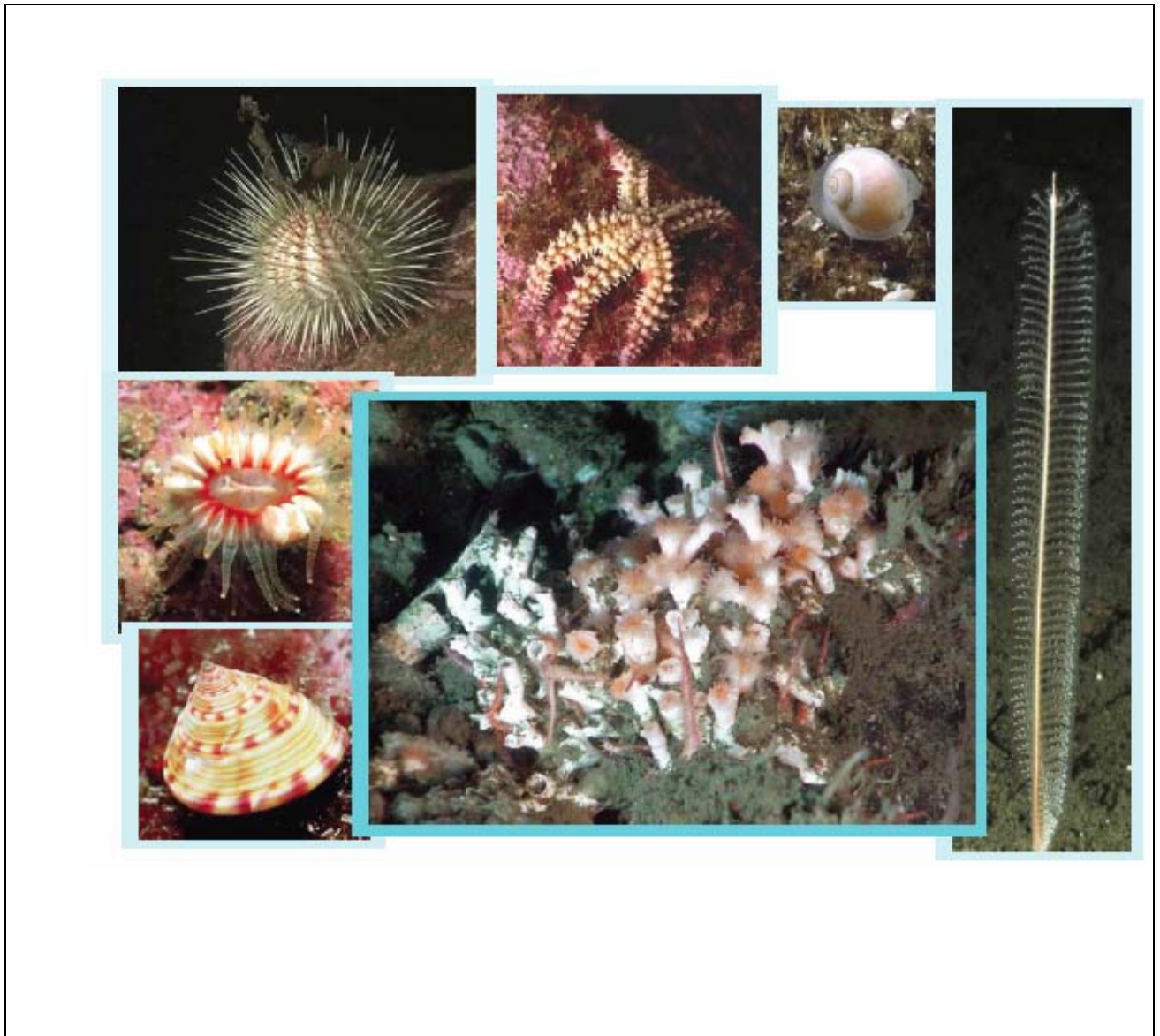


Forvaltingsplan for Norskehavet

Deltema

Forsuring av havet



Hovedkontor

Gaustadalléen 21
0349 Oslo
Telefon (47) 22 18 51 00
Telefax (47) 22 18 52 00
Internett: www.niva.no

Sørlandsavdelingen

Televeien 3
4879 Grimstad
Telefon (47) 22 18 51 00
Telefax (47) 37 04 45 13

Østlandsavdelingen

Sandvikaveien 41
2312 Ottestad
Telefon (47) 22 18 51 00
Telefax (47) 62 57 66 53

Vestlandsavdelingen

Postboks 2026
5817 Bergen
Telefon (47) 2218 51 00
Telefax (47) 55 23 24 95

NIVA Midt-Norge

Postboks 1266
7462 Trondheim
Telefon (47) 22 18 51 00
Telefax (47) 73 54 63 87

Tittel Forvaltingsplan for Norskehavet Deltema forsuring av havet	Løpenr. (for bestilling) 5526-2008	Dato 22. januar 2008
	Prosjektnr. Undernr. 27446	Sider Pris 73
Forfattarar L. G. Golmen, J. A. Berge, T. Dale, D. Durand, T. M. Johnsen, E. Lømsland, Are Pedersen, Arne Bjørge (HI), Signe Christensen-Dalsgaard (NINA), N. R. Hareide (Runde miljøseniter)	Fagområde Oseanografi m.m.	Distribusjon open
	Geografisk område Norskehavet	Trykka NIVA

Oppdragsgeivar Direktoratet for naturforvaltning (DN), N-7485 Trondheim	Oppdragsreferanse 07/040051, E. Postmyr
--	---

Samandrag På oppdrag frå Direktoratet for naturforvaltning, DN, har Norsk institutt for vannforskning, NIVA, gjennomført ein litteraturstudie/review av temaet forsuring av havet, med fokus på Norskehavet. Bakgrunnen er den aukande konsentrasjonen av CO₂ i havet som følgje av antropogene utslepp til atmosfæren. Sidan førindustriell tid har pH i havet blitt redusert med ca 0.1, og det er rekna med vidare reduksjon på 0.1 -0.2 i pH dei næraste ti-åra, og reduksjon på inntil 0.5 - 0.7 fram mot år 2100. På lenger sikt kan havforsuringa bli alvorleg særleg for marine artar med kalkskal. For kaldtvasskorallar og nokre andre følsame nøkkelartar i økosystemet kan ein no vere i ferd med å passere tolegrensa. Rapporten konkluderer med at det fram til år 2025 på basis av dagens kunnskap ikkje kan forventast dramatiske effektar av forsuringa dersom prognosene for pH endring held stikk. Men det er noko uvisse knytt til prognosane og særleg til kunnskapen om effektar, slik at endringar kan kome tidlegare enn venta. Det er tilrådd å auke fokuset på problemet ved å styrke forskning og overvaking og internasjonalt samarbeid på området. Informasjon om temaet bør formidlast nasjonalt og då særleg blant offentlege organisasjonar og næringar.

Fire norske emneord	Fire engelske emneord
1. CO ₂ i havet	1. Ocean CO ₂
2. Forsuring	2. Ocean acidification
3. Effekt på økosystem	3. Ecological impact
4. Norskehavet	4. Norwegian Sea

Lars G. Golmen
Prosjektleder

Dominique DURAND

Dominique Durand
Forskningsleiar

Jarle Nygard
Fag-og marknadsdirektør

Forvaltingsplan for Norskehavet

Deltema

Forsuring av havet



Norske frimerke 2007 med havmotiv. © Posten Norge.

Forsideillustrasjon: Sentralt foto (*Lophelia pertusa*) reproduisert med løyve frå NOAA. Resten av bilda er fotografert av Are Pedersen, NIVA.

Føreord

Forsuring av havet som følgje av auka tilførsler av CO₂ frå atmosfæren kan vise seg å bli eit stort og globalt miljø- og ressursproblem. Foreliggende rapport har fokus på Norskehavet og havforsuring.

Prosjektet er gjennomført av Norsk institutt for vannforskning (NIVA), på oppdrag for Direktoratet for naturforvaltning (DN). Rapporten er ein av fleire temautgreingar som skal danne grunnlag for etablering av Forvaltingsplan for Norskehavet.

Kontrakten for oppdraget blei ferdigstilt i slutten av november 2007, med rapporteringsfrist 15. januar 2008, med eit budsjett motsvarande om lag eit månadsverk. Dei knappe rammene har gjort at studien ikkje har kunna femne om alle moglege aspekt og scenarier eller eigne modellscenarier. Fokuset måtte setjast på forsuringutviklinga generelt, og lett tilgjengeleg litteratur og kjelder om dette temaet som stort sett er frå andre stader enn Norge og Norskehavet. Likevel nådde ein å gå igjennom fleire hundre aktuelle artiklar og bøker om temaet, og sitere frå dei aktuelle.

Kontaktperson hos DN var Egil Postmyr mens oseanograf Lars G. Golmen var prosjektleiar hos NIVA.

Vi takkar DN for eit interessant oppdrag og alle bidragsytarane for bidraga på kort varsel.

Bergen/Oslo, 22. januar 2008

Lars G. Golmen

*”Det er vanskeleg å spå,
særleg om framtida.”*

[Niels Bohr]

Innhald

Samandrag	6
1. Bakgrunn og formål	10
1.1 Forsuringsproblemet generelt	11
1.2 Arbeidsmetodikk	13
1.3 Fagleg avgrensing	13
1.4 Geografisk avgrensing	15
1.5 Kopling til andre faktorar/delutgreiingar	16
1.6 Lagring av CO ₂ under havbotnen	16
2. Havforsuring, status og trend	17
2.1 Litt om CO ₂ kjemien i havet	17
2.2 Historisk perspektiv	19
2.3 Klimagassutsleppa	20
2.4 Status for pH og forsuring	20
2.5 Framtidsscenariar globalt	21
2.6 Scenariar for Norskehavet	26
3. Vurdering av effektar	28
3.1 Planteplankton	28
3.2 Makroalgar	32
3.3 Korallar	34
3.4 Botnfauna	36
3.5 Fisk og evertebratar	38
3.5.1 Generelt om verknader	38
3.5.2 Effektar på zooplankton	41
3.5.3 Effektar på fisk	42
3.6 Sjøfugl	43
3.7 Sjøpattedyr	44
4. Marine kulturminne	46
4.1.1 Karakteristikk av funn	46
4.1.2 Effekt av forsuringa	47
5. Lekkasje frå CO₂ lagra under havbotnen	48
5.1 Lagringskapasiteten	49
5.2 Aktuelle mengder produsert og lagra CO ₂	50
5.3 Lagring og lekkasje	51
5.4 Risiko og effekt	52
6. Framtidsbilete 2025	54
6.1 Planteplankton	54
6.2 Makroalgar	54
6.3 Zooplankton	54
6.4 Korallar	55

6.5 Botndyr	55
6.6 Fisk	55
6.7 Sjøfugl	56
6.8 Sjøpattedyr	56
6.9 Kulturminne	57
6.10 Lagring av CO ₂	57
7. Konklusjonar, oppfølging	58
7.1 Forslag til oppfølging	58
7.1.1 Eksperiment-fasilitetar	58
7.1.2 Overvaking, modellering	59
7.2 Informasjonsformidling, internasjonalt samarbeid	59
8. Litteratur	60
Vedlegg A. Felles utredningstema	71

Samandrag

På oppdrag frå Direktoratet for naturforvaltning har NIVA, Norsk institutt for vannforskning, gjort ein litteraturstudie omkring forsuring av havet og kva følgjer den kan få spesielt for Norskehavet. Utgreiinga er ein av fleire som blir laga i samband med arbeidet med å lage ein heilskapleg Forvaltingsplan for Norskehavet som skal vere ferdig i 2009.

Forsuringa skjer som følgje av antropogene utslepp av CO₂ til atmosfæren. Deler av denne CO₂-en blir oppløyst i havvatnet som karbonsyre, som igjen dissosierar til bikarbonat, karbonat og H⁺ ionar slik at pH blir redusert. Dette medfører i sin tur at karbonatkonsentrasjon og overmettinga for kalsium-karbonat i sjøvatnet avtar slik at kalkbyggande organismar vil få problem. Dette kan vere det mest umiddelbare problemet og der ein alt er i ferd med å passere tolegrensa for artar som baserer skalbygginga på aragonitt, slik som korallar.

Det er rekna at pH er redusert med 0.1 i høve til førindustriell tid, og at ein dei næraste ti-åra vil oppleve ytterlegare 0.1-0.2 reduksjon. Fram mot århundreskiftet kan det bli tale om reduksjon på 0.5-0.7, til eit nivå som ikkje har vore i havet på mange millionar år.

I studien er litteratur for ulike marine artars følsemd for forsuring eller CO₂ eksponering gjennomgått for planteplankton, makroalgar, zooplankton, botndyr inkludert korallar samt fisk og sjøpattedyr. Det er i tillegg gjort ei vurdering for marine kulturminne og for framtidig lagring av CO₂ under havbotnen som er aktuelt for Norskehavet.

Det finst ein god del litteratur på effektar av forsuring på organismar, men i mange rapporterte forsøk er forsuringa gjort med andre syrer enn karbonsyre og med eksponering for større pH-endringar enn det som i første omgang er aktuelt å vurdere for havet i nær framtid. Det er og gjort lite på langtidseksponering for moderat pH reduksjon, og lite på det som kan vere nøkkelorganismar i Norskehavet. På litt lenger sikt er det imidlertid kjent at kalsifiseringa hos marine organismar kan bli redusert til 60 % av det historiske nivået innan år 2100. Dette vil i så fall kunne føre til vesentlege effektar på biodiversitet og økosystemfunksjon også i Norskehavet.

Planteplankton kan reagere med auka primærproduksjon som følgje av auka pCO₂ hos nokre artar. Dette stimulerer den biologiske CO₂-pumpa med meir sedimenterande materiale slik at oksygenbehovet til nedbrytning av organisk materiale i djupvatnet vil auke. Forekomsten av både kalkflagellatar og kiselalgar kan bli redusert med store endringar i det mikrobiologiske økosystemet som resultat. For makroalgar (brunalgar m.m.) tyder forsøk på at auka pCO₂ medfører auka produksjon men samstundes kan nedbrytingsprosessen i plantene og dermed den sesongmessige gjenveksten bli redusert. Forsuringa kan også føre til ein reduksjon av veksten hos kalkalgar.

Zooplankton (kopepodar) er følsame for langtidseksponering for sjølv moderat redusert pH, og det vil opptre sub-letale effektar som vil påverke funksjon og reproduksjon. For fisk er det dei tidlege livsstadia som er mest sårbare for forsuring; egg og juvenile er meir sensitive enn larvar for fleire artar. Vaksne fisk kan antakeleg forbli upåverka av den forventa pH-reduksjonen fram til år 2025.

Botndyr som pigghudlarvar (kråkebolle) har mindre toleranse for forsuring enn t.d. molluskar og krepssdyr fordi dei manglar oksygentransporterande pigment, har dårleg evne til ioneregulering og er avhengige av aragonitt i skalet både som vaksne og som juvenile. Vaksne kråkebollar har synt letalitet ved langtidseksponering allereie ved pH=7.9 for stillehavsartar, mens den vanlege norske arten tykkjst vere meir robust. Kaldtvasskorallar er svært følsame for nedgangen i aragonitt-konsentrasjonen i sjøvatnet, og kan alt no leve på grensa til det ugunstige for vekst.

Sjøpattedyr og sjøfugl vil neppe reagere fysiologisk på den moderate pH-endringa fram til år 2025. Eventuelle effektar vil kunne kome som følgje av endring i næringstilgongen på grunn av forsuringa.

Dette er kortfatta det som er funne av karakteristiske trekk ved nokre nøkkelartar/grupper. Når det gjeld kulturminne vil forsuringa også tendere negativt ved at korrosjon av metall vil auke men dette er ikkje forventa å gje nemnande verknad fram mot år 2025.

Lagring av CO₂ under havbotnen i Norskehavet er sannsynlegvis iverksett i 2025. Under føresetnad av grundig førehandsvurdering av dei geologiske lagera er det ikkje forventa at lekkasjar vil opptre innan så kort tid etter oppstart. Det er forventa at dette blir nøye overvaka og verifisert både for reservoara og sjøbotnen over.

Summary

Title: Environmental- and resource management plan for the Norwegian Sea. An assessment of effects from ocean acidification.

Year: 2008

Authors: L. G. Golmen, J. A. Berge, T. Dale, T. M. Johnsen, E. Lømsland, Are Pedersen, Arne Bjørge (IMR), Signe Christensen-Dalsgaard (NINA), N. R. Hareide (Runde miljøsenster)

Source: Norwegian Institute for Water Research, ISBN No. 978-82-577-5261-3

On contract from the Norwegian directorate for nature conservation (DN) NIVA, The Norwegian institute for water research conducted a literature review on possible environmental effects from ocean acidification in the Norwegian Sea. This report is one of several in the preparations to establish a general resource- and environmental management plan for this sea area, to be completed in 2009.

Ocean acidification results from the emissions of anthropogenic CO₂ to the atmosphere of which a substantial part ends up in the surface ocean as carbonic acid. The acid dissociates into bicarbonate, carbonate and H⁺ ions, reducing the pH. This in turn leads to a decrease in carbonate and in the super-saturation level of calcium carbonates which are important building material for calcifying organisms. This may be the first and most inevitable problem the decrease in pH will imply on the near term.

Ocean pH has dropped by about 0.1 units since pre-industrial times, and is projected to drop by another 0.1-0.2 units within a few decades. Towards year 2100 the drop may reach 0.5-0.7 units which will be the lowest in several million years.

The study included a review of tolerance levels for marine species from acidification or CO₂ exposure, regarding phytoplankton, macroalgae, zooplankton, benthos including corals, fish, sea mammals and sea birds. In addition, and evaluation was done of acidification effects on the degradation of shipwrecks and other sunken relicts, and from eventual leaks from sub-seabed storage of CO₂.

Several investigations on acidification effects have been reported on in the literature. Many are from acidification by other acids than carbonic acid, and many for much higher pH changes than what is expected in the sea in the near term. Also, there is a general lack of results from long-term exposures with moderate pH changes, and of tests on organisms that are important for the Norwegian Sea ecosystem in particular. Results still show it is possible that the calcification by organisms may be reduced by 60% relative to pre-industrial times by the year 2100, and that this may lead to significant changes in biodiversity and ecosystem functioning also in The Norwegian Sea long before this.

Phytoplankton may respond with increased primary production for some species due to the increase in *p*CO₂. This will stimulate the biological CO₂ pump and may result in increased oxygen consumption at depth due to increased fallout of organic debris. Both calcareous and silicate algae may be reduced in abundance, causing a major shift in the pelagic microbial communities. Macroalgae may tend to have increased production with increased *p*CO₂/reduced pH, but simultaneously internal degradation processes as well as the seasonal re-growth may be reduced. Ocean acidification will also lead to reduced growth of calcifying makroalgae.

Zooplankton (copepods) are sensitive to long-term exposure even to moderate pH reductions, causing sub-lethal effects on both function and reproduction. Fish may mostly be tolerant to the expected pH decrease by 2025, while fish eggs and juvenile stages will be vulnerable.

Bottom dwellers like sea urchins have a lower tolerance against acidification compared with molluscs and crustaceans due to a lack of pigments for oxygen-transfer, lack of ionic regulation and dependence

on aragonite as building material for both juveniles and adults. Some adult sea urchins from the Pacific have shown lethality in long-term exposures at levels of pH=7.9 only, while the species in the Norwegian Sea seem to be more robust. Cold water corals are very sensitive to the reduction in aragonite super-saturation in seawater, and may already be about to enter suboptimal growing conditions.

Sea mammals and sea birds are not expected to be impacted negatively in their physiological functions due to the acidification before 2025. Any impacts on these groups will be due to a change in food and prey distribution.

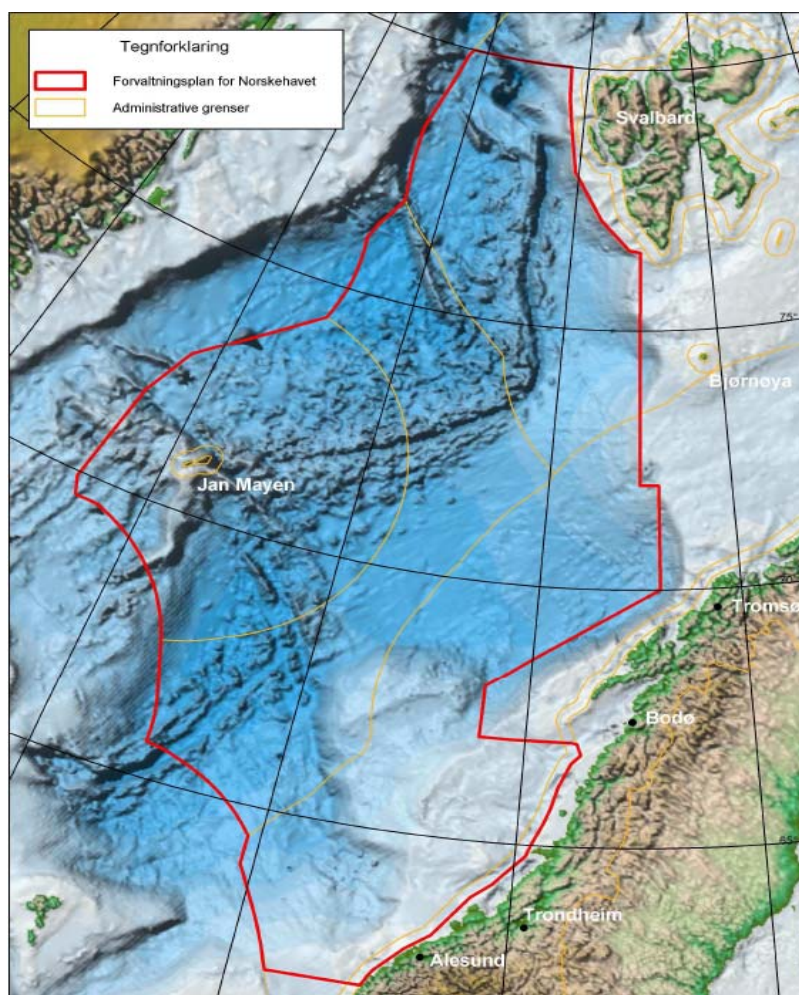
This is a brief summary of the findings in the study, regarding characteristics by some key ecological species or groups. Regarding sunken relicts on the seabed, the acidification will act to enhance corrosion but not to a degree to cause extra concern before the year 2025. Sub-seabed storage of CO₂ if applied properly and cautiously following imposed guidelines is not expected to cause acidification effects from leaks by 2025. Monitoring of the reservoirs and seabed should be performed to verify this.

1. Bakgrunn og formål

I regi av Miljøverndepartementet er det satt i gang arbeid med å lage ein Forvaltningsplan for Norskehavet (**Figur 1**). Planen skal innbefatte hovedsektorane fiskeri, skipstrafikk og olje/gass, alt med basis i berekraftig miljø.

I tillegg skal det utarbeidast ei utgreiing av "Ytre påvirkningar" som klimaendringar, radioaktive stoff, oppvarming av havet og forsuring av havet, det vil seie påverknad frå kjelder utanfor forvaltningsområdet. For desse delutgreiingane er det behov for å gje kunnskapsstatus og realistiske/moglege trendar og scenarior.

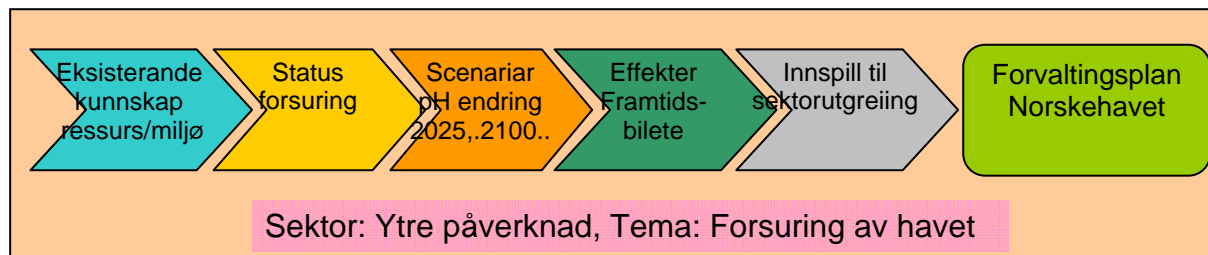
På bakgrunn av dette skal moglege miljøverknader vurderast. Strategi/tiltak for å overvake aktuelle parametrar og biotopar skal foreslåast, i tillegg til moglege forvaltningsmessige tiltak. **Figur 2** illustrerer gangen i vurderingane.



Figur 1. Avgrensing av forvaltningsområdet. Kjelde: NGU.

DN er sett til å koordinere arbeidet med Ytre påvirkning. DN kontakta NIVA i oktober 2007, med spørsmål om NIVA kunne ta på seg arbeidet med vurderingane tilknytt forsurningsavsnittet. NIVA leverte forslag på dette som blei akseptert av DN medio november, og arbeidet med studien tok til i

slutten av november. Tidsfristen var satt til 15. januar 2008. Det var med andre ord knappe rammer for gjennomføring av studien, som i hovedsak baserer seg på generell kunnskap anvendt på Norskehavet.

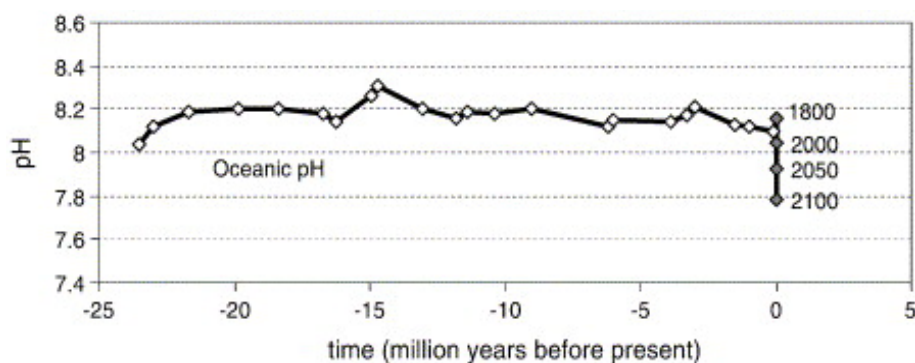


Figur 2. Skisse forløp/kronologi i foreliggende studie. Den skal danne innspel til sektorutgreiinga "Ytre påvirkning" saman med andre delutgreiingar, og som til slutt skal inn i den samla forvaltingsplanen. Sjå også **Figur 4**.

1.1 Forsuringsproblemet generelt

Det er sannsynleg at midlare pH i havet ikkje har vore under 8.0 på mange millionar år. Dette som resultat av ein naturleg og stabil likevekt i utvekslinga av CO₂ mellom hav og luft balansert med mineraltilførselar frå land (Pearson og Balmer 2000). Den aukande konsentrasjonen av atmosfærisk CO₂ inneber auka fluks av denne gassen ned i havet. Dette medfører ein endring av karbonkjemien i sjøvatnet, med auke i pCO₂ og reduksjon i pH og karbonat.

Det har blitt berekna at pH i overflatelaget sidan byrjinga av industrialiseringa har avtatt med ca 0.1 (Haugan og Drange 1996). Dette motsvarar ein 30% auke i H⁺ konsentrasjonen. Projeksjonar for dei neste 100 åra indikerer ytterlegare 0.2 - 0.3 reduksjon, som vil gje pH nivå i havet som i følge studiar av bor-isotop samansetninga i fossile kalkskal (Brooker og Peng 1998), sannsynlegvis ikkje har eksistert dei siste 20 millionar åra (**Figur 3**). Dersom dei verste prognosene for CO₂ utslepp slår til vil pH nivået nå lågare enn nokon gong dei siste 300 millionar åra (Doney 2006). Meir om prognoser i Kapittel 2.



Figur 3. Sannsynleg forhistorisk utvikling av pH i havet kombinert med berekningar og scenariar for nåtid/framtid. Frå Blackford og Gilbert 2007, modifisert etter Pearson og Balmer 2000.

Framskivingane langt fram i tid er naturleg nok usikre, avhengig av havets respons på karbon-tilførselene og andre faktorar, og av den faktiske utviklinga av utsleppa. Framskivingane for dei næraste ti-åra er imidlertid forankra i nye faktiske målingar, og bør difor vere ganske presise og tilstrekkelege til at ein kan analysere utviklinga og vurdere moglege effektar på økosystema i havet på den tidsskalaen, slik som formålet med denne rapporten er.

Endringane i karbonkjemi inneber først og fremst mindre karbonat og litt auke av bikarbonat. For å motverke denne endringa og reetablere likevekt, kan ein enklast sett tenkje seg at sjøvatnet enten kvittar seg med CO₂ eller får tilført karbonat frå andre kjelder, det vil seie frå mineralar og frå organsimer med skal eller skjelett der karbonat inngår (først og fremst basert på grunnstoffa Si eller Ca). Endringane går med andre ord ut over skalbygging til både mikroplankton og større organismer. I tillegg vil CO₂ og pH ha effektar på respirasjon og fysiologi, samt på kjemiske likevekter i sjøvatn og sediment.

Organismar som byggjer skal av kalsiumkarbonat, nyttar stort sett formene kalsitt (mange planktonartar, sneglar, skjell) eller aragonitt (korallar). Aragonitt (og også forma magnesiumkalsitt) er meir løyselege i sjøvatn enn vanleg kalsitt. Organismar som nyttar desse minerala, kan difor vere mest sårbare for forsuring. For fleire år sidan vart det påvist at både korallar og planktoniske former som nyttar vanleg kalsitt (kokkolitoforar m.m.) får dårlegare vekst ved lågare pH. I polare farvatn kan det oppstå undermetting for aragonitt innan utgangen av 2100. Organismar som små frittflytande sneglar (pteropodar) kan då forsvinne heilt eller forflytte seg til varmare vatn. Kalsittbyggjande fyto- og zooplankton kan ha eit par tiår ekstra å gå på.

Djuphavskorallar vil også kunne vere sårbare for forsuring, spesielt i Norskehavet/Grønlandshavet og det nordvestlege Atlanterhavet der signalet frå antropogent CO₂ først når ned i djupvatnet (Doney 2005).

Problemstillingane rundt havforsuring er relativt nye, sjølv om dei første spådommane og åtvaringane kom for meir enn 40 år sidan (sjå kapittel 2). Slik forsuring har ikkje vore langt framme i debatten enno samanlikna med effektar av global oppvarming. På den store IGBP konferansen, *Challenges of a changing earth*, i Amsterdam i 2001 (IGBP 2002) om globale miljøutfordringar var havforsuring ikkje nemnt i det heile.

Heller ikkje i nyare arbeid som Stenseth et al. (2004) i boka om klima i Nord-Atlanteren og Norskehavet og Loeng et al. (2007) i artikkelen om Norskehavet og klima er havforsuringa nemnt. Den har ikkje vore rekna som ein klimafaktor i vanleg forstand slik som t.d. temperaturauke og stiging i havnivået.

SCOR/IOC arrangerte konferansen *The Ocean in a High-CO₂ World* i 2004 (AGU 2005). Det kan sjå ut som om dette var første gong havforsuring blei tatt opp i stor breidde, og som sette temaet på dagsordenen internasjonalt. IPCC-rapporten *Climate Change 2007* diskuterer havforsuring i kapittel 7 (IPCC 2007a), og i kapittel 10 (IPCC 2007b). Som bakgrunn for foreliggjande rapport siterer vi følgjande frå kapittel 7:

- Ecological changes due to expected ocean acidification may be severe for corals in tropical and cold waters and for pelagic ecosystems.
- Acidification can influence the marine food web at higher trophic levels.
- According to a model experiment based on the IPCC 1992a emission scenario, bio-calcification will be reduced by 2100, in particular within the Southern Ocean and by 2050 for aragonite-producing organisms.

Frå norsk side kan ellers nemnast at Universitetet i Bergen ga ut ein rapport i 2004 på oppdrag frå MD om status og forsuringspotensialet (Haugan 2004). Rapporten omtalte status i norske farvatn, som er karakterisert av sterk vertikal blanding slik at forsuringa når raskare ned i djupet enn dei fleste andre stadar. DN arrangerte ein workshop om havforsuring i Trondheim i oktober 2004, der denne rapporten blei presentert, og ein ny rapport sprang ut av dette (Haugan et al. 2006). The Royal Society i England kom med ein fyldig status/review rapport i juni, 2005 (ROS 2005). Begge desse rapportane fungerte som innspel til OSPAR si handsaming av spørsmålet om lagring av CO₂ i/under havet som klimatiltak.

Boka *The Nordic Seas* som kom i 2005, har med to artiklar som berører havforsuring; Skjelvan et al. (2005) og Bellerby et al. (2005).

I samband rapporten frå høyringa i Underhuset om britisk havforskning som blei frigitt 18. oktober 2007, ga The Royal Society of Chemistry i England følgjande uttale om havforsuring:

EXECUTIVE SUMMARY

- Manmade emissions of carbon dioxide (CO₂) are causing the oceans to become more acidic.
- To-date, the oceans have absorbed approximately half of the carbon emitted into the environment by mankind.
- The ability of the oceans to continue to absorb carbon dioxide is not well understood; current carbon levels and changes in global temperatures may have a significant effect.
- Increasing carbon acidity could have a significant impact on many marine organisms, specifically calcifying organisms and larger aquatic animals. The effects of ocean acidification on these, and other organisms, is not completely known.
- The deep oceans have been suggested as potential storage sites for carbon.
- Much research is needed before the viability of deep ocean carbon storage can be evaluated. The effect of such schemes on the oceans, at a local and global scale, and on deep ocean life has not been determined.

Dette gjev eit godt bilete over kva utvikling som Norskehavet kan stå ovanfor. The Royal Society of Chemistry peikar også på ei anna problemstilling, den knytt til deponering av CO₂ under havbotnen som er eit klimatiltak som er aktuelt i Norskehavet i samband med fangst og lagring av CO₂ frå gasskraftverk og plattformar i Midt-Norge. Slik deponering kan medføre lekkasje av CO₂ til havvatnet, og det er difor inkludert som forsuringstema i den foreliggende rapporten.

1.2 Abeidsmetodikk

Mange av dei aktuelle problemstillingane omkring havforsuring er som nemnt omtalt i eksisterande rapportar og publikasjonar. Den foreliggende studien tar utgangspunkt i det som er kjent, og forsøker tilpasse dette til situasjonen i Norskehavet basert på ein omtale av dei økologiske og fysisk/kjemiske tilhøva der. Og i tillegg foreslå overvaking av utviklinga. Utfordringa har vore å “nedskalere” det globale biletet til tilhøva i Norskehavet, samt å projisere utviklinga fram i tid. Direkte inngrep for å få stansa forsuringa høyrer inn under andre departement og delutgreiingar.

I h.h.t. prosjektplanen, Fellesdelen, skal forventa ”framtidsbilder” leggest til grunn for analysene. Det er spesifisert at alle sektorar skal presentere eit framtidsbilde pr 2025. Herunder forutsetningar som dette bygg på, og den assosierte usikkerheita. I første omgang er det dermed mest relevant å skissere trendar for havforsuring, d.v.s. endring i pH og *p*CO₂ dei nærmaste ti-åra og i Norskehavet så langt det let seg gjere.

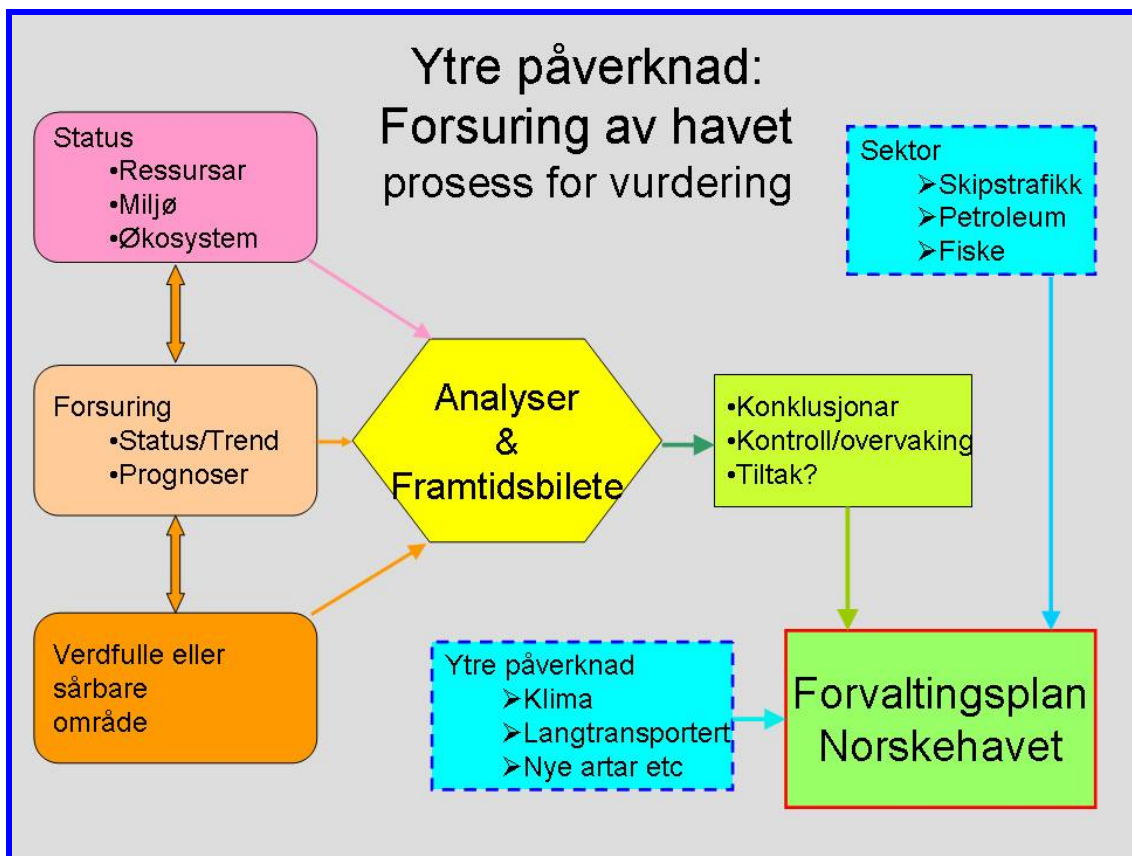
1.3 Fagleg avgrensing

I programmet for utgreiing av konsekvensar for ytre påverknad (om klima, forureining, nye artar m.m.) har DN etablert ein disposisjon for delutgreiingane som kan følgjast. For forsuring er det lite som er presisert, utanom at siste års utvikling skal omtalast.

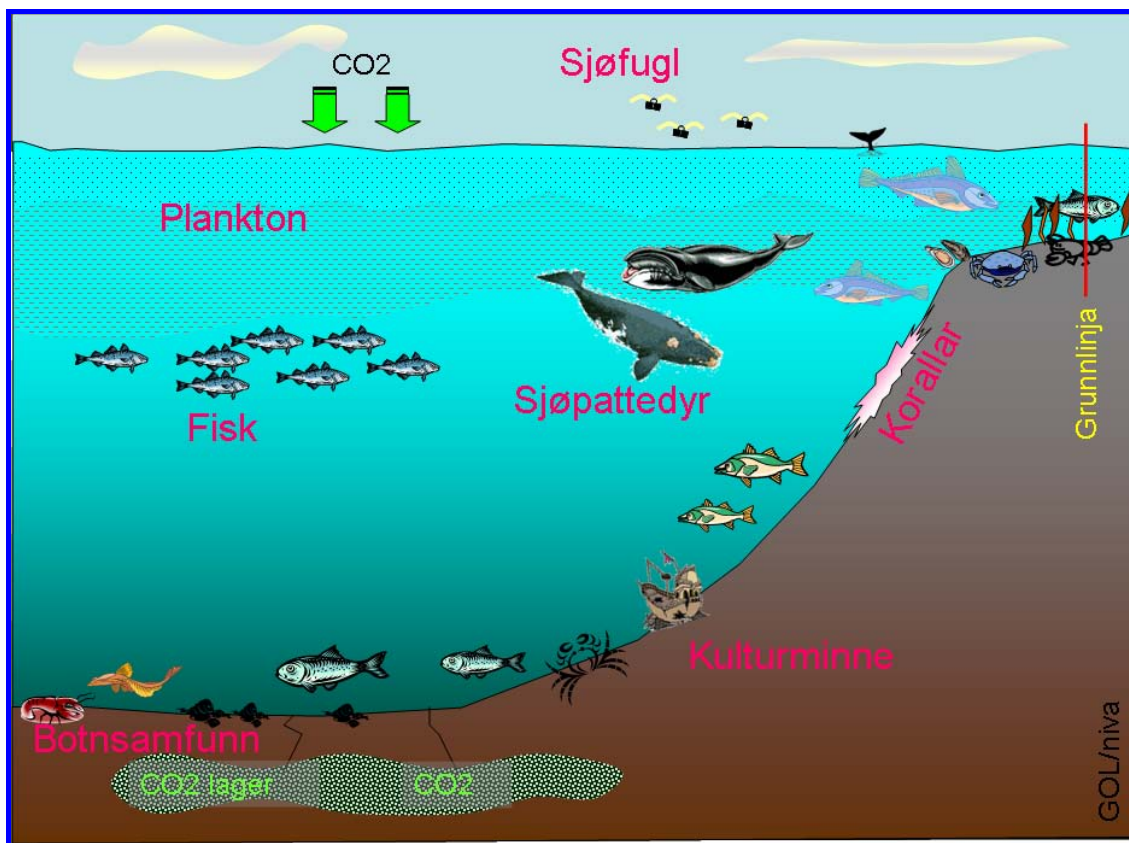
Føresetnaden for arbeidet med alle delstudiane har vore at statusrapporten for naturressursane som vart utarbeidd for DN hausten 2007 i samband med planarbeidet (Ottersen og Auran 2007), skal danne det viktigaste grunnlaget for del-studiane når det gjeld kva ressursar og scenarier som er mest aktuelle å vurdere.

For forsuring skal det vurderast effekter for følgjande faktorar, i h.h.t. DN's disposisjon (avsnitt 6.4):

- 1 Tilstanden; Omtale av denne, med framtidsscenariar basert på eksisterande kunnskap
- 2 Plankton; Verknader for biologisk produksjon
- 3. Botnsamfunn; Effektar og endra utbreiing
- 4. Fisk; Bestandsutvikling, og vandring/utbreiing (antatt vekt på sild, kolmule, makrell, sei og tobis)
- 5. Sjøpattedyr; Bestandsutvikling og vandring/utbreiing
- 6. Sjøfugl.
- 7. Marine kulturminne; Effekter på slike.



Figur 4. Flytdiagram for elementa i foreliggende prosjekt, og kopling mot vidare arbeid. Utgreiingane for andre sektorar og deltema (blå boksar) blir ivaretatt av andre.



Figur 5. Skisse av dei element som skal inngå i studien.

Det er m.a.o. eit stort problemkompleks som skal vurderast, spesielt dersom ein går ned på artsnivå. Gitt den korte tidsfristen for arbeidet har ein mest mogleg fokusert på effekt på økosystem nivå/gruppe. For fiskeressursane har imidlertid DN peikt på nokre nøkkelartar som burde vurderast individuelt. Verknader av forsurening på lågare trofiske nivå (plankton etc) skulle vektleggast i studien.

Det var naudsynt å raskt framskaffe ein grov-oversikt, og så basert på denne konvergere mot ein omtale av dei mest kritiske effektane og utslaga for aktuelle deler av økosystemet.

1.4 Geografisk avgrensing

Vurderingane gjeld Norskehavet, d.v.s. frå grunnlina og utover (**Figur 1**). Grunnlina er definert i Kgl. res 1935/1952 gjennom eit antal punkt/posisjonar ytterst på kysten som markerer "...de ytterste punkter av fast land som faller tørt ved lavvann, og som ligger på lengste perpendikulær til hovedretningen for kysten i området".

Dette vil sei at det er område ut frå norskekysten, det opne havet og botnområda der, som er i fokus for studien. Grunnlina ligg nærast land på Møre og lenger ut når ein går vidare nordover langs kysten. Fjordar og innaskjers kyst fell utanfor området. Vestfjorden skal likevel med i alle sektorutgreiningane, sjølv om den for havforsuring sin del neppe har særskilde karakteristikkar som gjer at den skil seg ut frå området for øvrig. Kunnskapen om havforsuring, både status og framtid, er såpass begrensa at skilnader mellom ulike lokale havområde uansett vanskeleg let seg dokumentere.

I vest og nordvest er djupvassområda av fiskevernsona ved Svalbard, fiskerisona ved Jan Mayen samt "smutthavet" inkludert i forvaltingsområdet.

1.5 Kopling til andre faktorar/delutgreiingar

Det er nærliggande å tenke på klimaendringar, spesielt temperaturauken i havområda, og endringar i salinitet og stratifisering. Desse endringane vil ha effekt på havmiljøet og økosystema, og kan kome parallelt med forsuringa og auken i $p\text{CO}_2$. Det ligg ei stor utfordring i å vurdere alle desse faktorane mot kvarandre for å finne framtidig resultant endring i økosystema.

Verknader av klimaendring i Norskehavet er ei eiga utgreiing under ”Ytre påvirkning” som blir utført av andre. I skrivande stund er det kun Arealrapporten (Ottersen og Auran 2007) som er ferdig.

1.6 Lagring av CO₂ under havbotnen

Dette er eit klimatiltak som blir seriøst vurdert i Nordsjøen og Norskehavet. Det er knytt ein viss lekkasjerisiko til slik lagring, sjølv om både OSPAR og London konvensjonen nyleg har opna for å tillate det. Geologisk lagring i Norskehavet er konkret diskutert av OED og oljeselskapa i samband med olje/gass aktivitet i Midt-Norge (Draugen og Heidrun felta). Ei vurdering kring dette er difor også med i denne rapporten.

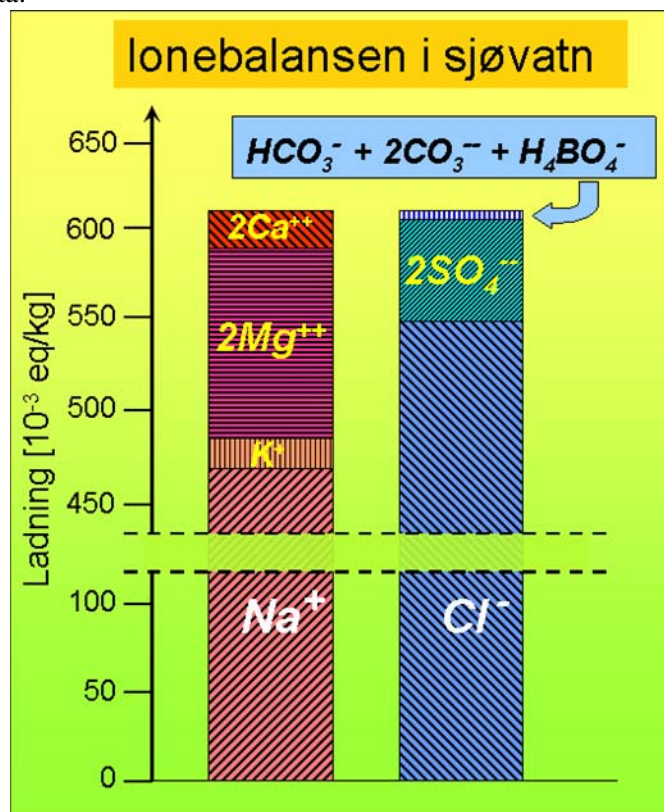
2. Havforsuring, status og trend

2.1 Litt om CO₂ kjemien i havet

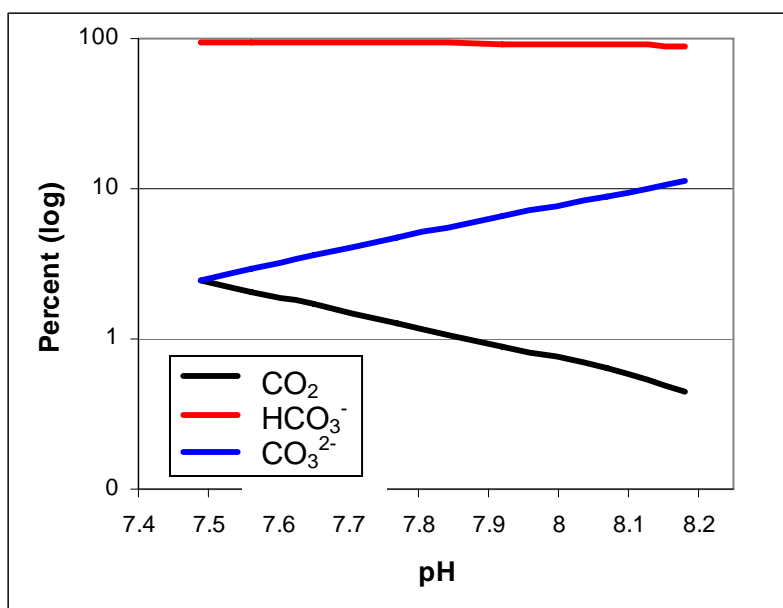
Kjemien i sjøvåtn er svært kompleks, dei fleste metall, sporstoff og naturlege salt finst oppløyst der. Dei dominerande komponentane er natrium, kalsium, magnesium, klor og sulfat (**Figur 6** og **Tabell 1**).

Karbon-komponentane utger kun ein liten del, og det er verd å merke seg at konsentrasjonen av kalsium (Ca) er mykje større (100X) enn konsentrasjonen av karbonat ved normal pH. I øvre lag er det m.a.o. ingen mangel på kalsium; Det er konsentrasjonen av karbonat som bestemmer kor myke fast kalsiumkarbonat som kan dannast i mineral eller skal. Karbonatkonsentrasjonen minkar med minkande pH (**Figur 7**) og det peikar mot det framtidige underskotet på karbonat til å byggje kalkskal etc. som er ein viktig del av bakgrunnen for foreliggende studie.

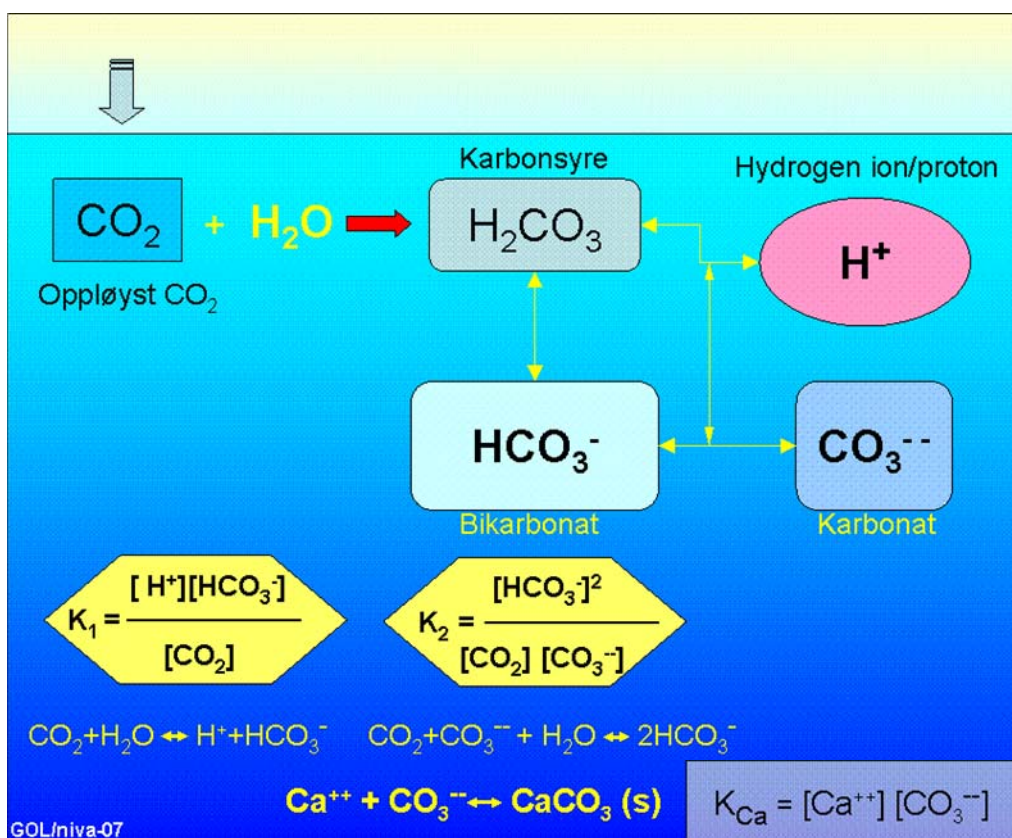
Karbonbalansen i havet er illustrert i **Figur 8**. Der er også likevektsreaksjonen mellom løyst Ca, karbonat og fast kalsiumkarbonat illustrert. Karbonbalansen medfører at havet har svært stor bufferkapasitet og kan ta opp langt meir CO₂-gass enn ferskvåtn. Litt forenkla kan ein sei at summen av konsentrasjonane av dei fem komponentane H⁺, Ca⁺⁺, CO₂, HCO₃⁻ og CO₃²⁻ er konstant i havet, og likevekta mellom formene er bestemt av dei tre likevektskonstantane. Konsentrasjonen av ein komponent vil dermed påvirke konsentrasjonen av ein eller fleire andre komponentar for å behalde den totale ionelikevekta.



Figur 6. Ionesamansetninga i sjøvåtn er dominert av Na⁺ og Cl⁻. Resterande del utger kationar som Mg⁺⁺, Ca⁺⁺ og K⁺ samt anionar dominert av SO₄²⁻. Aniona bikarbonat, karbonat og borat ("alkaliniteten") utger kun ein liten del. Etter Brooker og Peng (1998).



Figur 7. Konsentrasjon av karbonat, bikarbonat og fri CO₂ i sjøvann som funksjon av pH (innsnevra Bjerrum diagram). Figur: Arild Sundfjord, data frå ROS (2005).



Figur 8. Reaksjonane mellom CO₂ og sjøvann, med karbonsyra som dissosierer vidare gjennom to likevektsreaksjonar. Kalsium-reaksjonen illustrerer tilhøva ved lysoklinen (metnings-likevekt der).

Ved normal pH i sjøvatnet er høvet mellom likevektskonsentrasjonane av CO_2 , HCO_3^- og CO_3^{2-} på ca 1:100:10. Etterkvart som det minkar på fritt karbonat i sjøen og H^+ konsentrasjonen aukar så vil også bufferkapasiteten i høve til yterlegare CO_2 tilførsle minke. Det er m.a.o. neppe lineære prosessar som vil styre utviklinga framover, og økologiske effektar kan difor kome mykje raskare enn det ein ser ut frå dagens utvikling/trender i pH-utvikling.

Karbonsyra i nedbør og overflate/grunnvatn bidreg til forvitring av fjell som til dømes basalt og granitt. Når silikatbaserte mineral blir løyst i vatnet, blir også kalsium (Ca) frigitt og ført mot havet der den blir nytta i kontinuerleg produksjon av kalkskal og skjelett hos marine organismar. Denne produksjonen konsumerer karbonat (CO_3^{2-}) og såleis har geologisk forvitring og marin bioproduksjon halde dei forhistoriske CO_2 utsleppa i sjakk og bidrege til tilnærma konstant pH dei siste millionar åra i alle fall (**Figur 3**).

Tabell 1. Konsentrasjon (g/kg eller ‰) av dei mest forekomande kation og anion i sjøvatn. Avrunda desimalverdiar.

Kationar, g/kg *		Anionar, g/kg *	
Natrium, Na^+	10.76	Klorid, Cl^-	19.35
Magnesium, Mg^{2+}	1.30	Sulfat, SO_4^{2-}	2.71
Kalsium, Ca^{2+}	0.41	Bikarbonat, HCO_3^-	0.15
Kalium, K^+	0.40	Bromid, Br^-	0.07
Strontium, Sr^{2+}	0.008	Borat, H_2BO_3^-	0.005
		Fluorid, F^-	0.001
Relativ fordeling, ca:**	12.6 ‰		21.9 ‰

*) For sjøvatn med 35.0 i salinitet. Practical handbook. Marine Science. CRD Press, 1994.

**) Seawater: It's composition, properties and behaviour. Open Univ. Press, 1997.

2.2 Historisk perspektiv

For fleire 100 millionar år sidan kan atmosfærekonsentrasjonen ha vore over 1000 ppm CO_2 (Brooker og Peng 1998). Gradvis forvitring og utvasking av kalk- og silikatbergartar som bind CO_2 saman med andre prosessar, bidreg til å redusere atmosfærekonsentrasjonen. Bakteriar og etterkvart fotosyntesen fekk betre vilkår og auka uttaket av CO_2 frå atmosfæren og produksjonen av oksygen i biosfæren. Slik vart det også skapt vilkår for stadig meir avanserte organismar.

Det er m.a.o. rett det som klima-skeptikarane seier at det har vore store variasjonar i CO_2 tidlegare, og høgare konsentrasjonar enn det vi nå kan stå ovanfor. "Problemet" no er imidlertid at det bur menneske på jorda, 6.5 milliardar i avanserte samfunn, og i tillegg uteljande organismar som er tilpassa dagens klimatilstand.

pH nivået har truleg vore stabilt høgt dei siste ca 20 mill åra opp til notid, altså frå ca 50 millionar år etter komet-episoden og fram til i dag (**Figur 3**). Først no byrjar kurva å endre seg, brått. Menneskearten har levd på jorda dei siste ca 1 mill åra og vil oppleve denne endringa.

Den tiltakande forsureinga av havet på grunn av meir karbonsyre kan vere like dramatisk som den forsureinga som ein antek følgde etter det gigantiske komet-treffet mot Yucatanhavøya i Mexico for 65 mill år sidan. Den hendinga førte til at mange plante- og dyreartar døyde ut, også i havet. Det var svovelsyre som brått regna ned over jorda etter den episoden, ikkje karbonsyre. Men dei umiddelbare effektane i havet kan ha vore liknande den som kan følgje av karbonsyra no, berre det at komet-episoden var forbigåande, forsureingssjokket varte kanskje berre nokre få år før vasskjemien igjen betra seg. Ingen menneske var på jorda då dette skjedde. Det noverande "sjokket" som menneska vil kunne

oppleve, kan vare i fleire hundre år og såleis på fleire måtar bli meir effektivt m.h.t. utrydding av artar. Særleg gjeld dette livet i havet som dels var skjerma frå kometeffekten.

Det er lenge sidan dei første spådommane om at CO₂ konsentrasjonen også i havet vil auke som følge av dei antropogene utsleppa (Bolin og Eriksson 1959), sjølv om eksakt kunnskap om karbonsyklusen mangla. Pionerar som Roger Revelle og Charles Keeling i USA vart tidleg overtydd om at både luft og hav ville oppleve auke i CO₂ konsentrasjon og at havets kjemi ville bli endra av dette.

I ein artikkel i *Nature* for 35 år sidan omtalte Fairhall (1973) fleire av problemstillingane som er blitt aktualisert no. Med ein boksmodeell simulerte han auka tilførsler av antropogen CO₂ frå atmosfære til hav, basert på føresetnadar om utviklinga i utslepp som ikkje er langt frå det som faktisk har skjedd. I følgje modellen tok havet på det tidspunktet opp ein betydeleg del av dei antropogene CO₂ utsleppa (det var ny dokumentasjon): "*[The model] also predicts something not previously recognized: a significant uptake of fossil CO₂ by the sea. This uptake, if real, leads to concern.*"

Fairhall skriv vidare: "*The sea is presently supersaturated with respect to aragonite and calcite, which calcareous organisms form in building their shells. Should the sea become unsaturated in CaCO₃ the shells of these organisms would tend to dissolve, as would the ocean's coral reefs. The consequences could be very serious for life in the sea.*"

Det er også verd å merke seg at Fairhall i 1973 fann at med den tids prognoser for utsleppa av CO₂ ville konsentrasjonen av aragonitt gå frå overmetta til undermetta i øvre lag av havet eksplisitt uttrykt i året 2008 (altså i inneverande år).

Trass i desse tidlege åtvaringane er det først dei siste ti åra eller så at det har blitt satt fokus på havforsuring som eit mogleg globalt miljø- og ressursproblem. Dei grunne korallreva i varme farvatn har vore gjenstand for fleire studiar og med rapport om forvitring og bleiking, dels som følge av forsuring, og dels som følge av temperaturauken som først var i fokus. Dei bakanforliggende mekanismene er uklare. Slike korallrev er kompliserte økosystem med høg artsdiversitet. Ytre påverknadar kan redusere artsmangfaldet og dermed også bane vegen for opportunistar som konkurrerer med korallane om plassen eller næringa, og dermed aksellerere negativ utvikling.

2.3 Klimagassutsleppa

Det er stadig utslepp av "ny" CO₂ frå jordas indre, gjennom vulkanar sprekker i jordskorpa. Eit anslag for denne fluksen som har eksistert i uminnelege tider, er ca 500 mill tonn CO₂/år. Denne CO₂ bidrar til drivhuseffekten på same måte som menneskeskapte utslepp, men i historisk perspektiv er det etablert ei likevekt for konsentrasjonar og utveksling mellom atmosfære, land og hav.

Det er dei store og aukande utsleppa av klimagassen CO₂ som er opphav til havforsuringa. Dagens antropogene utslepp av CO₂ er på ca 25 milliardar tonn CO₂ (GtCO₂, tilsvarande 9.5 GtC), m.a.o. mange gonger større enn den naturlege fluksen gjennom jordskorpa, og langt større enn det forvitring av bergartar og marin kalkproduksjon kan balansere. Resultatet er den velkjende auken i atmosfærisk CO₂ som nå nærmar seg 400 ppm_v i konsentrasjon.

2.4 Status for pH og forsuring

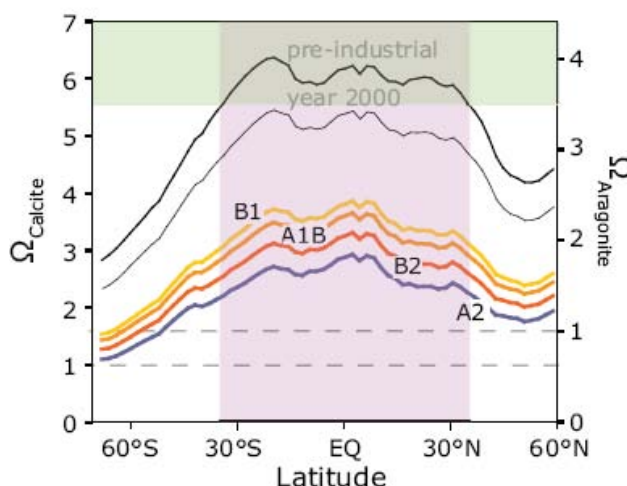
Normal historisk pH verdi havets overflate er antakeleg på 8.1 – 8.2. Standard sjøvatt (SWS) som blir produsert for nøyaktig kalibrering av vassprøver, skal m.a. halde pH på 8.1 basert på pH skalen for sjøvatt: $[H^+]_{SWS} = ([H^+] + [H_2SO_4] + [HF])$ (Millero et al. 2008). Det er påpeikt at forsuringa i dag er på om lag -0.1 i pH, relativt til førindustriell tid (Haugan og Drange 1996, Wallace 2001). Dermed er normalnivået i dag truleg redusert til 8.0 – 8.1.

I overflata er det normalt større naturleg variasjon i pH enn djupare nede. Ennå større naturleg variasjon er det i brakkvatn i fjordane der påverknaden frå land er stor. Desse områda ligg imidlertid utafor avgrensinga for noverande studie.

pH varierer også med djupet. Rundt termoklinen i havet finst ofte eit oksygenminimum koplta med vertikalt minimum i pH som følgje av naturlege remineraliseringsprosessar frå nedfall av organisk materiale som frigjer CO₂. Liknande prosessar skjer også på havbotnen men der bidreg kalkskal frå oven til å redusere pH-endringa.

Der er for lengst påvist at det antropogene CO₂ signalet har nådd djupvatnet i Nordatlanteren/ Norskehavet (Körtzinger et al. 1998). Her er dei Nordiske hav meir utsett enn andre havområde på grunn av effektiv vertikalomrøring og djupvassdanning i deler av området (Grønlandshavet). M.a.o. vil djupvatnet her raskare bli gjenstand for forsurening enn elles i verda.

Figur 9 syner dagens og framtidig tilstand i havet frå sør til nord for metningsgrad av kalsitt og aragonitt, og terskelen/nivået for når metningsgraden (naudsynt overmetning) blir for liten til å oppretthalde vekst for korallar etc. Figuren indikerer at vi nå er i ferd med å passere terskelverdien for begge minerala.



Figur 9. Kurver som syner metningsgraden for aragonitt og kalsitt (begge kalsiumkarbonat) frå sør til nord i havets overflate til ulike tidspunkt; førhistorisk, i år 2000 og i år 2100 for fire framtidige utslpps-scenarier for CO₂. Aragonitt er vanleg byggemateriale for korallar, mens kalsitt er mest vanleg for plankton. Øvre deler av havet er naturleg overmetta for begge karbonatminerala, noko som er eit kriterium for opptak i organismene. Det vertikalt skraverte området syner områda rundt ekvator der korallar har vokse naturleg opp til nyleg. Horisontalt skravert felt indikerer motsvarande metningsgrader som dette representerer. Kurva for år 2000 låg allereie under denne vekstgrensa (Ω ca 5.5 for kalsitt og 3.5 for aragonitt), og dei framtidige kurvene ligg vesentleg lenger unna naudsynt metningsgrad. Frå Caldeira (2007).

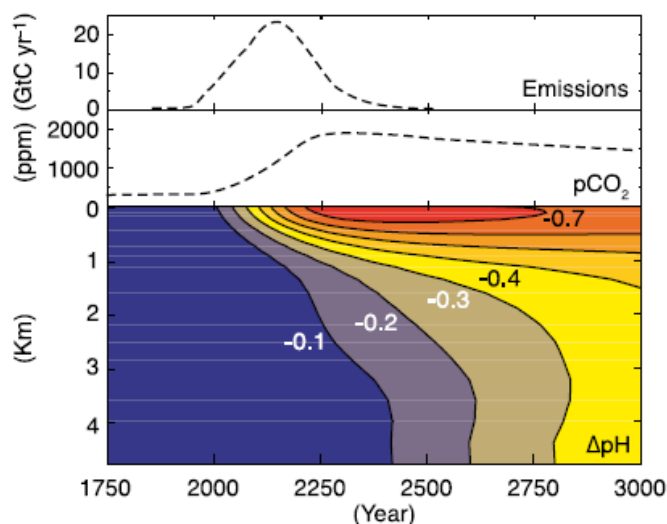
2.5 Framtidsscenarier globalt

Slike scenarier må baserast på eksisterande kunnskap og måleresultat erverva over lang tid, kombinert med numeriske simuleringar med koplta atmosfære-havmodellar som har med CO₂ kjemien og ulike bio-geokjemiske prosessar som påverkar denne. Det finst mange ulike modellar som stadig blir prøvd med nytt pådriv og modifisert/forbetra.

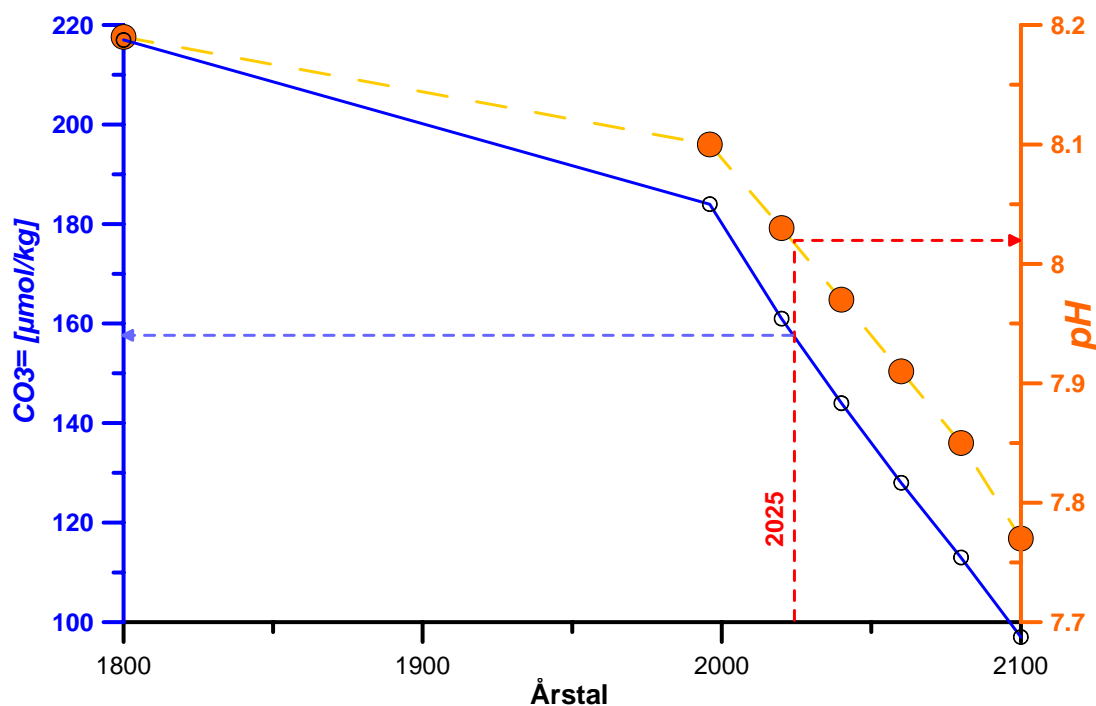
Arbeid av Brewer (1997) og Caldeira og Wickett (2003, 2005) har fått mykje publisitet. Vi nyttar desse publikasjonane for å vise kva storleiksordenar det kan bli tale om når det gjeld endring i pH på global skala. Framtidsscenaria avheng av ei rad økonomiske, fysiske, kjemiske og biologiske faktorar

og føresetnader. Til grunn ligg m.a. ymse prognoser for forbruket av fossil brensel i verda dei næraste hundreåra.

Figur 10 syner teoretisk utvikling i pH i eit globalt hav fram til år 3000 basert på ein "business as usual" prognose for CO₂ utsleppa. Det framgår at pH reduksjonen i øvre lag kan bli på 0.7 eller meir om eit par hundre år. Dette signalet forplantar seg nedover i djupet med ein tidsforsinking på nokre hundre år, som gjenspeglar tidsskalaen på den naturlege, evt modifiserte (p.g.a. klima) vertikalutvekslinga i havet. Langt fram i tid vil ein kunne få eit gjennomblanda hav m.o.t. CO₂ med kun små vertikalgradientar.



Figur 10. Predikert utvikling i pH i verdshava fram til år 3000 (Kaldeira og Wickett 2003) for historisk utvikling frå 1750 til no og sannsynleg scenario for CO₂ utslepp utan særlege mottiltak dei neste 100-åra.



Figur 11. Utvikling i pH og karbonat i havets overflate (globalt middel) mellom 1800 og 2100. Verdi for år 1800 representerer nær før-industriell tilstand. Framtids-scenarier er basert på "business as usual". Stipla liner indikerer nivået i år 2025. Etter Brewer (1997).

Peter Brewer (1997) publiserte ein tabell over framtidige nivå for pH og CO₂ i havoverflata, også basert på "business as usual" scenario for CO₂ utslepp. Resultata er synt i **Figur 11**. Det framgår at pH vil kunne falle til under 7.8 innan år 2100. Vi har i figuren interpolert i Brewers tabell for å finne ca nivå i referanseåret 2025. Det nivået vil ligge på rundt pH 8.0, med karbonatkonsentrasjon på 160 µmol/kg.

Calderia og Wickett (2005) foretok meir detaljerte framtidsstudiar over utviklinga, framleis på global skala, med fokus på relativt nær framtid, h.h.v. år 2100 og 2300. Dei la til grunn tre ulike berekningsbaner for CO₂ utslepp eller CO₂ konsentrasjon.

Bane 1 representerer utsleppsscenariar i h.h.t. SRES/IPCC. Resultata er synt i **Figur 12**. Det framgår at reduksjonen i pH kan bli opp mot 0.5 om hundre år.

Bane 2 representerer fem ulike stabiliseringsmål for CO₂ i atmosfæren, frå 450 ppm til 1000 ppm. Resultat for desse simuleringane er synt i **Figur 13**. Endringane her er om lag som for IPCC scenaria, innafor 0.5 i pH.

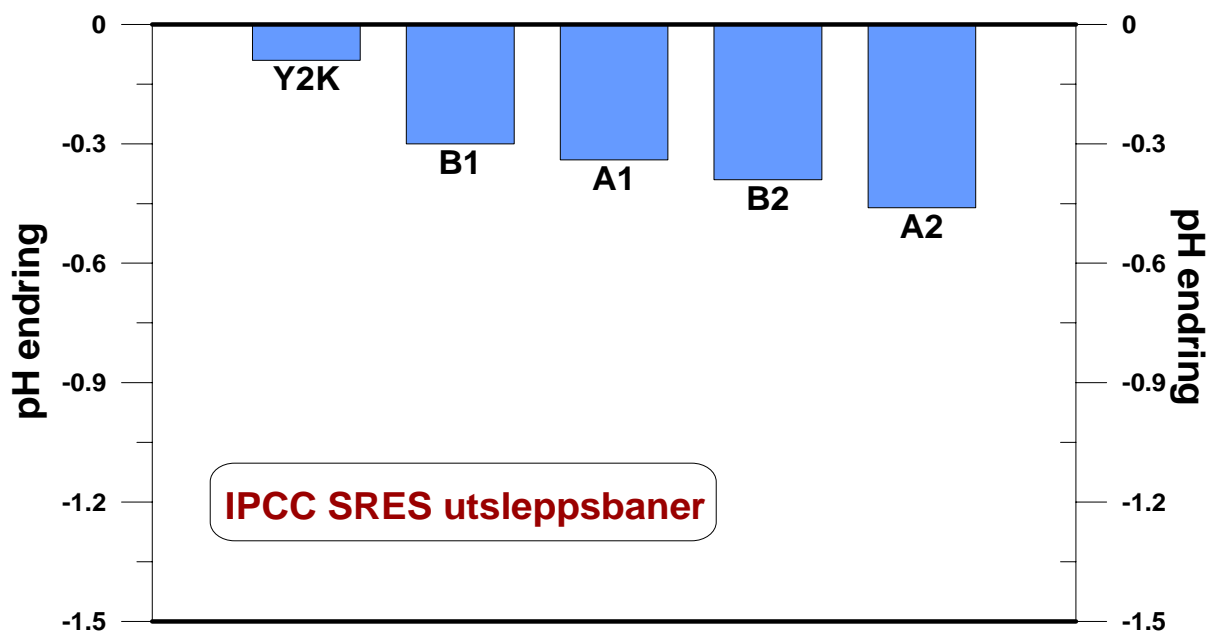
Bane 3 (**Figur 14**) representerer framskriving av forbrenning av fossil brensel basert på eit maksimum uttak som er relatert til sannsynleg tilgjengelege ressursar, frå 1250 til 20000 gigatonn karbon. Førstnemnde verdi kan representere ein nøktern framskriving, med store reduksjontiltak og markert overgang til andre energikjelder. Sistnemnde representerer bruk av "all" tilgjengeleg fossil brensel, også det som ligg lagra i havbotnen og permafrosten som biogent metan. Desse scenaria viser langt større pH reduksjon, til dels meir enn 1.0 om 200 år.

IPCC sin siste klimarapport handsama framtidsscenariar for havforsuring i kapittel 10 (IPCC 2007b). Frå teksten siterer vi:

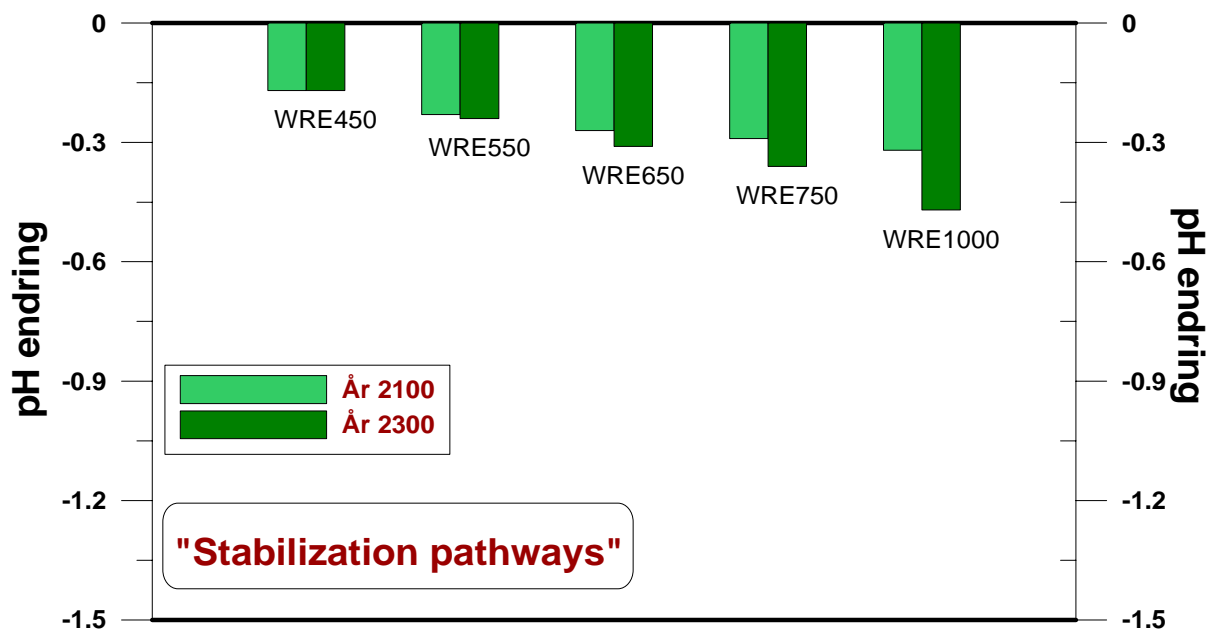
The present-day surface saturation state is strongly influenced by temperature and is lowest at high latitudes, with minima in the Southern Ocean. The model simulations project that undersaturation will be reached in a few decades. Therefore, conditions detrimental to high-latitude ecosystems could develop within decades, not centuries as suggested previously.

Her er tilhøva ved høge breiddegrader (inkludert Norskehavet) framheva, og det er her dei raskaste endringane skjer.

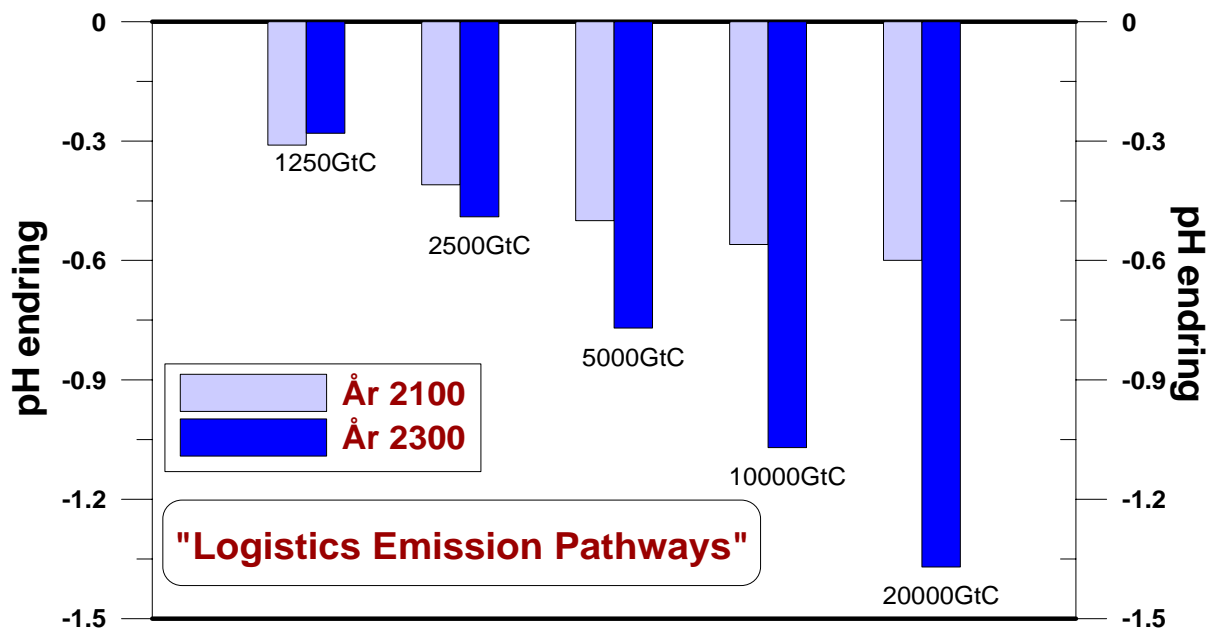
Figur 15 syner forventa tilstand i havet i 2030 m.o.t. metningsgrad for aragonitt, mens **Figur 16** syner utviklinga fram til 2100 for pH og metningsgraden. Begge desse figurane er frå IPCC 2007b.



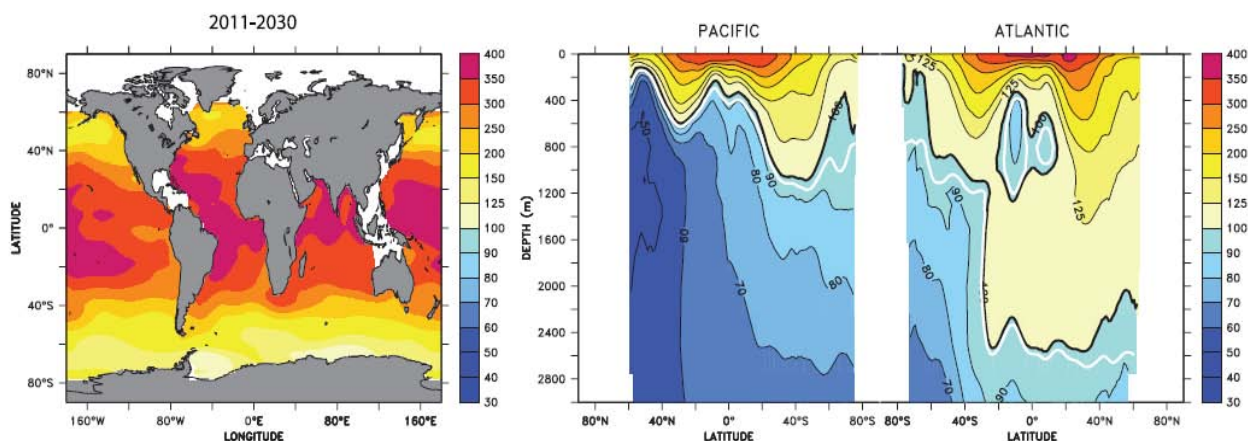
Figur 12. Forventa endring i pH i havets overflate i år 2100, i høve til førindustrielt nivå. Y2K representerer tilstanden i år 2000, med 0.09 i reduksjon. Dei fire neste verdiane representerer ulike baner for utslepp av CO₂, i følge IPCC SRES (Special Report on Emission Scenarios) som kom i år 2000. Etter Caldeira og Wickett (2005).



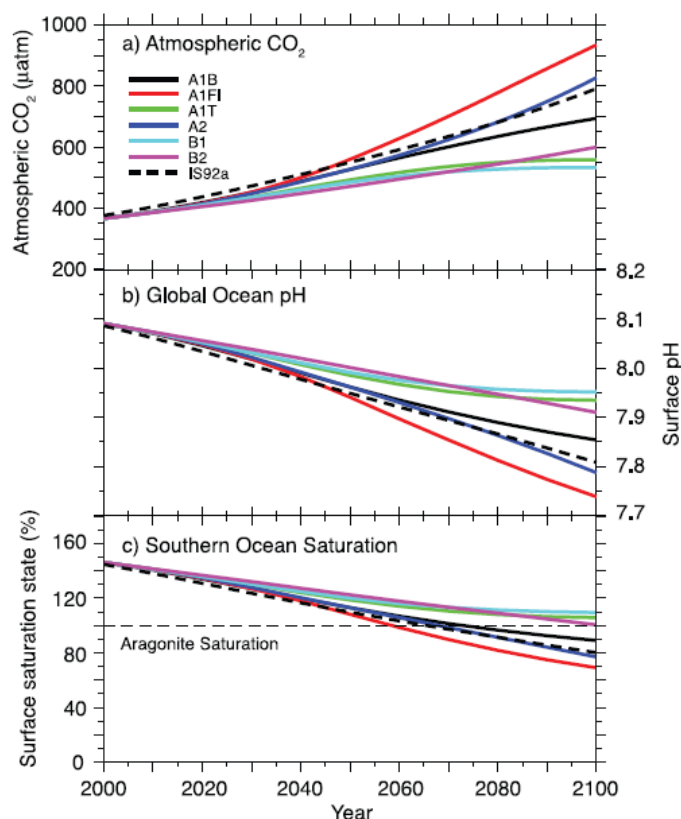
Figur 13. Forventa endring i pH i havets overflate i år 2100 og 2300, basert på fem ulike stabiliseringsmål for CO₂ konsentrasjonen i atmosfæren, frå 450 ppm til 1000 ppm. Etter Caldeira og Wickett (2005).



Figur 14. Forventa endring i pH i havets overflate i år 2100 og 2300, basert på fem ulike scenarier for akumulert forbruk og forbrenning av fossil brensel dei neste 500 åra, frå eit moderat og gradvis svinnande uttak på 1250 gigatonn karbon til 20000 GtC som representerer maksimalt uttak. Etter Caldeira og Wickett (2005).



Figur 15. Metningsprosent for kalsiumkarbonat (aragonitt) fram mot år 2030 i Stillehavet og Atlanterhavet frå sør til nord. 100% lina representerer overgang frå overmetning øvre lag (visse kalkskal kan dannast) til undermetning i djuphavet (kalkskal løyser seg opp). I Sørishavet vil denne grensa ligge nær overflata i 2030. Modellen går nord til Island-Færøyane, og dekkjer dermed Norskehavet dårleg. Det er imidlertid rimeleg å anta at tilhøva og trenden i Norskehavet liknar dei for Sørishavet. Frå IPCC 2007b.



Figur 16. Utvikling i atmosfærisk CO₂, pH i havets overflate og metningsgrad for kalsiumkarbonat (aragonitt) fram til år 2100. Frå IPCC 2007c.

2.6 Scenariar for Norskehavet

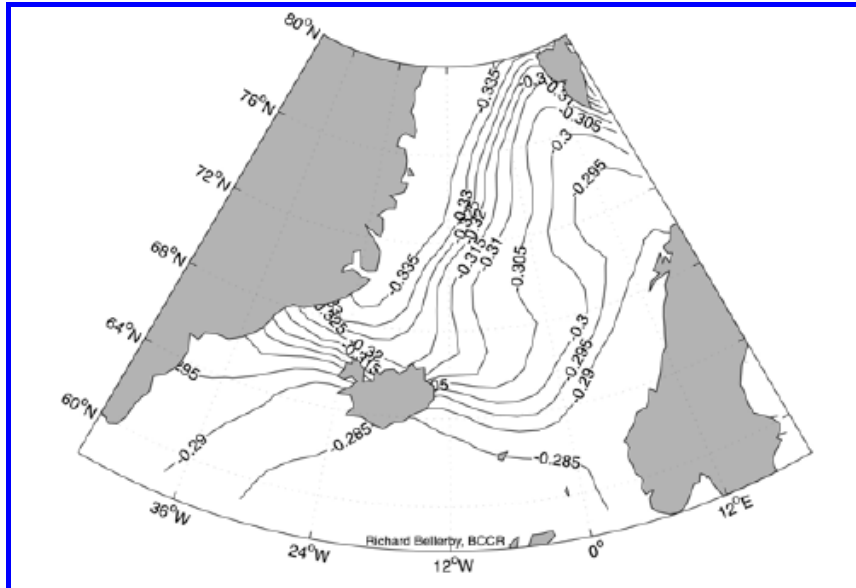
Det meste av foreliggende litteratur omkring havforsuring er av generell eller global karakter, evt med diskusjon for kvart av dei store verdshava der Norskehavet inngår som del av Nordlege Atlanterhav. Få av modellstudiane har oppløysing nok til å få med detaljar for Norskehavet, og mange av dei går berre nord til Skottland-Island ryggen ved ca 60° nord.

Norskehavet innafor vårt definisjonsområde har eit overflateareal på ca 1.1 mill km², og volum på ca 2 mill km³, med eit middeldjup på 1800 m (Ottersen og Auran 2007). Sett i relasjon til samla areal/volum av verdshava så utgjer Norskehavet høvesvis kun 0.3% og 0.15%, m.a.o. kun ein liten del. Havområdet har imidlertid ei viktigare rolle når det gjeld global sirkulasjon og utskifting enn det desse tala tilseier. I Norskehavet og tilstøytande område (Grønlandshavet, Islandshavet, Barentshavet) foregår det betydeleg danning av djupvatn som bidreg til termohalin sirkulasjon sørover i Atlanterhavet. Likeså fungerer dette havområdet som transittområde for vatn frå Polhavet på veg sørover og for Atlanterhavsvatn på veg nordover.

Ved UiB er det gjort modellstudiar som tek omsyn til desse regionale transport- og konveksjonsprosessane og som også simulerer framtidig utvikling i CO₂ og pH i Norskehavet. **Figur 17** syner resultat med Bergen Climate Model, for framskriving til dobla atmosfære-konsentrasjon av CO₂ i høve til år 2000. Framskrivinga er basert på ein auke i konsentrasjonen på 1%/år, slik at doblinga blir nådd innan år 2070.

Det framgår at reduksjonen i pH kan bli størst i vestlege del av området, 0.34 i Grønlandshavet, og lågare sør for Island-Færøyane ryggen, (< 0.3 reduksjon). Fram til år 2025 vil det bli mindre endringar enn dette.

Kaldt havvatn kan løyse større mengder CO₂ og andre gassar enn varmt vatn. Slikt vatn er mindre overmetta enn varmt havvatn for dei vanlege formene av kalsiumkarbonat og polare/subpolare område slik som Norskehavet vil såleis kunne vere sær sårbar i høve til CO₂/forsuring.



Figur 17. Endring i pH i overflata i Norskehavet ved ein dobla konsentrasjon av CO₂ i atmosfæren. Tidspunktet motsvarar år 2075. Frå Bellerby et al. 2005.

3. Vurdering av effektar

3.1 Planteplankton

Generelt er plankton, både planteplankton og dyreplankton, av fleire grunnar spesielt gode indikatorar for klimarelaterte marine miljøendringar (Hays et al. 2005):

1. Få planktonartar blir kommersielt utnytta og langtidsendringar kan derfor lettare relaterast til klimaendringar.
2. Dei fleste artane har ein kort generasjonssyklus slik at populasjonsstorleiken blir mindre influert av overleving frå tidlegare år.
3. Plankton kan vise dramatiske endringar i utbreiing ettersom dei er frittlevande og responderer lett til endringar i temperatur og strømf forhold slik at utbreiingsmønsteret lett kan bli endra.
4. Nyare forskningsresultat syner at plankton er meir sensitive indikatorar på miljøendringar enn miljøvariablane i seg sjølv på grunn av at dei biologiske samfunna ikkje responderer lineært og difor kan gje forsterka utsegnskraft på svake teikn på miljøforstyringar.

Havområda som er det marine planktonet sitt habitat, utgjer 71 % av jordas overflate. Planktonalgar er små mikroskopiske eincella organismar som svever fritt rundt i sjøen. Dei er det første leddet i næringskjeda, er med andre ord "havets gras" og grunnlaget for nesten alt liv i havet.

Det finst ulike typar planktonalgar, både autotrofe, heterotrofe og mikсотrofe, som kan ernære seg både autotroft og heterotroft. Dei autotrofe, som er plantar i ordets rette forstand, planteplankton, kan via fotosyntesen omdanne CO₂ til organisk stoff til bygging av cellestrukturar og drifting av dei metaboliske prosessane.

Marint planteplankton spelar ei hovudrolle i karbonsyklusen og står for omtrent 50 % av det globale opptaket av CO₂ med 47 Gt C per dag (Field et al. 1998). Noko av dette organiske karbonet sekk til slutt til botnar i djuphavet og vert gjennom nedbrytningsprosessar igjen omdanna til CO₂ eller blir begravd i sedimentet. Denne prosessen vert kalla den biologiske pumpa som effektivt fjernar CO₂ frå atmosfæren for ein periode på hundrevis til millionar av år (Arrigo 2007).

Den vertikale distribusjonen av karbon i havet vert med andre ord i stor grad påverka av biologisk medierte prosessar - fotosyntese, beiting, respirasjon og nedbryting - som til saman utgjer den biologiske pumpa. "Pumpeinntaket" er lokalisert i overflatelaget der planteplankton transformerer karbon frå ein oppløyst uorganisk form til organisk partikulært materiale med inntak av lys og næring. Den drivande krafta i pumpa er beiteaktiviteten til zooplankton og fisk som konsumerer det fyttoplankton-produserte karbonet. Ein fraksjon av dette konsumerte karbonet går over i det fekale materialet som sekk til djuphavet; fart på inntil fleire hundre meter pr. dag (Bishop 1989). Dagleg vertikal migrasjon av zooplankton og nekton kan ytterlegere bidra til denne transporten (Angel 1989). I mange regionar vil synkande aggregat av ubeita planteplankton også bidra vesentleg til fluksen.

Utløpet for pumpa er i djupvatnet der det organiske materialet i feces, animalsk vev, fyttoplankton eller oppløyst organisk materiale (DOM) vert oksidert tilbake til oppløyst uorganisk karbon, hovudsakleg via bakteriar og mikrozooplankton. Den biologiske pumpa utgjer såleis ein viktig overføringsveg for karbon frå overflatelaget til djuphavet. Karbon vert transportert også til djuphavet ved djupvassdanninga i polarområda.

Grunnlaget for den biologiske pumpa er fytoplanktonet si evne til å assimilere karbon gjennom fotosyntesen der drivkrafta er den globale fotosyntetiske aktive strålinga (PAR). Den utgjer generelt 50 % av det innstrålte lyset og ligg i bølgelengeområdet 400-700 nm. Denne primære drivkrafta varierer med breddegrad, årstid og graden av skyer, dvs. vertilhøve.

Tilgang på næringsstoff er også eit nødvendig vilkår for fotosyntese. Primært vil dette være nitrogen (N), forfor (P) og silikat (Si) som vert betrakta som makronæringsstoffa. Mikronæringsstoffa som består av spormetall (f. eks. jern (Fe), mangan (Mn), sink (Zn), kopar (Cu), molybden (Mo), kobolt (Co)) og vitaminar (B12, biotin, thiamin), trengst i svært låge konsentrasjonar, men er ikkje mindre viktige av den grunn. Næringsstilførsel til den eufotiske sonen føregår ved hjelp av turbulens, konveksjon og adveksjon.

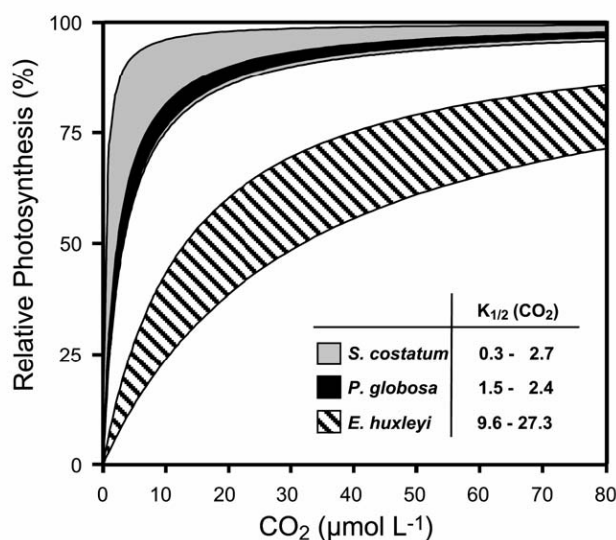
Drifta og effektiviteten på den biologiske pumpa er dermed ein viktig faktor med omsyn på overføring av antropogent CO₂ frå atmosfæren til havet. Pumpa er ikkje berre viktig for den globale karbonsyklusen, men også for syklusen til mange av dei kjemiske elementa som til dømes Ca, Si, N, P, Ba, Cd, Ni, Zn.

Når auken i CO₂ innhald i havet skjer over så kort tid som vi no er vitne til, det vil sei <10⁴ år, er havets pH relativt sensitiv til auken. Dersom endring i CO₂ skjer over eit langt tidsintervall (>10⁵ år), vil interaksjonar med karbonatmineral gjere havet sin buffekapasitet større og dermed redusere sensitiviteten for pH endringar. Uforminska CO₂ utslepp i dei nærmaste århundra vil sannsynlegvis kunne bidra til ei pH-endring på 0.7 einingar under dagens nivå og som vil vere større enn den endringa som har skjedd i løpet av dei siste 300 millionar åra (Caldeira & Wickett 2003). I dette tidsrommet er det lite som tyder på at pH i havet var lågare enn 0.6 einingar under dagens nivå (sjå kapittel 2).

På land tek plantene opp CO₂ primært ved diffusjon og auken i atmosfærisk CO₂ har difor positiv effekt på fotosyntesen. Dei fleste marine planteplanktonartane har konsentrasjonsmekanismar som aktivt kan ta opp uorganisk karbon enten i form av CO₂ eller bikarbonat (HCO₃⁻) eller begge former. Fordi dei aktivt kan konsentrere CO₂, har endringar i pH og CO₂ innhaldet difor mindre effekt på fotosyntesen hos marint planteplankton enn for terrestre plantar og også muligens også marine bentiske fotosyntetiserande organismar (Giordano et al 2005).

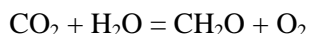
Nokre marine planteplanktonartar har imidlertid CO₂ som den foretrekte karbonkjelda, mens andre nyttar fortrinnsvis bikarbonat (Elzenga et al. 2000). I tillegg er det gruppespesifikke skilnader i CO₂ sensitiviteten i karbonmetabolismen. Mens kiselalgen *Skeletonema* og prymnesiophyceen *Phaeocystis globosa* er nær CO₂ metning ved dagens CO₂ nivå med omsyn på fotosyntesekapasitet (Burkhardt et al. 1999, 2001, Rost et al. 2003), så er kalkflagellatane *Emiliania huxleyi* (**Figur 18**) og *Gephyrocapsa oceanica* karbonbegrensa på grunn av sin låge affinitet til uorganisk karbon (Riebesell et al. 2000, Rost et al. 2003).

Det er energikrevande for marint planteplankton å bruke bikarbonat som karbonkjelde og begrensa tilgang på energi er muligens grunnen til at dei ikkje baserer seg fullstendig på aktivt opptak av bikarbonat, som det er rikeleg tilgang på, men baserer deler av karbonopptaket sitt på den låge og varierende tilgangen på CO₂ (Riebesell 2004). Berre 1 % av det uorganiske karbonet i havet er i form av CO₂ (Arrigo 2007).



Figur 18. Fotosyntesekurver for ulike artar som funksjon av CO₂ konsentrasjonen (etter Riebesell 2004). Kurvene viser skilnaden i sensitivitet for CO₂ mellom kiselalgen *Skeletonema costatum* og prymsniophyceane *Phaeocystis globosa* og *Emiliana huxleyi*.

Danning av organisk stoff gjennom planteplanktonets fotosyntese skjer ved opptak av CO₂ som er oppløyst i sjøvatnet (Hays et al 2005):



Med utgangspunkt i den predikerte doblinga av atmosfærisk CO₂ i 2100 som igjen bidrar til auke av oppløyst CO₂ i havet, kan det forventast at fotosyntesen i eutrofe område vil kunne verte dobla og ellers generelt auke med opp til 40% hos marine artar med låg affinitet for bikarbonat (Schippers et al 2004).

Enkelte planteplanktongrupper, til dømes kalkflagellatar, produserer små skjel av kalsiumkarbonat (kalsitt) som dei omgjer seg med:



Denne prosessen forbrukar bikarbonat og frigjer CO₂ (og er ei kjelde til auke av CO₂ i atmosfæren). For at kalk skal kunne dannast må ein ha overmetning av kalsiumkarbonat i sjøvatnet. Redusert pH vil redusere karbonatmetninga og dermed kunne påverke kalkdanninga hos kalkdannande marine organismar slik som kalkflagellatar. Effekten av auka CO₂ på kalkdanninga til *Emiliana huxleyi* frå norske kystfarvatn viser imidlertid litt motstridande resultat. Dellille et al. (2005) fann at kalsifiseringa blir signifikant redusert ved auka CO₂ konsentrasjon, mens Bellerby et al. 2007 ikkje fann nokon reduksjon sjølv ved eit CO₂ nivå som er representativt for eit scenario for 2150.

CO₂ produsert gjennom kalkdanninga skaper ein negativ feedback på grunn av at CO₂ mengda aukar og som ein følge av dette blir pH redusert (Hays et al. 2005, Riebesell et al. 2000). Effekten av utsynking av kalsiumkarbonat og partiklært organisk materiale har motsett effekt på partialtrykket av CO₂ i havets overflatelag og her spelar vertikalfordelinga mellom kalkflagellatane og dei andre artane ein viktig rolle.

Det er gjort ulike forsøk, både i og utanfor laboratoriet, på å studere moglege effektar av forsureing, og blant desse blir mesokosmosforsøk sett på som ein rimeleg god analog til naturlege system (Arrigo 2007). Det ligg føre resultat frå mesokosmosforsøk i Raunefjorden ved Bergen der effektar av auka

CO₂ konsentrasjon på naturleg planteplankton vart studert under ei kiselalgeblomstring med påfølgjande dominans av kalkflagellaten *Emiliania huxleyi*. Resultata viste inga endring på algesamansetning eller suksesjon (Riebesell et al. 2007). Auka CO₂ førte imidlertid til auka fotosyntese. Ved ein CO₂ konsentrasjon på 700 µatm som er scenariet for 2100, auka CO₂ opptaket hos planteplankton med 27 % i forhold til ved dagens CO₂ nivå.

Det vart også påvist signifikant endring i det støkiometriske forholdet mellom opptak av karbon i høve til opptak av ulike næringssalt ved aukande CO₂ ettersom næringsopptaket ikkje viste tegn til sensitivitet ovanfor auka CO₂ (Bellerby et al 2007, Riebesell et al. 2007). Dette kan bidra til lågare N og P i planteplanktonet med lågare vekst og reproduksjonspotensial hos herbivort dyreplankton som ein mogleg konsekvens, sjølv om enkelte forsøk har vist at POC og PON i overflatelaget ikkje avvik noko særleg frå Redfieldforholdet (Riebesell et al. 2007). Dette skuldast sannsynlegvis at auka CO₂ konsentrasjon fører til auka utskiljing av oppløyst organisk karbon (Riebesell et al. 2007, Bellerby et al. 2007, Schultz et al.2007) – noko som resulterer i auka utsynking av planteplanktonet ved slutten av blomstringsperioden.

I naturen kan organiske molekyl (DOC) som vert skilt ut frå planteplankton, gå saman og danne transparente exopolymer partiklar (TEP). Desse strukturane er klebrige og kan fremje aggregering og på den måten auke synkehastigheita til andre partiklar (Arrigo 2007). Resultata tyder på at ein må rekne med at styrken på den biologiske pumpa aukar med aukande CO₂ konsentrasjon. Ein aukande partikkelfluks frå overflata til djuphavet vil bidra til ein negativ feedback til den auka CO₂ konsentrasjonen i atmosfæra, men effekten av ein auke i den biologiske pumpa vil berre vere ei forskyving i tid på den forventa auken i atmosfærisk CO₂ (Arrigo 2007) ettersom all CO₂ som vert deponert i djuphavet gjennom den biologiske pumpa kjem til overflata igjen i løpet av eit langt tidsperspektiv.

Ei meir effektiv biologisk pumpe der meir partikulært materiale sedimenterer, vil forbruke meir oksygen i djuphavet ettersom nedbrytning av organisk materiale krev oksygen. Auka oksygenbehov til nedbrytning av organisk materiale vil difor kunne bidra til redusert tilgang på oksygen i djupare vasslag og føre til ein auke i område med oksygenfritt botnvatn (Riebesell et al. 2007).

Auka CO₂ konsentrasjon har også vist seg å auke cellestorleiken til plantplanktonet (Engel et al. 2007).

Den økologiske og biokjemiske vekselverknaden mellom kalkdannande planteplankton, ikkje kalkdannande planteplankton, sjøvannets karbonatkjemi og feedbacken med atmosfæra er svært kompleks (Riebesell et al. 2000, Barker et al. 2003, Boyd & Doney 2003, Hays et al. 2005). Planteplankton har ulik sensitivitet overfor CO₂ og ulike mekanismar for karbonopptak.

Ein auke i CO₂ konsentrasjonen vil difor ikkje berre endre aktiviteten til den enkelte arten men også favorisere enkelte artar framfor andre. Denne endringa i samfunnsstrukturen til planteplanktonet vil også påverke samfunnsstrukturen i dei høgare trofiske nivåa som er avhengige av planteplankton som mat. I tillegg vil også syklusen for ulike element som er forskjellig for ulike artar, som til dømes kalsiumkarbonat i hos kalkdannande artar og silikat hos kiselagane, bli påverka (Hays et al. 2005).

I tillegg kan også bakteriar og dyreplankton bli påverka av pH-endringar og såleis resultere i endra struktur og funksjon til heile økosystemet. Dei økologiske interaksjonane blir ytterlegare kompliserte ettersom forsuringa av sjøvatnet ikkje foregår isolert, men også vert påverka av auka temperatur. Temperaturen i havet er stipulert til å auke 2-3 grader i det komande århundre, og ein slik auke vil både påverke aktiviteten til planteplanktonet og løyslegheita til CO₂ (Hays et al. 2005).

I tillegg til å påverke karbondioksyd-bikarbonat-karbonat systemet er det forventa at forsuring av havet vil påverke havkjemien (elementa sine tilstandsformer) på en slik måte at det vil påverke tilgangen på næringsstoff og effekten av toksiske stoff. Den kjemiske forma eit element har i sjøvatn

vert påverka av dei andre elementa og blant desse er hydrogenionekonsentrasjonen. Metall ligg føre i to former i sjøvatn – fritt oppløyst og som kompleks. Ettersom ein reduksjon i pH generelt aukar andelen av dei fritt oppløyste formene, er dette eit problem med omsyn til toksiske metall sidan den fritt oppløyste forma er den mest giftige.

I enkelte tilfelle kan næringsstoff vere toksiske i høge konsentrasjonar. Dette gjeld særleg for mikronæringsstoffa som i stor grad består av spormetall. Spormetalla er tungmetall som i mange tilfelle er toksiske i høg konsentrasjon. Som eksempel kan nemnast kopar og sink (ROS 2005). Enkelte av spormetalla er begrensande for primærproduksjonen i enkelte havområde. Jern er eit slikt spormetall som ved ein reduksjon i pH kan bli meir tilgjengleg (Morel et al. 2003).

Ettersom tilgang på ulike typar næringsstoff er nødvendig for fotosyntesen, er det essensielt å vite korleis endra pH påverkar næringsstoffa. Det store spørsmålet er kva den totale verknaden av ei endring i havkjemien med omsyn på næringsstilgangen for planteplankton og dermed for primærproduksjonen vil vere. Dette er kompliserte forhold som ein med dagens kunnskap vanskeleg kan seie noko om.

I Norskehavsområdet finst det fleire hundre planktonalgeartar (Ottesen og Auran 2007). Den dominerande algegruppa er kiselalgane som er hovudnæringskjelda for mange dyreplanktonartar og som difor kanskje har den mest sentrale rolla i overføringa av energi til det neste trofiske nivået.

Andre viktige artar er prymnesiophyceene *Phaeocystis pouchetii* og *Emiliania huxleyi* kor den sistnevnte er ein kalkflagellat som produserer små skjel (coccolith) av kalsiumkarbonat. Begge desse artane kan danne masseblomstringar og er difor biomassemessig viktige for området. Sjølv om utbreiinga av *E. huxleyi* i havområda har auka dei siste tiåra, sannsynlegvis på grunn av auka temperatur, vil mest sannsynleg forsuringa av havet over tid redusere forekomsten av *E. huxleyi* og andre kalkflagellatar (ROS 2005), sjølv om nye resultat (Bellerby et al 2007) kanskje gjer denne vurderinga meir usikker. Tortell et al. (2002) fant for naturleg planteplankton at auka CO₂ nivå frå 150 µatm til 750 µatm kan føre til reduksjon i kiselalgeforekomstane og auke i forekomsten av *Phaeocystis*. Forsuring av havet kan med andre ord føre til store økosystemendringar.

Resultat frå Nordsjøen har synt at det marine pelagiske systemet responderer på klimaendringar. Sjølv om det er temperaturendring som har vore den mest nytta forklaringsvariabelen på desse endringane kan det kanskje vere ein samla respons på fleire variablar. Styrken på responsen er ulik for ulike grupper og er også årtidsavhengig, noko som medfører ei forskyving av forholdet mellom ulike trofiske nivåa og funksjonelle grupper (Edwards & Richardson 2004). Svekking av dei fenologiske samanhengane, det vil seie endringar i tidspunkta for dei årlege tilbakevendande fenomena, vil influere på den gjensidige påverknaden dei ulike trofiske nivåa har på kvarandre og på næringskjedestrukturen, noko som til sist vil kunne føre til økosystemendringar.

3.2 Makroalgar

Som alle andre fotosyntetiserande planter treng makroalgar (tang, tare og andre store algar) lys som energikjelde for å omdanne uorganiske næringsstoff til organiske forbindelsar, og kan difor ikkje vekse djupare enn at dei får lys nok til å ha ein netto fotosyntese. Vanlegvis er desse algane festa til fjell eller anna fast substrat, og i Norskehavet sine gruntområde er det mykje fjell der dei kan finne feste og vekse.

Makroalgar utgjer ein vesentleg og viktig del av botnvegetasjonen langs norskekysten. Godt utvikla tareskogar (**Figur 19**) finn ein langs kysten ut mot Norskehavet, også utanfor grunnlina. Her er vilkåra for vekst og utvikling av tareskog blant dei beste i verda. Imidlertid er det berre sør for Trøndelag at tareskogen er frodig da kråkeballar har beita ned det meste av taren lenger nord. Sidan gruntområda kun er smale område langs kystlina, vil makroalgane sin totale produksjon vere liten i høve til

planktonalgane sin totale primærproduksjon i Norskehavet. Likevel utgjør dei eit viktig, artsrikt og produktivt økosystem som mellom anna er gyteområde og oppvekstområde for fleire fiskeartar.

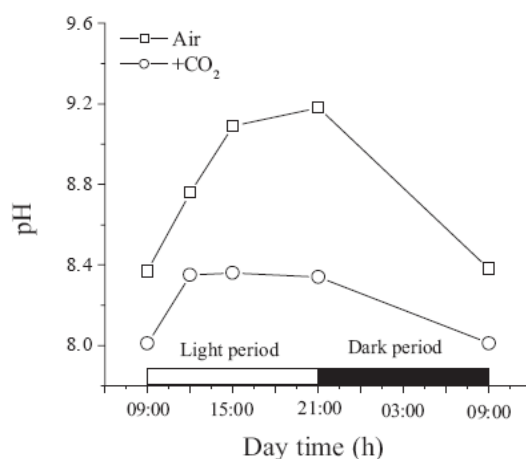


Figur 19. Tareskogen er eit viktig gyte – og oppvekstområde for mange fiskeartar. (Frå Ottersen & Auran 2007.)

Når det gjeld effekten av auka CO_2 og redusert pH på makroalgar, er relativt lite data tilgjengeleg (ROS 2005). Frå området Norskehavet er det ikkje rapportert om forsøk med auka CO_2 og redusert pH på makroalgar så her må ein støtte seg til resultat frå andre regionar.

Forsøk med brunalgen *Hizikia fusiforme*, som finst i den nordvestlege delen av Stillehavet, har vist at auka CO_2 -mengde i vatnet ga auka vekstrate (Zou 2005, **Figur 20**). Også opptakshastigheita for nitrat og nitratreduktaseaktiviteten auka under lysperioden, medan den lysmetta fotosyntesehastigheita, mørkerespirasjonen og fotosynteseeffektiviteten endra seg lite.

Forsøk med andre makroalgar (*Porphyra yezoensis* (raudalge), *Gracilaria chilensis* (raudalge), *Ulva rigida* (grønalg) har og vist auka vekstrate når CO_2 -mengda i sjøvatnet aukar (Björk et al. 1993, Gao et al. 1991, 1993a, Gordillo et al. 2001, Kübler et al. 1999).



Figur 20. Dagleg fluktuasjon av pH i sjøvatn med kultur av *Hizikia fusiforme* der sjøvatnet er gjennombobla med vanleg luft (Air = gjennomsnittleg $360 \mu\text{l l}^{-1} \text{CO}_2$) og CO_2 -anrika luft (+ CO_2 = gjennomsnittleg $700 \mu\text{l l}^{-1} \text{CO}_2$). (Frå Zou 2005.)

Den auka vekstraten ved høg CO₂ mengde synest å ha samanheng med auka assimileringshastigheit for nitrogen (Gordillo et al. 2001). Det finst imidlertid også resultat frå eksperiment som syner redusert eller uendra vekstrate ved auka mengde CO₂ i sjøvatnet. For raudalgene *Gracilaria tenuistipitata*, *Porphyra leucostica* og *P. linearis* vart det registrert redusert vekstrate ved auka CO₂ (García-Sánchez et al. 1994, Mercado et al. 1999, Israel et al. 1999), mens Israel & Hophy (2002) ikkje fann signifikant endra rate i eit forsøk gjennomført med fleire makroalgeartar.

Indikasjonar på auka vekstrate ved auka CO₂ konsentrasjon har framkome også gjennom målingar hos sjøgras (Beer et al. 2002). Årsaka til at mange makroalgar og sjøgras aukar fotosyntesehastigheita ved auka CO₂-mengde i havet, kan vere at mange av desse plantene tek opp CO₂ ved diffusjon i staden for gjennom ein konsentrasjonsmekanisme slik som hos mange planteplanktonartar (OSPAR 2006).

Sjølv om enkelte forsøk med tareartar viser auka primærproduksjon under auka CO₂-konsentrasjon, er det også resultat som tyder på at auka CO₂-mengde i vatnet kan føre til at hastigheita i nedbrytningsprosessen i plantene vert redusert. Dermed kan tilgangen på resirkulerte mikronæringsstoff bli redusert og det kan redusere den sesongmessige gjenveksten (Swanson & Fox 2007).

Kalkalgar (fam. Corallinaceae) som tilhøyrrer algeklassen raudalgar (Rhodophyceae), har til felles at celleveggane er kraftig kalkinkrustert. Kalken eller kalsiumkarbonatet i celleveggen kan vere til stades både i form av aragonitt og kalsitt. Ei forsuring av havet kan difor påverke kalkalgane i negativ retning. I forsøk har det vore vist at kalkalgen *Corralina pilulifera* får problem med kalsifiseringa når mengda CO₂ aukar (Gao et al. 1993b). Ved ei fordobling av pCO₂ i høve til førindustriell tid vil kalsifiseringshastigheita hos kalkalgane sannsynlegvis verte redusert med 10-40% (Feely et al. 2004). Ei forsuring av havet kan dermed føre til ein vesentleg reduksjon av veksten hos og førekomsten av kalkalgar.

Dei fleste resultat som ligg føre om kva effekt auka CO₂-mengder i vatnet har på makroalgar, kjem frå kulturforsøk på enkeltartar. Fram til no har ein ikkje gjort observasjonar av endringar i naturleg makroalgevegetasjon som ein kan tilskrive endringar forårsaka av at mengda CO₂ har auka i havet. Det er difor vanskeleg å overføre resultatata frå kulturforsøk til kva som vil skje på økosamfunnsplan ved ei storskala forsuring.

Kalsiumkarbonat

Kalsiumkarbonat (CaCO₃) finst i to former i sjøvatn– aragonitt (rombisk krystallform) og kalsitt (trigonal krystallform). Aragonitt er ei ustabil form som etter ei tid går over til kalsitt. Kalsiumkarbonat vert danna ved at kalsium (Ca) reagerer med karbonat (CO₃). Auka tilførsel av CO₂ til sjøvatnet fører med seg ei forsuring og ein reduksjon av mengden karbonat-ionar. Dette reduserer danninga av karbonatmineral – noko som vil påverke dyr og planter som nyttar kalsiumkarbonat til oppbygging av skal, skjelett eller tilsvarande i organismen. Forsuringa vil også kunne føre til at kalsiumkarbonat og andre karbonat byrjar bli løyst opp slik karbonat-ionar vert frigjevne. Desse vil reagere med H⁺-ionar og slik sett motverke forsuringa auka tilførsel av CO₂ medfører.

Organismar som danner skal/skjelett av aragonitt er meir sårbare enn dei som danner frå kalsitt. Aragonitt løyest lettare i vatn enn kalsitt, og det nøytrale metningsdjupet for aragonitt ligg derfor nærmare overflata enn metningsdjupet for kalsitt. Ved ei forsuring (reduert pH) vil metningsdjupet for aragonitt rykke ennå nærare overflata og for organismar som lever på djupt vatn og som nyttar aragonitt i skal/skjelettoppbygginga kan forsuringa bli katastrofal (sjå kapittel 2).

3.3 Korallar

Kaldtvasskorallar inkluderer steinkorallar (Scleractinia), blautkorallar (Octocorallia), svartkorallar (Antipatharia) og hydrokorallar (Stylasteridae). Dei er vidt utbreidd og finst i alle verdshav, men er mest kjent i Atlanteren truleg grunna stor leiteverksemd for olje/gass der. Det totale arealet av

kaldtvasskorallar globalt er framleis ukjent, men fleire studiar tyder på at arealet kan vere likt med eller til og med større enn arealet som i dag er dekt av dei meir kjende ekte (hermatypiske) grunne korallreva rundt ekvator (<50m djup og >20°C). Eit konservativt estimat ligg på 284 300 km² (Global Census of Marine Life on Seamounts. <http://censeam.niwa.co.nz/>).

Dei fleste kaldtvasskorallar finst på kanten av kontinentalsokkelane eller som undersjøiske ”kalkfjell eller knollar” (Roberts & Hirshfield, 2004, Freiwald et al., 2004). Slike kalkfjell kan bli opptil 350m høge og finst i Atlanteren på frå 600 til 900m djup (<http://www.lophelia.org>).

Dei største førekomstane av kaldtvasskorallar er i Nordaust-Atlanteren og er dominert av ei slekt – *Lophelia* (Freiwald et al 2004). Verdens største kaldtvassrev ligg i Norskehavet og strekkjer seg frå Sula til Haltenbanken. Saman med større rev i Lofoten området blei 970 km² verna i 1999 (Forskrift om vern av Korallrev) spesielt m.o.t. tråling og leiteverksemd i oljebransjen.

I norske farvatn finst to rev-byggande artar; glaskorall - *Lophelia pertusa* og steinkorallen - *Madrepora oculata*. Av desse to er det *Lophelia pertusa* som er den dominerande arten langs norskekysten og i våre fjordar. Dei finst forholdsvis djupt, på 150- 1000m (2000m), men på enkelte lokalitetar med god strøm, stabile temperaturar og høg salinitet kan dei førekome heilt opp til 39m djup som i Trondheimsfjorden (Moen & Svendsen, 2004). Dei fleste rev langs kysten av Nord-Norge ligg derimot på frå 200-400m på egga av kontinentalsokkelen.

Korallar veks sakte, men dei ekte som lever i symbiose med ein eincella alge, ein zoozanthell, har betydeleg større kalkdanning enn dei som ikkje lever i slik symbiose; Enkelte endegreiner kan vekse opp til 10cm pr. år. Det vert sagt at tropiske korallrev kan tilføre så mykje korallfragment til botnen at det utgjer på 2,5cm pr. år (Barnes, 1974). Kaldtvasskorallar har ikkje denne symbiosen og veks difor svært sakte, berre 6mm pr. år (Hovland & Mortensen, 1999). Det faktum at dei kan bli opp til 25m høge indikerer at dei kan bli svært gamle. Det er funne *Lophelia*-rev på Haltenpipetraseen som er 8500 år gamle, mens dei yngste var ca. 2000 år gamle (Nilsen, A.J., 2004).

Avgrensande faktorar for utbreiing

Utbreiinga av kaldtvasskorallar er som sagt avgrensa til 50-1000m djup på høgare breiddegrader, mens dei går mykje djupare nær ekvator (4000)m. Denne djupneskilnaden heng saman med at aragonitt som er den type kalsiumkarbonat som desse korallane består av, blir raskare løyst opp med fallande temperatur og aukande djup. Aragonitt finst i overmetting ned til vel 1000m i Norskehavet, djupare enn dette går aragonitt i oppløysing. Djupvasskorallar veks på stader med gode strømførhold og finst difor oftast på eggakanten eller på tersklar i terskelfjordar samt på undersjøiske fjellryggar i miljø med høg stabil salinitet og temperatur mellom 4 og 8°C (Mortensen & Buhl-Mortensen, 2004).

Det har elles også vore føreslege at slike djupvassamfunn kan drage nytte av den stadige tilførsla av næringsstoff som lek frå havbotnen og dermed vere ein medverkande faktor i utbreiinga til kaldtvasskorallane (Hovland & Risk, 2003). Det er også påvist auka konsentrasjonar av hydrokarbonar i porevatnet ved *Lophelia* rev utanfor Midt-Norge. Porevatn siv konstant opp frå sedimenta og bakteriar og andre mikroorganismar som lever av hydrokarbona kan difor vere ei stabil og betydeleg matkjelde for koralldyr (Hovland & Thomsen 1997).

Dagens status.

Kaldtvasskorallane sin økologi og biologi er relativt ukjend sidan dei har vore svært vanskelege å kome til. Men ved hjelp av dagens fjernstyrte undervassfarkostar (ROV) er ein nå i stand til å studere desse dyra nærmare. Kaldvasskorallane i Nordaust-Atlanteren er av dei reva som er best undersøkt, sannsynlegvis som følge av oljeverksemda (Freiwald et al 2004), men statusen veit ein enno lite om. Havforskningsinstituttet har studert skadar etter tråling ved slike rev og funne at mellom 30 og 50 % av alle rev som er registrert eller som sannsynlegvis har eksistert, er delvis eller heilt øydelagt av tråling.

Effekt av forsuring på kaldtvasskorallar

Vi har ikkje funne resultat frå forsøk med effektar av redusert pH i sjøvatn på kaldtvasskorallar, men ein bør kunne trekke ein god del sluttingar frå forsøk utført på ekte hermatypiske korallar. Sjølv ein liten forsuring av havet vil ha negative effektar på kalsifiserande organismar. Mest sannsynleg vil effekten innebere svekking av skjelettet som i verste fall kan døy (Gattuso et al. 1995). Ei dobling av CO₂ vil medføre reduksjon på 10-30% i kalsifiseringsraten hos ekte korallar (Gattuso et al., 1999; Kleypas et al., 1999). Reduksjonane vil kunne skje sjølv når sjøvatnet er overmetta av aragonitt (Feeley et al., 2004).

Fleire har nå vist at kalsifiseringsprosessane er proporsjonale med løyseligheita av aragonitt (Gattuso et al., 1999; Marubini & Atkinson, 1999; Langdon et al 2000, 2003; Leclercq et al 2000, 2002; Marubini et al. 2001, 2002). Ein reduksjon i desse prosessane vil få betydelege konsekvensar for djupvasskorallar som allereie veks svært seint.

3.4 Botnfauna

Norskehavet dekkjer store areal med stor variasjon i sjøvasskarakteristikk, djup og botntilhøve. Dette gjer at variasjonen av botndyrsamfunn er stor. Med unntak av enkelte mindre område er Norskehavet imidlertid karakterisert som eit lite undersøkt område med omsyn til utbreiing av botndyr.

Forsuringa som skuldast auka CO₂ innhald i atmosfæren vil i vårt århundre først og fremst ha potensial i seg til å påverke botndyrsamfunn i relativt grunne område (pH reduksjon på 0.1-0.3 pH eler meir i dette hundreåret, jamfør kapittel 2). Påverknaden vil kunne finne stad i heile forvaltingsområdet, men kanskje mest i vestlege deler der pH endringane kan bli størst og vertikalblandinga er mest effektiv. I djupare område vil påverknaden kunne kome seinare.

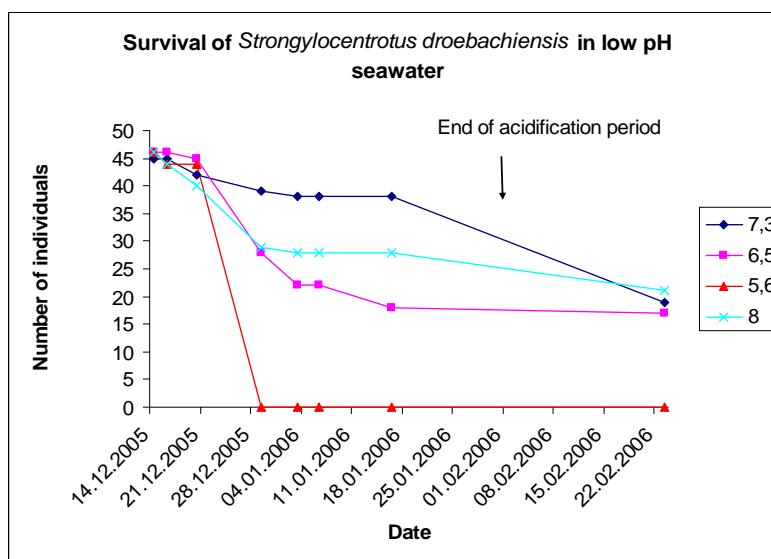
Tareskogen er eit spesifikt botnsamfunn som er relativt godt studert, og som er vektlagt i Arealrapporten (Ottersen og Auran 2007). Tareskogen har høgt biologisk mangfald, og reknast blant dei mest produktive økosystema på kloden. Krepsdyr, molluskar, og pigghudar er viktige dyregrupper i tareskogen. Sidan desse dyregruppene har kalsifiserte skal, er dei spesielt sårbare for auka CO₂ - konsentrasjonar.

Sjølv for organismar som er avhengig av karbonat til oppbyggjinga er det stor variabilitet når det gjeld toleranse for redusert pH. Studiar tyder blant anna på at pigghudlarvar har mindre toleranse enn molluskar (Shirayama et al., 2004) og krepsdyr (Spicer et al., 2006). Ei årsak til at pigghudar som til dømes kråkeballar er spesielt sensitive, er at dei manglar oksygentransporterande pigment, og har dårleg evne til ioneregulering (Miles et al. 2007). Dei er vidare avhengige av aragonitt i skalet både som vaksne og som juvenile (Politi et al. 2004, ROS 2005).

Kråkebollen *Psammechinus miliaris* synte betydeleg letalitet på pH ≤6.6 under CO₂ indusert forsuring i 8 dagar (Miles et al. 2007), mens tendensar til oppløysing av skalet vart observert også på den høgaste pH i det forsøket; pH=7.44. Ved kronisk eksponering for forhøgde konsentrasjonar av CO₂, (pH=7.9 i 26 veker) starta ein å observere dødeligheit etter ca 10 veker hos to stillehavsartar av kråkeballar. Akumulert letalitet i forsøka var av storleiksorden 4-27% (Shirayama & Thornton 2005).

Den viktigaste arten i den norske tareskogen, *Strongylocentrotus droebachiensis*, hadde liten eller ingen letalitet ved eksponering for CO₂ -konsentrasjonar motsvarande pH=6.98 over ein periode på 8 veker (Siikavuopio et al. 2007). Dette er i samsvar med eit anna forsøk gjort med *Strongylocentrotus droebachiensis*, som viste at denne arten overlevde vel så godt ved pH=7.3 som ved kontrollvilkåra (pH =8) etter ein eksponeringsperiode på 1 månad. Den første veka av forsøket var det svært liten dødeligheit sjølv ved en så låg pH som 5.6 (**Figur 21**). Både Shirayama & Thornton (2005) og

Siikavuopio et al. (2007) poengterte imidlertid at dei viktigste effektane er sub-letale i form av redusert vekst.

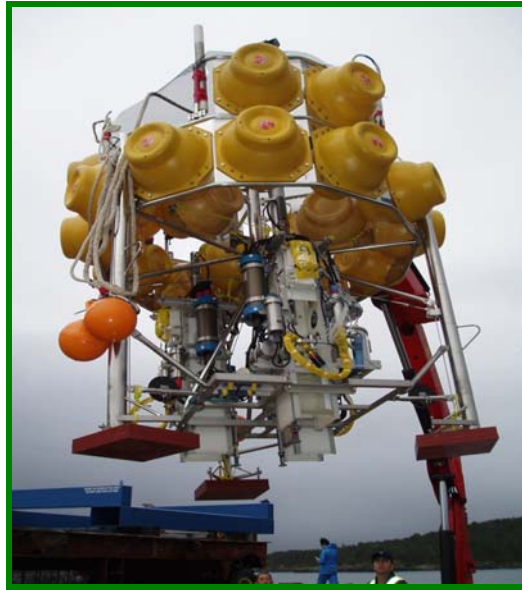


Figur 21. Overleving av kråkebollen *Strongylocentrotus droebachiensis* i sjøvann med varierende pH (pH=8 var kontrollvilkår). pH er justert ved bruk av CO₂ (upubliserte data, J.A. Berge, NIVA).

I forsøka til Shirayama & Thornton (2005) vart også sneglen *Strombus luhuanus* undersøkt. Det vart ikkje observert dødeligheit gjennom dei 26 vekene forsøket varte, men i likheit med kråkebollane observerte dei sub-letale effektar i form av redusert vekst ved låg pH. Både befrukting, celledeling og larveutvikling blir redusert ved auka CO₂ konsentrasjon hos pigghudane *Hemicentrotus pulcherrimus* og *Echinometra mathaei* (Kurihara & Shirayama 2004a,b). Stuktueller endringar hos larvane vart rapportert til å inntreffe ved ein pH på 7.8 (Kurihara & Shirayama 2004a,b).

Forsøk som inneber langtidseksponering (20 veker) av intakte botndyrsamfunn i sjøvann med redusert pH (CO₂ indusert) tyder på klare effektar på makrofaunastruktur og diversitet (Widdicombe et al. in prep) særleg når pH er under 7.3-7.6 (sandbotn) og lågare enn 5.6 (leirbotn). Resultata tyder dermed på at dyresamfunn på sandbotn er meir følsame enn tilsvarende samfunn på leirbotn. Ein veit ikkje heilt kva dette skuldast, men to moglege forklaringsmodellar har blitt lansert. Den første er at ein i leirbotn har mindre oksygen tilgjengeleg og høgare CO₂ konsentrasjonar enn på sandbotn slik at organismane der i utgangspunktet er meir tolerante for CO₂. Ei anna mogleg forklaring er at sedimenta i leirbotn har større bufferkapasitet.

Forsøk i Storfjorden på Sunnmøre i 2005 med eit bentisk kammer system (Figur 22, Ishida et al. 2006) viste effektar av auka CO₂ på bakteriar (reduksjon), archaea (stimulering), nanobenthos (stimulering), meiofauna (uklar respons) og sedimentprosessar (metanogenese og sulfatreduksjon i hovudsak stimulert). Andre liknande forsøk tyder på at næringsaltdynamikken i eit bløtbunnsamfunn også kan bli påverka av forsuring (Widdicombe et al. in prep, Widdicombe og Needham 2007). Det er difor ikkje berre makrofaunasamfunn som kan bli påverka av redusert pH, men også viktige prosessar og byttedyr som makrofaunaen er ein integrert del av.



Figur 22. Forsøk med CO₂-eksponering av botndyr i Storfjorden på Sunnmøre i 2005 med eit såkalla bentisk kammer system. Forsøka vart gjennomført i regi av NIVA og i samarbeid med forskarar i EU-nettverket CO₂GEONET. Japan bidrog både med utstyr og personell, utan dette kunne ikkje forsøket ha blitt utført.

3.5 Fisk og evertebratar

3.5.1 Generelt om verknader

I følgje Pörtner et al. (2004) er dei fleste fysiologiske mekanismar som blir påverka av CO₂ dei same i alle dyr, men tolegrensene for desse mekanismene er ulike frå art til art. Vi gjer difor i generelle termar greie for korleis forsuring verkar fysiologisk på marine dyr, og kva vi veit om tolegrensar hos dei ulike gruppene som er relevant for dette avsnittet. Vi har til slutt satt dette saman til eit framtidsbilete for 2025.

Dei fysiologiske effektane av auka CO₂ hos marine organsimar skuldast delvis reduksjonen i pH i vatnet, og delvis auka diffusjon av CO₂ inn i organismen (Pörtner et al. 2004, Pörtner et al. 2005). Effektane kan være akutt letale (fører til død i løpet av minuttar til timar), letale på litt lenger sikt (timar til dagar), eller sub-letale, der dyret ikkje dør men kor viktige funksjonar svekkast.

Ein utfordring knytta til denne utgreiinga er at scenariet er eit hav med eit permanent høgare nivå av CO₂ enn tidlegare. Livslange CO₂ eksponeringseksperiment eller studiar av effektar over generasjonar er aldri gjort (Ishimatsu et al. 2005), og i sin gjennomgang av litteraturen kring biologiske effektar av forhøgde CO₂ konsentrasjonar konkluderar Pörtner et al. (2004): *”At the present it is difficult, if not impossible, to give numbers for critical thresholds and to really quantify animal species as being permanently tolerant to elevation in ambient CO₂ since long-term effects have not yet been sufficiently investigated”*.

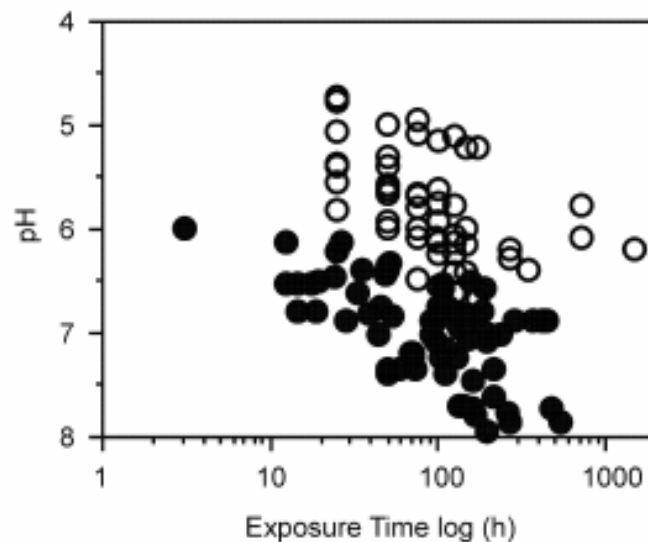
For å vurdere eventuelle effektar av CO₂, har ein i betydeleg grad støtta seg på litteratur som omtalar effektar av låg pH. Det er der vist til skadelege effektar på overleving, vekst og reproduksjon hos marine dyr (e.g. Knutzen 1981, Vinogradov & Komov 1985, Adams et al. 1997, Yamada & Ikeda 1999, Kurihara 2004), der graden av skade ser ut til å vere avhengig av intensiteten av pH reduksjonen samt av eksponeringstid (Caufield et al 1997, Bamber 1990, Adams et al. 1997, **Figur 18**).

I mange av desse studiane har ein anvendt syrer som HCl og H₂SO₄ for å gjere sjøvatnet surt. Nyare studiar indikerer imidlertid at vatn forsura med CO₂ gjev høgare toksisitet enn til dømes forsuring med HCl ved same pH (Ishimatsu et al. 2004, Kikkawa et al. 2004, Kurihara et al. 2004 a,b). Dette er illustrert i både **Figur 18 og 19**. Ein trur den høgare toksisiteten av CO₂ skuldast at CO₂ diffunderer lettare inn i kroppen enn til dømes HCl (Heisler 1986, Morris et al. 1989).

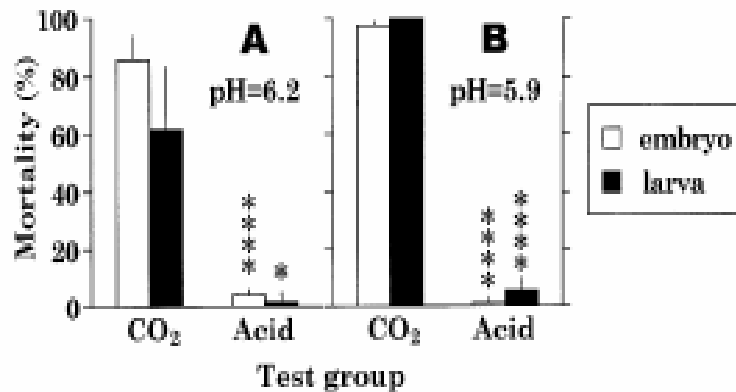
Desse studiane har medført at ein i dag er langt meir ottefull sjølv for pH reduksjonar på så lite som 0.2 einingar som følgje av CO₂, og då særleg for larvestadiar og organismar som danner kalkskal.

Trass i dette er det framleis relativt få publikasjonar knytt til biologiske verknader av marin forsuring (Harley et al. 2006). Dette er viktig å ha som bakteppe når vi det vidare summerer opp kva vi veit om effektar av CO₂ på marine makroorganismar.

Auka nivå av CO₂ inni organismen gjev forsuring (acidose) av vev og kroppsvæsker. Akutte letale effektar ser ein til dømes når pH i plasma blir redusert til eit nivå der funksjonen til pH sensitive oksygentransporterande pigment blir dårleg. Det er truleg kombinasjonen av eit oksygentransporterande pigment som fungerer dårleg ved redusert pH, ein muskuløs kropp og ein energikrevjande måte å røre seg på som gjer enkelte artar av akkar spesielt sensitive for auka CO₂ (Pörtner et al. 2005).



Figur 23. Figuren illustrerer mortalitet hos marine organismar ved ein gitt pH (Y aksa) over ei gitt eksponeringstid (X aksa) for den aktuelle pH. Kvar prikk representerer ein LT₅₀ verdi (LT₅₀ er det tidspunkt kor halvparten av forsøksobjekta er døde). Opne prikkar er resultat fra studier der vanlege syrer er brukt for å gjere vatnet surt (Auerbach et al. 1997, Yamada & Ikeda 1999), mens fylde prikkar er resultat av eit studium der CO₂ er brukt til dette (Watanabe et al. (2006). Figuren er henta fra Watanabe et al. (2006).



Figur 24. Figuren viser ei samanlikning mellom letaleffektar av forsuring med CO₂ og forsuring med HCl. I studiet har ein brukt embryo og larvar av raud sea bream, *Pagus major*. Stjernene viser signifikante skilnader mellom testgruppene. Figuren er henta frå Kikkawa et al. (2004).

Akutte effektar hos fisk er primært forårsaka av hjartsvikt, der mengden blod pumpa ut per tidseining fell under eit kritisk nivå (Lee et al. 2003, Ishimatsu et al. 2004). Generelt verkar fisk å vere mindre sensitive for akutte effektar enn evertebratar (Pörtner et al. 2005).

Dyr som pustar luft kan redusere den negative effekten av auka CO₂ på syre-base status ved hyperventilering. På grunn av at det er liten CO₂ gradient mellom vatnet og organismen kan hyperventilering i liten grad kompensere for effekten av hypercapnia hos dyr som pustar vatn (Scheid et al. 1989). Dyr som pustar vatn må nesten utelukkande basere seg på ei utveksling av ionar for å kompensere for dei CO₂ induserte endringane i syre base-status.

I alle organismar studert så langt ser ein ei akkumulering av bikarbonat ionar ved CO₂ induserte endringar i syre base-status (e.g. Heisler 1986, Wheatley 1989, Pörtner et al. 1998, 2000, 2004, Spicer et al. 2007). Denne kompensasjonen er meir eller mindre tilstrekkeleg. Det er ikkje så mange døme på ein fullstendig kompensasjon der pH returnerer til opprinnelege verdiar både intra og ekstracellulært (Heisler 1986), men eit slik døme er torsk (Larsen et al. 1997).

Fleire eksperiment tyder på at ein ufullstendig kompensasjon kan føre til ei senking av metabolismen og ein lågare respirasjon (Pörtner et al. 2000, 2004). Det er også indikasjonar på reduksjon i protein syntese, noko som påverkar dei fleste prosessar i kroppen, inkludert vekst og reproduksjon (Lagenbuch & Pörtner 2003, 2003). Evna til kompensere endringane i syre-base status er generelt mindre hjå evertebratar enn hjå fisk (Pörtner et al 2000, Langenbuch & Pörtner 2002).

Mange botndyr har skal/skjelett som inneheld karbonat (eksempelvis korallar, molluskar, foraminiferar og echinodermar) og kan difor potensielt vere følsame for forsuring. Det er imidlertid ikkje berre forsuringa åleine som har betydning, men som tidlegare nemnt, også graden av karbonatmetning i sjøvatnet og kva form for karbonat som finst (aragonitt er ~2× meir løyseleg enn kalsitt).

Forsøk med eksponering av fleire organismegrupper for auka CO₂ har vist effektar av redusert pH på biomineralisering (Langdon et al. 2000, Feely et al. 2004, Orr et al. 2005, Michaelidis et al. 2005, Kleypas et al. 1999, 2006, Berge et al. 2006) og larveutvikling (Kurihara et al. 2007, Kurihara & Shirayama 2004a, b). Granskingar for blåskjel og stillehavsøsters tyder på at kalsifisering avtek lineært med aukande pCO₂.

Berekingar tyder på at kalsifiseringa hos marine organismer allereie er blitt redusert med 11-44% sidan preindustriell tid (Andersson et al. 2005) og vil falle vidare til ca 60 % i løpet av det 21. hundreåret (Kleypas et al. 2006). Dette vil truleg føre til effektar på biodiversitet og økosystemfunksjon og dermed også potensielt kunne ha økonomiske konsekvensar (Gazeau et al. 2007).

Mange marine dyr har kompliserte livssyklusar på den måten at det er store morfologiske, fysiologiske og økologiske skilnader mellom ulike livstadiar. For mange av dei dyra som er studert er det kanskje berre vaksne individ som er undersøkt. Dei studiane som er gjort tyder på at tidlege utviklingsstadiar (egg, sperm, larvear og juvenile), er meir sårbare og at negative effektar manifesterer seg på nivå der vaksne individ er upåverka (Vinogradov & Komov 1985, Ingermann et al. 2002, Ishimatsu et al. 2004, Kurihara et al. 2004).

Det auka medvetet omkring CO₂ som ein stressfaktor for marine organismar reiser spørsmålet om korleis den kombinerte effekten av CO₂ og andre (klima)faktorar vil ha for marint miljø. Temperatur er ein styrande faktor for ulike artars utbreiing. Både marine fisk og evertebratar har ein oksygenbegrensa temperaturtoleranse (Pörtner et al. 2000, Pörtner et al. 2001, Pörtner et al. 2004 b). Ved høge temperaturar greier til dømes ikkje dei mekanismane som sørgjer for oksygentilførsel å halde tritt med dyrets temperaturavhengige auke i oksygen forbruk. Dyret kjem dermed ut av sitt aerobe "område". Ut fra dette kan ein anta at miljøfaktorar, som til dømes CO₂ som reduserer eit dyrs evne til oksygenopptak, vil kunne endre dyrets temperaturtoleranse. I eit klimaperspektiv er såleis kombinasjonen mellom endra CO₂ og endra temperatur dermed spesielt interessant. Det aller første studiet som har kombinert desse faktorane vart publisert i 2007 og viser at forhøga CO₂ konsentrasjonar aukar sensitiviteten for varme hos taskekrabbe, og dermed reduserer denne artens optimale temperaturintervall (Metzger et al. 2007).

3.5.2 Effektar på zooplankton

Zooplankton er ei fellesnemning for ei rekkje organismar som flyt eller driv fritt i havet grunna si begrensa evne til forflytting. Zooplanktonet inneheld ei rekkje taksonomiske grupper frå små eincella protozoar til vertebratar. I zooplanktonet finst dyr som lever planktonisk heile sin livssyklus (holoplankton), og dyr som lever deler av sin livssyklus som plankton (meroplankton), då oftast på egg- og larvestadiet.

Vanlege **holoplanktoniske** dyr er krepsdyr som kopepodar, krill, amfipodar og reker samt pilormar, manetar og snegl. I Norskehavet er holoplanktonet dominert av kopepodar, krill og i enkelte område i vest og sørvest av amfipodar (Ottersen og Auran 2007). Desse organismene er hovudføda for dei store og kommersielt viktige pelagiske fiskeartane som sild, makrell og kolmule og er dermed hjørnesteinar i økosystemet i Norskehavet og tilgrensande kystområde.

Dei fleste holoplanktoniske krepsdyr i Norskehavet foretek sesongmessige vertikalvandringar. Dei herbivore artane, som kopepoden *Calanus finmarchicus*, oppheld seg nær overflata om våren og sommaren sammenfallande med høg planteplankton biomasse, mens dei overvintrar på større djup (600-1000 m i aust og 100-200m i vest). Omnivore artar, som krillen *Meganyctiphanes norvegica*, står nær overflata for å beite planteplankton om våren men oppheld seg på større djup resten av året. Carnivore artar, som amphipoden *Thysanoessa libellula*, finst i store delar av vannsøykla (ned til 1000 m).

I Norskehavet består **meroplanktonet** blant anna av fiskeegg og larvar, samt egg og larvar av botnlevande evertebratar. Desse førekjem i høgast mengde om våren og sommaren, samanfallande med høg planteplankton biomasse, og finst i hovudsak nær overflata.

Det er ikkje gjort studiar av effektar av forsuring på dei dominerande artane av holoplankton som finst i Norskehavet. I litteraturen generelt finst det eit knippe studiar på kopepodar, mens det så langt vi kjenner til, ikkje ligg føre relevant litteratur som omhandlar amfipodar og krill.

Det er gjort fleire korttidsstudiar på letaleffektar av låg pH hos vaksne kopepodar. I studiar der sterke syrer er brukt for å gjere vatnet surt, ser ein betydeleg mortalitet ved pH omkring 6.5 (Grice et al. 1973, Rose and Williams 1977, Yamada & Ikeda 1999). Som nemnt over er det mykje som tyder på at vatn forsura med CO₂, er meir toksisk enn vatn forsura med andre syrer. I dei få studiane som er gjort, er det konkludert med at CO₂-konsentrasjonar som gjev pH >7 truleg ikkje er akutt toksisk på vaksne kopepodar (Kurihara et al. 2004a,b). Kurihara et al. 2004a, viste imidlertid at letale effektar hos *napilius* larvar vart observert ved lågare CO₂ konsentrasjonar (pH=7) enn det som var tilfelle for vaksne individ (pH=6.8).

Framtidsscenariar kan innebere ei varig eksponering for auka CO₂, og i den konteksten er både letaleffektar over tid og sub-letale effektar svært viktige. For kopepodar er det vist at auka eksponeringstid aukar pH-nivået for når ein observerer letale effektar (Yamada & Ikeda 1999, Sato et al. 2005, Watanabe et al. 2006). Watanabe et al. 2006, eksponerte overflate- og djupvasskopepodar frå både sub-arktiske, sub-trofiske og mellomliggjande havområde for ulike konsentrasjonar av CO₂ over eit tidsrom på 10 dagar. For den lågaste konsentrasjonen, (tilhøyrande pH på mellom 7.8 og 7.9), kunne ikkje LT₅₀ (tidspunkt når halvparten av forsøksobjekta er døde) bereknast fordi meir enn halvparten av dyra framleis var i live. Det var imidlertid dødelegheit også ved desse konsentrasjonane. Ved alle andre konsentrasjonar undersøkt (spenn i pH frå 6.5-7.8) inntraff LT₅₀ innanfor perioden på 10 dagar (Watanabe et al. 2006). Hjå kopepodar er det også påvist sub-letale effektar av auka CO₂, mellom anna ulike aspekt av reproduksjon slik som egg produksjon, klekkesuksess og larveutvikling (Kurihara et al. 2004a,b).

Som nemnt over, består **meroplanktonet** av tidlige livsstadiar (egg og larvar) av fisk og botnlevande evertebratar. Dette er difor handsama under avsnitta for fisk og botnsamfunn.

3.5.3 Effektar på fisk

Norsk vårgytande sild, kolmule, nordøstarktisk sei og makrell er viktige artar i Norskehavet både kommersielt og økologisk. Alle desse artane lever pelagisk. Viktige djupvassartar er mellom anna uer, snabeluer, blåkveite, lange og brosme. Norsk-arktisk torsk, kysttorsk og laks er også artar som delvis kan knytast til Norskehavet (Ottersen og Auran 2007).

Som nemnt over, ser det ut til at hjertesvikt er involvert i den mekansimen som gjer at auka konsentrasjon CO₂ kan drepe fisk (Ishimatsu et al. 2004). Dei konsentrasjonane som er rapportert akutt dødelege i kort-tids forsøk varierer imidlertid mykje frå ein art til ein annan (Ishimatsu et al. 2005). Hjå europeisk sea bass blei det ikkje observert dødeligheit før pH var ≤ 5.9 (Grøttum & Sigholt 1996). I eit liknande forsøk samanlikna Hayashi et al. (2004) CO₂ toleranse hos to beinfiskar (ein flatfisk med lågt aktivitetsnivå; *Paralichthys olivaceus*, og ein aktiv pelagisk art; *Seriola quinqueradiata*), og ein brusfisk (liten hai; *Mustelus manazo*). Studiet viste at den pelagiske beinfisken var mest sensitiv, etterfølgt av flatfisken og haien. Det vart imidlertid ikkje observert dødelegheit hos nokon av artane før pH var ≤ 6.18 (Hayashi et al. 2004).

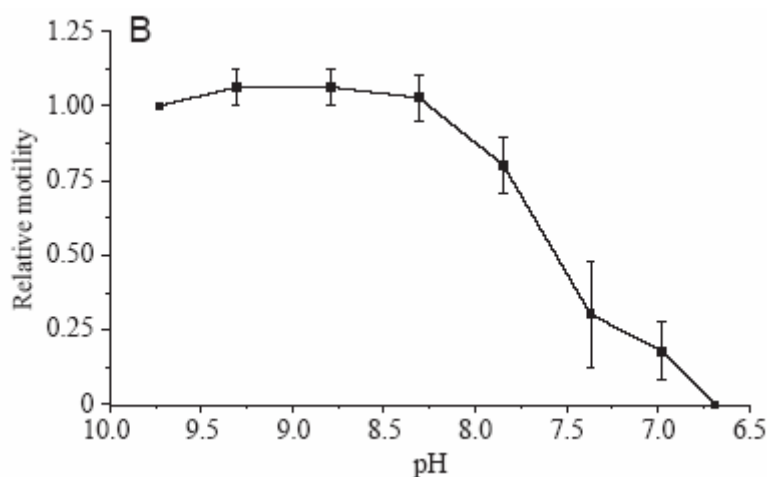
Den lågare CO₂-toleransen hos den aktive pelagiske arten samsvarar med arbeid til Pörtner et al. (2004), som kom predikerte at organismens aktivitetsnivå, mobilitet og reaktivitet vil vere korrelert med sensitivitet. Det finst også døme på artar som viser uventa høg toleranse, slik som ål (McKenzie et al. 2002, McKenzie et al. 2003).

Når det gjeld letaleffektar på marine artar under langtidseksponering er litteraturen svært sparsom. Eit av dei få studia som er gjort, er med steinbit i Norge. Steinbiten vart eksponert for pH 6.9-6.45 i 10

veker, men det vart ikkje observert dødelegheit i det heile under forsøket (Foss et al. 2003). I dette studiet blei det imidlertid påvist ein vekstreduksjon på 36% (Foss et al. 2003). Frå ferskvassartar og anadrom fisk er det også påvist vekstreduksjon på 24-49% ved eksponering for auka CO₂ konsentrasjonar (Fivelstad et al. 1998, Crocker & Cech 1996).

Tidlege livsstadiar er meir sårbare enn vaksne. Sensitiviteten kan vidare variere mellom ulike tidlege livsstadiar, og for fire ulike marine beinfiskar er det vist at egg og juvenile er meir sensitive enn larvar (Kikkawa et al. 2003). Egg av Japansk flyndre hadde LC₅₀ på pH 6.67 etter 24 timars eksponering (Kikkawa et al. 2003), mens ingen dødelegheit var observert hos vaksne ved 72 timars eksponering for pH 6.3 (Hayashi et al. 2004). Motsvarande skilnader såg ein mellom egg og vaksne hos raud sea bream (Kikkawa et al. 2003, Hayashi et al. 2004).

Sub-letale effektar i form av redusert reproduksjon og forstyrringar i tidleg utvikling er også dokumentert for fisk, men brorparten av studiane er gjort på ferskvassartar. Desse viser til dømes reduksjon av spermmobilitet ved auka CO₂-konsentrasjonar (Bencic et al. 2000, Ingermann et al. 2002, Inaba et al. 2003). For stør såg ein reduksjon i spermmobilitet allereie på pH omkring 7.8 (**Figur 25**), (Ingermann et al. 2002).



Figur 25. Spermmobilitet hos stør ved ulike pH. Verdiane på Y-aksen er uttrykt som relative verdier i høve til det som blei målt ved høgst pH (målingar ved høgste pH er sett til 1.00). Frå Ingermann et al. (2002).

3.6 Sjøfugl

Norskehavet er eit viktig område for sjøfugl. Det er anslått at rundt 4.5 millionar par hekkar langs kystane av Norskehavet, med 1.3 millionar par i Norge og 0.3 millionar par på Jan Mayen (Anker-Nilssen og Lorentsen 2004, Barrett et al. 2006). Området er også beiteområde for sjøfugl som hekkar lenger mot nord og aust, samt for overvintrande artar og artar som trekkjer gjennom området på våren og hausten (Ottersen og Auran 2007). Dei mest typiske sjøfuglane er mesteparten av tida på og ved havet, og hentar all næringa i det marine miljøet.

Det er ikkje gjort studiar på effektar av forsureing av havet på sjøfugl, og følgeleg har vi særst lite kunnskap om korleis forsureing vil kunne påverke sjøfuglbestandar. Sjøfugl nyttar økosystemet på ein heilt annan måte enn fisk og marine evertebratar. Dei er ikkje alltid i vatnet, dei har velutvikla hud og fjør og pustar i atmosfærisk luft. Sjøfuglar vil difor ikkje i same grad som fisk etc. vere direkte eksponert for sjøvotnet gjennom kontakt med respiratoriske vev eller hud. Dermed er problemstillingane omkring fysiologiske effektar ved forsureing ikkje like aktuelle for sjøfugl som for fisk og evertebratar.

Indirekte effektar på sjøfugl grunna endring i næringstilgang kan imidlertid ikkje sjåast bort frå. Dei fleste sjøfuglane hentar all si næring frå havet (sjå **Tabell 2** for omtale av viktige byttedyr for nokre av artane). Sjøfugl beitar som regel høgt oppe i næringskjeda og endringar på dei lågare trofiske nivåa vil dermed kunne påverke sjøfuglbestandane indirekte. Sjøfuglar vil såleis potensielt kunne bli berørt av ei endring i pH dersom mengde, tilgang og utbreiing av byttedyr blir endra på grunn av forsuringa.

Som omtalt i dei foregåande avsnitta finst det hittil lite konkret kunnskap om korleis forsuringa vil påverke aktuelle byttedyr. Dyreplanktonsamfunna kan bli påverka av ein reduksjon i pH, mens fisk tilsynelatande er mindre sensitive enn evertebratar.

Tabell 2. Viktige byttedyr for indikatorartane av sjøfugl i Norskehavet.

Art	Viktige byttedyr
Toppskarv	Yngre årsklassar av ulike torskfisk, i mindre grad pelagiske stimfisk
Ærfugl	Botndyr (som regel muslingar, krepsdyr og pigghudar), i mindre grad fisk
Krykkje	Ulike artar små, pelagiske stimfisk og krepsdyr
Lomvi	Hovudsakeleg pelagiske fiskeartar, men også krepsdyr
Lunde	Små, pelagiske stimfisk, spesielt sild og sil (tobis)

Det er ingen studiar som syner at ein pH-reduksjon tilsvarande den som forventa fram til 2025 vil få letale effektar for fisk. Ein indirekte effekt av forsuring av havet via byttedyrsamfunn for sjøfugl vil difor sannsynlegvis først påverke sjøfugl som i stor grad baserer sin diett på evertebratar, til dømes krykkje og ærfugl. Ut frå det som er sagt om effektar på marin fauna kan det reknast som lite sannsynleg at den skisserte endringa i pH på kort sikt vil gje målberre effektar på sjøfugl. Det gjeld både på individ- og bestandsnivå.

3.7 Sjøpattedyr

Utredningsområdet omfattar eit mangfald av habitatar for ei rekkje sjøpattedyr (Bjørge 2008). Som pattedyr er både sel og kval utstyrt med lunger og får alt oksygen gjennom å puste inn luft frå atmosfæren når dei er i overflatestilling. Sjøpattedyr står difor ikkje på same måte i direkte kontakt med vatnet som fisk og virvellause dyr. Respiratorisk vev hos sjøpattedyr er ikkje i kontakt med sjøvatnet og vil difor heller ikkje bli påvera av forsuring som kan tenkast å opptre som konsekvens av auka CO₂ innhald i atmosfæren (pH reduksjon på 0.1-0.3 for pH i dette hundreåret).

Sjøpattedyr har relativt velutvikla hud som gjer at effektar (eksempelvis acidose) i vev eller kroppsvæske truleg heller ikkje vil opptre som ein konsekvens av kontakt mellom hud og forsura vatn. Sjøpattedyr vil difor ikkje vere utsatt for den same direkte pH eksponeringa som evertebratar og fisk som er avhengig av oksygenopptak over ein cellemembran på gjeller eller anna respiratorisk vev som står i direkte kontakt med vatnet. Vi konkluderer difor med at sjøpattedyr truleg ikkje vil bli direkte påverka av forsuringa som konsekvens av auka CO₂ innhald i atmosfæren.

For mange av sjøpattedyra og særleg kvalane er Norskehavet eller i deler av det eit viktig beiteområde. Viktige byttedyr for sjøpattedyr innafor utredningsområdet er synt i **Tabell 3**. Sjøpattedyr vil potensielt kunne bli påverka av CO₂/pH indirekte via eventuelle effektar som forsuringa kan få for utbreiinga og mengde av byttedyr i Norskehavet. Kunnskap om effekten av forsuring på artar som er dokumenterte byttedyr hos kval er imidlertid svært begrensa eller ikkje eksisterande. Generelt er det imidlertid antek at fisk er mindre sensitiv for akutte effektar av CO₂ enn evertebratar (Pörtner et al. 2005). Vi antek difor at det først og fremst er artar av sjøpattedyr som ernærer seg av evertebratar som

har potensiale for å bli påverka av auka forsuring. Ut frå dette og tabellen kan grønlandssel og bardekvalar muligens vere meir utsett enn meir typiske fiske-etarar.

Den fåtallige og sterkt trua grønlandskvalen har ein sær snerper diett som er dominert av copepodar. Det er sannsynlig at denne kvalarten vil vere mest eksponert for eventuelle indirekte effektar av forsuring. Vi antek at spermkvalen som i hovudsak fangar byttedyr på djupt vatn neppe vil bli påverka av den generelle havforsuringa.

Lagring av CO₂ i geologiske strukturar på havbotnen vil ha potensial for utlekking og kan då gje kraftig forsuring lokalt og vil truleg betydeleg effekt på botndyr. Eventuell lekkasje vil medføre mindre akutte effektar på fisk som kan rømme unna surt vatn. Også når det gjeld forsuring forårsaka av moglege lekkasjar av CO₂ på havbotnen kan ein anta at direkte effektar på sjøpattedyr vil vere ubetydelege. Vi antek også at indirekte effektar knytt til redusert næringstilgong for sjøpattedyr også vil vere minimale, i hovudsak fordi berørte botnråde vil vere avgrensa.

Tabell 3. Sjøpattedyr som opptrer i Norskehavet og deira viktigaste byttedyr (Hovedkjelde: Bjørge 2008).

Art	Viktige byttedyr
Grønlandssel	Pelagiske krepsdyr (krill), amphipodar, fisk (særlig pelagisk stimfisk som sild, lodde og polartorsk)
Klappmyss	Blekksprut, fisk (til dels på djupt vatn uer, blåkveite og kolmule)
Havert og steinkobbe	Fiskeetarar (breispektra)
Vågekval	Krill, sild
Blåhkval	Krill, små stimfisk
Finnkval	Krill, små pelagisk stimfisk
Grønlandskval	Plankton (copepodar)
Spermkval	Blekksprut (djupt vatn)
Nebbkval	Blekksprut
Knøl	Generalist (hovedsakeleg fisk), lodde, polartorsk og annan stimfisk kan inngå i føden, krill, vingesnegl.
Andre tannkvalar	Hovedsakeleg fiskeetarar (eksempelvis sild, lodde, torsk) men også blekksprut, botnlevande krepsdyr (reker og krabbar)

4. Marine kulturminne

For marine kulturminne i Norskehavet er det mest aktuelt å vurdere farty og last frå farty som har forlist. D.v.s. offisielt farty som er eldre enn 100 år. I sjeldnare tilfelle kan det dreie seg om kun last som har blitt mista eller droppa. Andre gjenstandar, slik som havarete fly kan vere aktuelt å vurdere i den grad slikt blir definert som kulturminne.

Restar av busetnad og menneskeleg aktivitet på havbotn som kan ha lege over havflata for lenge sidan, slik som Doggerbanken i Nordsjøen (Gundersen et al. 2008), eksisterer kanskje også innafør foreliggende forvaltingsområde: På sokkelen utanfor Sunnmøre er det gjort funn på botnen som kan stamme frå menneske (Gundersen 2002). Ellers er påviste marine kulturminne i Norskehavet omtalt i Arealrapporten (Ottersen og Auran 2007, side 120-121). Det er fastlått at der er få dokumenterte kulturminne, at det ikkje har vore gjennomført offisiell registrering under vatn der, og at eksisterande kunnskap dermed er svært mangelfull.

Det som er kjent av funn, ligg stort sett nær kysten. På djupt vatn er det gjort få funn, med unntak t.d. av det som måtte vere kjent av større skipsvrak frå andre verdskrigen. Men det er openbert at det ligg mange vrak på havbotnen i Norskehavet, både frå nyare og eldre tid, som ennå ikkje er oppdaga. I takt med at damp og sidan motor overtok for segl, og stålskrog erstatta tre, vart det stadig meir havgåande trafikk. Mange vrak frå nyare tid kan difor ligge langt til havs. Mange forlis er dokumentert gjennom rapportar frå overlevande eller andre skip som har observert forliset. Desse vraka kan godt vere bra bevarte fordi dei ligg djupt, skjerma frå havstraum, bølger og forstyrrende fiskereiskapar.

Det kan reknast med at fleire funn vil bli gjort i samband med ny leite- og utvinningsaktivitet for olje/gass i Norskehavet, legging av nye røyr m.m. Med fjernstyrt ubåt, s.k. ROV, er det mogleg å gjere mange interessante funn.

I samband med kartlegging av røyrtraseen ut til Ormen Lange feltet frå Nyhamna på Aukra vart det gjort 11 ulike funn. Det mest kjente er eit lastfarty frå 1700-talet. Funnet som vart gjort i 2003, ligg innafør grunnlina men kan nemnast her som døme på kva som kan ligge andre stader. **Figur 26** syner undervassfotografi frå funnstaden. Funnet er nå grundig dokumentert av NTNU i samarbeid med Norsk Hydro og andre (Bryn et al. 2007). Det vart funne flasker, bestikk, kanoner, treverk, skipsklokke, hollandske og russiske myntar, restar av organisk malteriale m.m. Kva farty vraket representerer er ikkje eksakt bestemt.

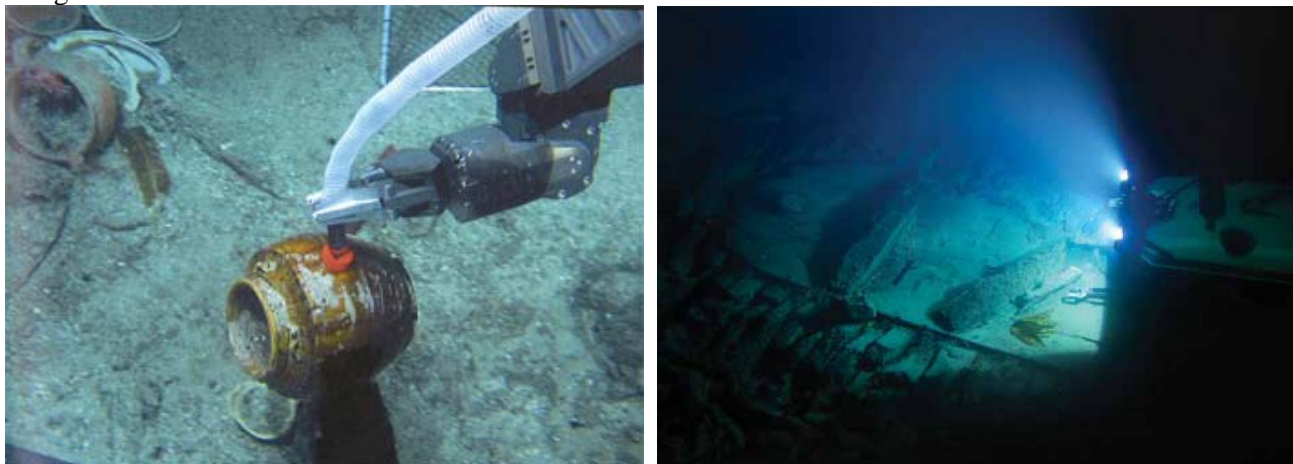
4.1.1 Karakteristikk av funn

Eldre skipsvrak vil naturleg nok bestå av treverk frå skrog og rigg. Av metall er jern (jernanker, beslag m.m.), koppar, messing og bly mest aktuelle, mens meir verdifulle metall som gull og sølv kan finnast bevart i mindre omfang. Alle desse metalla er ganske resistente mot korrosjon frå sjøvatnet, med unntak av jern. Karbonisert jern kan imidlertid bestå i hundrevis av år.

I lasta vil ein kunne finne restar av alle material og varer som fantes i den aktuelle tidsepoken. Forutan bestandig metall kan ein kanskje finne glas- og porselensrestar, kritt Piper og murstein som kan vere bra bestandig mot sjøvatn med normal pH. Organisk stoff som seglrestar, tauverk, kle må ein rekne med er borte om det ikkje har blitt begravd tett under anna materiale.

Andre gjenstandar som flyvrak o.l. vil bestå for det meste av metall, typisk aluminium som kan vere bestandig mot korrosjon avhengig av legeringa.

Nyare farty som fell innafør kulturminnedefinisjonen (eldre enn 100 år) vil i mange tilfelle vere av stål av varierende kvalitet. Stålet vil også kunne bestå i eit par hundre år. Etter kvart som tida går vil også meir moderne farty som har forlist, falle innafør definisjonen kulturminne. I framtida vil alle moderne material vere representert på ein funnstad. Nokre av desse materiala vil vere tilnærma ”evigvarande”.



Figur 26. Fotografi frå 170 m djup på vrakfunnet i Romsdal som vart gjort i 2003. Figurar frå Norsk Hydro og FFU Nytt nr. 4, 2005.

4.1.2 Effekt av forsuringa

Prognosene for havforsuringa fram til år 2025 er av storleiksorden 0.2 – 0.3 reduksjon i pH i havoverflata (sjå kapittel 2). I djupvatnet og ved botnen der funna ligg, vil forsuringa normalt kome seinare p.g.a. den vertikale vassutskiftinga som tek tid. I dei nordiske hava foregår imidlertid vertikalomrøringa effektivt slik at signal frå overflata når djupvatnet innan kort tid, d.v.s. innan nokre få år. Det som då kan bli endra av miljøvilkår rundt eit funn er redusert pH, mindre karbonat i sjøvatnet, meir totalt uorganisk CO₂ og litt meir CO₂ i gassform.

Dei kjemiske endringane vil vere små innafør dette tidsrommet, men tendensen vil bety auka korrosjon på metalla og auka grad av oppløysing av kalkhaldige gjenstandar og organismer som kan ha festa seg på gjenstandar og dermed verke forseglende. Dette er dels ein effekt av redusert pH og dels av stort hydrostatisk trykk. Kritt Piper og muligens noko porselen og steinty vil såleis kunne få raskare nedbryting på grunn av forsuringa.

Auken i CO₂ i sjøvatn medfører at karbonatovermetninga i sjøen gradvis blir redusert slik at kalkbyggjande organsimer ikkje lenger kan vekse. Deira vernande effekt kan dermed bli redusert.

Vrak som har lege ei tid, vil bli begravd under sedimentert materiale. Dette vil verke forseglende, særleg viss det oppstår oksygenvinn slik at vanleg korrorsjon blir redusert. I desse sedimenta foregår det naturleg remineralisering av organisk karbon og utvikling av CO₂ som igjen medfører redusert pH. Vrakrestar i djuphavet kan m.a.o. alltid ha vore eksponert for ein viss pH reduksjon, i alle fall tildekte deler av vraket og over visse perioder etter at det har blitt fraksjonert og begravd.

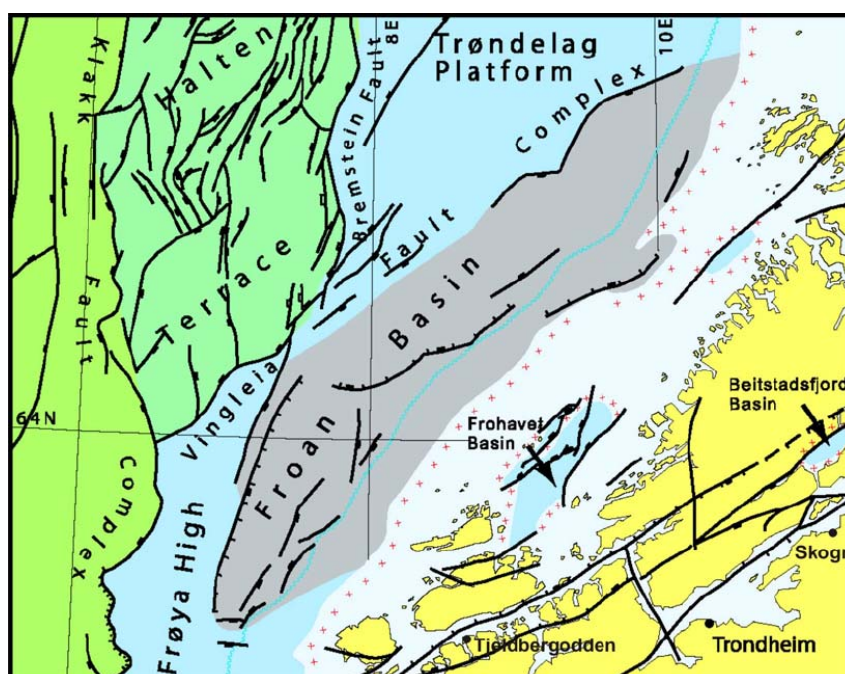
Det kan skje endringar i faunaen på og i sedimenta som følgje av forsuringa. Normal bioturbasjon, graving o.l. som kan påverke vrakrestar kan dermed også medføre endring i eksponering og levetid for gjenstandane. Dyr som angrip treverk, vil kunne få endra vilkår som følgje av forsuringa. Dei vrakdelane, særleg metall, som måtte stikke opp frå sedimenta, vil kunne forventast å få ein viss auke i korrosjon og nedbryting, aukande med tid etter kvart som pH signalet forplantar seg nedover i sjøen.

5. Lekkasje frå CO₂ lagra under havbotnen

CO₂ kan injiserast og lagrast i ferdig produserte olje- eller gassreservoar, eller i andre geologiske formasjonar under havet eller på land. Dette er eit klimatiltak som blir vurdert av offshore industrien og også for fleire terminalar og gasskraftverk på land. Petroleumsvirksomheita står for 29 % av dei norske CO₂ utsleppa, og desse aukar i takt med aukande energiforbruket på sokkelen (OED 2007). Tiltak med CO₂ fangst og lagring i denne sektoren kan bidra til store kutt. Norskehavet er aktuelt lagringsområde for planlagte tiltak på land i midt-Norge. StatoilHydro annonserte i byrjinga av 2008 at dei vil intensivere leiting etter olje/gass ressursar i Norskehavet. Dette kan på sikt også innebere nye prosjekt for lagring av CO₂.

Både OSPAR-konvensjonen og Londonkonvensjonen har i prinsippet opna for å tillate lagring av CO₂ under havbotnen. Begge arbeider med å lage regelverk for slik lagring. Utanom deltaking i nokre kommittear har norske styresmakter hittil gjort lite for å sikre at lagring av CO₂ vil skje på ein forsvarleg måte. NFR styrer sin FoU aktivitet om CO₂ fangst og lagring gjennom Gassnova og CLIMIT programmet der fokus ligg på fangst/reinsing av CO₂. Fleire institusjonar som IRIS, NIVA og SINTEF er imidlertid med i internasjonalt finansierte prosjekt som arbeider for å finne gode metoder for å sikre trygg lagring.

Sidan 1996 har det årleg blitt lagra ein million tonn CO₂ i Utsiraformasjonen i samband med prosessering av gassen frå Sleipnerfeltet i Nordsjøen. Dette er eit pilotprosjekt i regi av Statoil som har fått mykje merksemd på grunn av tidleg oppstart og injeksjon av relativt store mengder CO₂ (Golmen 2005). Også på Snøhvit feltet i Barentshavet er det lagt til rette for reinjeksjon av om lag 700 000 tonn årleg av CO₂ som blir ført i rør frå Melkøya til i ein struktur under det gasshaldige sjiktet på Snøhvit. Begge desse prosjekta gjeld CO₂ som er fjerna frå naturgassen før eksport.



Figur 27. Froanbassenget er aktuell lagringsstad for CO₂. Frå NGU 2004.

5.1 Lagringskapasiteten

På fastlandet i Norge er det ikkje påvist eigna stader for lagring av CO₂ (NGU 2002). Foranhavet som ligg innafor grunnlina, kan ha ein viss kapasitet til lagring (NGU 2004). Ellers har Norge gode høve til å lagre CO₂ utaskjers på grunn av tilgang til store, vassfylte reservoar (akviferar, t.d. Froanbassenget, **Figur 27**) og ferdigproduserte olje- eller gassreservoar. Slik lagring i ferdigproduserte felt kan vere ei god løysing fordi strukturen sannsynlegvis er tett fordi den har halde på gass og olje gjennom millionar av år (OED 2007).

Det kan ligge eit stort teknisk potensial for auka oljeutvinning å norsk sokkel ved hjelp av CO₂-injeksjon (EOR). Regjeringa har diskutert å etablere ei s.k. "verdikjede" for transport og injeksjon av CO₂. Arbeidet med dette blir koordinert av Gassco. For eksisterande punktutsløpp og planlagte gasskraftverk tilnytt region Norskehavet rekna Bellona (2005) at 4.5 – 5 mill tonn CO₂ kan fangast og injiserast i ein verdikjede (EOR) kontekst der. Det er eit potensiale for ennå større mengder og også i sbm auka gassutvinning med CO₂ (EGR).

Gassco, Gassnova, OD og NVE har vurdert alternative transportløysingar og deponeringsstader for norske utsløpp. For Norskehavet er Haltenbanken (**Figur 28**) med Draugen og Heidrun felte aktuelle område. Tidlegare har NGU funne at lagringskapasiteten i akviferar i dette området (Froan bassenget) er på inntil 30 GtCO₂ (NGU 2002). Til samanlikning fann dei at kapasiteten i norsk del av Nordsjøen er 150 GtCO₂. Begge tala indikerer svært stor lagringskapasitet i begge områda (samla norske utsløpp er av storleiksorden 50 mill tonn CO₂ eller 0.05 GtCO₂ pr år).

Det er i løpet av 2007 blitt kjent at ingen av dei planlagte gasskraftverka på Mongstad, Kårstø og Tjeldbergodden vil få klarsignal for lagring offshore i nær framtid. Dette på grunn av kostnadane. Det er imidlertid mogleg at denne konklusjonen ikkje blir ståande. Det ligg også føre søknad om gasskraftverk i Elnesvågen i Møre og Romsdal, førebels utan CO₂ fangst/lagring. Der er imidlertid aktuelle område for lagring 60 km frå land, og det kan vere andre gode lagringsreservoar i Norskehavet relativt nær land, lite er kartlagt hittil.

Halten CO₂ Prosjekt – barrierebrytende industri- og miljøprosjekt



Figur 28. Skisse av prosjektet for injeksjon på Haltenbanken (Draugen) av CO₂ frå gasskraftverket på Tjeldbergodden. (Figur: Statoil/Shell).

FNs Klimapanel har utgitt ein spesialrapport om lagring av CO₂ (IPCC 2005). Den oppsummerer kunnskapsstatus på feltet og gir ei rad tilrådingar m.o.t. val av lagringsstad og prosedyrer for verifisering av prosessen m.m. Rapporten framhevar den store kapasiteten som geologisk lagring kan representere men understrekar samtidig behovet for grundige førehandsanalyser av kvart aktuelt reservoarområde slik at risiko for evt lekkasjar kan verifiserast og minimerast, og evt miljøeffektar p.g.a. dette kan vurderast (gjennom EIA studiar) og reduserast.

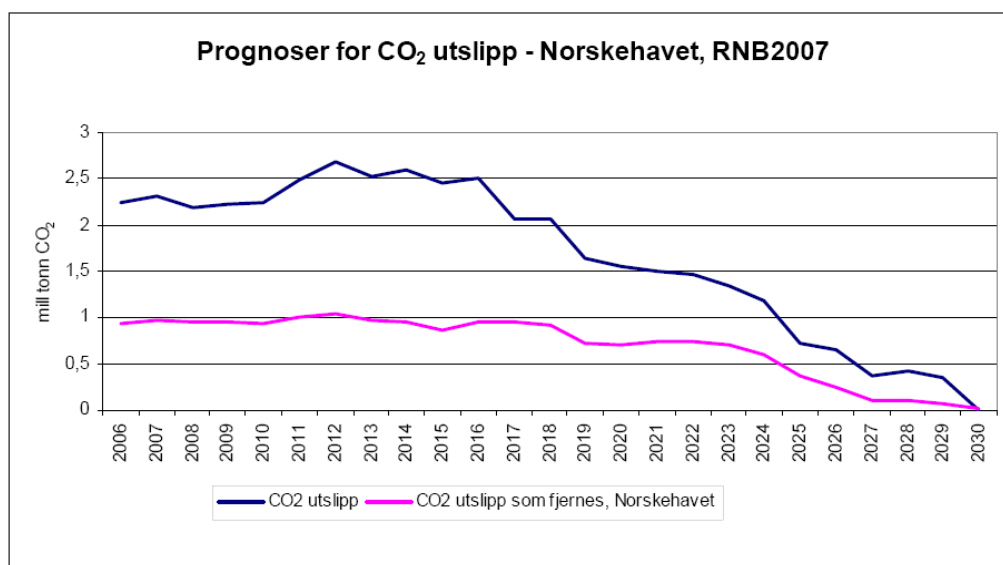
5.2 Aktuelle mengder produsert og lagra CO₂

Eit varmekraftverk basert på kol, olje eller gass slepp ut fleire millionar tonn CO₂ per år. Gass har minst utslepp pr produsert MWh og kolkraft størst utslepp, gamle kraftverk ligg over 1000 kg CO₂/MWh, mens nye ligg på under det halve. Gasskraftverk kan ligge rundt 200-300 kg/MWh, m.a.o. rundt det halve av det for kolkraft. For Norge og Norskehavet er nok CO₂ frå gasskraftverk mest aktuelt å vurdere mengdemessig, i høve til kvantum som må deponerast.

Figur 29 syner prognoser for CO₂ utslepp frå installasjonar i norsk del av Norskehavet. Det er tale om 2.5 - 3 mill. tonn CO₂/år på det meste. Mykje av dette er CO₂ frå gassfyrte turbinar o.l. Eit 150 MW anlegg på ei plattform representerer utslepp/fangst av storleiksorden 700 000 tonn CO₂/år (OD 2008). Deler av utsleppa på sokkelen kan eliminerast ved elektrifisering frå land (forutsatt at den elektrisiteten er CO₂-fri). Kostnadane ved dette er nyleg vurdert av Oljedirektoratet m. fl. (OD 2008), men konkrete lagringsaspekt er ikkje berørt der.

Ved etablering av gassfyrte kraftverk på land i Midt-Norge eller andre stader som soknar til Norskehavet vil mengdene CO₂ bli større enn utsleppa offshore. Ein kan rekne med eit par millionar tonn CO₂ frå eit middels stort kraftverk.

Over 30-50 års drift kan mengdene lagra CO₂ frå eit større gasskraftverk (0.5-1 GW) åleine come opp i fleire hundre millionar tonn. Det er rekna at slike mengder vil motsvare eit horisontalt areal av den geologiske strukturen på over 100 km² (Wilson et al. 2007). Dette illustrerer også arealomfanget på havbotnen for den langtidsovervakninga av reservoaret som kan bli påkrevd.



Figur 29. Prognoser for CO₂ utslepp frå norsk olje/gass offshore aktivitet i Norskehavet. Den lilla kurven viser CO₂ som kan bli eliminert ved elektrifisering av installasjonar. Kjelde: OD 2008.

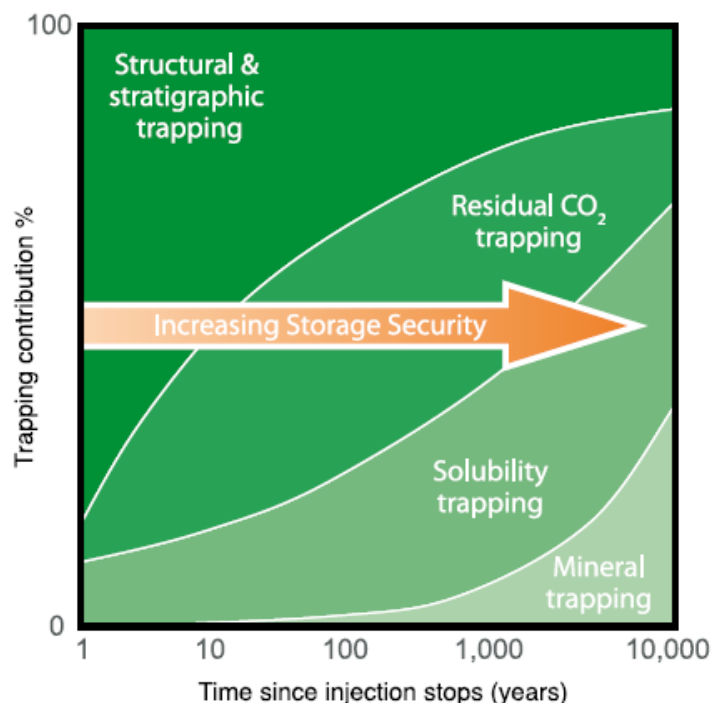
5.3 Lagring og lekkasje

Ein kan anta at den injiserte gassen først vil foreligge i væskeform, d.v.s. egentleg superkritisk p.g.a. stort trykk og høg temperatur. Etter som tida går vil CO₂ blande seg med omjevande væske og/eller diffundere utover i reservoaret. Prosess og rate vil avhenge av karakteristikken til reservoaret. Gassen vil kunne endere til å stige opp i reservoaret p.g.a. oppdrift, inntil den møter faste sjikt over. På lang tidsskala kan CO₂en løyse seg opp i andre eksisterande væsker, og til slutt evt bli mineralisert som karbonat viss vilkåra for dette er til stades (**Figur 30**). Lekkasjerisikoen er dermed sansynlegvis størst i første fase av lagringsprosjektet under injisering/trykkoppbygging og nokre ti-år etter at lagring er stansa. Det vil m.a.o. sei at lekkasje frå reservoaret kan oppstå ganske tidleg i eit prosjekt gjennom uoppdaga sprekksoner i dekkbergartane over reservoaret, eller gjennom brønningar og borehol (avstengde eller aktive).

Gjennom risikoanalyser har industrien og andre vurdert ulike lagringsscenariar og risiko for lekkasje. Erfaringstal er henta frå andre sektorar med gasshandtering/lagring. Kumulativ risiko for lekkasje frå eit geologisk CO₂ reservoar kan vere på 0,3 – 0,4 over 1.000 år, d.v.s. 30-40 % risiko for lekkasje over ei slik tidsperiode. Langsiktige årlige lekkasjerater på 0,1-0,2 % av totalt lagra CO₂ er brukt i europeiske studiar (Golmen 2005).

Om ein for Norskehavet tar utgangspunkt i foreliggende estimat for lagringskapasitet i olje og gassfelt på inntil fleire Gt CO₂, så vil slik lekkasje over tid tilsvare betydelege mengder CO₂, som enten kjem gradvis eller som større ”utbrudd”. Ved lagring og lekkasje i Nordsjøen eller andre stader nær forvaltingsområdet vil CO₂ gass derfrå teoretisk også kunne bli transportert inn i Norskehavet med havstraumane.

Sjøøl om geologisk lagring blir framstilt som både sikker og permanent, er det m.a.o. ikkje ubetydelege mengder CO₂ som over tid i realiteten kan unnslepe til havet over, og evt. eventuelt tilbake til atmosfæren.



Figur 30. Illustrasjon av ulike tilstandar som CO₂ blir lagra og bunde i etter injeksjon i undergrunnsformasjonen. På lang tidsskala kan mykje av gassen bli bunden kjemisk i mineral (mineral trapping). Figur frå IPCC (2005).

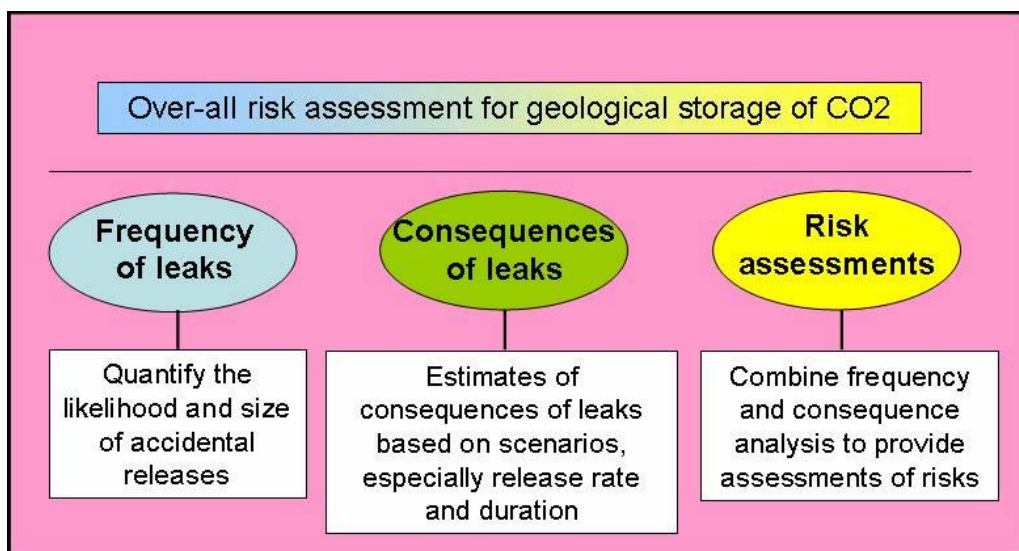
Dette er lite påakta i den norske debatten om CO₂ lagring, men er meir framme i internasjonale fora der det blir arbeidd med å vurdere både risikoaspekta og å få formulert metodikk og protokollar for monitorering og rapportering av lekkasjar. Viss det er slik at deler av CO₂en lek ut, så må det få følgjer for den internasjonale rapporteringa (under Kyoto f. eks.) og dei kredittar etc som er gitt under føresetnad av permanent lagring.

Det kan forventast at lokalitetar for lagring av CO₂ i geologiske strukturar under havbotnen vil bli valt med tanke på å minimalisere potensialet for lekkasjar. Likevel er det mogleg at lekkasjar kan oppstå over tid. Eventuelle lekkasjar vil først og fremst ha potensial til å påverke botndyringsamfunn på og i havbotnen over og nær lagreret og vil truleg difor ha begrensa utstrekning (avsnitt 5.2). Storleiken av redusert pH vil imidlertid kunne vere langt større (kanskje 2 pH einingar i nærområdet til ein lekkasje) enn ved påverknad frå forsuring frå atmosfæren. Det eksisterer relativt lite informasjon om hva slike potensielle utslepp kan bety for marine organismar og prosessar (ROS 2005) dersom lekkasjen når grenseflata mellom botn og hav.

Paradoksalt er mykje av dei publiserte resultata om økologiske effekter av havforsuing og auka pCO₂ i havet knytt til forskning om havlagring av CO₂, ein klimateknologi som norske styresmakter har forhindra/stansa forsøk rundt tidlegare (Giles 2002, Golmen 2002). Det er no eit sterkt behov for både praktiske forsøk og modellar som kan illustrere korleis utslepp frå eit CO₂ lager vil oppføre seg i havet, og kva verknader dette kan ha. Dette gjeld også Norskehavet. Slik forskning vil også vere viktig for å forklare kva som er i ferd med å skje i våre nære havområde på grunn av den pågåande forsuringa.

5.4 Risiko og effekt

Den totale miljørisikoen ved lekkasjar vi vere eit produkt av risikoen for lekkasje og verknadane av slik lekkasje (**Figur 31**). Vi vurderer ikkje risikoen vidare her, berre slår fast at det er generell konsensus i fagmiljøa om at det vil vere ein viss risiko for lekkasje frå geologiske lager av CO₂. For meir detaljar syner vi til andre rapportar om CO₂ lagring, t.d. IPCC sin spesialrapport om temaet (IPCC 2005).



Figur 31. Risikovurdering for gasslekkasje frå undergrunns deponi bygg på ei rad føresetnader. Frå Golmen (2005).

Dersom CO₂ lek frå eit framtidig deponi under havbotnen så vil både havbotnen (sedimenta) med dyrelivet der, og havvatnet over med fisk etc kunne bli påverka, liknande det som kan skje under det første scenariet vi vurderer, havforsuringa.

Det er imidlertid sannsynleg at gassen, som sannsynlegvis vil vere løyst i reservoavæske delvis i alle fall, vil trekke med seg spor av andre stoff slik som tungmetall og ymse mineral som har blitt løyst opp av CO₂ og den forsura reservoarvæska. Dermed kan spekteret av skadeverknader på lokal fauna bli større enn dersom kun CO₂ og pH påverka lokalmiljøet.

Er lekkasjen liten og lokaliteten ligg gunstig til, vil botnstraumen kunne tynne ut gassen slik at den raskt når bakgrunnsverdi, og influensområdet blir avgrensa. Ved større lekkasjar kan imidlertid konsentrasjonen av CO₂ bli langt høgare (og pH lagt lågare) enn i det omgjevande sjøvatnet, slik at verknadane på faunaen kan bli meir akutt.

Det finst mikroorganismar (s.k. ekstremofile organismer) som lever under høgt trykk og høg temperatur fleire hundre meter ned i havbotnen, både i salte akviferar, i olje/gss reservoar og i sediment, Den ekstraordnære metabolismen som desse organismene representerer, er svært låg. Dei er lite utforska og det kan vere vanskeleg å måle verknadar av av evt. CO₂-lekkasje på kort sikt. Dersom mengdene av desse organismene er så store som det blir hevda (større biomasse enn det som finst av liv ellers på jorda) så er dei neppe å betrakte som spesielt truga eller sårbare, men dette gjenstår å få dokumentert.

Geologisk lagring er uansett vurdert å vere ein sikker metode med lang tidshorisont. Miljøeffekten ved å ta i bruk denne og liknande lagringsmetoder på stor skala kan bli betydeleg og kan bidra til å oppretthalde akseptabelt naturmiljø inn mot ei framtid der bruk av andre/fornybare energikjelder dominerer. CO₂ lagring er m.a.o. rekna å vere ein mellombels overgangsteknologi til eit meir eller mindre karbonfritt samfunn. Lagera vil imidlertid bestå evindeleg, viss dei held tett.

Lagring av CO₂ vil bidra til å redusere forsuringa av havet. Det er likevel ugunstig viss eit lager under havbotnen skulle byrje å leke CO₂ til havet. For det første vil gassen kunne nå amosfæren slik at noko 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 utslepp for øvrig er under kontroll og CO₂ konsentrasjonen i atmosfæren er på veg ned. Slik lekkasje vil då i første rekke kunne bli eit lokalt miljøproblem.

6. Framtidsbilete 2025

På grunn av kompleksiteten i biologiske system er det vanskeleg å gje omfattande og pålitelege prognoser for stor-skala og lang-tids endringar av biologiske responsar på globale miljøendringar slik som havforsuringa. Endringar lenger fram i tid enn 2025 kan imidlertid bli svært alvorlege i følge både prognoser og litteratur, og forskings-innsatsen og overvakinga framover bør ha dette som bakgrunn.

Basert på foregåande gjennomgang av kunnskapsstatus for h.h.v. forsuringa og aktuelle effektar på organismer m.m. har vi nedanfor freista illustrere nokre framtidsbilete for ulike organismegrupper-/tema. Ein del av dette blir spekulativt sidan kunnskapen er mangefull, og dei spådde endringane i forsuringa fram til 2025, som berre ligg 16-17 år fram i tid, er moderate.

6.1 Planteplankton

Med eit tidsperspektiv på 17 år for framtidsbiletet kan ein truleg ikkje forvente store biologiske endringar som fylgje av forsuring av Norskehavet. Små endringar i primærproduksjon og auka aktivitet på den biologiske pumpa kan kanskje forventast, men den største endringa i primærproduksjonen vil sannsynlegvis skuldast auka sjøtemperatur og endra nordgrense for mange artar, som er tema for andre delutgreiingar. Problemstillingar rundt endringar for planteplankton som følgje av forsuringa vil uansett i tiår framover vere ei stor utfordring for marin forskning (Riebesell 2004).

6.2 Makroalgar

Innafor forvaltningsområde Norskehavet er det ikkje gjort forsøk med effektar av forsuring på makroalgar, og det er fram til no ikkje registrert endringar i makroalgevegetasjonen som ein eksplisitt har tilskreve forsuringa av havet. Den algegruppa som mest sannsynleg vil oppleve effekten av forsuringa først, er kalkalgane der celleveggen er inkrustert med kalk. Redusert pH vil redusere konsentrasjonen av karbonat – noko som vil redusere kalsifiseringshastigheita hos denne algegruppa. Forsøk frå andre område har ellers konkludert med auka vekst hos makroalgar ved auka CO₂ mengde. Dersom ein samtidig får ein reduksjon i mengden kråkeballar som følgje av forsuringa kan dette føre til ei gjenvekst av tareskogen nord for Trøndelag.

Lite tyder imidlertid på at det innan 2025 vil skje store endringar i makroalgevegetasjonen på grunn av forsuringa. Eit slikt scenario er mogleg men vil sannsynlegvis ligge noko lenger fram i tid. Forsuringa av havet vil også vere knytt til samtidig temperaturauke, endra næringssaltforhold, sannsynlegvis introduksjon av nye artar på grunn av endra veksttilhøve osv. Fleire samtidige endringar gjer det vanskeleg å forutsei korleis endringane i pH spesifikt vil påverke makroalgesamfunna.

6.3 Zooplankton

Det er ytterst få granskningar som direkte omhandlar pH-effektar på artar som finst i Norskehavet. Det er også gjort svært lite studiar med CO₂ konsentrasjonar og pH-nivå som er relevante for det noverande framtidsscenariet. Framtidsscenaria inneber vidare ei varig eksponering for auka CO₂, og ingen langtidss forsøk i ordets rette forstand er gjennomført, verken på letale eller sub-letale effektar. Den litteraturen som ligg føre per i dag indikerer ikkje at ein pH reduksjon motsvarende den som er forventa fram til 2025 (pH rundt 8) vil gi letale effektar på vaksne individ av zooplankton, verken akutte eller over litt lenger tid (veker). Sjølv om unge stadiar har vist seg langt meir sensitive enn vaksne, har vi heller ikkje funne døme på letale effektar hos unge stadiar av zooplankton på pH omkring 8. Hjø kopepodar er det også påvist sub-letale effektar av auka CO₂, mellom anna ulike aspekt av reproduksjon slik som eggproduksjon og klekkesuksess, men desse studiane var også gjort

ved mykje lågare pH. Manglande forsøk med langtidseksponering uttgjer som nemnt eit vesentleg kunnskapshol på dette området.

Sjølv om ein kjende toleransegrensene for dei enkelte artar ville det, grunna kompleksiteten i biologiske system vere svært vanskeleg å gje eit omfattande og påliteleg varsel for stor-skala og lang-tids endringar på økosystemet grunna forsuring. Zooplankton har imidlertid ei nøkkelrolle i økosystemet i Norskehavet fordi dei er bindeledd mellom primærprodusentar og høgare trofiske nivå som fisk, sjøpattedyr og sjøfugl. Kun små endringar til dømes i reproduksjonssuksess eller overleving hos viktige zooplanktonartar kan dermed tenkjast å føre til endringar i strukturen på det pelagiske økosystemet. For scenarior som inkluderer både auka temperatur og redusert pH, antyder modellar til dømes auke i geleplankton (manetar) på bekostning av krepsdyr i Nordsjøen (Attrill et al. 2007). Dominerande zooplanktonartar er difor gode kandidatar for studiar av effektar av forsuring, og også kandidatar for overvakning.

6.4 Korallar

Ettersom vi ikkje har oversyn over tilstanden til kaldtvasskorallane før den industrielle revolusjonen, er det vanskelig å sei kva som har skjedd dei siste hundre åra. Men ut frå dei innleiande vurderingane av effektar som fleire har skissert, er det rimeleg å anta at ein reduksjon eller svekking av kaldtvasskorallar i Norskehavet alt har byrja.

Negative effektar vil først kome til syne på rev som i dag ligg nær nedre grensa for mogleg djupneutbreiing. Ei djupneheving av grensa for mettingsnivå for aragonitt og kalsitt har allereie skjedd som følgje av forsuringa. Konsekvensane av det vil først bli synleg i Sørishavet, men heller ikkje i Norskehavet vil ein kunne unngå å merke svekking av korallar på djupt vatn. Det finst fleire publikasjonar som tyder på at overflatevatnet i polhava vil bli undermetta m.o.t. aragonitt i løpet av dei neste 40-50 åra (Orr et al. 2005, 2006, Guinotte et al. 2006). Dette vil få betydelege konsekvensar på sikt også for norske farvatn, med sannynleg effekt på korallane innan 2025.

Fleire enn 95% av dei 410 kjente lokalitetane av djupvasskorallar (i 2006) ligg grunnare enn ASH (aragonitt mettingsdjup) dvs. der aragonitt er i overmetting. Guinotte et al. (2006) har estimert ved modellar at i 2099 vil 70% av desse ligge djupare enn ASH – altså aragonitt vil vere i undermetting i sjøvatnet og organismar vil sakte løysast opp, med dramatiske konsekvensar for korallane.

6.5 Botndyr

Det er gjort lite forskning som er direkte relevant for å forutsei moglege effektar på botndyrsamfunn i Norskehavet forårsaka av forsuring frå auka atmosfærisk CO₂. Granskingar som er gjort, tyder ikkje på at ein pH reduksjon motsvarande den som er forventa fram mot år 2025 vil gje direkte akutte effektar på botndyrsamfunn på djupt vatn.

Granskingar av meroplankton (larvar av botndyr) tyder imidlertid på at unge stadiar kan vere langt meir følsame enn vaksne botndyr. Forventa forsuring i Norskehavet forårsaka av atmosfærisk CO₂ fram mot år 2025 vil difor likevel kunne føre til visse endringar i struktur og diversitet i botndyrsamfunn og potensielt kunne gje økonomiske konsekvensar dersom haustbare artar blir berørt. Adapasjon til redusert pH vil imidlertid kanskje kunne vere ein modererande faktor. Som for andre grupper er det scenaria lenger fram i tid som gjev mest grunn til otte.

6.6 Fisk

Ottersen og Auran (2007) ga oversyn over fiskebestandar, vandringsmønster, bestandsstorleik og bestandane sin plass i økosystemet i Norskehavet. Delrapport "Fiskeriaktiviteten i Norskehavet" (Anon 2007) gir oversikt over fiskeriaktiviteten på desse bestandane.

Dei store bestandane av krill, raudåte og mesopelagisk fisk i Norskehavet dannar grunnlag for dei store pelagiske fiskebestandane, sild, kolmule og makrell som beitar i dei opne delane av Norskehavet. Bestanden av Norsk Vårgytande sild er no på ca 10 mill tonn. Som nemnt så beiter silda ute i Norskehavet og kjem inn til kysten for å gyte i den nordgåande Atlanterhavsstraumen. Den legg igjen gyteprodukt på frå 500 000 til 2 mill tonn på botnen på Møre spesielt (**Tabell 4**). Desse enorme mengdene biomasse er med på å legge grunnlag for mange ulike fiskeartar langs norskekysten og i Barentshavet.

Sameleis beitar kolmule i Norskehavet. Den har hovudgytefelt vest om Irland og dei Britiske øyane. Gytinga skjer i Den Nordlege Atlanterhavsstraumen som fører egg og larvar inn i Norskehavet, til norskekysten og Barentshavet. Fisket av desse to artane har til saman utgjort 1-3 mill tonn årleg dei siste åra. Det er tilsvarar rundt 2% av total fangst av fisk i verda pr år. I tillegg har dei som nemnt stor betydning for andre fiskeslag og fiskeri i Nordaustatlanteren frå Irland til Barentshavet, ved Færøyane og Island.

Grunnlaget for desse store prosessane finn vi i dei store planktoniske ressursane i Norskehavet. Endringar i utbreiing og overleving av desse kan ha alvorlige konsekvensar både for viktige artar som sild og kolmule, men også for mange av dei andre viktige fiskeartane i Norskehavet og Barentshavet som dreg nytte av sild og kolmule.

Ikkje for fisk heller ligg det føre resultat som er direkte relevante for å forutsei moglege effektar i Norskehavet forårsaka av forsuring frå auka CO₂-innhald i sjøvatnet. Fisk er truleg mindre sensitiv enn evertebratar, og det er ingen studiar som viser at pH reduksjonen tilsvarande den som er forventa fram til 2025 (pH rundt 8) vil gi letale effektar på nokre livsstadium, verken akutt eller ved lenger tids eksponering. Sub-letale effektar som til dømes redusert vekst er kun påvist ved betydeleg lågare pH. Spermceller i ferskvatn har vist redusert mobilitet ved pH på det nivå som ligg innafor vårt framtidsbilete, men samanlikning med ferskvatn kan vere mindre relevant.

Sidan byttedyra til viktige fiskeartar i Norskehavet er meir sensitive enn fisken sjølv, vil truleg eventuelle effektar på fisk først vere indirekte i form av endringar i fødetilgong. Som nemnt ovanfor, ventar vi imidlertid ikkje å sjå effektar på zooplankton ved det aktuelle pH-nivået.

Tabell 4. Oversikt over bestand fangst og mengde og gyteprodukt for sild og kolmule i Norskehavet.

Art	Bestand (tonn)	Fangst (tonn), Gj snitt siste 5 år	Gyteprodukt (tonn)
NVG Sild	Ca 10 mill	1 mill	1 - 2 mill
Kolmule	ca 7 mill	1.5 mill	1- 1.5 mill
Total	Ca 17 mill	2.5 mill	1-3.5 mill

6.7 Sjøfugl

Med utgangspunkt i eksisterande viten om effektar og prognosene for omfang av forsuringa i havet, er det neppe sannsynleg at denne vil få store konsekvensar for sjøfugl i perioden fram til 2025. Den aktuelle forsuringa vil neppe medføre fysiologisk påverknad på sjøfugl. Ein potensiell indirekte effekt vil kunne oppstå gjennom endring i tilgong på mat. Sjøfugl har imidlertid generelt stor mobilitet og dei fleste artane utnyttar fleire ulike næringssemne. Dei vil difor til ein viss grad kunne tilpasse sitt næringsøk i høve til mindre omfattande endringar i tilgong og utbreiing av byttedyr som måtte kome.

6.8 Sjøpattedyr

Forsuringa innan år 2025 vil neppe innebere noko form for fysiologisk stress hos sjøpattedyra. Grønlandskvalen er ein fåtallig og truga art og har ein diett som er dominert av copepodar. Det er sannsynlig at denne kvalarten er den som først kan oppleve næringsmessig effekt av forsuring.

Spermkvalen som i hovudsak fangar byttedyr på djupt vatn, vil ikkje vere like utsett. Forsuring som måtte vere forårsaka av lekkasjar av CO₂ på havbotnen vil ha ingen eller ubetydelege effektar når det gjeld pattedyr. I store trekk antek vi at indirekte effektar knytt til redusert næringstilgang for sjøpattedyr også vil vere minimale innan år 2025.

6.9 Kulturminne

Endringane i miljøvilkår grunna havforsuringa vil kunne føre til auka korrosjon og nedbryting av marine kulturminne. Dei aktuelle prognosene for havforsuringa fram mot år 2025 tilseier imidlertid ingen dramatiske endringar for eksistensen til marine kulturminne på havbotnen fram til då. Forsuringa vil sannsynlegvis kome seinare i djupvatnet og ved botnen der funna ligg, enn på grunt vatn.

6.10 Lagring av CO₂

I år 2025 er det sannsynlegvis etablert lager for CO₂ under havbotnen i Norskehavet, og deponering pågår på eitt eller fleire felt. Det vil sannsynlegvis også pågå storskala deponering i Nordsjøen, inkludert Johansen feltet vest av Sognefjorden og andre felt som ligg nær grensa til Norskehavet.

Vi må kunne anta at deponeringa er følgt opp med grundig monitorering av den tekniske prosessen, av havbotnen og av det geologiske reservoaret. Slik monitorering vil truleg bli eit krav frå styresmaktene, og vi må forutsette at metodikken er litt tilstrekkeleg utvikla innan den tid til å kunne avdekke også mindre lekkasjar. Dette fordrar eit langt større fokus på forskning omkring lagring enn det som er i dag, som for det meste er retta mot fangst av CO₂.

Det er lite sannsynleg at det så kort etter oppstart har oppstått synlege eller målbare lekkasjar som påverkar biosfæren. Skulle det skje, vil ein kunne avbryte deponeringa, redusere trykket i reservoaret og dermed sannsynlegvis få stansa lekkasjen.

Som første framtidssbilde for år 2025 vil vi ta som utgangspunkt at eventuelle lager av CO₂ under havbotnen er tette, og at det ikkje lek CO₂. Dette er det mest sannsynlege scenariet. Vi forutset at selskapa og styresakene har sett i verk den naudsynte overvakinga som skal til for å dokumentere at dette held stikk.

Mindre sannsynlege scenarier for 2025 vil innebere lekkasje over ei viss tid, inntil denne har blitt stansa. Her vil ein kunne sjå for seg miljøeffektar rundt eit utsleppspunkt, som kan vere relativt omfattande, men geografisk avgrensa.

Lagring i Nordsjøen vil også kunne innebere lekkasje. Dersom det skjer, kan det tenkast at deler av denne CO₂ gassen med assosierte komponentar frå reservoaret kan bli transportert inn i Norskehavet med havstraumane.

7. Konklusjonar, oppfølging

Gjennomgangen av eksisterande kunnskap og litteratur på området så langt vi har nådd å finne og lese, teiknar eit ganske alvorleg framtidsbilete når det gjeld havforsuringa. Verknadar fram mot år 2025 vil truleg vere av avgrensa omfang og kan bli skjult i den totale variabiliteten som økosystema naturleg gjennomfører, eller som vil bli forårsaka av direkte klimaendringar. Nokre nøkkelartar vil imidlertid kunne framvise konkrete forsuringseffektar alt då. Lenger fram gjennom hundreåret kan det forventast at konkrete effektar art for art vil oppstå. Storskala endringar i primærproduksjon og for zooplankton vil endre fødetilgangen til andre artar, inkludert fisk.

Denne utviklinga er i praksis umogleg 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 gjer seg gjeldande nede i havet. Tiltak med kalking som vi kjenner frå forsuring av ferskvatn, vil ikkje monne i havet. På sikt kan auka erosjon og avrenning frå land avhjelpe situasjonen noko. I mellomtida kan vi håpe på at andre (ukjende) modererande miljøfaktorar kan bli aktivert og motverke eller redusere dei framskrevne endringane i havforsuringa.

7.1 Forslag til oppfølging

Oppfølging vil måtte inkludere både eksperimentelle forsøk og modellering av forsuringseffektar. Det eksisterer modellar som i utgangspunktet kan vere gode nok for å gje prognoser for sjølve forsuringa, mens økosystemmodellar må utvidast/omarbeidast for å ta inn nye prosessar og komponentar etter kvart som ny eksperimentell kunnskap blir erverva.

Det er gjort få CO₂-relaterte forsurningsforsøk med direkte relevans for forvaltingsområde Norskehavet. Det kan nemnast at eit planlagt in-situ forsøk med CO₂ eksponering på Storegga vart stansa i 2002 av dåverande miljøvernminister Børge Brände (Giles 2002, Golmen 2002). Grunngevinga var at effektane av CO₂ var ukjende. Det må forventast at slike uventa avbrot i så viktig forskning ikkje skjer igjen, vilkåra må vere både langsiktige og føreseielege.

7.1.1 Eksperiment-fasilitetar

Det trengs fleire eksperiment for å undersøke korleis effektane av dei endringane som har kome fram i mesokosmosstudiar av pelagiske økosystem vil påverke dei bentiske økosystema. Dette kan utførast ved bruk av store flytande mesokosmos eller ved tilsikta ekstra forsuring av fjordar eller deler av åpent hav. Svært få forsøk er gjort med omsyn til effekten av auka CO₂ mengde i sjøvatnet på dei makroalge-artane som dominerer i forvaltingsområde Norskehavet. Ein treng kunnskap om forsuringseffektar både på enkeltartar og på samfunnsnivå, og korleis ei auke i CO₂ mengda verkar når også andre parametar vert endra (t.d. auka temperatur, endra næringsstofftilgang osv.).

Ved Universitetet i Bergen er det nyleg gjort vellykka økosystemforsøk med plankton (Riebesel et al. 2007) med stor relevans for problemstillinga. Slike forsøk bør repeterast med nye/endra vilkår. I 2005 gjennomførte NIVA med fleire CO₂-forsøk på ca 400 m djup i Storfjorden på Sunnmøre (Ishida et al. 2006, Berge et al 2007) med eit bentisk sjølvstyrt kammer. Storfjorden har open kommunikasjon med Norskehavet og kan tene som eit "referanselaboratorium" der forsurningsforsøk ned til over 600 m djup kan gjennomførast kontrollert.

Ved NTNU finst det ein trykktank som er eigna for eksponeringsforsøk for CO₂ ved høgt trykk, og ved NIVAs forsøksstasjon Solbergstrand har ein lang og god erfaring med forsurningsforsøk. Oppdrettsnæringa sit på betydeleg kompetanse når det gjeld vasskvalitet, CO₂ m.m. i høve til ulike oppdrettsartar. Denne næringa bør trekkast inn i framtidig forskning om havforsuring.

Forskning omkring lagring av CO₂ under havbotnen i norske havområde vil også kunne kome til å omfatte økologiske forsøk på grunn av lekkasjerisikoen. Slik forskning vil ha direkte relevans for dei generelle forsuringsspørsmåla og det bør etablerast opne kommunikasjonsliner mellom dei ulike miljøa som arbeider med dette.

7.1.2 Overvaking, modellering

Det er behov for både overvaking og modellering av Norskehavet for å få ei betre forståing av opptaket og endringar i kapasiteten til å halde på antropogent CO₂. Modellerings-resultat (Bellerby et al., 2005) indikerer at regionen kan gå over til å bli ei kjelde for antropogent karbon til atmosfæren mot slutten av dette hundreåret og det er difor viktig også av den grunn å få kunnskap om hastigheita på endringane i karbonatsystemet.

HI si omfattande økosystemovervaking i Norskehavet er eit godt utgangspunkt for å inkludere tilleggsparemetrar som går på forsuringproblematikken. Nokre nøkkelartar/grupper bør bli gjenstand for ennå meir inngåande studiar, vi nemner her nokre slike.

Korallsystem

Havet som omgir kaldtvasskorallane på den nordre norske kontinentalsokkelen, kan bli undermetta med omsyn på aragonitt ved slutten av dette hundreåret og vil kunne kome ned mot eit dødeleg nivå for korallane i perioden 2050-2070 (Bellerby pers. med.). Langtidsovervåking og studiar av endringar er naudsynt for å forstå effektane av auka CO₂ på fleire marine kalkdannede artar. Her kan lettare tilgjengelege korallrev innaskjers som ligg eksponert til for Norskehavsvatn fungere som overvåkings-lokalitetar, t.d. rev i Breisundet på Møre.

Pelagiske økosystem og makroalgar

Det er viktig med fleire undersøkingar av ulike marine økosystem i nordlege havområde og i Arktis. Forskningsprosjekt med støtte frå EU (EPOCA) og NFR (MERCLIM) vil dei neste fire åra studere responsen til eit arktisk økosystem på endringar i CO₂ nivået, og kan gje viktige kunnskapsbidrag.

For å kunne registrere dei endringane som mest sannsynleg vil kome av forsuringa, er det nødvendig å etablere faste overvåkingsstasjonar for makroalgar, botnfauna m.m. fleire stader i forvaltningsområdet. Stasjonane bør velgast ut og etablerast snarast for å etablere tidsseriar og datasett som gjev grunnlag for å vurdere kva som er naturlege variasjonar og kva som er effekt av forsuring og anna klimarelatert endring.

7.2 Informasjonsformidling, internasjonalt samarbeid

Forsuringsspørsmåla er såpass alvorlege og djuptgripande at det bør satsast på løpande formidling i Norge om kunnskap og internasjonal/nasjonal forskning på området. Dette bør vere mynta på både alminneleg publikum gjennom utstillingar, avisartiklar o.l. og på næringsorganisasjonar og politiske miljø.

Internasjonalt samarbeid og arbeidsdeling er viktig for å unngå duplisering av forsøk og modellstudiar og for å fokusere forskingsinnsatsen mot dei viktigaste og mest følsame artane og regionane. Det er rimeleg å anta at Norskehavet og tilstøytande område (Polhavet) her vil få særskilt fokus i tida framover og at mange grupper vil utføre forskning her. Det er viktig at informasjon om slik internasjonal forskning blir gjort kjent hos norske miljø slik at Norge kan knyte seg til og dra umiddelbar nytte av resultatane.

8. Litteratur

Adams E, J. Caulfield, H. Herzog og D. Auerbach 1997: Impacts of reduced pH from ocean CO₂ disposal: Sensitivity of zooplankton mortality to model parameters. *WASTE MANAGE* 17:375-380.

AGU 2005: The Ocean in a High-CO₂ world. *Journal of Geophysical Res.*, Special Section. Konferanserapport med proceedings, AGU, USA. (<http://www.agu.org/journals/ss/HIGHCO2/>)

Andersson A., J. Mackenzie og A. Lerman 2005: Coastal ocean and carbonate systems in the high CO₂ world of the anthropocene. *American Journal of Science*. 305: 875-918.

Angel, M.V. 1989: Does mesopelagic biology affect the vertical flux? Pp. 155-173 in: Berger, W.H., V.S. Smetacek & G. Wefer (eds.). *Productivity of the ocean: Present and past*. John Wiley & Sons Limited.

Anker-Nilssen, T. og S.-H. Lorentsen 2004: Seabirds in the Norwegian Sea. – I: Skjoldal, H.R., Sætre, R., Færnø, A., Misund, O.A. & Røttingen, I. (red.). *The Norwegian Sea Ecosystem*. Tapir Academic Press, Trondheim, s 435-446.

Anon (2007): Fiskeriaktiviteten i Norskehavet. Delrapport til det felles faktagrunnlaget for Forvaltningsplan Norskehavet. Rapp. Fiskeridirektoratet, 49s.

Arrigo, K.R. 2007 : Carbon cycle. *Marine manipulations*. *Nature* 450, 491-492.

Attrill M, J. Wright og M. Edwards 2007 Climate-related increases in jellyfish frequency suggest a more gelatinous future for the North Sea. *LIMNOL OCEANOGR* 52:480-485.

Auerbach D, J. Caulfield E. Adams E og H.. Herzog 1997: Impacts of ocean CO₂ disposal on marine life: I. A toxicological assessment integrating constant-concentration laboratory assay data with variable-concentration field exposure. *Environ Monit Assess* 2:333-343.

Bamber, R. 1990: The effects of an acidic seawater on 3 species of lamellibranch molluscs. *J EXP MAR BIOL ECOL* 143:181-191.

Barker, S., J. A. Higgins og H. Elderfield 2003: The future of the carbon cycle: review, calcification response, ballast and feedback on atmospheric CO₂. *Philos. Trans. R. Soc. Land. Ser. A*. 361, 1977-1999.

Barnes. R., 1974: *Invertebrate zoology*. W.B. Saunders Company. 870s.

Barrett, R. T., S.-H. Lorentsen og T. Anker-Nilssen 2006: The status of breeding seabirds in mainland Norway. *Atlantic Seabirds* 8: 97-126.

Beer, S., M. Björk, F. Hellblom, og L. Axelsson 2002: Inorganic carbon utilization in marine angiosperms (seagrasses). *Functional Plant Biology* 29, 237-250.

Bencic, D: J. Cloud, og R. Ingermann 2000: Carbon dioxide reversibly inhibits sperm motility and fertilizing ability in steelhead (*Oncorhynchus mykiss*). *FISH PHYSIOL BIOCHEM* 23:275-281

- Berge, J.A., H. Ishida, J. West, K. Sjøstad, M. Krüger, P. Coombs, T. Fukuhara, L. Golmen, N.R. Hareide, M. Magi, J. Pearce, A. Stene, Y. Watanabe og J. Kita 2007; The Benthic Chamber experiment in Storfjorden (Norway) 2005 – effects of CO₂ on microbes, nanobenthos and meiofauna. NIVA rapport 5305, 75s.
- Berge, J.A., B. Bjerkeng, O. Pettersen, M.T. Schaanning og S. Oxnevad 2006: Effects of increased sea water concentrations of CO₂ on growth of the bivalve *Mytilus edulis* L. *Chemosphere*, **62**(4), 681-687.
- Bellerby, G.J., A. Olsen, T. Furevik og L.G. Andersson 2005: Response of the surface ocean CO₂ system in the Nordic Seas and Northern North Atlantic to Climate Change. I: The Nordic Seas, an integrated perspective, (Red. H. Drange et al.), AGU Geophys. Monograph, 366 s.
- Bellerby, R.G.J., K.G. Schulz, U. Riebesell, C. Neill, G. Nondal, T. Johannessen og K.R. Brown 2007: Marine ecosystem community carbon and nutrient uptake stoichiometry under varying ocean acidification during the PeECE III experiment. *Biogeosciences Discuss.*, **4**, 4631-4652.
- Bellona (Jakobsen et al.) 2005: CO₂ til EOR- verdi og miljøskaping hånd i hånd. Rapp. Bellona august 2005, 105 s.
- Bishop, J.K.B. 1989: Regional extremes in particulate matter composition and flux: Effects of the chemistry of the ocean interior. Pp. 117-137 in: Berger, W.H., V.S. Smetacek & G. Wefer (eds.). *Productivity of the ocean: Present and past*. John Wiley & Sons Limited.
- Bjørge, A. 2007. Sjøpattedyr. I: Ottersen, G. og Auran, J.A. (red.). *Helhetlig forvaltningsplan for Norskehavet: Arealrapport med miljø- og naturressursbeskrivelse*. Fisk. Hav 2007 (6). 166 s.
- Björk, M., K. Haglund, Z. Ramazanov og M. Pedersen 1993: Inductible mechanism for HCO₃⁻ utilization and repression of photorespiration in protoplasts and thallus of three species of *Ulva* (Chlorophyta). *J. Phycol.* **29**, 166-173.
- Blackford, J.C. og F.J. Gilbert 2007: pH variability and CO₂ induced acidification in the North Sea. *J. Mar. Syst.* Vol. **64**, 229-241.
- Bolin, B. og 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.
- Boyd, P. og S.C. Doney 2003: The impact of climate change and feedback process on ocean carbon cycle. *Ocean Biogeochemistry: In Ocean Biogeochemistry: the role of the ocean carbon cycle in global change* (ed. Fasham, M.J.R.). 157–193. Springer, Germany.
- Brewer, P.G. 1997: Ocean chemistry of the fossil fuel CO₂ signal: The halocline signal of "business as usual". *Geophys. Res. Lett.* Vol. **24**, 1367-1369.
- 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.
- Bryn, P., M. E. Jasinski og F. Søreide 2007: *Ormen Lange – Pipelines and Shipwrecks*. Universitetsforlaget.
- Burkhardt, S., I. Zondervan og U. Riebesell 1999: Effect of CO₂ concentration on the C:N:P ratio in marine phytoplankton: A species comparison. *Limnol. Oceanogr.* **44**, 683-690.

- Burkhardt, S., G. Amoroso, U. Riebesell og D. Sültemeyer 2001: CO₂ and HCO₃⁻ uptake in marine diatoms acclimated to different CO₂ concentrations. *Limnol. Oceanogr.* 46, 1378-1391.
- Caldeira, K. og M.E. Wickett 2003: Anthropogenic carbon and ocean pH. *Nature* Vol 425, 365.
- Caldeira, K., 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.
- Calderia, K. 2007: What corals are dying to tell us about CO₂ and ocean acidification. *Oceanography* Vol. 20, N2 2, 188-195.
- Caulfield J, D. Auerbach, E. Adams og H. Herzog H 1997: Near field impacts of reduced pH from ocean CO₂ disposal. *ENERG CONVERS MANAGE* 38:S343-S348.
- Crocker C og J. Cech 1996: The effects of hypercapnia on the growth of juvenile white sturgeon, *Acipenser transmontanus*. *AQUACULTURE* 147:293-299.
- Delille, B., J. Harlay, I. Zondervan, S. Jacquet, L. Chou, R. Wollast, R.G.J. Bellerby, M. Frankignoulle, A. Vieira Borges, U. Riebesell og J.-P.Gattuso 2005: Response of primary production and calcification to changes of pCO₂ during experimental blooms of the coccolithophorid *Emiliana huxleyi*. *Global Biogeochemical Cycles*, 19, GB2023, doi:10.1029/2004GB002318.
- Doney, S. 2006: The dangers of ocean acidification. *Scientific American*, mars 2006.
- Edwards, M. og A.J. Richardson 2004: Impact of climate change on marine pelagic phenology and trophic mismatch. *Nature* 430:881-884.
- Elzenga, J.T., H.B. Prins og J. Stefals 2000: The role of extracellular carbonic anhydrase activity in inorganic carbon utilization of *Phaeocystis globosa* (Prymnesiophyceae): A comparison with other marine algae using the isotopic disequilibrium technique. *Limnol. Oceanogr.* 45. 372-380.
- Engel, A., K. Schulz, U. Riebesell, R.G.J. Bellerby, B. Delille og M. Schartau 2007: Effects of CO₂ on particle size, distribution and phytoplankton abundance during a mesocosm bloom experiment (PeECE II). *Biogeosciences Discuss.*, 4, 4101-4133.
- Fairhall, A.W. 1973: Accumulation of Fossil CO₂ in the Atmosphere and the Sea. *NATURE*, Vol. 245, 7. sept 1973, 20-23.
- Feely, R.A., C.L. Sabine, K. Lee, W. Berelson, J. Kleypas, V.J. Fabry og F.J. Millero 2004: Impact of anthropogenic CO₂ on the CaCO₃ system in the ocean. *Science*. 305: 362-366.
- Field, C.B., M.J. Behrenfeld, J.T. Randerson og P. Falkowski 1998: Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. *Science* 281, 237-240.
- Fivelstad S, H. Haavik, G. Lovik og A. Olsen 1998: Sublethal effects and safe levels of carbon dioxide in seawater for Atlantic salmon postsmolts (*Salmo salar* L.): ion regulation and growth. *AQUACULTURE* 160:305-316.
- Foss A, B. Rosnes og V. Øiestad 2003: Graded environmental hypercapnia in juvenile spotted wolffish (*Anarhichas minor* Olafsen): effects on growth, food conversion efficiency and nephrocalcinosis. *AQUACULTURE* 220:607-617

- Freiwald, A., J.H Fosså, A. Grehan, T. Koslow og J. M. Roberts 2004: Cold-water Coral Reefs. UNEPWCMC, Cambridge, UK.
- García-Sánchez, M.J.,J.A. Fernández og F.X. Niell 1994: Effect of inorganic carbon supply on the photosynthetic physiology of *Gracilaria tenuistipitata*. *Planta* 194, 55-61.
- Gao, K., Y. Aruga, K. Asada T. Ishihara, T. Akano, og M. Kiyohara 1991: Enhanced growth of the red alga *Porphyra yezoensis* Ueda in high CO₂ concentrations. *J. Appl. Phycol.* 3, 356-362.
- Gao, K., Y. Aruga, K. Asada og M. Kiyohara 1993a: Influence of enhanced CO₂ on growth and photosynthesis of the red algae *Gracilaria* sp. and *G. chilensis*. *J. Appl. Phycol.* 5, 563-571.
- Gao, K., Y. Aruga, T. Ishihara, T. Akano og M. Kiyohara 1993b: Calcification in the articulated coralline alga *Corallina pilulifera*, with special reference to the effect of elevated CO₂ concentration. *Mar. Biol.* 117, 129-132.
- Gattuso, J.P., M. Pichon og M. Frankignoulle 1995: Biological control of air-sea CO₂ fluxes: effect of photosynthetic and calcifying marine organisms and ecosystems. *Mar. Ecol. Progr. Ser.* 129(1-3): 307-312.
- Gattuso, J-P., Allemand, D. og M. Frankignoulle 1999: Photosynthesis and calcification at cellular, organismal and community levels in coral reefs: a review on interactions and control by carbonate chemistry. *American Zoologist.* 39(1):163-183.
- Gazeau F, C. Ouiblier, J. M. Jansen, J-P. Gattuso, J.J. Middelburg og C. Heip 2007: Impact of elevated CO₂ on shellfish calcification. *Geophysical Research Letters*, 34, L07603.
- Giles, J. 2002: Norway sinks ocean carbon study. *Nature*, Vol 419, p6.
- Giordano, M., J. Beardall og J. A.Raven 2005: CO₂ concentrating mechanism in algae: mechanism, environmental modulation, and evolution. *Annual Review of Plant Biology* 56, 99-131.
- Giunotte, J. M., J. Orr, S. Cairns, A. Freiwald, L. Morgan og R. George 2006. Will human-induced changes in seawater chemistry alter the distribution of deep-sea scleractinian corals? *Frontiers in Ecology and the Environment.* 4 (3):141-146.
- Golmen 2002: The international project on CO₂ ocean sequestration. A summary of the experiment permitting process in Norway, 2002. Rapp. nr 4619, NIVA, 43 s.
- Golmen, L.G. 2005: Sub-seabed CO₂ storage in the North Sea. Rapp. Nr. 5090, NIVA, 30s.
- Gordillo, F.J.L, F.X. Niell og F.L. Figueroa 2001: Non-photosynthetic enhancement of growth by high CO₂ level in the nitrophilic seaweed *Ulva rigida* C. Agardh (Chlorophyta). *Planta* 213, 64-70.
- Grice G, P. Wiebe og E. Hoagland 1973: Acid.iron waste as a factor affecting the distribution and abundance of zooplankton in the New York bight. *Estuarine and Coastal Marine SciEnce* 1:45-50.
- Grottum J., og T. Sigholt 1996: Acute toxicity of carbon dioxide on European seabass (*Dicentrarchus labrax*): Mortality and effects on plasma. *COMP BIOCHEM PHYS A* 115:323-327.
- Gundersen, J. 2002: Regonal konsekvensvurdering, Norskehavet. Underlagsrapport. Rapp. NTNU-Vitenskapsmuseet, 14s.

- Gundersen, J., F. Kvalø og D. Nævestad 2008: Kulturminner og petroleumsutvinning i Nordsjøen. Håndtering av kulturminnehensyn på sjøbunnen. Norsk sjøfartsmuseum, Skr. Nr. 51, 58s.
- Harley, C.D.G., A.R. Hughes, K.M. Hultgren B.J. Miner, C.J.B. Sorte, C.S. Thornber, L.F. Rodriguez, L. Tomanek og S L. Williams 2006: The impact of climate change in coastal marine systems. *Ecology Letters*. 9: 228.241.
- Haugan, P. M. 2004: Mulige effekter av forsuring av havet. Rapport Nr 2-2004, Geofysisk institutt, UiB, 10s.
- Haugan, P. M. og H. Drange 1996: Effects of CO₂ on the ocean environment. *Energy Conversion Mgmt*, Vol. 37, 1019-1022.
- Haugan, P. M., C. Turley og H.O. Pörtner 2006: Effects on the marine environment of ocean acidification resulting from elevated levels of CO₂ in the atmosphere. DN utredning 2006-1, 35 s.
- Hayashi, M., J. Kita og A. Ishimatsu 2004: Acid-base responses to lethal aquatic hypercapnia in three marine fishes. *MAR BIOL* 144:153-160.
- Heisler, N: 1986: Acid-base regulation in fishes. I: Heisler N (red) *Acid-base regulation in Animals*. Elsevier, New York, p 309-356.
- Hays, G. C., A.J. Richardson og C. Robinson 2005: Climate change and marine plankton. *Trends in Ecology and Evolution* 20:337-344.
- Hovland M. og E. Thomsen 1997: Cold-water corals – are they hydrocarbon seep related? *Marine Geology*. 137:159-164.
- Hovland, M. og P.B. Mortensen 1999: *Norske Korallrev og Prosessar i havbotnen*. John Grieg Forlag. 155s.
- Hovland M. og M. Risk 2003: Do Norwegian deep-water coral reefs rely on seeping fluids? *Marine Geology*. 198:83-96.
- Hoegh-Guldberg, O., P.J. Mumby, A.J. Hooten, R.S. Steneck, P. Greenfield, E. Gomez, C.D. Harvell, P.F. Sale, A.J. Edwards, K. Caldeira, N. Knowlton, C.M. Eakin, R. Iglesias-Prieto, N. Muthiga, R.H. Bradbury, A. Dubi, M.E. Hatzioolos 2007: Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification. *Science*, Vol. 318, 1737-1742.
- IGBP 2002: Challenges of a changing earth. Proceedings of the Global Change Open Sciences Conference, Amsterdam, 10-13 July 2001. Redaktør W. Steffen et al., Springer 2002, 216s.
- Inaba K., C. Dreanno og J. Cosson 2003: Control of flatfish sperm motility by CO₂ and carbonic anhydrase. *CELL MOTIL CYTOSKEL* 55:174-187.
- Ingermann R., M. Holcomb, M. Robinson og J. Cloud 2002: Carbon dioxide and pH affect sperm motility of white sturgeon (*Acipenser transmontanus*). *J EXP BIOL* 205:2885-2890
- IPCC 2005 (red. Metz et al.): *IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*. Cambridge Press, 443 s.

- IPCC 2007a (Denman et al.): Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry. I: Climate Change 2007, Kapittel 7, The physical science basis, 509-533.
- IPCC 2007b (Meehl et al.): Global Climate Projections. I: Climate Change 2007, Kapittel 10, The physical science basis, 747-846.
- IPCC 2007c (Kaldeira og Akai et al.): IPCC Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage. Kapittel 6: Ocean Storage, 278-318.
- Ishida, H., T. Fukuhara, Y. Watanabe, Y. Shirayama, L. Golmen and T. Ohsumi 2006: Assessing the effect of high concentration of CO₂ on deep-sea benthic microorganisms using a benthic chamber system. Proceedings, GHGT-8 Conference, Trondheim, June 2006.
- Ishimatsu A., T. Kikkawa, M. Hayashi, K. Lee og J. Kita 2004: Effects of CO₂ on marine fish: Larvae and adults. J OCEANOGR 60:731-741.
- Ishimatsu, A., M. Hayashi, K. Lee, T. Kikkawa og J. Kita 2005: Physiological effects on fishes in a high-CO₂ world. J GEOPHYS RES-OCEANS 110:.
- Israel, A., S. Katz, Z. Dubinsky, J.E. Merrill og M. Friedlander 1999: Photosynthetic inorganic carbon utilization and growth of *Porphyra linearis* (Rhodophyta). J. Appl. Phycol. 11, 447-453.
- Israel, A. og M. Hophy 2002: Growth, photosynthetic properties and Rubisco activities and amounts of marine macroalgae grown under current and elevated seawater CO₂ concentrations. Glob. Chang. Biol. 8, 831-840.
- Kikkawa, T., A. Ishimatsu og J. Kita 2003: Acute CO₂ tolerance during the early developmental stages of four marine teleosts. ENVIRON TOXICOL 18:375-382.
- Kikkawa, T., J. Kita og A. Ishimatsu 2004: Comparison of the lethal effect of CO₂ and acidification on red sea bream (*Pagrus major*) during the early developmental stages. MAR POLLUT BULL 48:108-110.
- Kleypas, J. A., J. McManus og L. Menez 1999: Using environmental data to define reef habitat: where do we draw the line? American Zoologist. 39:146-159.
- Kleypas J.A., R.A. Feely, V.J. Fabry, C. Langdon, C.L. Sabine og L.L. Robbins 2006: Impact of ocean acidification on coral reefs and other marine calcifiers: a guide for future research. NOAA/Pacific Marine Environmental Laboratory Cont., Vol. 2897.
- Knutzen J. 1981: Effects of decreased pH on marine organisms. Marine Pollution Bulletin. 12: 25-29.
- Kurihara H. og Y. Shirayama 2004a: Effects of increased atmospheric CO₂ on sea urchin early development. Mar Ecol Prog Ser 274:161-169.
- Kurihara H. og Y. Shirayama 2004b: Effects of increased atmospheric CO₂ and decreased pH on sea urchin embryos and gametes. In: Heinzeller T, Nebelsick JH (eds) Echinoderms: München. Proc 11th Int Echinoderm Con. AABalkema, Leiden, p 31-36.
- Kurihara, H., S. Kato, og A. Ishimatsu 2007: Effects of increased seawater pCO₂ on early development of the oyster *Crassostrea gigas*. Aquat Biol, 1, 91-98.

- Kurihara, H., S. Shimode og Y. Shirayama 2004: Effects of raised CO₂ concentration on the egg production rate and early development of two marine copepods (*Acartia steueri* and *Acartia erythraea*). *MAR POLLUT BULL* 49:721-727.
- Kurihara, H., S. Shimode og Y. Shirayama 2004: Sub-lethal effects of elevated concentration of CO₂ on planktonic copepods and sea urchins. *J OCEANOGR* 60:743-750.
- Kübler, J.E., A.W. Johnston og J.A. Raven. 1999: The effects of reduced and elevated CO₂ and O₂ on the seaweed *Lomentaria articulata*. *Plant, Cell and Environment* 22, 1303-1310.
- Körtzinger, A., L. Mintrop og J.C. Duinker 1998: On the penetration of anthropogenic CO₂ in the North Atlantic Ocean. *J. Geophys. Res.*, Vol. 103, Nr. C9, 18681-18689.
- Langdon C., T. Takahashi, C. Sweeney, D. Chipman, J. Goddard, F. Marubini, H. Aceves, H. Barnett og M.J. Atkinson 2000: Effect of calcium carbonate saturation state on the calcification rate of an experimental coral reef. *Global Biochemistry Cycles*. 14: 639-654.
- Langdon, C., W. A. Broecker, D. E. Hammond, E. Glenn, K. Fritzsimmmons, S. G. Nelson, T. H. Peng, I. Hajdas og G. Monani 2003: Effect of elevated CO₂ on the community metabolism of an experimental coral reef. *Global Biogeochemical Cycles*. 17:1011.
- Langenbuch, M. og H. Pörtner 2002: Changes in metabolic rate and N excretion in the marine invertebrate *Sipunculus nudus* under conditions of environmental hypercapnia: identifying effective acid-base variables. *J EXP BIOL* 205:1153-1160.
- Langenbuch M. og H. Pörtner 2003: Energy budget of hepatocytes from Antarctic fish (*Pachycara brachycephalum* and *Lepidonotothen kempfi*) as a function of ambient CO₂: pH-dependent limitations of cellular protein biosynthesis? *J EXP BIOL* 206:3895-3903.
- Larsen B., H. Pörtner og F. Jensen 1997: Extra- and intracellular acid-base balance and ionic regulation in cod (*Gadus morhua*) during combined and isolated exposures to hypercapnia and copper. *MAR BIOL* 128:337-346.
- Lee K., J. Kita og A. Ishimatsu 2003: Effects of lethal levels of environmental hypercapnia on cardiovascular and blood-gas status in yellowtail, *Seriola quinqueradiata*. *ZOOL SCI* 20:417-422.
- Leclercq N., J-P. Gattuso og J. Jaubert 2000: CO₂ partial pressure controls the calcification rate of a coral community *Global Change Biology* 6:329-334.
- Leclercq N., J-P. Gattuso og J. Jaubert 2002: Primary production, respiration, and calcification of a coral reef mesocosm under increased CO₂ partial pressure. *Limnology and Oceanography* 47:558-564.
- Loeng, H. og K. Drinkwater 2007: An overview of the ecosystems of the Barents and and Norwegian Sea and their response to climate variability. *Deep sea Res. II*, Vol 54, 2478-2500.
- Marubini, F. og M. J. Atkinson 1999: Effects of lowered pH and elevated nitrate on coral calcification. *Marine Ecology Progress Series*. 188:117-121.
- Marubini, F., H. Marnett, C. Langdon og M. J. Atkinson 2001: Dependence of calcification on light and carbonate ion concentration for the hermatypic coral *Porites compressa*. *Marine Ecology Progress Series*. 220:153-162.

- Marubini, F., C. Ferrier-Pages og J-P. Cuif 2006: Suppression of growth in scleractinian corals by decreasing ambient carbonate ion concentration: a cross-family comparison. *Proceedings of the Royal Society of London B*. 270:179-184.
- McKenzie, D., E. Taylor, A. Dalla Valle og J. Steffensen 2002: Tolerance of acute hypercapnic acidosis by the European eel (*Anguilla anguilla*). *J COMP PHYSIOL B* 172:339-346.
- McKenzie, D. M. Piccolella, A. Dalla Valle, E. Taylor, C. Bolis og J. Steffensen 2003: Tolerance of chronic hypercapnia by the European eel *Anguilla anguilla*. *J EXP BIOL* 206:1717-1726.
- Mercado, J.M., F. Javier, L. Grodillo, F.X. Niell og F.L. Figueroa 1999: Effects of different levels of CO₂ on photosynthesis and cell components of the red alga *Porphyra leucosticta*. *J. Appl. Phycol.* 11, 455-461.
- Metzger, R., F. Sartoris, M. Langenbuch og H. Pörtner 2007: Influence of elevated CO₂ concentrations on thermal tolerance of the edible crab *Cancer pagurus*. *J THERM BIOL* 32:144-151.
- Michaelidis B., C. Ouzounis, A. Palaras og H.O. Pörtner 2005: Effects of long term moderate hypercapnia on acid-base balance and growth rate in marine mussels *Mytilus galloprovincialis*. *Marine Ecology Progress Series*. 293: 109-118.
- Miles, H., S. Widdicombe, J. Spicer og J. Hall-Spencer 2007: Effects of anthropogenic seawater acidification on acid-base balance in the sea urchin *Psammechinus miliaris*. *MAR POLLUT BULL* 54:89-96.
- 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*, Vol 55, 50-72.
- Moen, F.E. og E. Svendsen 2004: Dyreliv i havet. Nordeuropeisk marin fauna. Kom Forlag. 608s.
- Mortensen, P. B. og L. Buhl-Mortensen 2004: Distribution of deep-water gorgonian corals in relation to benthic habitat features in the Northeast Channel (Atlantic Canada) *Marine Biology*. 114:1223-1238.
- Nilsen, A.J. 2004: Norske dypvanns korallrev. I "Dyreliv i havet. Nordeuropeisk Marin Fauna" Eds. Moen, F.A. & E. Svensen 2004. s. 121-128.
- NGU 2002 (Bøe et al.): CO₂ point sources and subsurface storage capacities for CO₂ in aquifers in Norway. NGU Rapport 2002.010, 132 s.
- NGU 2004 (Polak et al.): Storage potential for CO₂ in the Frohavet Basin, Mid-Norway. NGU Rapport 2004.049, 57 s.
- OD 2008: Kraft fra land til norsk sokkel. Utredning v/Oljedirektoratet med fl., januar 2008, 99s.
- OED (red. J. Bækken, E. Zenker) 2007: Fakta. Norsk petroleumsvirksomhet 2007. Olje og Energidepartementet/Oljedirektoratet, 218s.
- Orr, J. C., L. G. Anderson, N.R. Bopp, V. J. Fabry, E. Jones og D. Swingedouw 2006: Arctic Ocean Acidification. *Ocean Sci. Meet. Suppl. AGU*, 87:36.

Orr J.C., V.J. Fabry, O. Aumont, L. Bopp, S.C. Doney, R.A. Feely, A. Gnanadesikan, N. Gruber, A. Ishida, F. Joos, R.M. Key, K. Lindsay, G.K. Plattner, K.B. Rodgers, C.L. Sabine, J.L. Sarmiento, R. Schlitzer, R.D. Slater, I.J. Totterdell, M.F. Weirig, Y. Yamanaka og A. Yool A 2005; Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature*. 437: 681-686.

OSPAR 2006. Effects on the marine environment of ocean acidification resulting from elevated levels of CO₂ in the atmosphere. OSPAR Commission. 33 p.

Ottersen, G. og A. Auran (Red) 2007: Helhetlig forvaltningsplan for Norskehavet. Arealrapport med miljø og naturbeskrivelse. Rapp. Havforskningsinstituttet nr 6/2007, 165s.

Pearson, P.N. og M.R. Balmer 2000: Atmospheric carbon dioxide concentrations over the past 60 million years. *Nature* 6797, 695-699.

Politi, Y., T. Arad, E. Klein, S. Weiner og L. Addadi 2004: Sea urchin spine calcite forms via a transient amorphous calcium carbonate phase. *SCIENCE* 306:1161-1164.

Pörtner, H. 2001: Climate change and temperature-dependent biogeography: oxygen limitation of thermal tolerance in animals. *NATURWISSENSCHAFTEN* 88:137-146.

Pörtner, H., C. Bock og A. Reipschlagler 2000: Modulation of the cost of pHi regulation during metabolic depression: A P-31-NMR study in invertebrate (*Sipunculus nudus*) isolated muscle. *J EXP BIOL* 203:2417-2428.

Pörtner, H., M. Langenbuch og B. Michaelidis 2005: Synergistic effects of temperature extremes, hypoxia, and increases in CO₂ on marine animals: From Earth history to global change. *J GEOPHYS RES-OCEANS* 110:.

Pörtner, H., M. Langenbuch og A. Reipschlagler 2004: Biological impact of elevated ocean CO₂ concentrations: Lessons from animal physiology and earth history. *J OCEANOGR* 60:705-718.

Pörtner, H., F. Mark og C. Bock 2004: Oxygen limited thermal tolerance in fish? Answers obtained by nuclear magnetic resonance techniques. *RESP PHYSIOL NEUROBI* 141:243-260.

Pörtner, H., A. Reipschlagler og N. Heisler 1998: Acid-base regulation, metabolism and energetics in *Sipunculus nudus* as a function of ambient carbon dioxide level. *J EXP BIOL* 201:43-55.

Riebesell, U. 2004: Effects of CO₂ enrichment on marine phytoplankton. *Journal of Oceanography* 60, 719-729.

Riebesell, U., I. Zondervan, B. Rost, B. P.D. Tortell, R. Zeebe og F.M.M. Morel 2000: Reduced calcification of marine plankton in response to increased atmospheric CO₂. *Nature* 407, 364-367.

Riebesell, U., K.G. Schulz, R.G.J. Bellerby, M. Botros, P. Fritsche, M. Meyerhöfer, C. Neill, G. Nondal, A. Oschlies, J. Wohlers og E. Zöllner, 2007: Enhanced biological carbon consumption in a high CO₂ ocean. *Nature*, doi: 10.1038/nature06267

Roberts S. og M. Hirshfield 2004: Deep-sea corals: out of sight, but no longer out of mind. *Frontiers in Ecology and Environment* 2:123-130.

ROS 2005: (John Ravens et al.) Ocean acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide. Rapport, The Royal Society, UK, 61 s.

Rose, C., W. Williams, T. Hollister og P. Parrish 1977: Methods for determining acute toxicity of an acid waste and limiting permissible concentration at boundaries of an ocean mixing zone. *ENVIRON SCI TECHNOL* 11:367-371.

Rost, B., U. Riebesell, S. Burkhardt og D. Sültemeyer 2003: Carbon acquisition of bloom-forming marine phytoplankton. *Limnol. Oceanogr.* 48, 55-67.

Sabine C.L., R.A. Feely, N. Gruber, R.M. Key, K. Lee, J.L. Bullister, R. Wanninkhof, C.S. Wong, D.W.R. Wallace, B. Tilbrook, F.J. Millero, T.H. Peng, A. Kozyr, T. Ono og A.F. Rios 2004: The oceanic sink for anthropogenic CO₂. *Science* 305, 367–371.

Sato, T., Y. Watanabe, K. Toyota og J. Ishizaka 2005: Extended probit mortality model for zooplankton against transient change of PCO₂. *MAR POLLUT BULL* 50:975-979.

Scheid, P., J. Shrams og J. Piper 1989: Gas exchange in vertebrates. *Verh Dtsch Zool Ges* 82:57-68
 Shirayama Y, Thornton H (2005) Effect of increased atmospheric CO₂ on shallow water marine benthos. *J GEOPHYS RES-OCEANS* 110:.

Schippers, P., M. Lüring og M. Sheffer 2004: Increase of atmospheric CO₂ promotes phytoplankton. *Ecology Letters* 7, 446–451.

Schulz, K.G., U. Riebesell, R.G.J. Bellerby, H. Biswas, M. Meyerhöfer, M.N. Müller, J.K. Egge, J.C. Nejtgaard, C. Neill, J. Wohlers og E. Zöllner 2007: Build-up and decline of organic matter during PeECE III. *Biogeosciences Discuss.*, 4, 4539-4570.

Siikavuopio, S., A. Mortensen, T. Dale og A. Foss 2007: Effects of carbon dioxide exposure on feed intake and gonad growth in green sea urchin, *Strongylocentrotus droebachiensis*. *AQUACULTURE* 266:97-101.

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

Shirayama Y et al (2004). Impacts on ocean life in a high-CO₂ world. Paper presented at SCOR-UNESCO sponsored symposium. "The ocean in a high-CO₂ world." Paris, 2004.

Spicer J., A. Raffo og S. Widdicombe 2007: Influence of CO₂-related seawater acidification on extracellular acid-base balance in the velvet swimming crab *Necora puber*. *MAR BIOL* 151:1117-1125.

Stenseth, N.C., G. Ottersen, J.W. Hurrell og A. Belgrano 2004: Marine ecosystems and climate variation. The North Atlantic. A comparative perspective. Oxford U.Press, 252s.

Swanson, A.K. og C.H. Fox 2007: Altered kelp (Laminariales) phlorotannins and growth under elevated carbon dioxide and ultraviolet-B treatments can influence associated intertidal food webs. *Global Change Biology* 13, 1696-1709.

Tortell, P.D., R.D. Giocoma, D.M. Sigman og F.M.M. Morel 2002: CO₂ effects on taxonomic composition and nutrient utilization in an Equatorial Pacific phytoplankton assemblage. *Marine Ecology Progress Series* 236, 37–43.

Vinogradov, G. og V. Komov 1985: Ion regulation in the perch, *Percha fluviatilis*, in connection with the problem of acidification of water bodies. *Journal of Ichthyology* 25:53-61.

Wallace, D.W.R. 2001: Storage and transport 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.

Watanabe, Y., A. Yamaguchi, H. Ishidai, T. Harimoto, S. Suzuki, Y. Sekido, T. Ikeda, Y. Shirayama M. Mac Takashi, T. Ohsumi og J. Ishizaka J 2006: Lethality of increasing CO₂ levels on deep-sea copepods in the western North Pacific. *J OCEANOGR* 62:185-196.

Wheatly, M. 1989: Physiological responses of the crayfish (*Pacifificatus leniusculus*) to environmental hyperoxia. I. extracellular acid-base and electrolyte status and transbranchial exchange. *J EXP BIOL* 143:33-51.

Widdicombe S. og H.R. Needham 2007: Impact of CO₂ induced seawater acidification on the burrowing activity of *Nereis virens* and sediment nutrient flux. *Mar Ecol Prog Ser*, 341:111-122.

Widdicombe, S., S.L. Dashfield, C.L. McNeill, H.R. Needham, A. Beesley, A. McEvoy, S. Oexnevad, R.K. Clarke og J. A. Berge (in prep): The response of sediment diversity and nutrient flux to CO₂ induced seawater acidification.

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

Yamada, Y. og T. Ikeda 1999: Acute toxicity of lowered pH to some oceanic zooplankton. *Plankton Biol Ecol* 46:62-67.

Zou, D. 2005: Effects of elevated atmospheric CO₂ on growth, photosynthesis and nitrogen metabolism in the economic brown seaweed, *Hizikia fusiforme* (Sargassaceae, Phaeophyta). *Aquaculture* 250, 726-735.

Vedlegg A. Felles utredningstema

Tabell over alle felles utredningstema med undertema og parametrar, i h.h.t. DN's program, Fellesdelen.

Fokusområde	Utredningstema	Undertema	Parametre
Biologisk miljø	Plankton	Planteplancton	Virkninger av tid for våroppblomstringen på biologisk produksjon. Virkning av biomasse (uttrykt som klorofyll a) på biologisk produksjon.
		Makrozooplankton	Biomasse. Geografisk utbredelse.
		Fiskeegg	Biomasse. Geografisk utbredelse.
		Larver	Biomasse. Geografisk utbredelse.
	Bunnsamfunn	Bunndyrsamfunn	Omfang av skade/ødeleggelse
		Korallrev	Omfang av skade/ødeleggelse
	Fisk	Sild	Bestandsutvikling (storrelse og sammensetning, vekt på gytebestand). Næringstilgang for sjøfugl. Vandring/utbredelse.
		Kolmule	Bestandsutvikling (storrelse og sammensetning, vekt på gytebestand). Næringstilgang for sjøfugl. Vandring/utbredelse.

Forts. neste side.

Samfunn		Makrell	Bestandsutvikling (storrelse og sammensetning, vekt på gytebestand). Næringstilgang for sjøfugl. Vandring/utbredelse.	
		Sei	Bestandsutvikling (storrelse og sammensetning, vekt på gytebestand). Næringstilgang for sjøfugl. Vandring/utbredelse.	
		Tobis	Bestandsutvikling (storrelse og sammensetning). Næringstilgang for sjøfugl. Vandring/utbredelse.	
	Sjøfugl	Pelagisk dykkende fugl (lomvi, lunde)	Bestandsutvikling (storrelse og sammensetning). Vandring/utbredelse. Påvirkning av hekkeområder.	
		Bentisk dykkende fugl (ærfugl)	Bestandsutvikling (storrelse og sammensetning). Vandring/utbredelse. Påvirkning av hekkeområder.	
	Sjøpattedyr	Vågehval	Bestandsutvikling (storrelse og sammensetning). Vandring/utbredelse.	
		Klappmyss	Bestandsutvikling (storrelse og sammensetning). Vandring/utbredelse.	
		Det pelagiske hvalsamfunnet i sørlige del av utredningsområdet	Artssammensetning/relativ tallrikhet. Vandring/utbredelse.	
		Steinkobbe	Bestandsutvikling (storrelse og sammensetning). Vandring/utbredelse.	
		Nise	Bestandsutvikling (storrelse og sammensetning). Vandring/utbredelse.	
		Strandsonen	Undervannseng	Berort areal. Restitusjonstid.
	Næringsliv og sysselsetting	Strandeng	Berort areal. Restitusjonstid.	
		Tangvoll	Berort areal. Restitusjonstid.	
		Dagens situasjon: Betydning for næringsliv og sysselsetting regionalt og nasjonalt	Opplysninger hentes fra den felles samfunnsbeskrivelsen.	
		Framtidsbilde: Forventet utvikling i sysselsetting nasjonalt og regionalt	Skjønnsmessige vurderinger, ev. erfaringstall og økonomiske beregninger	
		Framtidsbilde: Forventet utvikling i verdiskapning nasjonalt og regionalt	Skjønnsmessige vurderinger, ev. erfaringstall og økonomiske beregninger	
		Uhellssituasjoner: Direkte kostnader for samfunnet knyttet til håndtering av større ulykker.	Erfaringstall og økonomiske beregninger	
		Uhellssit.: Faren for negative økonomiske ringvirkninger av større ulykker	Erfaringstall og økonomiske beregninger	
		Marin arkeologi	Skipsvrak	Ødeleggelse. Flytting.
			Rester av tidligere boplasser	Ødeleggelse. Flytting.
Lokalsamfunn		Kystkultur	Erfaringsmateriale, undersøkelser, skjønnsmessig omtale	
	Samisk kultur og bosetting	Erfaringsmateriale, undersøkelser, skjønnsmessig omtale		
	Ertidsfiske	Erfaringsmateriale, undersøkelser, skjønnsmessig omtale		
	Båtutfart og badeliv	Erfaringsmateriale, undersøkelser, skjønnsmessig omtale		