

## 6 Súrnun sjávar

### Samantekt

1. Súrnun hafsins er staðreynd, staðfest með beinum mælingum og fræðilegum reikningum.
2. Til að komast hjá stórfelldum breytingum á lífríki og vistkerfum í höfunum þarf að minnka losun CO<sub>2</sub> stórlega. Framtíð hafsins ræðst af því hvernig losun manna á koltvíoxíði verður háttáð og til hvaða aðgerða verður gripið fyrir en síðar.
3. Súrnun sjávar hefur nú þegar haft neikvæð áhrif á lífríki hafsins og skelfiskræktun.
4. Vegna aðstæðna í hafinu hér nyrst í Atlantshafi er súrnun sjávar miklu örari þar en að jafnaði í heimshöfunum. Því er líklegt að sjórinn hér við land hafi súrnað meira eftir iðnvæðingu heldur en heimshöfin að jafnaði. Örustar breytingar eru í yfirborði sjávar og líklegt er að náttúruleg árstíðasveifla á sýrustigi í yfirborði sjávar sé komin út fyrir það svið sem lífríkið hafði aðlagast fyrir iðnvæðingu. Súrnunin er hægari í dýpri sjávarlögum en nær til botns á 1800 m dýpi þar sem súrnun er vöktuð í Íslandshafi.
5. Kalkmyndandi lífríki er talið einkar viðkvæmt fyrir áhrifum súrnunar. Vegna eiginleika sjávar og lágs sjávarhita er kalkmettunarstig í hafinu við Ísland og í Norðurhöfum almennt náttúrulega lágt. Við þessar aðstæður leiðir súrnun fyrir til undirmettunar kalks heldur en að jafnaði í heimshöfunum.
6. Líklegt er að neikvæð áhrif súrnunar á lífríki og vistkerfi sjávar komi fyrir fram á íslenskum hafsvæðum en að jafnaði í heimshöfunum. Áhrif á efnahagslega mikilvægar tegundir geta birst óvænt eins og gerðist í ostruræktun við Kyrrahafsstrendur

N-Ameríku. Áhrifin geta komið fram, án þess að eftir því sé tekið, hjá tegundum í lífríkinu sem eru ekki nýttar.

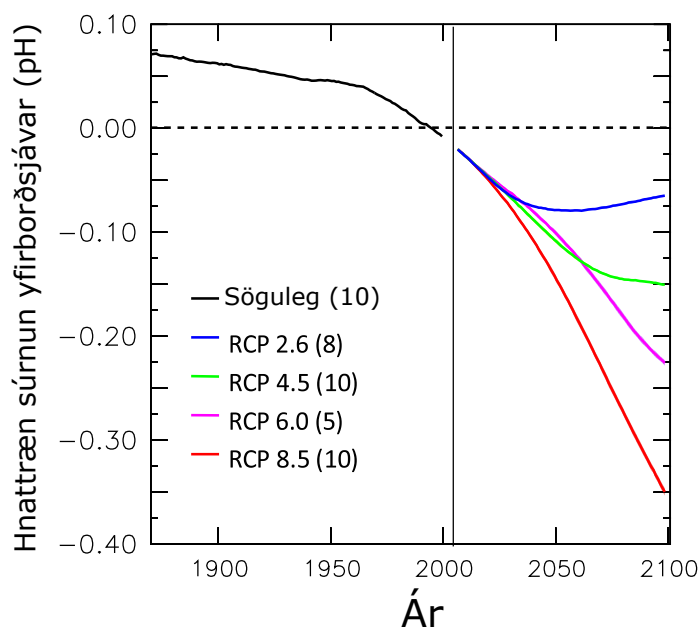
### 6.1 Inngangur

Hafið tekur upp hluta þess koltvíoxíðs sem losað er í andrúmsloftið og veldur það súrnun sjávar. *Sýrustig yfirborðssjávar hefur fallið um 0.1 pH-stig frá upphafi iðnhyltingar, sem samsvarar 26% aukningu í styrk vetnisjóna H<sup>+</sup> (mikil víska). Fall sýrustigs yfirborðssjávar nemur 0.0014 til 0.0024 pH stigum á ári. Auk þessarar upptöku á CO<sub>2</sub> úr lofthjúpunum geta náttúruleg ferli breytt sýrustigi sé litið til áratuga eða lengri tíma.*

Þessa staðreynd má finna í kafla um súrnun sjávar í fimmtu matsskýrslu IPCC (2013)<sup>1</sup> og í þessum kafla verður farið yfir þær forsendur sem liggja að baki hennar, auk þess sem súrnun sjávar á Íslandsmiðum og áhrif verða rædd sérstaklega. Hraðasta súrnunin sem minnst er á í setningunni hér að ofan (0.0024 pH stig á ári) mælist í Íslandshafi, svæðinu milli Íslands og Jan Mayen.

Súrnun sjávar vísar til þess að sýrustigið, pH, lækki með tímanum, áratugum, vegna þess að sjórinn tekur upp koldíoxíð úr lofti, sem sífellt eykst vegna athafna manna. Það eru náttúrulegar árstíðasveiflur á sýrustigi sjávar vegna myndunar lífræns efnis við ljóstillifun og eyðingu þess við niðurbrot. Enn fremur getur sýrustigið breyst vegna annarra náttúrulegra efnaferla, eldgosa í sjó, langtímabreytinga á frjósemi sjávar og vegna brennisteins- og nitursambanda sem berast í andrúmsloft

Mynd 6.1 Áætluð framtíðarþróun meðalsýrustigs (pH) í yfirborði hafsins frá 1870 til 2100 miðað við sögulegar mælingar og sviðsmyndir um losun gróðurhúsalofttegunda. Eins og fram kemur í grein 3.10 myndi samdráttur losunar í takt við sviðsmynd RCP2.6 nægja til þess að uppfylla ákvæði Parísarsamkomulagsins um að halda hlýnun innan við 2°C og þetta er eina sviðsmyndin þar sem súrnun sjávar hættir. Í aðdraganda Parísarsamkomulagsins sendu aðildarþjóðir Sp loforð um samdrátt í losun, og losun í samræmi við þau fer nærri því að fylgja RCP4.5 (Sjá tilvísun 3).



og sjó. Súrnun sjávar er skilgreind sem lækking á pH-stigi vegna athafna manna<sup>1</sup>. Hér verður einkum tekið mið af langtímabreytingum á sýrustigi sjávar og tengslum þeirra við styrk koltvíoxíðs í andrúmslofti.

Mynd 6.1 sýnir hvernig sýrustig í yfirborði hafsins lækkaði að meðaltali á liðinni öld. Hvað framtíðin ber í skauti sér er háð því hvernig til tekst við að hemja losun á CO<sub>2</sub>. Með róttækri minnkun losunar, sem RCP2.6 ferillinn sýnir og er nálægt markmiði Parísarsamkomulagsins<sup>2</sup>, er ennþá mögulegt að snúa þróuninni við þannig að pH fari heldur að hækka á síðari hluta aldarinnar<sup>3</sup>. Óheft losun, samkvæmt sviðsmynd RCP8.5 leiðir til mikillar lækkunar sýrustigs, um 0.4. Einungis minnkandi losun sem nemur ásetningi aðildarþjóða Parísarsamkomulagsins mun duga til þess að hægja á þróuninni, sýrustig mun þó halda áfram að falla út öldina.

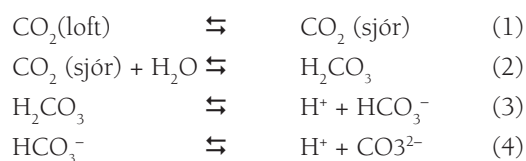
## 6.2 Efnafraeðihlið súrnunar sjávar

Frá upphafi iðnvæðingar hefur losun á koldíoxíði, CO<sub>2</sub>, í andrúmsloft vegna brennslu á jarðefnaeldsneyti, vegna iðnaðar og landnotkunar, leitt til þess að styrkur CO<sub>2</sub> í lofti hefur vaxið úr 278 ppm árið 1750 og ekki farið undir 400 ppm síðan 2015<sup>4</sup>. Heimshöfin hafa fram til ársins 2010 tekið upp um um 155PgC, eða um 28% af því CO<sub>2</sub> sem losað hefur verið til andrúmslofts, 555PgC<sup>5,6</sup>.

Ef ekki hefði notið upptöku sjávar á CO<sub>2</sub> úr lofti

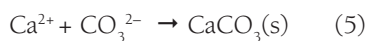
hefðu gróðurhússáhrif í andrúmslofti orðið enn öflugri og áhrif hlýnunar enn meiri en ella. Á móti kemur, að þegar CO<sub>2</sub> leysist upp í sjó veldur það verulegum áhrifum á kolefniskerfið þar. Meðalgildi pH í yfirborðssjó hafsins hefur lækkað um 0.1, úr 8.2 í 8.1. Þar eð pH er styrkur H<sup>+</sup> á lograkvarða þýðir meðallækkun pH í yfirborði heimshafanna að styrkur H<sup>+</sup> hefur vaxið um 26%.

Sveiflur á sýrustigi sjávar, pH, stjórna fyrst og fremst af flæði CO<sub>2</sub> milli lofts og sjávar, ásamt lífríkisferlunum, tillífum sem felur í sér bindingu kolefnis úr sjó í lífrænan vef og öndun/rotun á lífrænu efni sem leiðir til losunar á CO<sub>2</sub> í sjó. Þegar lofttegundin CO<sub>2</sub> berst um yfirborð hafsins úr lofti til sjávar hefur það áhrif á fjögur efnaferli sem breyta styrk efna sem samanlagt mynda ólífræna kolefniskerfið í sjó: Uppleyst CO<sub>2</sub> (sjór), kolsýra (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), vetniskarbonsat (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) og karbonsat (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>). Samanlagður styrkur efnaferlanna fjögurra er nefndur TCO<sub>2</sub> (tafla 6.2). Efnajafnvægin eru þessi:



Fyrsta efnajafnvægið lýsir uppleysingu koltvíoxíðs í sjó. Allar lofttegundir andrúmsloftsins leysast upp í sjó, uppleysanleiki þeirra er mismunandi en hann eykst

þegar hitastig lækkar. Uppleysanleiki koltvíoxíðs fer vaxandi í sjó sem flæðir með Golfstraumi norður Atlantshaf og er í fyrstu um 25°C. Sjórinn kólnar á leiðinni og uppleysanleikinn er tvöfalt meiri þegar komið er í Norðurhöf. Þetta er ein helsta ástæða þess að sjórinn í N-Atlantshafi tekur upp mikið CO<sub>2</sub> úr lofti. Það myndast vetnisjónir, H<sup>+</sup>, í efnajafnvægjum 3 og 4. Við aukinn styrk H<sup>+</sup> í sjó lækkar pH, sjórinn súrnar. Það fara meira en 99.9% af vetnisjónum sem myndast í efnajafnvægi 3 í að eyða karbónati, efnajafnvægi 4 gengur þá til vinstri og styrkur vetniskarbónats (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) eykst en styrkur CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> lækkar. Í súrnun sjávar felst því lækkun pH (aukinn styrkur H<sup>+</sup>) og lækkun á styrk karbónats, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, en hækkun á styrk vetniskarbónats (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>). Karbónat er annað byggingarefnið til myndunar kalks, CaCO<sub>3</sub>, á móti Ca<sup>2+</sup>, kalsínjón, sem er eitt af aðalefnum í seltu sjávar og því í nægum styrk til kalkmyndunar:



Súrnun sjávar getur því haft áhrif á kalkmyndun hjá lífverum hafsins þegar styrkur CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> lækkar og leysni kalks, CaCO<sub>3</sub>, eykst. Efnajafnvægin 1–4 eru í samhangandi og jafnvægisfastarnir, sem eru vel þekktir, eru háðir hita, seltu og þrýstingi (dýpi). Sé styrk einhvers þáttar breytt, þá hliðrast allt kerfið í átt að nýju jafnvægi. Í venjulegum yfirborðssjó með pH=8.1 eru 90% kolefnisins sem vetniskarbónat, um 9% sem karbónat en aðeins um 1% sem lofttegundin CO<sub>2</sub> uppleyst í sjónum.

Súrnun sjávar er afleiðing efnafræðilegra eiginleika sameindarinnar CO<sub>2</sub>, koltvíoxíðs, en gróðurhúsaáhrif eru afleiðing eðliseiginleika sameindarinnar CO<sub>2</sub>. Þó er súrnun ekki óháð hlýnun sjávar. CO<sub>2</sub>, sem sjór dregur í sig úr lofti, tekur ekki þátt í gróðurhúsaáhrifunum en hlýnun sjávar dregur úr uppleysanleika CO<sub>2</sub> í sjó og þar með getu sjávar til að taka upp og binda CO<sub>2</sub> úr lofti.

### 6.3 Áhrif súrnunar á kalkmyndum í lífríki hafsins

Lækkun á styrk karbónats, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, við súrnun sjávar leiðir til þess að efnajafnvægi 5 hliðrast. Það á við um uppleysanleika kalks. Kalk, CaCO<sub>3</sub>, er fast efni og langmest af því kalki sem er í hafinu og á hafsbotni hafa lífverur myndað. Kalk getur leyst upp í sjó en uppleysan-

leiki þess er háður aðstæðum; hita, þrýstingi (dýpi) og styrk kalsíns og karbónats í umhverfinu. Eiginleikar kalks eru breytilegir eftir kristalbyggingu þess, t.d. er uppleysanleiki breytilegur. Helstu byggingarform kalks, sem lífverur sjávar mynda, eru kalsít, aragónít og magnesíumblandað kalsít. Aragónít og magnesíumblandað kalsít eru uppleysanlegri kalkgerðir en kalsít. Þar eð súrnun sjávar leiðir til lækkandi styrks á karbónati eru lífverur sem mynda aragónít taldar viðkvæmari heldur en þær sem mynda kalsít. Aðstæður gagnvart kalkleysni eru settar fram sem Omega-gildi, Ω, kalkmettunarstig. Omega-gildið er varmafræðileg stærð sem ræðst af styrk jóna, Ca<sup>2+</sup> og CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, og umhverfis- aðstæðum, hita, seltu og þrýstingi. Fyrir aragónít er kalkmettunarstig, Ω<sub>ar</sub>, skilgreint sem:

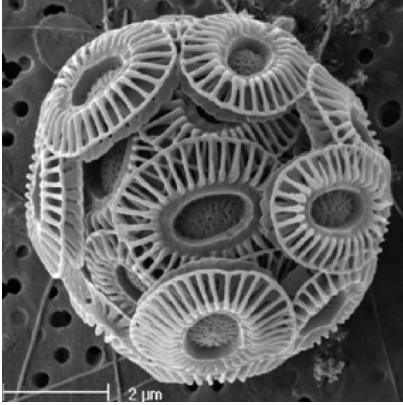
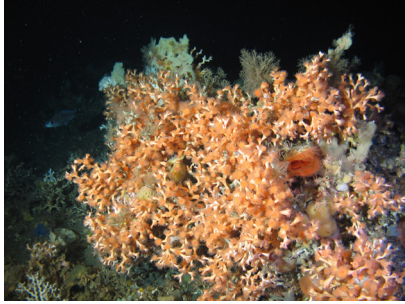
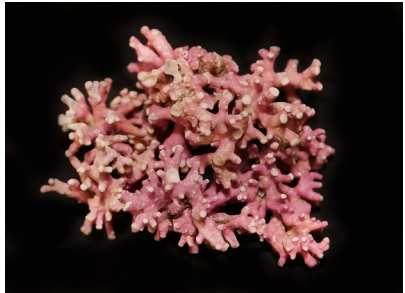
$$\Omega_{\text{ar}} = \frac{[\text{Ca}^{2+}][\text{CO}_3^{2-}]}{K_{\text{sp}}}$$

þar sem K<sub>sp</sub> er leysnimargfeldi kalks á aragónítformi. Það er nú orðin venja, þegar rætt er um breytingar vegna súrnunar, að taka mið af kalki á aragónítformi, því lífverur sem mynda aragónít kalk eru viðkvæmari gagnvart súrnun en þær sem mynda kalsít. Þriðja kristalform kalks í sjávarlífverum er magnesíumblandað kalsít, sem er einnig uppleysanlegra en kalsít. Í töflu 6.1 eru dæmi um kalkmyndandi lífverur í hafinu við Ísland, á botni eða uppi í sjó, og myndar hver sína gerð kalks.

Kalkmettunarstig má nota til að lýsa því hvort aðstæður eru almennt hagstæðar lífríkinu til kalkmyndunar eða hvort líklegt sé að kalk leysist upp:

- Ω < 1 Undirnettun og kalk hefur tilhneigingu til að leysast upp.
- Ω = 1 Sjór í efnafræðilegu jafnvægi gagnvart kalkleysni.
- Ω > 1 Sjór er yfirmettaður og aðstæður almennt hagstæðar kalkmyndandi lífríki.

Þó að sjór sé yfirmettaður og omega > 1, þá er ólífræn útfelling á kalki í raun mjög hægfara ferli og heimshöfn eru víðast hvar yfirmettuð í yfirborði, hlý svæði sérstaklega þar sem há omega-gildi eru algeng. Kalk leysist betur upp í köldum sjó en heitum og því eru omega-gildi á köldum svæðum, t.d. í Norðurhöfum, náttúrulega lægri en t.d. á hitabeltissvæðum. Fyrir vikið

Kalkgerð	Dæmi	Mynd
Kalsít	Kalksvifþörungar (Coccolithophores)  <i>Emiliana huxleyi</i>  Mynd: Jeremy R. Young, Natural History Museum of London.	
Aragónít	Rifmyndandi kaldsjávarkórallar.  <i>Lophelia pertusa</i> í Lónsdjúpi.  Mynd: Hafrannsóknastofnun	
Magnesiumblandað kalsít	Kalkmyndandi rauðþörungar í Arnarfirði  <i>Lithothamnion spp.</i>  Undirstaða kalkþörungavinnslu  Mynd: Hrönn Egilsdóttir	

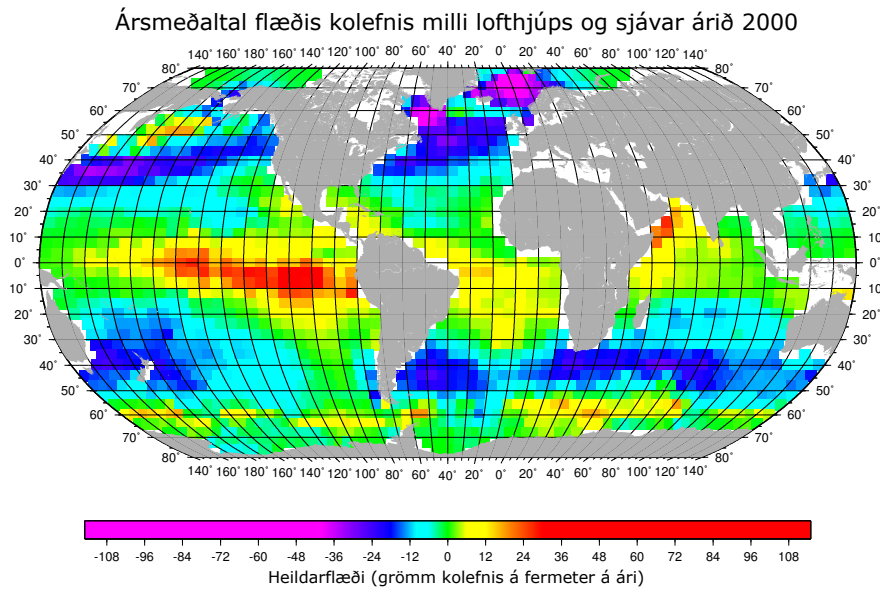
Tafla 6.1 Helstu gerðir kalks sem lífverur sjávar mynda.

færast kalkmettunarstig nú hraðar að undirmettun,  $\Omega_{ar} < 1$ , á köldum svæðum en þeim sem heitari eru. Norður-Íshafið, þar sem  $\Omega$  er um 1.5 við yfirborð, færast stöðugt nær þessum mörkum<sup>7</sup>.

#### 6.4 Mat á breytingum við vaxandi styrk CO<sub>2</sub> lofti

Á grundvelli vel þekktra staðreynda um jafnvægisfasta CO<sub>2</sub> í sjó má lýsa því hvernig ólífræna kolefniskerfið í sjó hliðrast til þegar umhverfisaðstæður breytast, t.d. þegar styrkur CO<sub>2</sub> í lofti vex og jafnvægi næst við yfirborðssjó. Í töflu 6.2 aftast í kaflanum eru bornir

saman eiginleikar sjávar sem er í jafnvægi við andrúmsloft eins og það var fyrir iðnvæðingu (280 ppm CO<sub>2</sub>), eins og svipar til okkar daga (400 ppm), eins og verður við tvöfaldan styrk CO<sub>2</sub> í lofti (560 ppm) með og án 2°C hlýnunar, og loks eins og verður ef CO<sub>2</sub> styrkur í lofti nær 900 ppm. Sjórinn í dæminu gæti verið hlýsjór sunnan Íslands að vetrarlagi, fyrir iðnvæðingu 5°C heitur en við tvöföldun á CO<sub>2</sub> í lofti orðinn 7°C.



Mynd 6.2 Flæði  $\text{CO}_2$  milli lofts og sjávar á ársgrundvelli. Á bláum og fjólubláum svæðum dregur hafið til sín  $\text{CO}_2$  að jafnaði en á gulum og rauðum svæðum er flæðið að jafnaði úr sjó til lofts. Mynd uppfærð frá heimild 8.

Í töflu 6.2 sést að:

- Á okkar tímum hefur sýrustig fallið um 0.14 og styrkur  $\text{H}^+$  vaxið um 37% frá því sem var í sjónum fyrir iðnvæðingu, mun meira en að jafnaði í heimshöfunum (26%).
- Á okkar tímum er styrkur karbónats,  $\text{CO}_3^{2-}$ , 24% lægri en fyrir iðnvæðingu og mettnarstig aragónít-kalks hefur lækkað úr 2.18 í 1.67.
- Hækkandi hiti vinnur á móti lækkanði  $\text{CO}_3^{2-}$  og mettnarstigi. Tveggja gráðu hlýnun við tvöfaldan  $\text{CO}_2$  styrk í lofti hækkar mettnarstig aragónít-kalks um 0.1, úr 1.27 í 1.38.
- Þegar  $\text{CO}_2$  í lofti eykst enn frekar í 560 ppm færast breytingar á karbónatkerfi sjávar áfram í sömu átt, og ef hann nær 900 ppm  $\text{CO}_2$  verður pH fallið í 7.7 og sjórinn orðinn undirmettaður af aragónít-kalki.
- Meðalgildi á sýrustigi yfirborðssjávar, pH, er um 8.1. Það sýnir að sjór er í raun veikt basískur. Jafnvel við óhefta losun verður sýrustigið áfram basískt. Í framtíð heldur sjór áfram að hlýna án þess að verða heitur og súrna án þess að verða beinlínis súr.

Kalkmettnarstig má reikna með hliðsjón af mældum efnaeiginleikum sjávar eða að gefnum forsendum eins og gert er í töflu 6.2. Kalkmettnarstigið er efnafræðilegur mælikvarði, góður til að meta upptöku sjávar á  $\text{CO}_2$  með tíma og hvort sjór sé undir- eða yfirmettaður. Hins vegar tengjast áhrif súrnunar á kalkmyndandi lífverur ekki kalkmettnargildum á einhlítan hátt.

## 6.5 Svæðatengdur breytileiki á súrnun hafsins

Losun koltvíoxíðs til andrúmslofts er miklu meiri á norðurhveli en á suðurhveli en veðrakerfin og blöndun í lofthjúpnunum sjá til þess að styrkur  $\text{CO}_2$  í lofthjúpnunum á Suðurskautlandinu fylgir norðurhvelinu eftir með eins til tveggja ára seinkun. Við yfirborð heimshafanna eru aðstæður breytilegar með tilliti til flæðis  $\text{CO}_2$  milli lofts og sjávar. Því er flæðið ærið misjafnt. Á sumum svæðum dregur hafið til sín meira  $\text{CO}_2$  úr lofti en það gefur frá sér. Á öðrum svæðum er þessu öfugt farið. Mynd 6.2 af heimshöfunum sýnir glögggt að Norður-Atlantshaf sker sig úr því á hverju ári tekur það til sín miklu meira  $\text{CO}_2$  en það lætur frá sér<sup>8</sup>. Það veldur súrnun. Rannsóknir á ferlum í lífríki og haffræði Norður-Atlantshafsins sem koma þar við sögu eru því og verða í brennidepli.

Varðandi heimshöfin öll er talið að sjór dragi til sín úr lofti um 9.7 Gt  $\text{CO}_2$  á ári meira kolefni heldur en flæðir úr sjó til lofts. Það er um fjórðungur þess sem losað er af manna völdum<sup>9</sup>.

## 6.6 Rannsóknir á áhrifum súrnunar sjávar á lífríki

Súrnun sjávar var lítt í umræðunni fyrr en undir lok síðustu aldar. Undanfarna tvo áratugi hafa stóruaust rannsóknir á súrnun sjávar og afleiðingum fyrir lífríki hafsins. Alþjóðleg verkefni hafa beinst að súrnun sjávar og ráðstefnur um súrnun eru haldnar reglulega.

Hafrannsóknastofnun hefur tekið þátt í norrænum og evrópskum rannsóknum á súrnun sjávar og lagt fram niðurstöður rannsókna á íslenskum hafsvæðum. Árlega birtast hundruð vísindagreina um rannsóknir á súrnun<sup>10</sup>.

Vegna þess að önnur helsta breyting á eiginleikum sjávar við súrnun er lækkun á styrk karbónats, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> má búast við áhrifum á kalkmyndandi lífverur í sjó. Hin meginbreytingin, lækkun pH, aukinn styrkur H<sup>+</sup>, getur haft víðtækari áhrif þar eð fjölmörg lífefaerli eru tengd styrk H<sup>+</sup>, pH<sup>10</sup>. Rannsóknir á áhrifum súrnunar beindust í fyrstu einkum að kalkmyndandi lífverum, t. d. svíflægum kalkþörungum og kóröllum<sup>11</sup>. Rannsóknir hafa orðið víðtækari með tilraunum á rannsóknastofum og úti í náttúrunni<sup>12</sup>. Sveiflur í lífríki, umhverfi og koldíoxíðstyrk í lofti á fyrri tímum í sögu Jarðar hafa sagt sögu um útrýmingu tegunda<sup>13</sup>. Vaxandi þekking er núorðið fléttuð inn í líkön og þannig er reynt að skyggjast inn í framtíðina. Með þeim hætti hafa áhrif á efnahagslega mikilvæg vistkerfi<sup>14</sup> og tegundir verið rannsökuð. Fyrir tilstilli Norrænu ráðherranefndarinnar hefur verið tekin saman skýrsla um súrnun sjávar í Norðurhöfum og Norður-Íshafi því þar er pH og kalkmettunarstig náttúrulega lágt<sup>15</sup>. Í mikilvægum yfirlitsgreinum hafa fjölmargir sérfræðingar dregið saman rannsóknaniðurstöður og lagt mat á hugsanlega þróun fram eftir öldinni og áhrif af breytingum á sjó og lífríki<sup>16,17,18</sup>.

Þegar eru dæmi um það að súrnun sjávar hafi haft neikvæðar efnahagslegar afleiðingar. Svo háttar til um hafræðilegar aðstæður á landgrunninu og strandsvæðum við Kyrrahafsstrendur N-Ameríku að kalkmettunarstig er lágt og áhrif súrnunar sjávar geta orðið meiri þar en víðast annars staðar. Á þessum slóðum hefur súrnun haft mikil efnahagsleg áhrif á rekstur eldisstöðva þar sem klaktar eru út ostrulirfur til áframeldis. Í stöðvum, þar sem dælt var inn strandsjó, tók að bera á framleiðslubresti 2006 og meðfylgjandi tekjutapi sem rannsóknir sýndu að rekja mætti til lágs kalkmettunarstigs, Ω<sub>ar</sub>, í sjónum á svæðinu<sup>19</sup>. Við þessu var brugðist með því að fylgjast náið með eiginleikum sjávarins sem var notaður, beita efnafraeðiaðferðum til að hækka kalkmettunarstigið en sum fyrirtæki fluttu starfsemi sína brott af svæðinu<sup>20</sup>. Athyglisvert er að ostrulirfur í ræktunarstöðvunum þurftu sjó með lágmarks kalkmettunarstig til þess að ná þroska og byrja að mynda kalkskel. Í lífssögu ostrunnar ræðst þetta á 1–2

dögum eftir klak. Lirfur sem komast ekki yfir þennan áfanga eru úr sögunni.

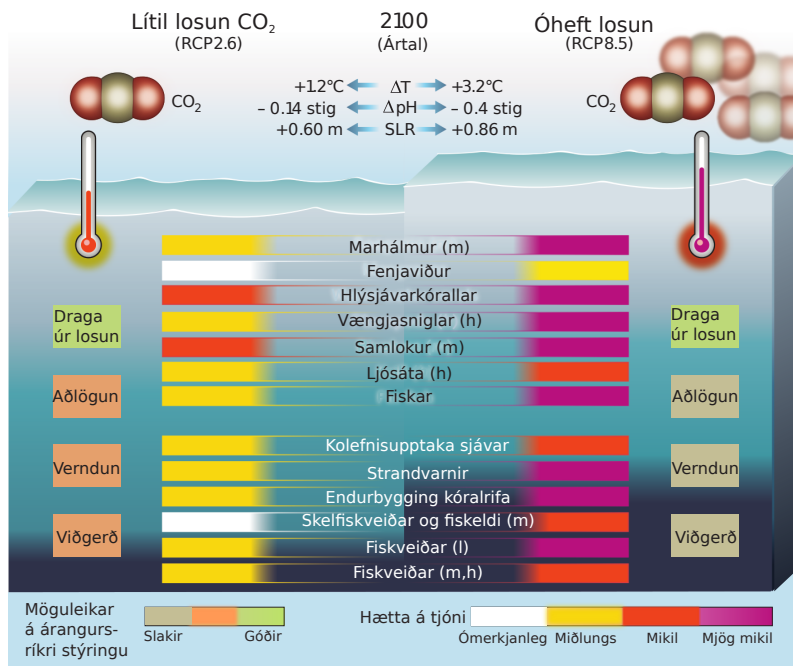
## 6.7 Afleiðingar súrnunar, tvær sviðmyndir

Sumarið 2015, skömmu fyrir fundinn sem leiddi til Parísarsamkomulagsins, var birt yfirlitsgrein þar sem fjallað var um líkleg áhrif umhverfisbreytinga og hvernig lífríki og vistkerfi hafsins yrðu árið 2100, annars vegar við losun CO<sub>2</sub> samkvæmt RCP2.6 ferlinum og hins vegar við óhefta losun, samkvæmt RCP8.5 ferlinum<sup>18</sup>. Í yfirlitsgreininni voru dregnar saman niðurstöður úr tilraunum, beinum mælingum og úr líkönum. Á mynd 6.3 er helstu niðurstöðum lýst á myndrænan hátt.

Vinstri hluti myndarinnar sýnir sviðsmynd RCP2.6 með 1.2°C hlýnun, sjávarborðshækkun 0.60 m og pH lækkun um 0.14 einingar. Hér má rifja upp að í þessari sviðsmynd tekur pH að hækka á ný eftir miðja öldina (mynd 6.1). Á litakvarða sem gefur til kynna áhættuna sem fylgir breytingunum er gulur litur einkennandi fyrir þessa sviðsmynd sem þýðir hófleg áhrif. Bæði hlýsjávarkórallar og samlokur (kalkmyndandi skeljar) hafa þó rautt litamerki sem gefur til kynna mikil áhrif. Hlýsjávarkórallar mynda aragónítalk og þurfa hátt kalkmettunarstig, a.m.k. Ω<sub>ar</sub>>3.25. Mettunarstig aragóníts verður trúlega orðið lægra en svo á búsvæðum rifmyndandi kóralla við 560 ppm CO<sub>2</sub> styrk í lofti<sup>21</sup>. Því munu svæðum með hlýsjávarkóröllum og tilheyrandi vistkerfum trúlega fækka næstu áratugi. Einnig kemur fram á hvítum reit, merktum samlokum á vinstri hluta myndarinnar, að þær megi áfram rækta en það verður aðeins í stöðvum sem geta stýrt kalkmettunarstigi sjávar sem þar er notaður.

Á hægri hluta myndarinnar er RCP8.5 sviðsmyndin með 3.2°C hlýnun, sjávarborðshækkun 0.86 m og pH lækkun um 0.4 einingar. Á litakvarðanum, sem gefur til kynna áhættuna sem fylgir breytingunum eru einkum rauðir og fjólubláir litir sem gefa til kynna að miklar eða mjög miklar afleiðingar einkenna RCP8.5 sviðsmyndina. Aðeins fenjaviður (mangroves) sleppur með hófleg áhrif.

Mjög mun hægja á upptöku hafsins á koltvíoxíði frá andrúmslofti, sérstaklega við óhefta losun. Höfin taka nú upp um 25% af koltvíoxíði sem berst í andrúmsloftið með bruna. Minni hlutdeild hafsins eykur líkur á enn sterkari gróðurhúsaáhrifum.



Mynd 6.3 Breytingar á eðlisþáttum og efnafraði sjávar og áhrif á lífríki og þjónustu vistkerfa, tvær sviðsmyndir. Í annarri sviðsmyndinni er dregið verulega úr losun (RCP2.6) en í hinni er losun óheft (RCP8.5). Breytingar á hita ( $\Delta T$ ) og sýrustigi ( $\Delta pH$ ) eru frá 1870 – 1899 til 2090 – 2099, en hnattræn breyting í sjávarstöðu (SLR) frá 1901 til 2100. Áhrif RCP2.6 eru mun vægari, en mikilvæg þjónusta vistkerfa og nýttjar þeirra mun þó eiga undir högg að sækja sem gerir kröfu til skilvirkar stýringar. Stafir innan sviga merkja staðsetningu (l:breiddargráður lægri en 30°; m: 30°–60°; h: > 60°. Heimild myndar er 18, sjá einnig heimild 28.)

Í stuttu máli voru heildarniðurstöður settar fram í fjórum atriðum:

- Í fyrsta lagi að höfin hafa sterk áhrif á veðrakerfi og að þau þjóna velferð manna á margvísлагan hátt.
- Í öðru lagi hafa hnattrænar breytingar nú þegar haft áhrif á einstakar lífverur og vistkerfi strandsvæða. Jafnvel við stórminnkaða losun, RCP2.6, er hætt við miklum áhrifum á ýmsar tegundir áður en að aldamótum kemur. Áhrifin koma fram á öllum breiddargráðum frá hitabelti til pólsvæða.
- Í þriðja lagi verður nauðsynlegt að draga úr losun að mörkum sviðsmyndar RCP2.6 til að komast hjá miklum og óafturkræfum breytingum á vistkerfum hafsins og nýtingarmöguleikum.
- Í fjórða lagi minnka möguleikar manna til að bregðast við, eða finna mótvægi við breytingar sem fylgja vaxandi styrk CO<sub>2</sub> í andrúmsloftinu.

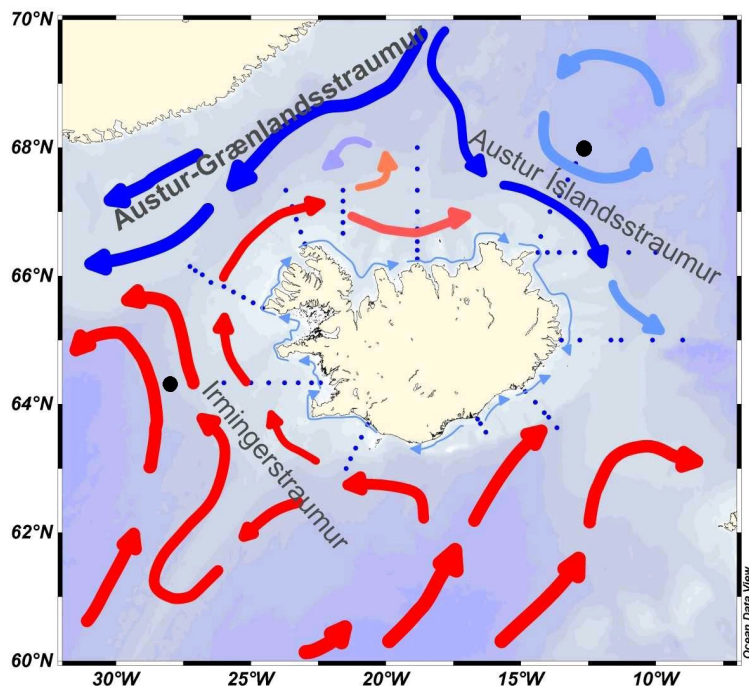
Þessar sviðsmyndir eru dökkar, einkum hvað varðar þróun lífríkis hafsins, ef losun koltvíoxíðs fylgir RCP8.5 ferlinu út öldina. Þá mun lífríki hafsins hafa tekið miklum breytingum vegna hlýnunar og súrnunar hér við land sem annars staðar. Rannsóknir á áhrifum súrnunar á nýliðun Atlantshafsporsks við þær aðstæður sem verða í lok aldarinnar samkvæmt RCP8.5 benda til þess að afföll á þorsklirfum muni verða allt að fjórðungi meiri en nú gerist<sup>22</sup>. Súrnun mun bætast við aðra

umhverfisþætti sem hafa áhrif á nýliðun og þar með árgangastyrk og afrakstur.

## 6.8 Hafið við Ísland

Árið 1983 hófst samvinnuverkefni Hafrannsóknastofnunar og Lamont-Doherty Earth Observatory við Columbiaháskólann í New York um rannsóknir á árstíðabreytingum á CO<sub>2</sub> í sjó og flæði CO<sub>2</sub> milli loftis og sjávar, annars vegar í hlýjum Atlantssjó suðvestur af landinu og hins vegar norðan landsins í svalsjó Íslandshafs (mynd 6.4). Sjórin á þessum stöðum er hvor með sínum einkennum. Atlantssjórin að uppruna frá hlýsjávarsvæðum sunnar í Atlantshafi en svalsjórinn hefur einkenni frá Norðurhöfum, hann er kaldur og með lægri seltu. Gagnasöfnun fyrstu tvö árin leiddi til nýrrar þekkingar á samspili lífríkis, gróðurs og veðurs á þessum svæðum svo ákveðið var að halda verkefninu áfram og efla tækjakost<sup>23</sup>. Þetta er upphafið að tveimur gagnarunum sem hefur verið viðhaldið síðan og eru mikilvægar því þær sýna hvernig hlýsjórinn og svalsjórinn hafa svarað sífelldri aukningu á styrk CO<sub>2</sub> í lofti. Þetta verkefni er nú hluti af vöktun Haf-rannsóknastofnunar á ástandi sjávar við Ísland, vetur, vor, sumar og haust. Það eru ekki síst mælingar um miðjan vetur sem reynast gagnlegar til að meta langtímabreytingar á yfirborðssjó, því á þeim árstíma er

Mynd 6.4 Yfirborðsstraumar við Ísland og stöðvanet sjórannsóknna Hafrannsóknastofnunar. Tveir staðir í stöðvanetinu þar sem fylgst er með súrnun sjávar eru merktir sem svartir punktar. (Heimild: sjá umfjöllun í tilvísun 29.)



sviþörungavöxtur nær enginn en flæði varma og lofttegunda milli lofts og sjávar í hvað mestum ham.

Rannsóknir hér við land á öðrum árstímum hafa auk þess veitt mikilvægar upplýsingar um árstíðasveiflur á sýrustigi og koltvíoxíðstyrk og samskipti lofts og sjávar<sup>24</sup>. Enn ítarlegri upplýsingar um skammtímasveiflur nást með mælibauiu sem nú er á mælistaðnum í Íslandshafi í samvinnu Hafrannsóknastofnunar og bandarísku Haf- og veðurfræðistofnunarinnar NOAA<sup>25</sup>.

Aðeins er til ein önnur álíka löng mælingaruna, sú er frá heittempruðu hafsvæði Atlantshafs í grennd við Bermuda. Styttri runur eru til frá öðrum heimshöfum. Þær bera allar vitni um það hvernig höfin súrna<sup>26</sup>.

Mynd 6.5 sýnir að súrnunareinkennin á þessum tveimur hafsvæðum hér við land eru hvert með sínum hætti og tengist það mismunandi uppruna og eiginleikum sjávarins. Sýrustig, pH, yfirborðssjávar í Íslandshafi um miðjan vetur er hærra en í hlýsjónum sunnan landsins en sýrustigið þar fellur hraðar en í hlýsjónum og reyndar hraðar en annars staðar í höfunum, 0.0024/ár<sup>27</sup>. Í hlýsjónum fellur pH álíka hratt og algengt er á mörgum öðrum hafsvæðum, eða um 0.0017/ár.

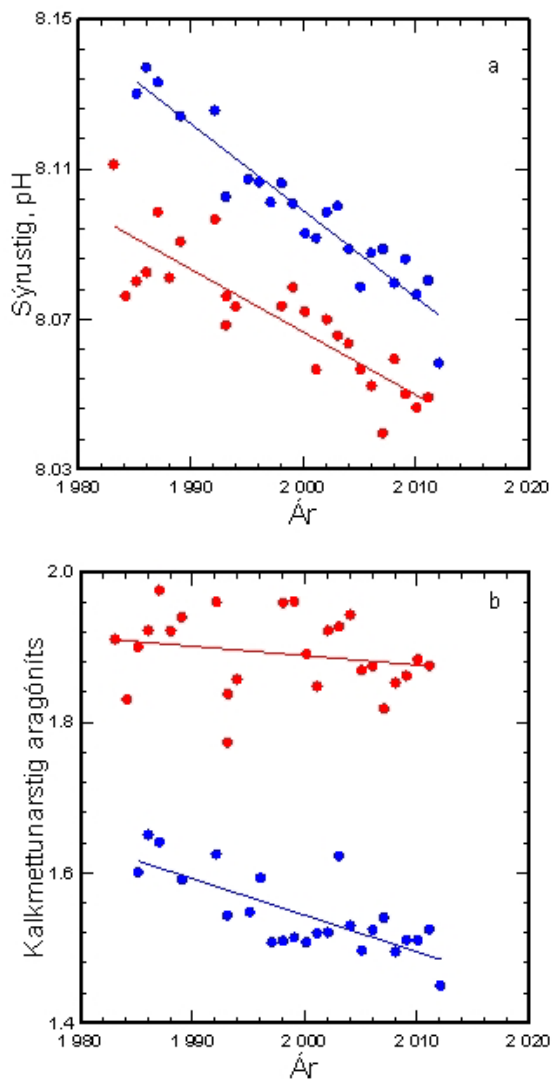
Kalkmettunarstigið í sjó hér við land er lágt af náttúrulegum ástæðum, einkum vegna lágs sjávarhita hér norðarlega í Atlantshafi. Það er lægra og fellur örar með tíma í svalsjónum en í hlýsjónum (mynd 6.5b). Kalkmettunarstig aragóníts,  $\Omega_{ar}$ , í svalsjó Íslandshafs

hefur fallið u. þ. b. 0.15 á rannsóknatímanum. Það er nú um 1.45 í yfirborðssjó á veturna, það lækkar með dýpi og á um 1700 m dýpi er sjórinn við mettnarmörk,  $\Omega_{ar}=1$ . Vegna vaxandi  $CO_2$  mjakast kalkmettnarmörkin jafnt og þétt upp á við og þannig breiðist undirmettaður sjór með  $\Omega_{ar}<1$  yfir sífellt stærri hluta hafsbotsins í Íslandshafi. Í hlýsjónum er kalkmettnarstigið hærra,  $\Omega_{ar}$  um 1.9 (mynd 6.5), það hefur lækkað hægar og það sveiflast meira en í Íslandshafi. Það tengist einkum meiri hlýnun og seltubreytingum í hlýsjónum á rannsóknatímanum heldur en í Íslandshafi (sjá nánar í grein 7.1). Hlýnunin hefur unnið á móti lækkanði kalkmettnun vegna súrnunar.

### 6.8.1 Árstíðasveiflur – langtímabreytingar

Í yfirborði hafsins við Ísland eru miklar árstíðasveiflur, ekki einungis á hita, heldur sveiflast sýrustig, pH, einnig og kalkmettnarstig,  $\Omega_{ar}$ . Myrkustu vetrarmánuðina er nánast engin ljóstillifun, þörungavöxtur, en hann eykst með hækkanði sól. Þá binda þörungar koltvíoxíð og mynda lífrænan vef. Við það hækkar pH og  $\Omega_{ar}$ . Öndverða ferlinu, öndun og niðurbroti lífræns efnis, fylgja gagnstæðar breytingar sem færa pH og  $\Omega_{ar}$  að lokum aftur að vetrargildum. Í Íslandshafi er árleg sveifla pH 0.12 stig og  $\Omega_{ar}$  0.75. Sumar tegundir í lífríki hafsins valda sveiflunum og aðrar eru háðar aðstæðum sem koma fram með þeim. Lífríkið hefur þróast og mótast af aðstæðunum á jarðsögulegum tíma. Því er





Mynd 6.5 Sýrustig (a) og kalkmettunarstig (b) í yfirborði hlýsjávar (rautt) og svalsjávar (blátt) að vetrarlagi. (Mynd uppfærð frá heimild 25.)

ástæða til að skoða áhrif súrnunar sjávar á náttúrulegu árstíðasveiflurnar. Það vekur spurningar um það hvernig árstíðasveiflur sýru- og kalkmettunarstigs hafi hliðrast frá því sem var fyrir iðnvæðingu. Niðurstöður frá mælingadufla NOAA í Íslandshafi benda til þess að nú orðið sé pH allt árið neðan þess sveiflusviðs sem það var áður á og kalkmettunarstig mest allt árið<sup>26</sup>. Svipaðar breytingar í yfirborði sjávar eiga sér stað víðar í höfunum og stuðla, ásamt öðrum umhverfisþáttum, t.d. hlýnun, að breytingum á vistkerfum. Afleiðingar fyrir lífríkið munu ráðast af því hve langt súrnun hafsins mun ganga, eins og ráða má af mynd 6.3.

## 6.9 Áhrif á lífríki við Ísland

Í lífríki hafsins við Ísland eru fjölmargar kalkmyndandi tegundir. Sumar þeirra, t.d. hörpudiskur og kræklingur, eru nýttar sem matvæli og kalkþörungur eru unnir af

hafsbotni til kalkframleiðslu. Margar aðrar tegundir eru hluti af fjölbreytilegu lífríki og hafa mismikla þýðingu í fæðuvef hafsins. Það er erfitt að spá um hver verði áhrif súrnunar hér við land. Þau geta birst óvænt eins og gerðist í ostruræktun við Kyrrahafsstrendur N-Ameríku. Áhrifin geta komið fram, án þess að eftir því sé tekið, hjá tegundum í lífríkinu sem eru ekki nýttar. Með grunnþekkingu á lífríkinu og tengslum tegunda við umhverfisþætti og kalkmettunarstig er unnið að því að bæta þekkingu á áhættunni sem fylgir súrnun sjávar hér við land<sup>12</sup>.

Stærðir	Styrkur CO2 fyrir iðnvæðingu, 280 ppm	Núítíma styrkur CO2, 400 ppm	% breyting miðað við fyrir iðnvæðingu	2x styrkur CO2 frá iðnvæðingu 560 ppm	% breyting miðað við fyrir iðnvæðingu	2 x styrkur CO2 og hlýnun um 2°C 560 ppm	% breyting miðað við fyrir iðnvæðingu	Framtíðar- styrkur CO2 900 ppm	% breyting miðað við fyrir iðnvæðingu
Hitastig [°C]	5	5		5		7		5	
Selta	35	35		35		35		35	
Syrustig, pH	8.173	8.038		7.906		7.909		7.714	
H+ [mol/kg]	$6.707 \times 10^{-9}$	$9.171 \times 10^{-9}$	+37	$1.243 \times 10^{-8}$	+85	$1.234 \times 10^{-8}$	+84	$1.931 \times 10^{-8}$	+288
CO2 (uppl.) [μmol/kg]	14.5	20.8		29.1		27.1		46.7	
HCO3- [μmol/kg]	1932.1	2018.5		2085.1		2067.9		2156.6	
CO32- [μmol/kg]	144.6	110.5	-24	84.2	-42	91.3	-37	56.1	-61
TCO2 [μmol/kg]	2091.3	2149.8		2198.4		2186.3		2259.3	
Kalkmetunastig, Ωar	2.18	1.67		1.27		1.38		0.84	

Tafla 6.2 Reiknaðir eiginleikar kolefniskerfis í sjó miðað við kolhvíoxíð í lofti: a) fyrir iðnvæðingu, 280 ppm, b) á okkar tíma, 400 ppm, c) við tvöfaldaðan styrk þess er var fyrir iðnvæðingu, 560 ppm, með og án 2°C hlýnunar, og d) í framtíð ef styrkur kolhvíoxíðs í lofti nær 900 ppm. Miðað er við seltu = 35.0, basastig 2300 μmol/kg og að andrúmsloft og yfirborðssjór séu í jafnvægi.

## Tilvísanir

- 1 Rhein, M., S.R. Rintoul, S. Aoki, E. Campos, D. Chambers, R.A. Feely, S. Gulev, G.C. Johnson, S.A. Josey, A. Kostianoy, C. Mauritzen, D. Roemmich, L.D. Talley og F. Wang, 2013. Observations: Ocean. Í *Climate Change 2013*; sjá heimild 2 í kafla 3.
- 2 Sjá umfjöllun um Parísarsamkomulagið í grein 3.10.
- 3 Bopp, L., Resplandy, L., Orr, J.C., Doney, S.C., Dunne, J.P., Gehlen, M., Halloran, P., Heinze, C., Ilyina, T., Seferian, R. & Tjiputra, J. 2013. Multiple stressors of ocean ecosystems in the 21st century: projections with CMIP5 models. *Biogeosciences* 10. 6225-6245
- 4 Sjá umfjöllun í grein 3.1.
- 5 Khatiwala, S., ofl. 2013. Global ocean storage of anthropogenic carbon. *Biogeosciences* 10(4)2169-2191.
- 6 Takahashi, T. 2004. The fate of industrial carbon dioxide. *Science* 305, 352-353.
- 7 AMAP, AMAP Assessment 2013. Arctic Ocean Acidification 2013. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP): Oslo, Norway, 99 bls.
- 8 Takahashi, T. ofl. 2009. Climatological Mean and Decadal Change in Surface Ocean p CO<sub>2</sub>, and Net Sea-air CO<sub>2</sub> Flux over the Global Oceans. *Deep-Sea Research II* 56. 554-557.
- 9 Sjá einnig umfjöllun í grein 3.5.
- 10 J.-P., G. & H.L. 2011. Ocean acidification: Background and history, in *Ocean acidification*, G.J.-P.H.L. (ritstj.). Oxford University Press: New York. 326 bls.
- 11 Orr, J.C., ofl. 2005. Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature*, 437, 681-686.
- 12 Hrönn Egilsdóttir 2017. Calcifying organisms in changing shallow and deep marine environments, PhD dissertation, Faculty of Earth Science, University of Iceland, 119 s.
- 13 Zeebe, R. E. 2011. Where are you heading Earth? *Nature Geosci.* 4,216-417.
- 14 Faya, G., J.S. Linka & J.A. Hareb 2017. Assessing the effects of ocean acidification in the Northeast US using an end-to-end marine ecosystem model. *Ecological Modelling*. 347: p. 1-10.
- 15 AMAP, 2014. Arctic Ocean Acidification 2013: An Overview. AMAP, Osló, Noregi. 27 bls.
- 16 Schiermeier, Q. 2011. Earth's Acid test. *Nature* 471. 154-156.
- 17 Kroeker, K.J., ofl. 2013. Impacts of ocean acidification on marine organisms: quantifying sensitivities and interaction with warming. *Global Change Biology* 19, 1884-1896.
- 18 Gattuso, J.-P., ofl. 2015. Contrasting futures for ocean and society from different anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions scenarios. *Science* 349, bls. 6243.
- 19 Barton, A., ofl. 2012. The Pacific oyster, *Crassostrea gigas*, shows negative correlation to naturally elevated carbon dioxide levels: Implications for near-term ocean acidification effects. *Limnol. Oceanogr.* 57(3) 698-710.
- 20 Chan, F., ofl. 2007. The West Coast Ocean Acidification and Hypoxia Science Panel: Major Findings, Recommendations, and Actions 2016. California Ocean Science Trust: Oakland, California, USA.
- 21 Hoegh-Guldberg, O., ofl., *Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification*. *Science* 318, bls. 1737-1742.
- 22 Stiasny, M.H., Mittermayer, F.H., Sswat, M., Voss, R., Jutfelt, F., Chierici, M., Puvanendran, V., Mortensen, A., Reusch, T.B. & Clemmesen, C., 2016. Ocean acidification effects on Atlantic cod larval survival and recruitment to the fished population. *PLoS one*, 11(8) p.e0155448.
- 23 Takahashi, T., ofl. 1985. Seasonal variability of the carbon-nutrient chemistry in the ocean areas west and north of Iceland. *Rit Fiskideildar* 9. 20-36.
- 24 Takahashi, T., ofl. 1993. Seasonal variation of CO<sub>2</sub> and nutrient salts over the high latitude oceans: A comparative study. *Global Biogeochemical Cycles* 7(4) 843-878.
- 25 Sutton, A.J., ofl. 2016. Using present-day observations to detect when anthropogenic change forces surface ocean carbonate chemistry outside preindustrial bounds. *Biogeosciences* 13(17) 5065-5083. Sjá einnig [www.pmel.noaa.gov/co2/story/Iceland](http://www.pmel.noaa.gov/co2/story/Iceland).
- 26 Bates, N.R., ofl. 2014. A time-series view of changing ocean chemistry due to ocean uptake of anthropogenic CO<sub>2</sub> and ocean acidification. *Oceanography* 27(1) 126-141.
- 27 Olafsson, J., ofl. 2009. Rate of Iceland Sea acidification from time series measurements. *Biogeosciences* 6. 2661-2668.
- 28 IGBP, IOC & SCOR, 2013. Ocean Acidification Summary for Policymakers – Third Symposium on the Ocean in a High- CO<sub>2</sub> World. International Geosphere-Biosphere Programme: Stockholm, Sweden.
- 29 Myndin er lítilega aðlöguð úr Asthorsson, O.S., Valdimarsson, H., Gudmundsdóttir, A. & Óskarsson, G.J., 2012. Climate-related variations in the occurrence and distribution of mackerel (*Scomber scombrus*) in Icelandic waters. *ICES journal of marine science*, 69(7) 1289-1297.

