anthropogenic CO₂ increase and C-13 Suess effect in the Nordic seas since 1981. *Global Biogeochemical Cycles* 20

Omar, A., T. Johannessen, S. Kaltin, Olsen A. (2003) Anthropogenic increase of oceanic pCO₂ in the Barents Sea surfacewater, *J. Geophys. Res.*, 108(C12), 3388, doi:10.1029/2002JC001628

Omar, A.M., Johannessen, T., Olsen, A., Kaltin, S., Rey, F. (2007) Seasonal and interannual variability of the air-seaCO₂ flux in the Atlantic sector of the Barents Sea. *Mar Chem* 104:203-213

Omar, A.M., Olsen, A. (2006) Reconstructing the time history of the air-sea CO₂ disequilibrium and its rate of change in the eastern subpolar North Atlantic, 1972-1989. *Geophysical Research Letters* 33

- Omar, A. M., Olsen, A., Johannessen, T., Hoppema, M., Thomas, H., and Borges, A. V. (2009) Spatiotemporal variations of $f\text{CO}_2$ in the North Sea. *Ocean Sci. Discuss.*, 6, 1655-1686.
- Orr, James C., Fabry, Victoria J., Aumont, Olivier, Bopp, Laurent, Doney, Scott C., Feely, Richard A., et al. (2005) Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature* 437:681-696
- Pearson, P.N., Foster, G.L., Wade, B.S. (2009) Atmospheric carbon dioxide through the Eocene-Oligocene climate transition. *Nature* 461:1110-U1204
- Pegler, K. and Kempe, S. (1988) The carbonate system of the North Sea: determination of alkalinity and calculation of PCO_2 and Si_{cal} (spring 1986) *Mitt. Geol.-Paläont. Inst. Univ. Hamburg* 65:35-87
- Planque, B., Taylor, A.H. (1998) Long-term changes in zooplankton and the climate of the North Atlantic. *ICES Journal of Marine Science* 55: 644-654
- Raupach, M.R., Marland, G., Ciais, P., Le Quere, C., Canadell, J.G., Klepper, G., Field, C.B. (2007) Global and regional drivers of accelerating CO_2 emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 104:10288-10293
- Riebesell, U., Schulz, K.G., Bellerby, R.G.J., Botros, M., Fritsche, P., Meyerhofer, M., Neill, C., Nondal, G., Oschlies, A., Wohlers, J., Zollner, E. (2007) Enhanced biological carbon consumption in a high CO_2 ocean. *Nature* 450:545-U510
- Riebesell, U., Zondervan, I., Rost, B., Tortell, P.D., Zeebel, R.E., Morel, F.M.M (2000) Reduced calcification of marine plankton in response to increased atmospheric CO_2 . *Nature* 407, 364-367
- Skjelvan I, Falck E, Rey F, Kringstad SB (2008) Inorganic carbon time series at Ocean Weather Station M in the Norwegian Sea. *Biogeosciences* 5:549-560

Skjelvan, I., Olsen, A., Anderson, L.G., Bellerby, R.G.J., Falck E., Kasajuima, Y., Kivimäe, C., Omar, A.M., Rey F, Olsson, K.A., Johannessen, T., Heinze, C. (2005) A review of the inorganic carbon cycle of the Norwegians Seas and the Barents Sea. I: The Nordic Seas: An intergrated perspective. (Red. H. Drange et al.), AGU Geophys. Monograph, 366 s.

Skogen, M.D., Budgell, W.P., Rey, F. (2007). Interannual variability in Nordic seas primary production. ICES Journal of Marine Sciance 64 (5): 889-898

Smetacek, V., Assmy, P., Henjes, J. (2004) The role of grazing in structuring Southern Ocean pelagic ecosystems and biogeochemical cycles. Antarctic Science 16:541-558

Soetart, K, Hofman, A.F., Middelburg, J.J., Meysman, F.J.R., Greenwood, J. (2007) The effect of biogeochemical processes on pH. Marine Chemistry 105:30-51

Steinacher, M., Joos, F., Frölicher, T.L., Plattner, G. -K., Doney, S. C. (2009) Imminent ocean acidification in the Arctic projected with the NCAR global coupled carbon cycle-climate model. Biogeosciences 6:515-533

St.prp. nr. 49 2006–2007 Samarbeid om håndtering av CO₂ på Mongstad.

Talmage S.C., Gobler ,C.J. (2009) The effects of elevated carbon dioxide concentrations on the metamorphosis, size, and survival of larval hard clams (*Mercenaria mercenaria*), bay scallops (*Argopecten irradians*), and Eastern oysters (*Crassostrea virginica*). Limnol Oceanogr 54:2072-2080

Thomas H, Bozec Y, de Baar HJW, Elkalay K, Frankignoulle M, Schiettecatte LS, Kattner G, Borges AV (2005) The carbon budget of the North Sea. Biogeosciences 2:87-96

Thomas H, Bozec Y, Elkalay K, de Baar HJW, Borges AV, Schiettecatte LS (2005) Controls of the surface water partial pressure of CO₂ in the North Sea. Biogeosciences 2:323-334

Turley, C.M., Roberts, J.M., Guinotte, J.M. (2007) Corals in deep-water: will the unseen hand of ocean acidification destroy cold-water ecosystems? Coral Reefs 26 (3): 445-448

Turley, C., Blackford, J.C., Widdicombe, S., Lowe, D, Nightingale, P.D., Rees, A.P (2006) Reviewing the Impact of Increased Atmospheric CO₂ on Oceanic pH and the marine Ecosystem. *In: Avoiding Dangerous Climate Change (Eds: Schellnhuber, H.J., Cramer, W., Nakicenovic, N., Wigley. T., Yohe, G.)* Cambridge University Press, UK.

Tyrrell T, Schneider B, Charalampopoulou A, Riebesell U (2008) Coccolithophores and calcite saturation state in the Baltic and Black Seas. *Biogeosciences* 5:485-494

Vedernikov, V.I., Demidov, A.B. (1997) Primary production and chlorophyll in the Northeastern region of the Norwegian Sea in July. *Okeanologiya*, 37 (2): 250-256

Voltattorni, N., A. Sciarra, G. Caramanna, D. Cinti, L. Pizzino og F. Quattrocchi (2009) Gas geochemistry of natural analogues for the studies of geological CO₂ sequestration. *Appl. Geochemistry* Vol. 24: 1339-1346.

Wallace, D.W.R. 2001: Storage and tranport of excess CO₂ in the oceans. I: Ocean circulation and climate: observing and modelling the global ocean. (red, G. Siedler et al.), Academic Press, 620s.

Walther, K., Sartoris, F.J., Bock, C., Portner, H.O. (2009) Impact of anthropogenic ocean acidification on thermal tolerance of the spider crab *Hyas araneus*. *Biogeosciences* 6:2207-2215

Wilson, E.J., Friedmann, S.J. , Pollak, M. F. (2007) Research and development: Incorporating Risk, Regulation and Liability of Carbon Capture and Sequestration. *Environ. Sci. Technol.* Vol 41, 5945 – 5952

Yates, K.K., Dufore, C., Smiley, N, Jackson, C., Halley, R.B. (2007) Diurnal variation of oxygen and carbonate system parameters in Tampa Bay and Florida Bay. *Marine Chemistry* 104:110-124



Statens forurensningstilsyn (SFT)
 Postboks 8100 Dep, 0032 Oslo - Besøksadresse: Strømsveien 96
 Telefon: 22 57 34 00 - Telefaks: 22 67 67 06
 E-post: postmottak@sft.no - Internett: www.sft.no

Utførende institusjon Havforskningsinstituttet	ISBN-nummer
---	-------------

Oppdragstakers prosjektansvarlig Knut Yngve Børsheim	Kontaktperson SFT Erik Syvertsen	TA-nummer 2575/2009
		SPFO-nummer

	År 2009	Sidetall 96	SFTs kontraktnummer 5009146
--	------------	----------------	--------------------------------

Utgiver Havforskningsinstituttet	Prosjektet er finansiert av SFT
-------------------------------------	------------------------------------

Forfatter(e) Knut Yngve Børsheim (HI) og Lars Golmen (NIVA)
Tittel - norsk og engelsk Forsuring av havet. Kunnskapsstatus for norske farvann. Ocean acidification. Current knowledge for Norwegian waters.
Sammendrag – summary Rapporten inneholder en oppsummering av kunnskapsstatus for norske havområder når det gjelder havforsuring og forventet utvikling fram mot år 2100. Videre blir det oppsummert hvilke effekter forsuringen vil kunne ha på arter og økosystemer. Viktige aspekter ved overvåkning blir behandlet, og det gis anbefalinger for videre overvåkning av norske havområder med tanke på forsuringsutviklingen.

4 emneord Havforsuring Kunnskapsstatus Effekter av havforsuring Overvåkning av havforsuring	4 subject words Ocean acidification Current knowledge Ocean acidification effects Ocean acidification monitoring
---	--

Postboks 8100 Dep,
0032 Oslo
Besøksadresse: Strømsveien 96

Telefon: 22 57 34 00
Telefaks: 22 67 67 06
E-post: postmottak@sft.no
www.sft.no

Om SFT

Statens forurensningstilsyn (SFT) er et direktorat under Miljøverndepartementet med 300 ansatte på Helsefy i Oslo. SFT arbeider for en forurensningsfri framtid Vi iverksetter forurensningspolitikken og er veiviser, vokter og forvalter for et bedre miljø.

SFTs hovedoppgaver er å:

- overvåke og informere om miljøets tilstand og utvikling
- utøve myndighet og føre tilsyn etter forurensningsloven, produktkontrollloven og klimakvotelovent
- styre og veilede fylkesmennenes miljøvern avdelinger innen SFTs ansvarsområder
- gi råd til Miljøverndepartementet og tydeliggjøre behovet i sektorene for økt miljøinnsats
- delta i det internasjonale miljøvern samarbeidet og utviklingssamarbeidet på miljøområdet

[TA nr 2575/2009](#)