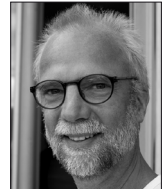


# HUR PÅVERKAR KLIMATFÖRÄNDRINGAR SJÖAR OCH HAV?

## The potential effects of global climate change on oceans and lakes

av NILS EKELUND, *Institutionen för Natur, Miljö, Samhälle, Malmö Högskola, 205 06 Malmö*  
e-post: [Nils.ekelund@mah.se](mailto:Nils.ekelund@mah.se)



### Abstract

Global increases in atmospheric CO<sub>2</sub> and temperature are associated with an increase in the temperature of freshwater lakes and marine ecosystems. The ice breakup in lakes occur earlier which gives an opportunity for phytoplankton to grow early in the season. Another effect is a prolonged period of stratification in the lakes. Warming also may cause a shift of species in phytoplankton community. Climate models indicate that blue-green algae will increase in relative abundance under the predicted future climate. The effects of climate change on marine ecosystems are related to shifts in water temperature, circulation, stratification, nutrient input and pH. An increase in temperature will create a rising sea level, decreasing sea-ice extent in Antarctica and Arctic and a altered patterns of ocean circulation and freshwater input. A greater light penetration into the water column caused by a reduction in sea ice may increase open-water phytoplankton primary production, although nutrient limitation could reduce the level of increase in primary production. In tropical waters are coral reefs very vulnerable to minor increases in temperature. A rising atmospheric CO<sub>2</sub> and a resulting increased oceanic CO<sub>2</sub> uptake will also reduce the sea-surface pH. A drop in pH makes it more difficult for corals to secrete and maintain their skeletons.

*Key words* – Climate change, lakes, oceans, phytoplankton, CO<sub>2</sub>

### Sammanfattning

I samband med de pågående klimatförändringarna så sker även en temperaturhöjning i sjöar och hav. Islossningen sker tidigare i sjöar vilket innebär att växtsäsongen för växtplankton blir längre och att perioden för skiktning kan förlängas. Dessutom kommer troligen artsammansättningen av växtplankton att förändras. Enligt klimatmodeller innebär detta att blå-grön alger börjar sin tillväxt tidigare på våren när temperaturen ökar. Effekter av klimatförändringar på marina ekosystem relaterar till förändringar av havstemperaturen, cirkulation av havsströmmar, skiktningförhållanden, näring och pH. En ökad havstemperatur ger sedan som följd en höjd havsnivå, en minskad mängd havsis i Arktis och Antarktis, en ökad skiktning av havet, ett förändrat mönster av havsströmmar och ett förändrat inflöde av färskvatten till haven. En av effekterna vid en minskning av havsisen kan bli ett ökat ljusinflöde ner på djupet i havet som i sin tur ger en ökad primärproduktion. Emellertid kan denna ökning av primärproduktionen eventuellt begränsas av näringstillgången. I tropiska vatten är korallekosystemen väldigt känsliga för små förändringar i temperaturen. En ytterligare effekt från en ökad koldioxidhalt i atmosfären är det ökade upptaget av koldioxid till haven som ger en minskning av pH. Ett minskat pH i haven innebär att korallernas förmåga att bilda kalkskelett försämras.

### Inledning

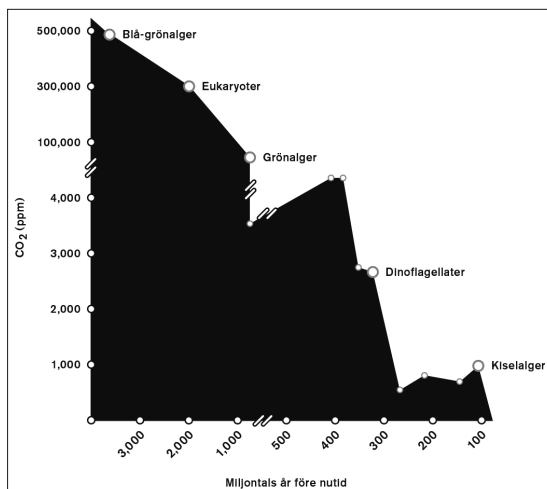
Jordens klimatsystem består av atmosfären (luft, vatten, gaser, moln, partiklar), hydrosfären (oceaner, sjöar, floder, grundvatten) och kryosfären (kontinentalisar, bergs-glaciärer, havsis, snötäckt land). Oceanerna är en av de

viktigaste delarna i klimatsystemet eftersom de lagrar 93 % av jordens totala kolinnehåll. I detta sammanhang så vet vi nu också att växtplankton har en bidragande del i klimatet eftersom deras aktivitet står för ca 50 % av primärproduktionen genom att ta upp koldioxid. Om man kunde packa alla jordens växtplankton i form av en

planka som är 7 cm tjock och 30 cm bred så skulle plankan vara ca 386 000 km lång, ungefär samma avstånd som mellan jorden och månen. Oceanerna har sedan starten av den industriella revolutionen fungerat som en sänka för 30 % av de antropogena utsläppen av kol (Hallegraeff 2010).

Växtplankton är mikroskopiska alger (tex grönalger, kiselalger, blå-grönalger, dinoflagellater) som antingen direkt eller indirekt bildar den flytande näringen för alla vattenlevande djurorganismer i sjöar och hav. Växtplankton kan indelas i tre storleksklasser: mikroplankton (20–200 µm), nanoplankton (2–20 µm) och picoplankton (0.2–2 µm). Ordet plankton härstammar från det grekiska ordet 'planktos' som innebär drift eller glida och används för att beskriva en passiv förflyttning av växter eller djur i vattenmiljöer (Falkowski and Raven 1997).

Vid jordens begynnelse var halterna av koldioxid mycket högre än vad vi har idag och dessutom var den ultraviolettera strålningen också mycket högre. De första fotosyntetiska blå-gröna algerna utvecklades för 3.5 miljarder år sedan, när koldioxidhalterna var 1000 gånger högre än dagens (Figur 1). Sedan följde grönalger för 1000 miljoner år sedan (500 gånger dagens koldioxidhalt), dinoflagellater för 330–400 miljoner år sedan (8 gånger dagens koldioxidhalt) och till sist utvecklades kiselalgerna under relativt låga koldioxidhalter som motsvarade 2–3 gånger dagens koldioxidhalt. Under de sista 800 000 åren har koldioxidhalterna däremot fluktuerat mellan 180 ppm (miljondelar) under glacialtiden (istiden) och 300 ppm under de interglaciala perioderna



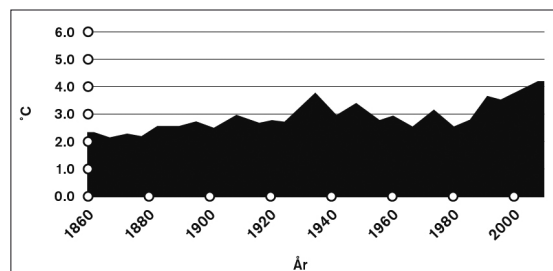
Figur 1. Klimatförändringars påverkan på olika alggruppers utveckling under miljontals år före nutid. Koldioxidhaltens förändring med tiden visas på y-axeln (illustration av Andreas Ekelund).

(Figur 1). Men under de 200 senaste åren så har koldioxidhalterna ökat från 280 ppm till mer än 380 ppm och de framtida prognoserna visar på halter motsvarande 750 till 1000 ppm vid år 2100 (Hallegraeff 2010).

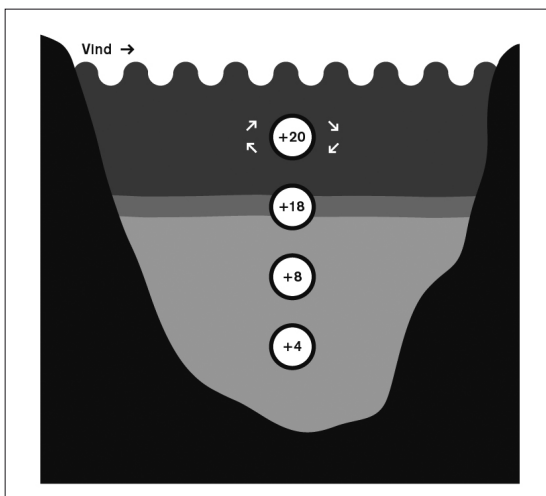
Även jordens temperatur har förändrats med perioder mycket varmare än idag och med perioder som också varit mycket kallare än idag. Emellertid så har den globala temperaturen under de senaste 20–30 åren ökat markant med en prognos motsvarande 2–4 graders ökning inom de närmaste 100 åren (Figur 2). Detta innebär att jorden tidigare har genomgått stora förändringar när det gäller mängden koldioxid och temperaturnivåer, men att dagens förändringar sker under en mycket kortare tid än vad de tidigare förändringarna gjorde.

I och med de långsamma förändringar som tidigare skedde av klimatet så hade organismer möjlighet att på ett annat sätt hinna anpassa sig till en förändrad miljö. Idag sker klimatförändringarna snabbare och för växtplankton som har en kort livstid så innebär detta att de kan reagera snabbt på förändringar i sin närmiljö i jämförelse med andra organismer som har en längre generationstid. Växtplanktonen har förmågan att sprida sig snabbt via vatten till miljöer som passar deras krav på temperatur, salthalt eller andra faktorer (Hallegraeff 2010).

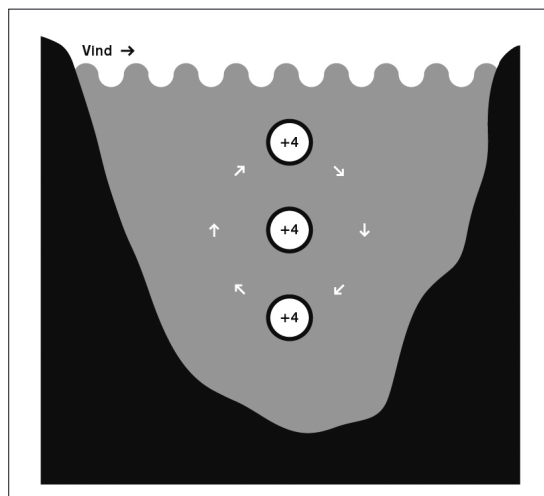
Ett exempel på förändringar är att alger som är anpassade till varmare vatten ökar deras utbredningsområde medan växtplankton som är vana vid kallare vatten får ett mindre utbredningsområde. Den Nord Atlantiska Oscillationen (NAO) som är ett klimatfenomen som beror på förändringar i atmosfärstryck mellan Island och Azorerna resulterar i ett högt NAO-index när västliga vindar ökar och när mildare temperaturnivåer ökar över Nord Europa. Vid ett lågt NAO-index så innebär det kyligt klimat och lägre grad av västliga vindar. NAO har också visat sig att påverka växtplanktonens tillväxtsäsong i Nordsjön som blivit längre och att detta även sammanfaller med en ökad temperatur av havets ytvatten (Hallegraeff 2010).



Figur 2. Årlig medeltemperatur i Sverige under tiden 1860–2010 (från SMHI) (illustration av Andreas Ekelund).



Figur 3. Sommarförhållanden i svensk sjö där ytvattnet blir varmare och lättare än djupare vatten. Gränsen mellan varmare ytvatten och kallare djupvatten kallas språngskikt (illustration av Andreas Ekelund).



Figur 4. Höst- och vårcirkulation i en svensk sjö, vilket ger en jämn temperatur i hela vattenmassan (illustration av Andreas Ekelund).

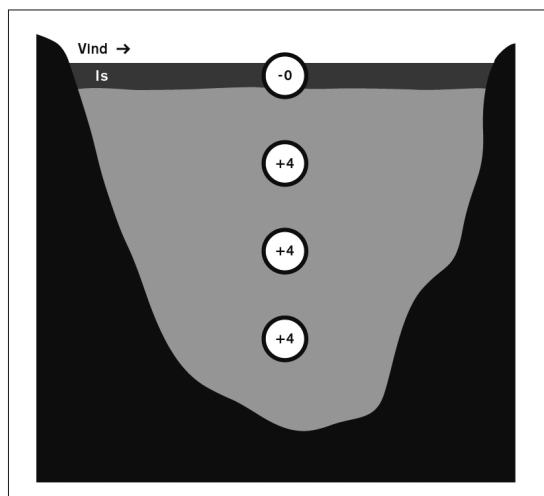
Syftet med denna artikel är att ge en beskrivning av hur klimatförändringar och en ökad temperatur i framtiden kan komma att påverka livet i hav och sjöar.

## Sjöar

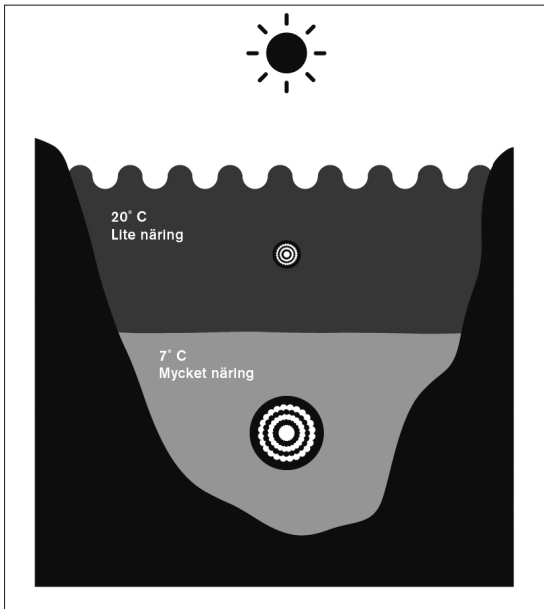
I de flesta sjöar och hav så bildas under sommarmånaderna ett så kallat temperatursprångskikt, vilket innebär att varmare ytvatten blir skilt från kallare djupvatten (Figur 3). Detta språngskikt försvinner sedan under höst- och vintermånaderna då det sker en omrörning av vattenmassan (Figur 4). Studier i USA har visat att språngskiktet förlängts med ett antal dagar under de senaste åren, vilket till största delen beror på att språngskiktet startat tidigare under året (Coats 2010). Detta beror delvis på att isen under vintermånaderna spricker upp tidigare under våren än vad den tidigare gjort (Figur 5) (Markensten 2006). Även i Sverige har studier från sjön Erken visat att tiden för vårsiktningen (språngskikt) ökat, vilket inneburit minskad växtplanktonproduktion men även en förändring av artsammansättningen (Wehenmayer et al. 1999).

En ökad temperatur i sjöar och hav förändrar densitetsgradienten och i sin tur den energi som krävs för att blanda näringsfattigt ytvatten med näringsrikt bottenvatten under den årliga omrörningen av vattnet. En närvaro av en densitetsgradient minskar även bildandet av turbulens i vattnet. Den ökade densitetsgradienten mellan yt- och djupvatten leder även till att det näringsrika djupvattnet inte kommer att transporteras upp till ytan

vilket medför att tillgängligheten på näring för fotosyntetiska organismer minskar i det ljusbelysta ytvattnet. En konsekvens av dessa förändringar blir att växtplankton, som har en god förmåga att ta upp näring, kommer att konkurrera ut de celler som inte har en god förmåga att ta upp näring. En ytterligare fördel kommer de organismer att ha som även har förmågan att vertikalt hålla sig kvar i de övre vattenmassorna där ljusnivån är god (MacIntyre 1993).



Figur 5. Vinterförhållanden i en svensk sjö med isläggning och en vattentemperatur på + 4°C (illustration av Andreas Ekelund).



Figur 6. Prognos för sommarförhållanden i en svensk sjö efter påverkan av klimatförändringar. Följderna kan bli mindre näring i ytvattnet med alger av mindre storlek och mer näring i djupvattnet med alger av större storlek (illustration av Andreas Ekelund).

En trolig konsekvens av att temperaturen ökar i sjöar och hav blir antagligen att sammansättningen av växtplankton kommer att förändras. Om växtplankton som är det första steget i näringskedjan påverkas av en ökad temperatur så kan det få effekter på de djur som äter växtplankton, t.ex. fiskar och kräftdjur. Cellstorleken av växtplankton påverkar faktorer som tillväxt, fotosyntes, andning, näringsupptag vilket i sin tur kommer att påverka hur mycket näring som transporteras mellan olika näringsnivåer och hur mycket organiskt material som transporteras till djupare vatten. I och med att språngskiktet bildas kommer de växtplankton som befinner sig ovanför språngskiktet att ha gott om ljus men lite näring medan växtplankton som lever djupare kommer att ha gott om näring men lite tillgång på ljus (Figur 6). Detta innebär att växtplankton som har förmågan att röra sig kan söka sig till områden med antingen god tillgång på ljus eller god tillgång på näring. Växtplankton som är orörliga är däremot beroende av strömmar och vindar som gör att det blir omrörning och på så sätt ger bra näringsförhållanden. Detta innebär att när vattnet blir varmare i våra sjöar och hav så förändras sammansättningen av växtplanktonarter, vilket innebär att arter som trivs i varmare vatten kommer att konkurrera ut arter som gillar kallare vatten. Om halten av näring blir lägre i det övre skiktet i samband med en förlängning av tiden

för språngskiktet så kan det innebära att mindre plankton kommer att dominera i det övre skiktet eftersom detta kommer att gynna mindre celler istället för större celler (Figur 6). Att mindre celler gynnas vid näringsbrist beror på att de har högre förhållande mellan cellens area och cellens volym vilket innebär att de har ett högre näringsupptag jämfört med större celler som har ett lägre värde i förhållandet mellan cellens area och cellvolym. Mindre celler kommer att dominera i vatten som är lugna och näringsfattiga medan stora celler kommer att trivas i näringsrika vatten och turbulenta vatten. I samband med att språngskiktet bildas på våren så sker också en kraftig tillväxt (algblooming) av växtplankton som konsumerar näringen i den övre delen av språngskiktet och när sedan näringshalten avtar så minskar också mängden växtplankton (Beardall et al. 2009, Winder et al. 2009).

Kiselalger är en av de växtplanktongrupper som är viktiga för upptaget av koldioxid. Detta upptag leder i sin tur till att det kol som kiselalger tar upp kommer att exporteras ner till djupare vatten när cellerna dör och sjunker ner mot botten. I den ekologiska näringskedjan så spelar även kiselalger en roll i och med att de är föda för de organismer (primärkonsument) som äter kiselalger. En skillnad i cellstorlek kommer som en följd även att påverka näringskedjan och oftast så äter större djurplankton större växtplankton vilket leder till en kort näringskedja. Skulle en förändring innebära att mindre växtplankton kommer att dominera så blir även näringskedjan förändrad till att bli mer komplex. En förändring kan till exempel vara att den grupp av kiselalger som kräver mycket näring och dessutom har en dålig flytförmåga kommer att ersättas av andra alggrupper som har en bättre förmåga att överleva i mindre turbulenta vatten. Men det kan också innebära att små kiselalger med ett högt förhållande cell area till cell volym, god upptagningsförmåga av näring, god ljusupptagningsförmåga och en god flytförmåga kommer att konkurrera ut stora kiselalger.

I studier där klimatmodeller använts för att förutspå förändringar i framtiden så har faktorer som temperatur, näring och olika arter av plankton studerats. Modellerna bygger också på data från tidsperioder under slutet på 1900-talet för att sedan kunna förutspå vad som kommer att hända i framtiden. I dessa studier har man bland annat visat att blå-grönalger börjar sin tillväxt tidigare på våren när temperaturen ökar. Men under hösten så minskar mängden blå-grönalger beroende på att den näringsbrist som uppstår efter en kraftig vårblooming begränsar tillväxten på hösten. Mängden blå-grönalger under året kommer därför att vara ganska konstant men det är tillväxtperioderna som kommer att förskjutas eller förändras under året (Elliot 2012).

## Marina ekosystem

Effekter av klimatförändringar på marina ekosystem förknippas för det mesta med förändringar av havstemperaturen, cirkulation av havsströmmar, skiktningförhållanden, näringsförhållanden och pH, vilka alla ger olika biologiska effekter. Den primärt direkta konsekvensen av klimatförändringarna på haven är en temperaturhöjning. En ökad havstemperatur skapar i sin tur en rad olika effekter som en höjd havsnivå, en ökad skiktning av havet, minskad mängd havsis, ett förändrat mönster av havsströmmar, nederbörd och färskvatten inflöde till haven. Dessa förändringar kan sedan få fysiologiska följder för de organismer som lever i haven som till exempel ändrat beteende och produktionsförändringar, vilket kan få till följd att populationer av organismer förändras till storlek, byter levnadsområde eller förändrar tiden för tillväxt under året. Emellertid så fungerar inte en ökad koldioxidhalt som en isolerad händelse utan måste ses i ett sammanhang med effekter från bland annat övergödning, förstörelse av kustområden, överfiske och ett ökat utnyttjande av havet för produktion av fisk och alger (akvakultur). Därför måste effekter på marina ekosystem ses utifrån en helhet där både icke koldioxid- och koldioxidbundna effekter inkluderas (Doney et al. 2012).

De marina områden som framförallt är känsliga för de klimatförändringar som pågår är områden kring Arktis och Antarktis beroende på isavsmältningarna och tropiska vatten där korallekosystemen är känsliga för små förändringar i temperaturen. För de Arktiska och Antarktiska havsområdena så har drastiska minskningar av havsisen skett i Arktis medan de största minskningarna av isen i Antarktis har skett längs med den Antarktiska halvön under framförallt sommaren. I Arktis så förväntas isarna vara försvunna under sommaren med start ungefär omkring år 2050 om inte tidigare. Dessutom kommer den tjocka isen att ersättas av en tunnare årlig is. Beroende på den pågående temperaturhöjningen så kommer en termisk expansion och en smältning av landfast is (glaciärer och inlandsis) att ske, vilket kommer att orsaka en höjning av havsnivån med ungefär 3 mm per år (Doney et al. 2012).

De fysikaliska förändringar som sker vid polerna sker snabbare än vid många andra havsområden i världen och kan på så sätt fungera som en varningsklocka när det gäller konsekvenserna för komplexa marina ekosystem. En av effekterna vid en minskning av havsisen kan bli ett ökat ljusinflöde ner på djupet i havet som i sin tur ger en ökad primärproduktion av växtplankton. Men möjligheten finns att denna ökning av primärproduktionen begränsas av näringstillgången. Dessutom kan en förändring av artsammansättningen av växtplankton för-

ändras så att mindre celler kommer att dominera på grund av ett ökat sötvattensinflöde. Ett annat exempel som beskriver de förändringar som pågår i Arktis är produktionen av djurplankton som är beroende av den is som bildas varje vår vid kantlinjen av den Arktiska isen. Försvinner denna isbildning så minskar produktionen av djurplankton vilket får negativa följder för de djur som är beroende av djurplankton i sin föda.

I Antarktis så har temperaturen ökat med 6 grader i havet vid Antarktiska halvön sedan 1950-talet. Antalet dagar som är isbelagda har minskat med 90 dagar sedan satellitmätningar startades 1978. Minskningen av havsis i Antarktis är troligen orsaken till de stora förändringar som skett ute i det öppna havet där mängden krill (lyskräfter) minskat rejält sedan 1950, med en motsvarande ökning av salper (Doney et al. 2012, Schloss et al. 2012). Förändringar som dessa kan orsaka stora förändringar i den ekologiska näringskedjan i det öppna havet (Doney et al. 2012).

I tropiska vatten förekommer ungefär 25 % av alla marina arter och de är associerade till koraller. Effekter av klimatförändringar på koraller är sedan tidigare väl känt och ljusblekning av koraller beror på att havets temperatur ökat samtidigt med en intensiv solstrålning. I korallerna dör de delar (zooxantheller) som är växtplankton (dinoflagellater) och vars funktion är att utföra fotosyntes för att förse resten av korallen med energi. Beroende på den genetiska mångfalden inom koralllevande arter så kommer en mindre ökning av temperaturen att orsaka mindre förändringar men skulle däremot temperaturökningen bli väldigt markant så kommer antagligen en mer omfattande blekning och död att förekomma hos koralllevande organismer. En ytterligare effekt från en ökad koldioxidhalt i atmosfären är det ökade upptaget av koldioxid till haven som ger en minskning av pH. Försurningen har ökat beroende på en minskning med 0.1 pH enheter sedan den industriella revolutionen startade. En försurning innebär att förhållandet mellan karbonatjoner och kalciumkarbonat förändras vilket innebär att korallernas förmåga att bilda kalskelett försämras. Tillväxten av korallerna försämras och deras kalskelett blir glesare vilket dessutom gör att de blir känsliga för stormar. Förutom dessa direkta effekter av klimatförändringar så kommer även de organismer som har koraller som sitt habitat att påverkas. Om habitatet förändras väldigt mycket så kommer antagligen även antalet arter som lever i dessa habitat att minska. En återhämtning av korallskador har visat sig att ske snabbare om korallernas anknytning till mangroveområden var intakta. Detta innebär också att effekter av klimatförändringar på koraller antagligen inte blir lika stora om korallerna har en fungerande koppling till mangroveområden (Doney et al. 2012).

## Sammanfattning

Sammanfattningsvis så innebär de pågående klimatförändringarna att varken sötvatten eller marina ekosystem lämnas opåverkade. Effekterna är framförallt påtagliga för områdena kring Antarktis och Arktis på grund av den minskade mängden havsis. I tropiska vatten så är risken att en minskning av havets pH försämrar möjligheterna för korallerna att bilda sina nödvändiga och livsviktiga kalkskelett. För sötvattenssystem innebär det att islossningen sker tidigare under året och om islossningen sker tidigare blir växtsäsongen för växtplankton längre och perioden för stratifieringen kan även den förlängas. En trolig effekt av klimatförändringarna och en ökad temperatur i sjöarna är att tiden för tillväxt av blå-grönalger kommer att förändras, vilket innebär en kraftigare och tidigare tillväxt under våren. I förlängningen så innebär detta antagligen också att även artsammansättningen av växtplankton förändras. Klimatförändringarna kommer i det stora hela att påverka näringskedjor och näringsflöden i akvatiska ekosystem, som på sikt även kommer att ge effekter på de sociala och mänskliga system som är beroende av de organismer som lever i akvatiska system.

## Referenser

- Beardall, J., Allen, D., Bragg, J., Finkel, Z.V., Flynn, K.J., Quigg, A., Rees, T.A.V., Richardson, A. and Raven, J.A. (2009) Allometry and stoichiometry of unicellular, colonial and multicellular phytoplankton. *New Phytologist*, 181: 295–309.
- Coats, R. (2010) Climate change in the Tahoe basin: regional trends, impacts and drivers. *Climate Change* 102: 435–466.
- Doney S.C., Ruckelshaus M., Duffy J.E., Barry J.P., Chan F., English C.A., Galindo H.M., Grebmeier J.M., Hollowed A.B., Knowlton N., Polovina J., Rabalais N.N., Sydeman W.J. and Talley L.D. (2012) Climate change impacts on marine ecosystems. *Annu. Rev. Mar. Sci.* 4: 11–37.
- Elliot J.A. (2012) Is the future blue-green? A review of the current model predictions of how climate change could affect pelagic freshwater cyanobacteria. *Water Research* 46: 1364–1371.
- Falkowski, P.G. and Raven J.A. (1997) *Aquatic Photosynthesis*. ISBN 0-86542-387-3. Blackwell Science.
- Hallegraeff G.M. (2010) Ocean climate change phytoplankton community responses, and harmful algal blooms: a formidable predictive challenge. *J. Phycol.* 46: 220–235.
- MacIntyre, S. (1993) Vertical mixing in a shallow, eutrophic lake: Possible consequences for the light climate of phytoplankton. *Limnology and Oceanography*, 38(4): 798–817.
- Markensten H. (2006) Climate effects on early phytoplankton biomass over three decades modified by the morphometry in connected lake basins. *Hydrobiologia* 559: 319–329.
- Schloss I.R., Abele D., Moreau S., Demers S., Bers A.V., González O. and Ferreyra G.A. (2012) Response of phytoplankton dynamics to 19-year (1991–2009) climate trends in Potter Cove (Antarctica). *J. of Marine Systems* 92: 53–66.
- Wehenmayer, G.A., Blencker, T. and Petterson, K. (1999) Changes in the plankton spring outburst related to the North Atlantic Oscillation. *Limnology and Oceanography*, 44: 1788–1792.
- Winder, M., Reuter, J.E. and Schladow, S.G. (2009) Lake warming favours small-sized planktonic diatom species. *Proceeding of the Royal Society, B.* 276: 427–435.