

På vej mod et surt hav

- udledning af CO₂ ændrer verdenshavene

Menneskets udledning af kuldioxid til atmosfæren er med til at gøre verdenshavene surere. Et surere hav vil gøre det umuligt for mange typer af havlevende organismer at danne kalk. Det kan få alvorlige konsekvenser for Jordens kulstofkredsløb.

Af Katherine Richardson og Lone Thybo Mouritsen

■ Klimaforskere er efterhånden ikke i tvivl om, at jorden i øjeblikket oplever en opvarmning, hvis hovedårsag er en menneskeskabt forøgelse i koncentrationen af drivhusgasser i atmosfæren. Kuldioxid (CO₂) er en af de vigtigste drivhusgasser, og gennem jordens historie har udviklingen i atmosfærens indhold af CO₂ og jordens overfladetemperatur fulgt hinanden. Når CO₂-koncentrationen er steget er temperaturen blevet højere, og når indholdet af CO₂ i atmosfæren er faldet er jordens klima blevet koldere. Der er ingen grund til at tro, at atmosfærens indhold af CO₂ og jordens temperatur ikke vil være koblet på samme måde i fremtiden. Derfor er der i dag stor fokus på vores udledning af drivhusgasser og ikke mindst udviklingen af CO₂ i atmosfæren.

Kuldioxid på himmelflugt
Kun i en relativ kort årrække har det været muligt faktisk at måle atmosfærens koncentration



Foto: The Coral Kingdom Collection, Mohammed Al Momany.

Forskerne forudser, at det inden år 2065 vil være umuligt for koraller at danne kalk i havet – dvs. intet sted i oceanerne vil der eksistere de rette kemiske betingelser, som gør det muligt for koraller at danne kalk.

af CO₂. Alligevel lykkedes det i 1999 et forskerhold at tegne et billede af udviklingen af CO₂-koncentrationen i Jordens atmo-

sfære gennem de sidste 450.000 år. Det gjorde de ved at måle gaskoncentrationen i luftbobler i iskerner udtaget fra isen på

Antarktis. Forlænger man denne kurve over CO₂-udviklingen den sidste halve million år med de senere års faktiske målin-

ger af CO_2 i atmosfæren, får man et foruroligende billede (se figur 1). I perioden fra for ca. 450.000 år siden og indtil for ca. 150 år siden varierede CO_2 -koncentrationen i atmosfæren en del, men koncentrationerne holdt sig pænt inden for et område mellem ca. 180 og 280 ppm (dele pr. million). Desuden skete de ændringer, som fandt sted, relativt langsomt. I de sidste ca. 120 år er den atmosfæriske CO_2 -koncentration derimod vokset både voldsomt og hurtigt. I dag er koncentrationen omkring 370 ppm, og altså højere end den har været på noget tidspunkt de forudgående 450.000 år. Organisationen *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) under FN forudsiger, at CO_2 -indholdet i atmosfæren vil nå op over 700 ppm inden år 2100, hvis menneskets udledninger af CO_2 fortsætter som forventet. Hvis data fra iskerneboringer, målte koncentrationer fra de seneste år og fremskrivningen af atmosfærens CO_2 -indhold på baggrund af den nuværende udvikling afbildes sammen som på figur 1 (dvs. på en tidsskala, der dækker næsten 500.000 år), kan man se, at den igangværende stigning i CO_2 står lodret i forhold til variationerne den sidste halve million år. Det er altså en enestående markant stigning af atmosfærens indhold af CO_2 , vi er vidne til i disse år, og det er muligt, at der aldrig tidligere i Jordens historie er sket en så hurtig ændring i atmosfærens indhold af CO_2 , som vi ser i dag!

Et surere hav

Denne hurtige og voldsomme stigning i atmosfærens CO_2 -indhold har alvorlige konsekvenser, ikke kun for vores klima, men også for havets kemi og dermed for mange af de organismer, som lever i havet. Lidt over 70 % af jordens overflade er dækket af hav, og over hele dette store område er havets overflade i direkte kontakt med atmosfæren. Den CO_2 , der findes opløst i havets overfladevand, søger hele tiden at komme i ligevægt med den

CO_2 , som findes i atmosfæren. Jo mere CO_2 der findes i atmosfæren, jo mere CO_2 opløses i havet. Når CO_2 opløses i vand dannes der kulsyre. Ved denne proces frigives brintioner (H^+), hvilket gør vandet mere surt (se boks 1). En konsekvens af denne forsuringssproces kender vi fra vores hverdag, hvor tilsætning af CO_2 til læskedrikke skaber en sur væske, som f.eks. cola, der er skadelig for kalkstrukturer som tandemaljen.

Surhedsgraden af en væske måles på pH-skalaen, som angiver koncentration af brintioner. Jo flere brintioner, der er til stede, jo lavere er pH-værdien, så en forsuring af væsken betyder, at pH falder. I de senere år har man kunne konstatere et fald på ca. 0,1 pH-enhed i havets overfladevand. Hvis udviklingen i atmosfærens CO_2 -koncentration fortsætter som i øjeblikket, forventer man et fald på 0,5 pH-enheder inden år 2100. Et fald på 0,5 enheder lyder ikke af meget, men da pH-skalaen er logaritmisk betyder det faktisk en tredobling i koncentrationen af brintioner.

Organismer får svært ved at danne kalk

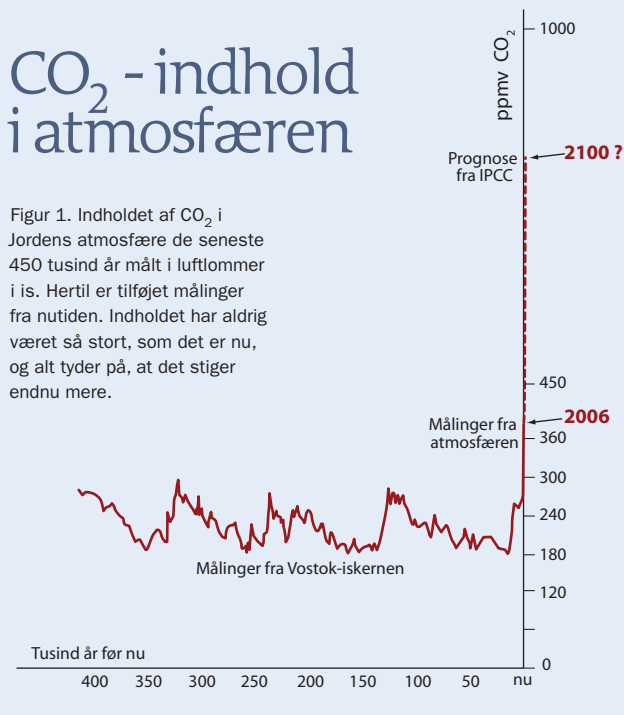
Læskedrikke med karbonat skader, som nævnt, tandemaljen, fordi syren i væsken opløser de kalkforbindelser, som indgår i emaljen. På samme måde truer et mere surt hav de marine organismer, som danner kalk. En forsuring af havet betyder, at f.eks. muslingeskaller, sneglehus og korallers skeletter går i opløsning, og samtidig betyder de kemiske reaktioner, der foregår, når CO_2 opløses i havet, at muligheden for at danne kalk forringes (se boks 1).

Konsekvenserne af forsuring vil således have direkte betydning for overlevelsen af en lang række plante- og dyregrupper, men også for hele jordens kulstofomsætning kan ændre pH forhold i havet få afgørende betydning.

Blandt de mange havlevende dyr og planter, der danner kalk, er mikroskopiske kalkflagellater særlig vigtige for Jordens kulstofomsætning (se foto).

CO_2 - indhold i atmosfæren

Figur 1. Indholdet af CO_2 i Jordens atmosfære de seneste 450 tusind år målt i luftlommer i is. Hertil er tilføjet målinger fra nutiden. Indholdet har aldrig været så stort, som det er nu, og alt tyder på, at det stiger endnu mere.



Kulstofkemi i havet

Boks 1: CO_2 -balancen mellem hav og atmosfære følger en lov kaldet Henrys Lov, som siger, at den gasmængde, der kan opløses i en væske, er direkte proportional med trykket af den pågældende gas over væsken. Jo mere CO_2 , der er i atmosfæren, jo mere CO_2 vil altså opløses i havet. Når CO_2 opløses i havet reagerer det med vand (H_2O) og danner kulsyre (H_2CO_3).



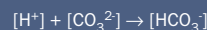
Kulsyren frigiver brintioner (H^+) og danner bikarbonat (HCO_3^-).



Jo flere brintioner jo mere surt er vandet og jo lavere er pH-værdien. Jo mere CO_2 , der opløses i havet jo mere surt bliver det altså.

CO_2 i havet findes på tre forskellige former: opløst kuldioxid (CO_2 , ca. 1 %), bikarbonat (HCO_3^- , ca. 91 %) og karbonat (CO_3^{2-} , ca. 8 %). Den relative fordeling mellem de tre forskellige former afhænger af vandets pH.

Brintionerne fra kulsyren vil reagere med de karbonationer, der findes i vandet og danne bikarbonat:



Når CO_2 opløses i havet stiger koncentrationen af H^+ , H_2CO_3 og HCO_3^- altså, mens koncentrationen af CO_3^{2-} falder, og det er denne mangel på karbonationer, der reducerer de kalkdannende organismers mulighed for at danne kalciumkarbonat (CaCO_3).

Dannelse og opløsning af kalciumkarbonat kan beskrives med ligningen:



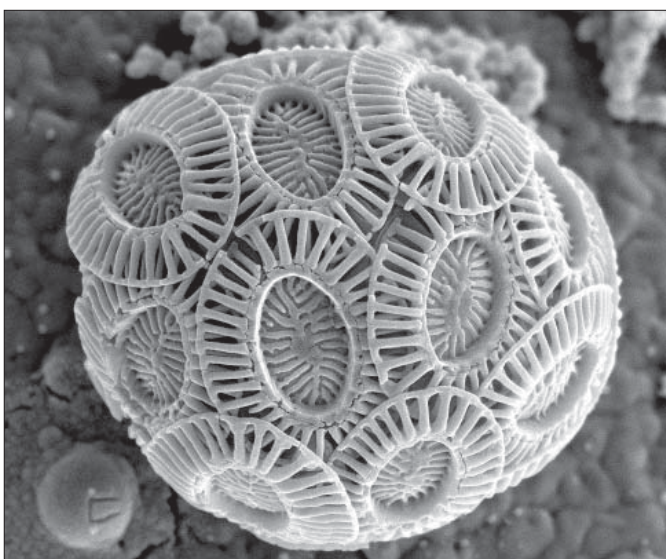
Da opløsning af CO_2 i havet fjerner CO_3^{2-} forrykkes ligevægten mod højre, hvorved dannelsen af kalciumkarbonat (CaCO_3) hæmmes og opløsning af skaller og skeletter hos kalkdannende organismer øges.

Foto: Geologisk Nyt



Geologiske kalkaflejringer som f.eks. Møns Klint, består næsten udelukkende af kalk produceret af mikroskopiske organismer.

Foto: Gert Hansen



Kalkflagellaten, *E. huxleyi*, er en biogeokemisk vigtig fytoplanktonart, der har indflydelse på både det globale kulstof- og svovlkredsløb. *E. huxleyi* kan forekomme i alle klodens farvande.

Disse små planter danner kalkplader, som de kan afstøde i vandet. Pladerne er tungere end vand, og synker forholdsvis hurtigt til bunds, hvor de bliver indlejret i jordens største kulstofdepot: havbunden. Plader fra kalkflagellater og andre kalkholdige mikroskopiske organismer er faldet til bunds i havet i millioner af år, og resultatet kan bl.a. ses i form af geologiske kalkaflejringer, som f.eks. Møns

klint, som næsten udelukkende består af kalk produceret af mikroskopiske organismer. Disse og andre kalkdannende organismer i havet spiller således en meget vigtig rolle i transporten af kulstof fra havets overflade til bundvandet, hvor det kan lagres i op til tusindvis af år, og bunden, hvor det kan lagres endnu længere, hvilket gør dem til vigtige spillere i jordens samlede kulstofkredsløb. Ingen ved

med sikkerhed, hvordan kalkflagellaterne og andre kalkdannende organismer vil reagere på havets stigende surhed, men laboratoriestudier, hvor kalkflagellater dyrkes ved en pH-værdi, der er 0,5 lavere end havets nuværende pH, viser kraftige misdannelser af organismernes kalkstrukturer.

Korallernes endeligt?

Havets kalkdannende organismer kan danne en af to forskellige former for kalk (begge bestående af kalciumkarbonat, CaCO_3 , men med forskellig krystalstruktur). Kalcit er den sværest opløselige, og derfor mindre påvirket af havets pH-ændringer end aragonit. Kalkflagellater danner kalcit, og disse organismer forventes derfor ikke at være blandt de første, som påvirkes af havets stigende surhed. Den mere syrefølsomme aragonit dannes af f.eks. koraller, som derfor forventes at være mere følsomme overfor en forsurende af havet. Faktisk forudsiger man, at der inden år 2065 intet sted i oceanerne vil eksistere kemiske betingelser, som gør det muligt for koraller at danne kalk, såfremt den nuværende udvikling i atmosfærens CO_2 indhold fortsætter som forventet. Samme dystre fremtidsperspektiver findes for en gruppe af små pelagiske bløddyr (*pteropoder*), som er meget vigtige i især i arktiske og antarktiske fødekæder, herunder i Ross Havet. Pteropoderne, som danner aragonitskaller, udgør et meget vigtigt led i fødekæden, og er hovedansvarlige for transporten af kulstof fra overfladevandet til havets bund i dette antarktiske område. Forskerne forudsiger, at forsurende af havet vil betyde, at denne organisme-gruppe vil forsvinde fra Rosshavet inden for de næste 50 år.

Kulstoftransporten til havbunden går i stå

Udover at påvirke havets fødekæder, vil den forventede reduktion i antallet af kalkdannende organismer reducere transporten af kalk og dermed kulstof til bunden, og det kan have direkte konsekvenser for den globale opvarmning. Oceanerne inde-

holder nemlig ca. 50 gange så meget kulstof som atmosfæren, og som tidligere nævnt, sker der en konstant udveksling af kulstof mellem hav og atmosfære. Jo mere kulstof, som fjernes fra havets overfladelag ved transport af kalk til bundvandet, jo mere CO_2 kan havet optage fra atmosfæren. Populært sagt kan havet indeholde en vis mængde CO_2 (i form af opløst CO_2 , bikarbonat og karbonat – se boks 1) og når havets organismer flytter denne CO_2 væk fra det vandlag, som er i kontakt med atmosfæren, bliver der frigjort kapacitet til, at havet kan optage endnu mere CO_2 fra atmosfæren. Indtil nu, har havet optaget ca. halvdelen af den "ekstra" CO_2 , som vi mennesker har udledt til atmosfæren. Uden havets optagelse af CO_2 ville atmosfærens indhold af kuldioxid være betydeligt større og Jorden ville opleve langt højere temperaturer end i dag. En reduktion i kalktransporten til bunden vil reducere lagringen af kulstof på havets bund, og dermed reducere havets mulighed for at fjerne CO_2 fra atmosfæren. Sker det vil de atmosfæriske CO_2 -koncentrationer stige langt hurtigere end man forventer i dag.

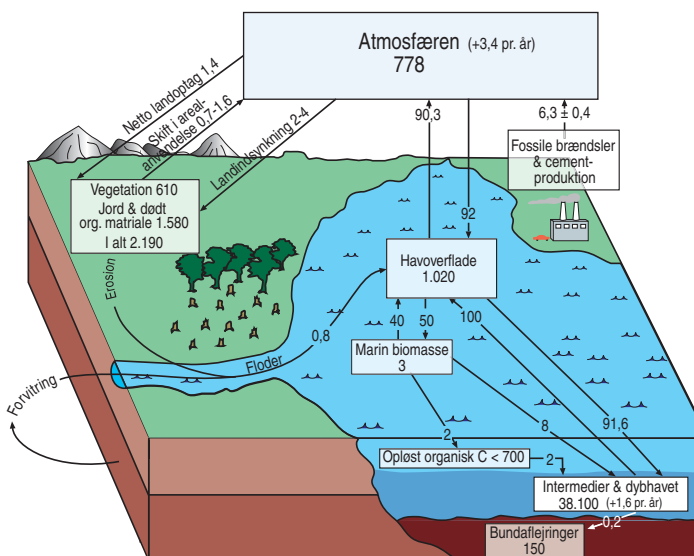
Hurtige ændringer = større problemer

Vi har set, at atmosfærens indhold af CO_2 er højere, end den har været i den sidste halve million år. Ser man på hele Jordens ca. 4,5 milliarder år lange historie, finder man, at Jorden i dens barndom havde en atmosfære med langt højere CO_2 -koncentrationer, end vi ser i dag (inden fotosyntetiserende organismer udviklede sig, var koncentrationen af CO_2 i atmosfæren sandsynligvis omkring 20 gange højere end i dag). Havet har derfor antageligvis tidligere oplevet (og overlevet) perioder med forsurende, I dag vurderes forsurende problemet imidlertid at være langt mere akut end nogensinde tidligere pga. den hastighed, hvormed de atmosfæriske CO_2 -koncentrationer stiger. Tidligere i jordens historie er ændringerne i atmosfærens CO_2 -indhold generelt

sket relativt langsomt. Det har givet havet mulighed for selv at neutralisere den kulsyre, som dannes i overfladevandet. Neutraliseringen sker ved hjælp af de mange kalkdannende organismer, som synker til bunds i havet, og gør havets bundvand meget kalkholdigt. Når det kalkholdige bundvand blandes op i de øvre vandmasser, vil det neutralisere syredannelsen i overfladen. Opblandingen af bund- og overfladevand forårsager af havets naturlige blandingprocesser sker over en tids-horisont på titusinder af år. Når ændringer i atmosfærens CO_2 -koncentration sker langsomt over tusinder af år, har havet derfor en mulighed for at modvirke overfladens forsurening ved at bundvand blandes med overfladevand. Når CO_2 koncentrationen derimod, som i dag, ændrer sig drastisk i løbet af få årtier, kan havets naturlige bufferkapacitet simpelthen ikke nå at følge med!

Aktuel forskning

Det er kun for relativt nyligt, at forskerne har fået øje på forsureningen af havet, og de potentielle katastrofale konsekvenser for havets økologi og det globale kulstofkredsløb. Derfor er forskning som Galathea-3 projektet *Kulstofkredsløbet fra nord til syd langs Galatheas rute* (se boks 2) rettet mod en bedre forståelse af kulstofomsætningen i havet meget aktuell. Formålet med denne forskning er at opnå indsigt i havets rolle i det globale kulstofkredsløb og de effekter, menneskets udledning af CO_2 har på havet. Forskningen skal desuden gerne give et fundament for at rådgive om, hvordan man bedst modvirker havets forsurening og følgeeffekterne heraf. Vores forståelse af CO_2 -udledningens påvirkning af havet er i dag langt fra fuldkommen. Imidlertid får vi ved at iagttage de igangværende ændringer i havets surhedsgrad bekræftet, at Jorden er et system, hvor de forskellige elementer (luft, vand, og jord) påvirker hinanden, og at en ændring et sted i systemet vil have betydelige konsekvenser også andre steder i systemet. ■



Kilde: Grafik omtegnet efter U.S. Climate Change Science Program, Strategic Plan for the Climate Change Science Program: Final Report, July 2003, www.climatechange.gov. IPCC's Third Assessment Report (IPCC, 2001a). Aflejringer i alt: 78.000.000

Forsimples figur over det globale kulstofkredsløb. Udvekslingen af kulstof mellem atmosfæren, oceanerne og landjorden er fundamental for Jordens klima. Dog er især oceanernes rolle i kredsløbet dårligt belyst. Reservoirstørrelser er angivet i gigatons kulstof og for strømningene i gigatons kulstof pr. år for de vigtigste komponenter i kredsløbet i 1990'erne.

Menneskelige aktiviteter som brug af fossile brændstoffer samt skovrydning og afbrænding af skov er medvirkende til den store stigning i atmosfærens indhold af CO_2 .

Om forfatterne:



Katherine Richardson
er professor
Tlf.: 8942 4380
e-mail:
richardson@biology.au.dk



Lone Thybo Mouritsen
er akademisk medarbejder
Tlf.: 89424394
e-mail:
lone.mouritsen@biology.au.dk

Begge er ved Afd. for Marin Økologi, Biologisk Institut, Aarhus Universitet.

Kulstofkredsløbet på Galathea 3

Boks 2. Sammen med forskere fra flere danske forskningsinstitutioner (Danmarks Miljøundersøgelser, Forskningscenter Risø og Københavns Universitet) deltager forskere fra Marin Økologi, Biologisk Institut på Aarhus Universitet i et stort forskningsprojekt på Galathea3-ekspeditionen ledet af professor Katherine Richardson, den ene af artiklens forfattere. Projektet har forskere, laboranter og studerende med på hele ekspeditionens rute.

Det overordnede formål med forskningsprojektet er at undersøge globale mønstre i oceanernes rolle i reguleringen af atmosfærens CO_2 -indhold og dermed klodens klimaudvikling.

Oceanernes optagelse af CO_2 og det marine kulstofkredsløb reguleres af en række fysiske, kemiske og biologiske processer. Hvorvidt det kulstof, som optages af fotosyntetiserende mikroskopiske alger i de øvre vandmasser, ultimativt lagres i de nedre dele af oceanerne, og således medvirker til effektivt at fjerne CO_2 fra atmosfæren, afhænger i høj grad af kompleksiteten af den fødekæde, hvori plantebiomassen indgår.

I dette forskningsprojekt kombineres detaljerede undersøgelser af fødekædens struktur og processer fra de mindste alger til fisk med målinger af CO_2 -udveksling mellem atmosfæren og havet og informationer om havets fysiske og kemiske karakteristika og havstrømme. Meget få forskningsprojekter har kombineret undersøgelser af fysiske, kemiske og biologiske processer i kortlægningen af kulstofkredsløbet, og gennemførelsen af dette projekt under Galathea3 vil være første gang disse sammenhænge undersøges på en global skala.

Yderligere læsning:

Ocean acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide, The Royal Society. Rapporten kan findes på www.royalsoc.ac.uk

The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) har denne hjemmeside: www.ipcc.ch

Let læst populært hæfte: CO_2 - Hvorfra, hvorfor, hvor meget? TEMA-rapport fra DMU, 31/2000