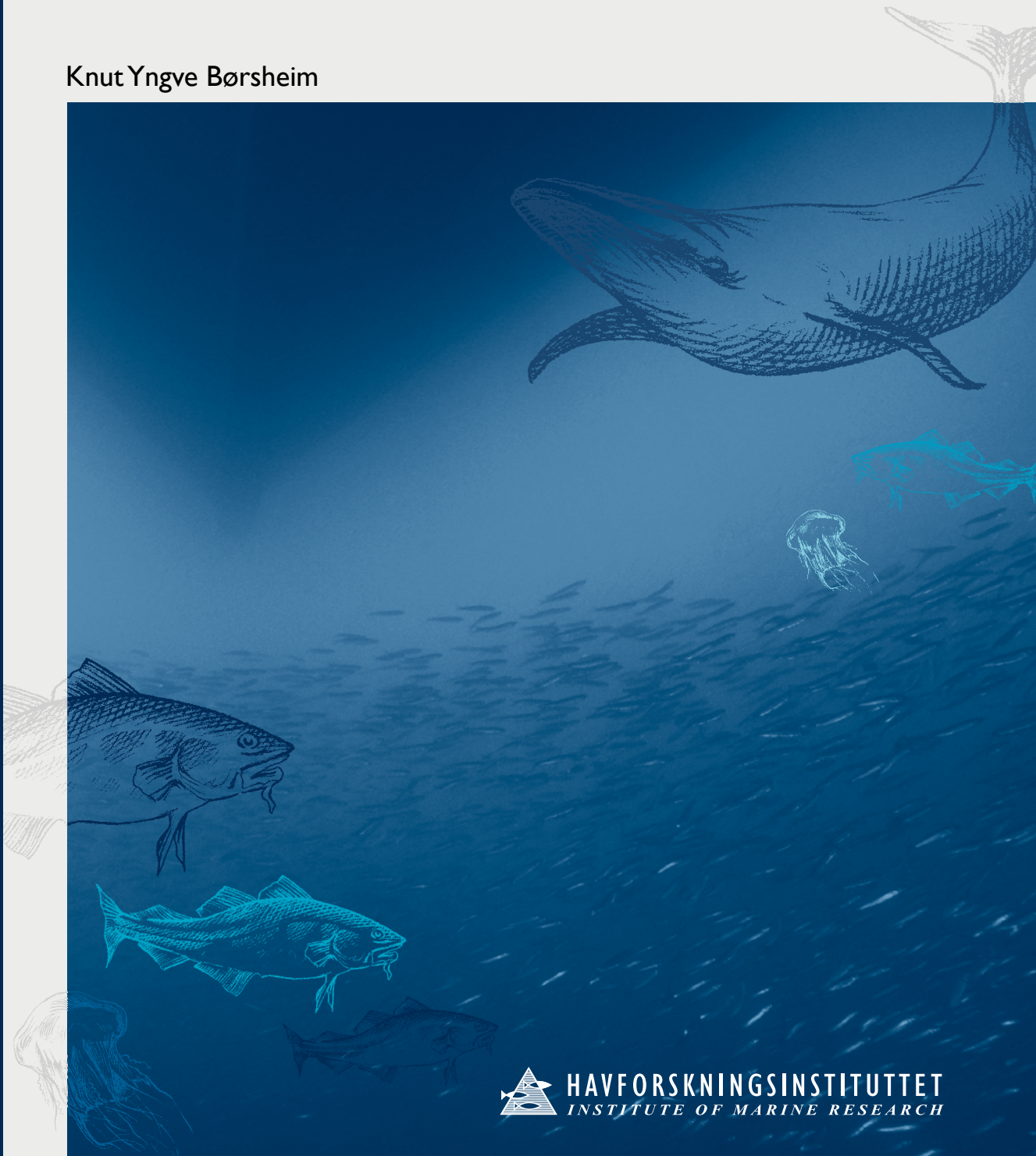


Forsuring av havet medfører nye utfordringer for biologisk forskning

Knut Yngve Børsheim



PROSJEKTRAPPORT



Nordnesgaten 50, Postboks 1870 Nordnes, 5817 BERGEN
Tlf. 55 23 85 00, Faks 55 23 85 31, www.imr.no

Tromsø Flødevigen Austevoll Matre
9294 TROMSØ 4817 HIS 5392 STOREBØ 5984 MATREDAL
Tlf. 55 23 85 00 Tlf. 55 23 85 00 Tlf. 55 23 85 00 Tlf. 55 23 85 00
Fax 77 60 97 01 Fax 37 05 90 01 Fax 56 18 22 22 Fax 56 36 75 85

Distribusjon:

Åpen

Havforskningsprosjektnr.:**Oppdragsgiver(e):**

NorACIA, Norsk polarinstitutt

Oppdragsgivers referanse:**Dato:**

1. mars 2008

Program:

Klima og fisk

Faggruppe:

Oseanografi

Antall sider totalt:

15

Rapport:

FISKEN OG HAVET

Nr. - År

3 - 2008

Tittel (norsk/engelsk):

Forsuring av havet medfører nye utfordringer for biologisk forskning

Forfatter(e):

Knut Yngve Børsheim

Sammendrag:

Etter starten på den industrielle revolusjon for vel 200 år siden har fossilt materiale som kull, olje og naturgass blitt brent til CO₂ i et stadig økende tempo. Det er vel kjent at karbondioksid i atmosfæren gir drivhuseffekt som påvirker klimaet på jorden.

En mindre påaktet konsekvens av tilførsel av CO₂ til atmosfæren, er at det forsurer havet. Den faglige bevisstgjøringen omkring forsuring av havet som konsekvens av CO₂-utslipp til atmosfæren har vokst fram først i løpet av de siste ti år (Caldeira og Wickett 2003). Man kan i dag fastslå og forutsi klart og konsist sammenhengen mellom CO₂ utslipp til atmosfæren og forsuring av havet (Orr et al. 2005). Videre er det vist med sikkerhet at videre utslipp vil forverre problemet, og at det ikke finnes noen kjent teknologi som kan bøte på forsuringseffekten. Begrensning av utslipp av CO₂ til atmosfæren er det eneste kjente tiltaket som kan virke globalt til å bremse forsuringen.

Summary:

Since the beginning of the industrial revolution more than 200 years ago, fossil fuels such as coal, oil, and gas have been burned to CO₂ in at a steadily increasing rate. It is well known that carbon dioxide in the atmosphere has a greenhouse effect that affects the earth's climate.

Less attention has been given to the fact that increased concentration of carbon dioxide in the atmosphere acidifies seawater. Only recently the scientific community has started to realize that acidification of the ocean is a sure consequence of increased amounts of CO₂ in the atmosphere (Caldeira og Wickett 2003). It is foreseeable that increased concentration of CO₂ in the atmosphere will make the oceans more acid (Orr et al. 2005). Currently we do not have any technology to remediate the problem. Decreasing anthropogenic release of CO₂ to the atmosphere is the only identified action that can decelerate ocean acidification.

Emneord (norsk):

1. Forsuring
2. Karbondioksid
3. Klima

Subject heading (English):

1. Acidification
2. Carbon dioxide
3. Climate


.....
prosjektleder


.....
faggruppelider

Innholdsfortegnelse

Sammendrag.....	5
Opptak av CO ₂ i havet.....	5
Økosystemet.....	6
Organismer som danner kalkskall.....	7
Vingesnegler (<i>Pteropoder</i>).....	8
Kalkalgene (<i>Emiliana huxleyi</i>).....	9
Koraller.....	10
Rauåte.....	11
Naturlig variasjon, primærproduksjon.....	11
Behov for bedre kunnskapsgrunnlag.....	13
Konklusjoner.....	14
Referanser.....	14

Sammendrag

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. Det er vel kjent at karbondioksid i atmosfæren gir drivhuseffekt som påvirker klimaet på jorden.

En mindre påaktet konsekvens er at tilførsel av CO₂ til atmosfæren fører til forsuring av havet. Den faglige bevisstgjøringen omkring forsuring av havet på grunn av CO₂-utslipp til atmosfæren har vokst frem først i løpet av de siste ti år (Caldeira og Wickett 2003). Man kan i dag fastslå og forutsi klart og konsist sammenhengen mellom CO₂ utslipp til atmosfæren og forsuring av havet (Orr et al. 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. Begrensning av utslipp av CO₂ til atmosfæren er det eneste kjente tiltak som kan virke globalt til å bremse forsuringen.

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 fossilt brensel samt sementindustrien (Canadell et al. 2007). Dette opptaket har samtidig ført til forsuring av overflatelaget av havet (Soetart et al. 2007). Mulige konsekvenser av forsuringen er blitt utredet i fyldige rapporter som er tilgjengelige elektronisk (Tabell 1). Den herværende rapporten vil konsentrere seg om de mest sentrale problemstillingene, samt de mest prekære forskningsbehovene.

Tabell 1. Rapporter med fyldig dokumentasjon om konsekvenser av surere hav.

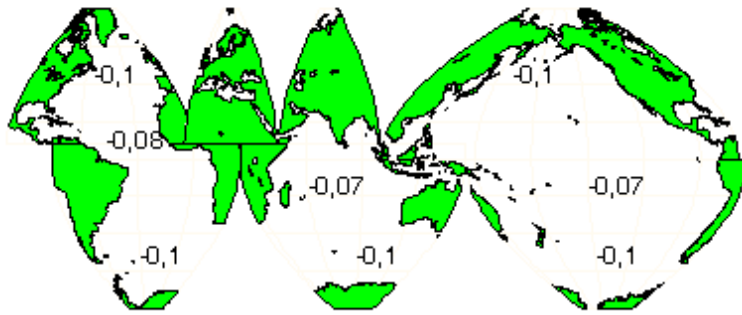
Raven, J., Caldeira, K., Elderfield, H., Hoegh-Guldberg, O. Liss, P.S., Riebessell, U., Shepherd, J., Turley, C., Watson, A.J. (2005) Ocean acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide. Policy Document 12/05. The Royal Society, London.

Scubert, R., Schellnhuber, H.-J., Buchmann, N., Epiney, A., Griesshammer, R., Kulissa, M., Messner, D., Rahmstorf, S., Schmied, J. (2006) The future of the oceans – warming up, rising high, turning sour. German Advisory Council in Global Change (WBGU). Special Report.

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

Fernand, L., Brewer, P. (2007). Report of the Workshop on the significance of Changing Ocean CO₂ and pH in the Shelf Sea Ecosystems. ICES WKCPH, ICES Oceanography Committee.

Nøyaktige målinger av pH i havet fra over hundre tilbake finnes ikke. Imidlertid har vi meget 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 1959. 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 (Figur 1). Forsuringen øker fortest nærmest polene, og sprer seg nedover i vannsøylen og mot ekvator (Figur 1). Også for fremtidsscenarier av 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 minst 0,5 pH enheter de neste hundre år (Steinacker 2007). Uansett hvilket framtidsscenario som blir realisert, vil det være et stort behov for øket kunnskap om de biologiske effektene av et surere hav.



Change in pH from 1820 to 2005

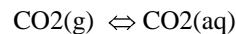
Figur 1. Beregnet forandring i pH i overflatevann fra før den industrielle revolusjon frem til 2005.
Kilde: http://en.wikipedia.org/wiki/Ocean_acidification

Økosystemet

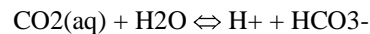
Hvordan havets økosystem vil reagere på en forsurening er ikke enkelt å forutsi. De store grupper av organismer som danner kalkskall, vil få problemer, og problemene vil først vise seg i polare farvann, og bre seg derfra. For blåskjell er det vist at veksthastigheten reduseres allerede ved moderat forsurening (Gazeau et al. 2007). Imidlertid er det all grunn til å bekymre seg for alle grupper av marine organismer. Særlig i formeringsfasen kan endring i pH bli et problem for videreføring av artene (Major et al. 2007).

Karbondioksid som tilføres sjøvann inngår i følgende system av likevekter:

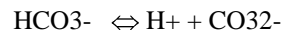
Karbondioksid løses i vann:



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 dannelse av hydrogenioner:



og



Dette betyr at havet tilføres stadig mer hydrogenioner og følgelig synker pH.

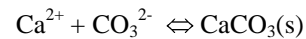
Et generelt trekk er at vi har lite kunnskap om effekter av forsurening i området av de pH-forandringene som forventes i de kommende 10 til 100 år. Effekter av enda mer drastiske pH forandringer har vist at forsurening kan påvirke egg og larver samt sentrale livsprosesser for mange grupper av organismer (Raven et al. 2005). Det vil imidlertid være nødvendig med studier av effekter innen et smalere område av forsuringsgrad, og her er det et forskningsbehov som i all hovedsak tidligere har vært upåaktet. Rent teleologisk vil mange gjerne spørre etter i hvor stor grad nålevende marine arter allerede er tilpasset pH endringer. Vi kjenner til tidligere pH endringer som følge av forandringer i atmosfærens CO_2 -innhold, men det er enighet om at aldri tidligere har forandringene vært så hurtige som den menneskeskapt forandringen som finner sted i vår levetid. Eksempelvis steg konsentrasjonen av CO_2 i atmosfæren med 80 ppm på slutten av de siste istider, men denne stigningen fant sted over ca 6000 år, mens vi har opplevd en økning på 100 ppm i atmosfæren de siste 100 år, en godt og vel 100 ganger raskere forandring (Raven et al. 2005). Selv om det finnes organismer som kan tilpasse seg forandringene, vil det være liten tid til utvikling av nye genetiske tilpasninger til forandringene. Naturen vil i stor grad måtte spille på det genetiske materialet som allerede er utviklet under tidligere, langt langsommere svingninger i havets pH. Hvilke arter som vil komme best ut av den fremtidige situasjonen, vet vi ikke.

Organismer som danner kalkskall

Både blant dyr og alger finnes grupper som danner skall som hovedsakelig består av kalk ($\text{CaCO}_3(\text{s})$). Blåskjell, rur, strandsnegl og kråkeboller er velkjent fra fjæresonen. Kalkalger som for eksempel *Emiliania 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 nærmere overflaten etter hvert som man nærmer seg polarområdene (Orr et al. 2005, Steinacker 2007).

Kalk dannes ved utfelling av kalsium sammen med karbonat:



Økt konsentrasjon av hydrogenioner fører til minket konsentrasjon av CO_3^{2-} , og tilstrekkelig lav konsentrasjon CO_3^{2-} vil føre til sjøvannet blir undermettet på kalsiumkarbonat, og kalk vil over tid gå i oppløsning.

Imidlertid finnes 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 løselighetsdypet for kalsitt dypere enn metningsdypet for aragonitt. I tillegg er det slik at den kjemiske sammensetningen av biologisk dannet kalkskall kan variere i forhold ren kalsitt og aragonitt. For eksempel vil mengden innblandet magnesium variere, og større innslag av magnesium øker løseligheten av disse mineralene. I tillegg vil kalk dannet av organismer kunne inneholde varierende innslag av organisk materiale. Konsekvensen av forskjellene fra rent mineralisk 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.

Kalsiumkarbonat forekommer i to krystallformer:

Kalsitt

Trigonalt krystallsystem

(<http://www.mindat.org/min-859.html>)

Aragonitt

Orthorombisk krystallsystem

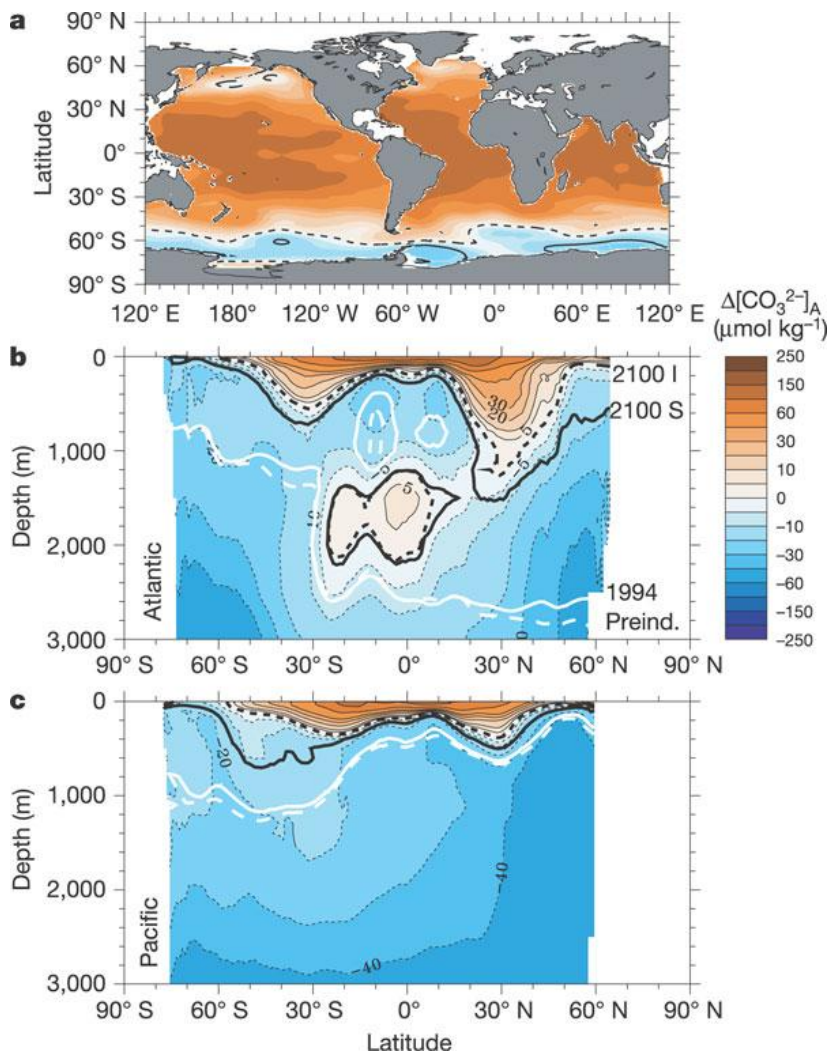
(<http://www.mindat.org/min-307.html>)

Biologisk dannet kalk vil i tillegg avvike fra de rene mineralformene ved innslag av organisk materiale samt andre kationer som for eksempel magnesium.

Når en organisme skal danne kalk, vil dette termodynamisk være enklest når vannet er overmettet på kalk, slik som overflatevannet har vært i de siste millioner av år.

Surhetsgraden endrer løseligheten av kalk hovedsakelig ved å påvirke konsentrasjonen av karbonationer. Kort fortalt vil senking av pH senke konsentrasjonen av karbonationer, og øke løseligheten av kalk. Etter hvert som CO_2 i atmosfæren løser seg i havets overflatevann, og dette vannet blander seg videre ned i havet, stiger metningsdypet for kalk opp mot overflaten, og dermed minker vannvolumet som er gunstig for de kalkdannende organismene. De mest dramatiske effektene kommer først i polare farvann, hvor havet kan bli undermettet med hensyn til kalk helt opp til overflaten i løpet av noen få tiår (Orr et al. 2005). Prognosene for når dette skjer er avhengig av utslippsscenario og klimamodell, men selv de mest konservative kalkyler anslår undermetning i overflatevannet i Antarktis allerede om få tiår. Simuleringene

rapportert av Orr et al. (2005) er å finne som animasjoner på internett (<http://www.ipsl.jussieu.fr/~jomce/acidification/>). Nordområdene mangler i denne rapporten, men beregninger utført ved Universitetet i Bern viser at De nordiske hav og Polhavet vil være de mest sårbare områdene for forsureningen (Steinacker 2007).



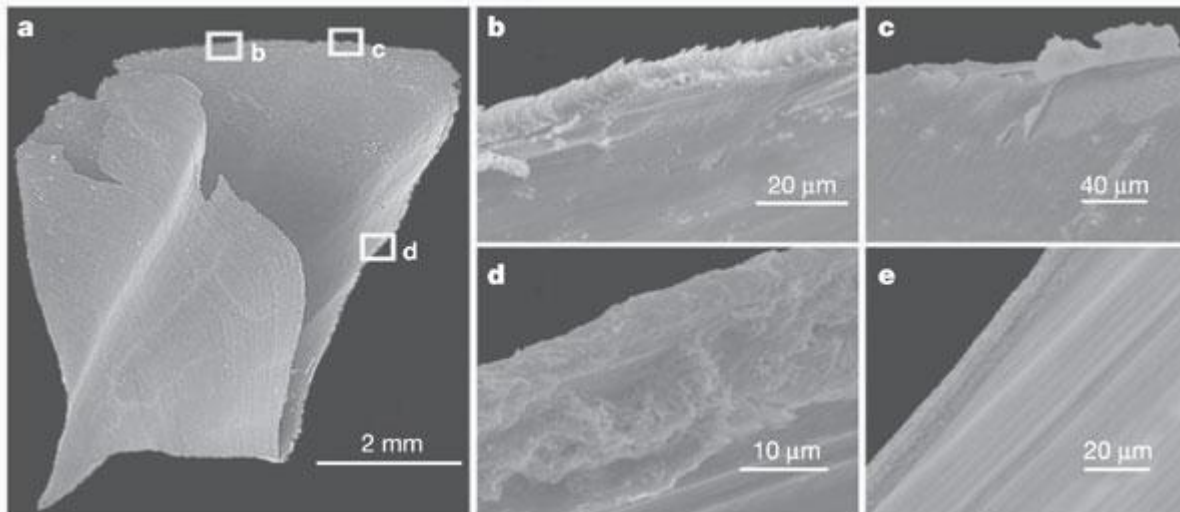
The $\Delta[\text{CO}_3^{2-}]_A$ is the *in situ* $[\text{CO}_3^{2-}]$ minus that for aragonite-equilibrated sea water at the same salinity, temperature and pressure. Shown are the OCMIP-2 median concentrations in the year 2100 under scenario IS92a: **a**, surface map; **b**, Atlantic; and **c**, Pacific zonal averages. Thick lines indicate the aragonite saturation horizon in 1765 (Preind.; white dashed line), 1994 (white solid line) and 2100 (black solid line for S650; black dashed line for IS92a). Positive $\Delta[\text{CO}_3^{2-}]_A$ indicates supersaturation; negative $\Delta[\text{CO}_3^{2-}]_A$ indicates undersaturation.

Figur 2. Utviklingen av metningsgraden for aragonitt under fortsatt CO_2 utslipp. Reprodusert med tillatelse fra Nature (Lisensnummer 1841780900621).

Vingesnegler (Pteropoder)

Vingesneglene spiller en betydelig rolle i marine næringsnett, særlig på høye breddegrader (Smetacek 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. På grunn av at det finnes lite forskning på den utbredelse, fødeinntak og generell økologi og fysiologi hos

vingesneglene, er det grunn til å øke denne. Det vist at den forsurening kan ha konkurranse-svekkende effekter på vinkesneglene i Antarktis (Orr et al. 2005). Hvilke effekter en forverring av vingesneglenes konkurransevne for eksempel i Barentshavet er et viktig spørsmål å utrede, ikke minst med tanke på fiskeressursene som står på spill.



a–d, Shell from a live pteropod, *Clio pyramidata*, collected from the subarctic Pacific and kept in water undersaturated with respect to aragonite for 48 h. The whole shell (**a**) has superimposed white rectangles that indicate three magnified areas: the shell surface (**b**), which reveals etch pits from dissolution and resulting exposure of aragonitic rods; the prismatic layer (**c**), which has begun to peel back, increasing the surface area over which dissolution occurs; and the aperture region (**d**), which reveals advanced shell dissolution when compared to a typical *C. pyramidata* shell not exposed to undersaturated conditions (**e**).

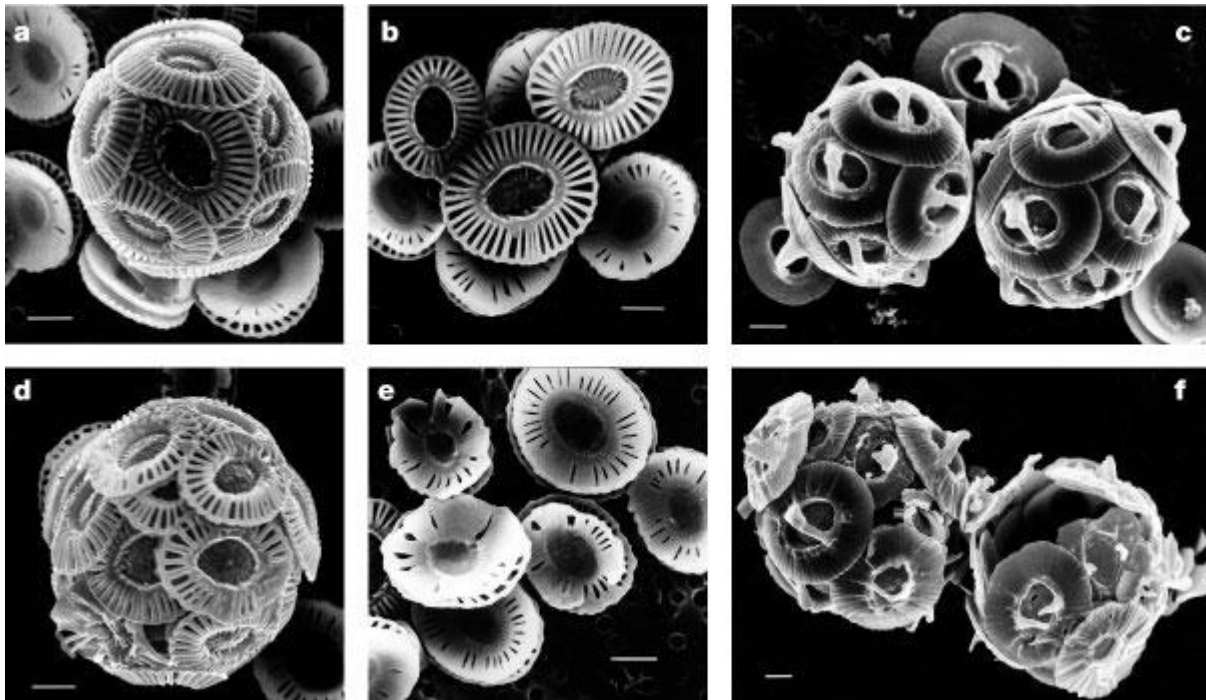
Figur 3. Effekt av forsurening på skall fra vingesnegl. Fra Orr et al. 2005, reproduisert med tillatelse fra Nature (lisens nummer 1841780900621).

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 CO₂-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 CO₂ 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 CO₂ og Ca²⁺, en prosess som gir netto produksjon av CO₂ og følgelig bidrar til forsurening. Denne tosidigheten i forhold til total balanse i deres CO₂ budsjett har gjort at det er noe uklart hvorvidt disse algene bidrar positivt eller negativt i forhold til transport av CO₂ 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 mangelvare. 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 CO₂.



a, b, d, e, *Emiliana huxleyi*; and c, f, *Gephyrocapsa oceanica* collected from cultures incubated at [CO₂] ≈ 12 μmol l⁻¹ (**a– c**) and at [CO₂] ≈ 30–33 μmol l⁻¹ (**d–f**), corresponding to pCO₂ levels of about 300 p.p.m.v. and 780–850 p.p.m.v., respectively. Scale bars represent 1 μm. Note the difference in the coccolith structure (including distinct malformations) and in the degree of calcification of cells grown at normal and elevated CO₂ levels. Pictures are selected from a large set of SEM photographs to depict the general trend in coccolith calcification. As the culture medium was super-saturated with respect to calcium carbonate under all experimental conditions, post-formation calcite dissolution is not expected to have occurred.

Figur 4. Effekt av forsuring på skallene til levende kalkalger. Fra Riebesell et al. (2000), reproduisert med tillatelse fra Nature (lisens nummer: 1842400813331).

Koraller

Kaldtvannskorallene er økosystemer av stor betydning som habitat for en rekke fisk og mange andre dyr. Det har i de siste år 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 i Europa. Ved Røst finnes verdens største kjente kaldtvannsrev, disse oasisene på en ellers ugjestmild havbunn er vi bare så vidt begynt få et glimt av, men vi har en biologisk ressurs som det kunne være vel verdt å ta vare på (Figur 5) .

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.



Figur 5. Fra korallrev på 200 meters dyp i Lophhavet (70°30'N).

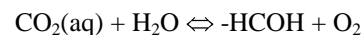
Rauåte

Rauåte er antatt å være det viktigste leddet mellom primærproduksjon og fiskelarver i våre farvann. 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. Hvordan disse skallene vil reagere på forsurenningen 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 (Major et al. 2007).

Naturlig variasjon, primærproduksjon

I tillegg til innflytelsen av CO₂ tilført havet fra atmosfæren, vil biologisk omsetning av karbon ha betydning for sjøvannets surhetsgrad. Primærprodusentene konsumerer CO₂ og fotosyntese øker derfor vannets pH.

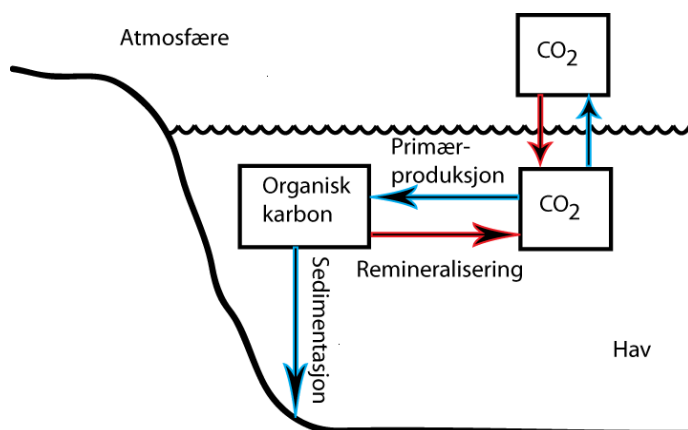
Primærproduksjon kan framstilles som



der -HCOH står for organisk materiale. Fotosyntesen forbruker syren CO₂ og produktene er nøytrale i forhold til pH, derfor stiger pH i vann med høy primærproduksjon.

Når pH stiger, vil dette øke opptaksraten av CO₂ fra atmosfæren, så vann med høy produksjon vil også ha potensiale for øket opptak av CO₂. Den omvendte prosessen, respirasjon eller nedbrytning av organisk materiale, vil produsere CO₂ og forårsake tilsvarende senkning av pH. Dette er velkjent gammel kunnskap, men jeg nevner det fordi problemstillingen omkring forsuring av havet spenner over en rekke fagområder, og naturlig variasjon kan fort virke forvirrende og avsporende.

Det er ikke slik at primærproduksjonen i et lengre tidsvindu motvirker forsuringseffekten av øket CO₂ i atmosfæren (e.g. Soetart et al. 2007). Når CO₂ konsumeres i overflatevann, vil dette øke gradienten av partialtrykk mellom vannet og atmosfæren, og netto diffusjonshastighet av CO₂ ned i havet øker. Resultatet av disse prosessene vil i tillegg avhenge av hvilken skjebne det produserte organiske materialet går til. I løpet av året vil store deler av primærproduksjonen bli mineralisert i den øverste delen av vannsøylen, og noe som igjen kan favorisere utgassing av CO₂, og totalresultatet kan eventuelt bli nøytralt over årsgjennomsnittet. Deler av det organiske materialet vil sedimentere, og denne fraksjonen vil gi et netto bidrag til forhøyet pH i overflaten, med mindre diffusjon fra atmosfæren effektivt kompenserer for CO₂ konsumert i primærproduksjonen (Figur 6).



Figur 6. Skjematiske oversikt over utvekslingen av CO₂ med atmosfæren og hovertrekkene i den biologiske karboncyklus. Blå piler viser prosesser som fører til økning i sjøvannets pH, de røde pilene viser prosesser som gir surere vann.

Veksling mellom fotosyntese og respirasjon gjennom døgnet kan gi pH-variasjoner som er store i forhold til de systematiske forandringene som kommer av langsiktig forandring i mengde CO₂ i atmosfæren. I to kystnære lokaliteter, Tampa Bay og Florida Bay i USA, er det vist at døgnvariasjon i pH strakk seg over 0,22 og 0,39 pH enheter sent på sommeren (Yates et al. 2007). Hele denne variasjonen kunne forklares ut fra karbonatsystemet, samt vekslingen mellom fotosyntese om dagen og respirasjon om natten. Variasjonene vil være mindre i mindre produktive farvann, men prinsippet blir det samme, og det blir klart at enkeltmålinger av pH ikke kan brukes til å finne langtidstrendene i pH uten at målingene tolkes ut fra kunnskapen om de naturlige variasjonene og sammenhengen med hele buffersystemet i sjøvannet.

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. I åpent hav vil en finne langt jevnere fordeling av pH i overflatevann, men klar gradient fra overflatevann til dypvann (Tabell 2). Nedbrytning av sedimenterende organisk materiale vil anrike dypvannet med CO₂ og andre næringsalter, og vannet vil derfor være surere enn vanlig overflatevann og mer næringsrikt. Dypvannet i Stillehavet er surere enn i Atlanterhavet, fordi Stillehavsvannet er eldst og nedbrytning av organisk materiale har foregått i lenger tid enn i Atlanterhavet (Tabell 2). I begge havområdet er pH lavest ved rundt 1000 meters dyp. I såkalte oppstrømsområder, der dypvann blir presset opp til overflaten, vil man gjerne finne lave pH-verdier i grunt vann simpelthen fordi dette vannet nylig stammer fra det surere dypvannet.

Tabell 2. Sammenligning av dybdefordelingen av pH i Atlanterhavet og Stillehavet

	Atlanterhvet	Stillehavet
Overflaten	8,15	8,15
Rundt 1000 m dyp	7,95	7,61
3-5000 m	8,12	7,97

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

Det kan virke som en selvmotsigelse at vi bekymrer oss for en forandring i sjøvannets pH på 0,1 enheter, når døgnvariasjoner kan komme opp i 0,2 til 0,4 enheter, og gradienten mot dypvannet er opptil 0,5 enheter. Det er imidlertid ikke slik at de naturlige variasjoner bidrar med usikkerhet om prognosene for forsuringsprosessen. Vi vet at overflatevannet kommer til

å bli surere ved tilførsel av CO₂ til atmosfæren, og at overflatevannet vil bli undermettet med hensyn til kalk i polare strøk i løpet av de nærmeste tiår. Dette vil helt sikkert påvirke levevilkårene for kalkdannende organismer, og hvordan det vil påvirke andre organismer vet vi simpelthen for lite om.

Behov for bedre kunnskapsgrunnlag

En framtid med surere hav kan forutsies, men de biologiske konsekvensene er mildt sagt uklare. Det er et problem at rapporterte eksperimenter i litteraturen som viser konsekvenser av senket pH i sjøvann stort sett har undersøkt langt større grader av forsuring enn det som vil være realiteten i alle fall de neste 50 år. Ved senking av pH til under 7, er det lett å påvise alvorlige effekter, særlig er det verd å merke seg negative effekter på marine egg og larver. Imidlertid er det et 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 Norge er vi den heldige situasjon at vi nettopp har bygget noen av verdens mest moderne anlegg for kontroll av sjøvann til bruk i omfattende biologiske eksperimenter. Ved stasjon Matre på Havforskningsinstituttet er det installert hypermoderne sett av sjøvannstanker med mulighet for kontroll av de aktuelle miljøvariablene. Et viktig moment er dette laboratoriet har rensing av avløpsvannet, og at denne rensingen er god nok til at anlegget er sertifisert for arbeid med organismer som er fremmed for lokaliteten i Matre. Dette åpner muligheten for arbeid med organismer fra for eksempel Arktis, som er svært aktuelt i forbindelse med forskningsbehovet. I tillegg har vi moderne forskningsanlegg både i Ny-Ålesund og Longyearbyen, der arktiske arter kan studeres i sitt naturlige miljø.

I den nåværende situasjon vil det være viktig å initiere kunnskapsgenerering omkring effekter av moderat forsuring av våre viktige fiskeriområder som for eksempel Barentshavet. Eksisterende anlegg som i hovedsak er bygget med tanke på akvakultur kan bli et stort aktivum for denne typen forskning. Havforskningsinstituttet Stasjon Matre har unike muligheter, og kombinert med et enormt internasjonalt forskningsbehov ligger det her en mulighet til å utvikle et miljø som kan fungere som både nasjonalt og internasjonalt senter for fysiologisk forskning knyttet til forandringer i sjøvannets kjemi. Dette behøver på ingen måte å være i konflikt med anleggets planlagte rolle innen akvakulturforskningen, tvert i mot vil man kunne se for seg en berikelse og forsterking av hele fagmiljøet som baserer seg på biologiske studier i kontrollerte relativt store volumer av sjøvann. I tillegg kan man se for seg muligheter for støtte innen EU sine programmer for spesielle store marine forskingsenheter. Selv uten slik støtte vil ganske sikkert anlegget slik det er utstyrt i dag kunne trekke til seg meget avanserte prosjekter innen problemstillingen omkring moderat forsuring.

Det vil ikke være til å komme forbi at forvaltningen vil ønske 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 fyttoplankton. Dette er store og

grunnleggende problemstillinger innen planktonøkologien, og det vil igjen være nærliggende å se for seg en satsing knyttet til Havforskningsinstituttets 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.

Konklusjoner

- Tilførsel av CO₂ til atmosfæren fører til forsuring av havet
- De nåværende CO₂ utslipp gir en forsuring som går over 100 ganger raskere enn naturen har gjennomgått tidligere i slutten av istidene
- Naturlig reversering av forsuring vil ta tusenvis av år, ingen kjente tiltak kan nevneverdig akselerere reverseringen av forsuringen på global skala
- Forsuring vil ha negativ påvirkning på livsvilkårene for kalsifiserende organismer i havet, samt potensielt negativ virkning på følsomme biologiske prosesser som reproduksjon og tidlige stadier som egg og larver
- Det eneste praktiske alternativ til å risikere stor skala forandringer som følge av fortsatt forsuring av havet, er å redusere CO₂ utslippene
- Det foreligger et stort udekket kunnskapsbehov om effekter av moderat forsuring på livet i havet.

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
- 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
- Caldeira, K.; Wickett, M.E. (2003). "Anthropogenic carbon and ocean pH". *Nature* 425 (6956): 365-365.
- 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
- Fernand, L., Brewer, P. (2007). Report of the Workshop on the significance of Changing Ocean CO₂ and pH in the Shelf Sea Ecosystems. ICES WKCPH, ICES Oceanography Committee.
- 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
- 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 Letters* 34 (7): Art. No. L07603
- 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

- 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
- Raven, J., Caldeira, K., Elderfield, H., Hoegh-Guldberg, O. Liss, P.S., Riebesell, U., Shepherd, J., Turley, C., Watson, A.J. (2005) Ocean acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide. Policy Document 12/05. The Royal Society, London.
- 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 CO₂. *Nature* 407, 364-367
- Scubert, R., Schellnhuber, H.-J., Buchmann, N., Epiney, A., Griesshammer, R., Kulissa, M., Messner, D., Rahmstorf, S., Schmied, J. (2006) The future of the oceans – warming up, rising high, turning sour. German Advisory Council in Global Change (WBGU). Special Report.
- 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
- 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
- Yates. K.K., Dufore, C., Smiley, N, Jackson, C., Halley, R.B. (2007) Diurnal variation of oxygen and carbonate system parameters in Tamba Bay and Florida Bay. *Marine Chemistry* 104:110-124.

Retur: Havforskningsinstituttet, Postboks 1870 Nordnes, NO-5817 Bergen



HAVFORSKNINGSINSTITUTTET

Institute of Marine Research

Nordnesgaten 50 - Postboks 1870 Nordnes
NO-5817 Bergen
Tel.: 55 23 85 00 – Faks: 55 23 85 31

HAVFORSKNINGSINSTITUTTET

AVDELING TROMSØ

Sykehusveien 23, Postboks 6404
NO-9294 Tromsø
Tlf.: 77 60 97 00 – Faks: 77 60 97 01

HAVFORSKNINGSINSTITUTTET

FORSKNINGSSTASJONEN FLØDEVIGEN

Nye Flødevigveien 20
NO-4817 His
Tlf.: 55 23 85 00 – Faks: 37 05 90 01

HAVFORSKNINGSINSTITUTTET

FORSKNINGSSTASJONEN AUSTEVOLL

NO-5392 Storebø
Tlf.: 55 23 85 00 – Faks: 56 18 22 22

**HAVFORSKNINGSINSTITUTTET,
FORSKNINGSSTASJONEN MATRE**

NO-5984 Matredal
Tlf.: 55 23 85 00 – Faks: 56 36 75 85

**SAMFUNNSKONTAKT OG KOMMUNIKASJON
PUBLIC RELATIONS AND COMMUNICATIONS**

Tlf.: 55 23 85 00 – Faks: 55 23 85 55
E-post: informasjonen@imr.no

www.imr.no

