

Um gróðurhúsaáhrif og hlýnun jarðar

Júlíus Sólnes prófessor emerítus og fv. umhverfisráðherra

Fyrirspurnir:solnes@hi.is

Inngangur

Um fátt hefur verið meira talað síðustu vikunar en loftslagsbreytingar og hlýnun andrúmslofts jarðar, og þá ógn er af henni stafar. Hin mikla loftslagsráðstefna í París í desember 2015 vakti okkur svo sannarlega til umhugsunar um þetta hitamál. Það er því ekki úr vegi að fara nokkrum orðum um hvað felst í hugtakinu gróðurhúsaáhrif, og af hverju langflestir fræðimenn, 97% þeirra sem fást við loftslagsvísindi og hafa birt greinar í ritrýndum vísindatímaritum, telja að okkur stafi mikil hættu af væntanlegri hlýnun andrúmslofts jarðar um tvær gráður á þessari öld eða meira, ef ekkert verður gert til að draga úr blæstri koltvíoxíðs út í loftið af manna völdum. Það samkomulag sem náðist á Parísarráðstefnunni, gerir ráð fyrir, að allar þjóðir heims sameinist um að koma í veg fyrir, að hitastig andrúmslofts hækki meira en tvær gráður fyrir lok þessarar aldar, helzt ekki meira en 1,5 gráðu, en mjög óvíst er að það náist. Margir vísindamenn á ráðstefnunni bentu á, að til þess mætti engin losun koltvíoxíðs af manna völdum eiga sér stað eftir 2030–2050 til loka aldarinnar.

Margir munu segja, að ekki væri nú amalegt, ef meðalhitastig, a.m.k. hér á norðurlöndum, hækkaði um tvær gráður eða svo. Þá er rétt að hafa í huga, að rúmlega fjögurra gráðu lækkingun á meðalhitastigi á yfirborði jarðar orsakaði síðustu ísöld, sem lauk fyrir nálega tólf þúsund árum. Hitastigsbreytingin sem olli henni er ekki meiri en u.þ.b. tvöföld sú hækking meðalhitastigs andrúmslofts, sem talin er munu verða á þessari öld. Það fer því ekki milli mála, að þessi tveggja gráðu aukning mun marka djúp spor og rugla allt ástand á byggðum bólum. Hafa áhrif á sjávarhita, fiskigegnd, landbúnað, jarðrækt, búsetu og margt fleira. Þegar verðum við vör við meiri ófgar í veðri en við eigum að venjast, jöklar hopa örar en áður, og meðalhitastig á yfirborði jarðar virðist hækka stöðugt, þótt með miklum sveiflum sé. Reyndar eru þeir mjög margir, sem telja áhyggjur manna af hlýnun andrúmslofts jarðar vera tóma vitleysu og sérstaklega þá staðhæfingu, að hún sé af manna völdum. Þær veðurfarsbreytingar sem við lifum, ef einhverjar, séu hluti

af duttlungum náttúrunnar og þeim breytileika, sem hún er undirorpin.

Gallup International kannaði skoðun fólks á loftslagsbreytingum í 128 löndum 2007–2008. Spurt var hvort a) viðkomandi vissi eitthvað um loftslagsbreytingar, og b) hann teldi sér stafa hættu af þeim. 29 OECD lönd, Ísland meðal þeirra, voru með í könnuninni. Í öllum þeim löndum töldu menn sig vita eitthvað/mikið um loftslagsbreytingar, 95% Íslendinga í þeim hópi. Í 24 löndum OECD taldi meirihluti manna þær vera ógn. Aðeins í Tékklandi, Danmörku, Eistlandi, Finnlandi og Íslandi (33%) áleit minna en helmingur aðspurðra loftslagsbreytingar vera hættulegar. Íslendingar eru því í hópi þeirra landa, sem hafa litla trú á hlýnun andrúmslofts jarðar með tilheyrandi loftslagsbreytingum af völdum mannlegra athafna. Í Bandaríkjunum, sem margir telja eitt mesta andstöðuríki við allar aðgerðir í loftslagsmálum, höfðu 63% þátttakenda í könnuninni áhyggjur af hnattrænni hlýnun og loftslagsbreytingum hennar vegna. Íslendingar skera sig sem sagt úr hvað þetta efni áhræir og því ekki vanþörf á, að meira sé fjallað um þessa hættu á opinberum vettvangi.

Bandaríski stjarnfræðingurinn Spencer Weart hefur skrifað merka bók um sögu og þróun þekkingar manna á gróðurhúsaáhrifunum.¹ Útdrátt úr henni má finna á vefsíðu bandarísku eðlisfræðistofnunarinnar.² Er meðal annars stuðst við hann í þessum skrifum.

Gróðurhúsaáhrifin

Lofthjúpur jarðar, gufuhvolfið, skapar lífvænleg skilyrði á jörðu. Ef hjúpurinn væri ekki til staðar, væri meðalhitastig á jarðaryfirborði -18°C , en vegna hans er yfirborðshitinn að jafnaði um $+16^{\circ}\text{C}$, misheitt eftir því hvar við erum, eins og allir þekkja. En hvernig verður þessi hiti til? Forfeður vorir brutu heilann um þá gátu fram eftir öldum án þess að finna lausn á henni. Í byrjun nítjándu aldar velti franskur stærðfræðingurinn Joseph Fourier þessu fyrir sér. Kveikjan að vangaveltum hans var heliometer Horace Benedicts de Saussure frá því um 1760. De Saussure smíðaði trékassa með glugga (þreföldu gleri), sem sólarljós komst inn um. Að innan var kassinn einangraður með svörtum korkplötum. Þannig hitnaði loftið í kassanum og yljaði fjallgöngumönnum, sem notuðu slíka lampa í ölpunum.³ Fourier leit á lofthjúp jarðar sem risastóran heliometer, er væri eins og samloka milli yfirborðs jarðar og ímyndaðs þaks, en fyrir ofan það tæki við fimbulkuldi himingeimsins (um 3 gráður Kelvin eða -270°C , sjá mynd 2). Innan samlokunnar finnast alls kyns loftgundir fyrir utan súrefni og köfnunarefni (nitur) svo sem vatnsgufa og kolsýra. Sólargeislar sem berast til jarðar með mjög hárrí tíðni, fara auðveldlega gegnum loft-hjúpin án þess að valda teljandi áhrifum. Fourier kallaði þá björtu geislana. Þeir hitta yfirborð jarðar, sem gleypir eitthvað af þeim í sig og hitnar, en mestur hluti þeirra kastast til baka í formi lágtíðnigeisla, er Fourier kallaði myrka geisla. Vatnsgufan á auðvelt með að fanga

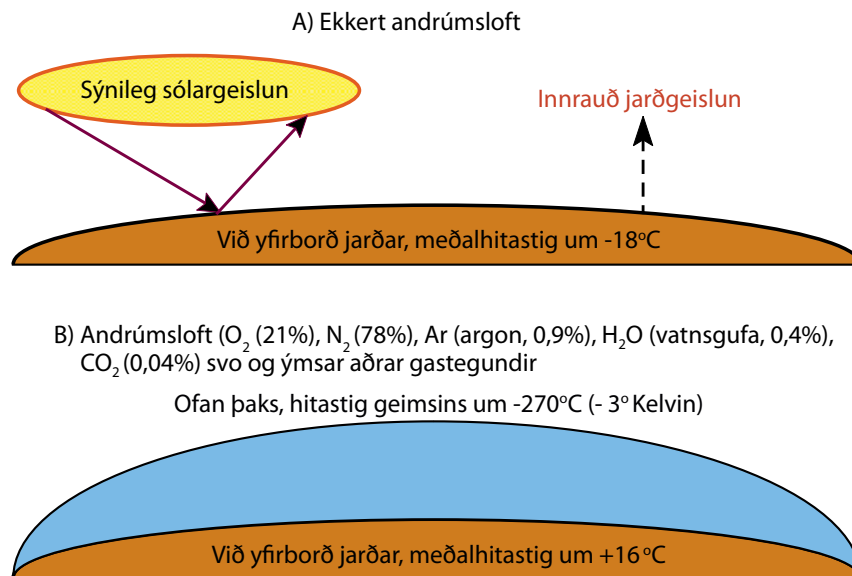
1 Weart, Spencer, 2008. *The Discovery of Global Warming*. 240 bls., Harvard University Press.

2 Weart, Spencer, 2015. *The Discovery of Global Warming*. Sjá heimasíðu Bandarísku eðlisfræðistofnunarinnar: <https://www.aip.org/history/climate/index.htm>, skoðuð í janúar 2016.

3 James R. Fleming, 1999. Joseph Fourier, the “greenhouse effect”, and the quest for a universal theory of terrestrial temperatures, *Endeavour*, 23(2).



Mynd 1. Af hverju ættu Íslendingar að hafa áhyggjur af hlýnun andrúmslofts jarðar! (Af forsiðu blaðsins *the Economist*, febrúar 2008).



Mynd 2. Lofthjúpur Fourier. Nitur eða köfnunarefni er langstærsti hluti andrúmslofts jarðar, eða um 78%. Súrefni er um 21%, og önnur efni, svo sem vatnsgufa og koltvíoxíð, mun minna.

myrku geislana, „sjúga“ í sig hitaorku þeirra, og endurkasta hluta þeirra aftur til jarðar. Við þetta hlýnar andrúmsloftið og nær meðalhitastiginu $+16^\circ C$ við yfirborð jarðar. Fourier taldi að einnig gætti áhrifa rúmgeisla frá fjarlægari stjörnum, og eins myndi innri hiti jarðar valda einhverri hlýnun gufuhvolfsins. Hann ályktaði þó, að áhrif sólargeislanna væru langmest og sterkust.

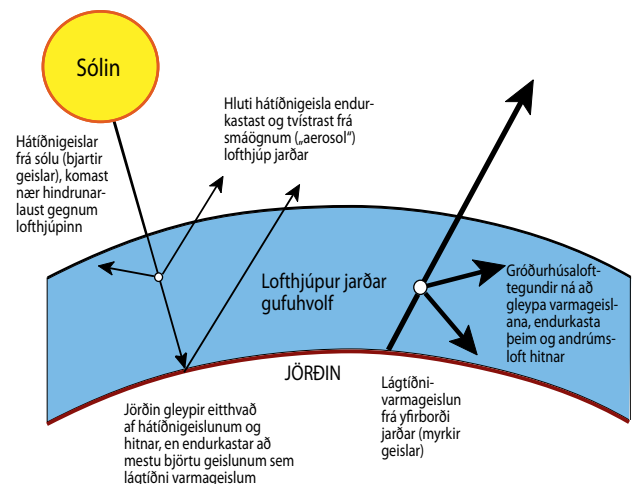
Joseph Fourier (1768–1830) var með mestu hugsuðum samtíðar sinnar. Hann var afburða stærðfræðingur, eðlisfræðingur, stjórnmála- maður og lögreglustjóri um skeið sem og fyrsti rektor franska tæknihá- skólans, l'École polytechnique í París. Þegar hann snéri sér að loftslags- málum í byrjun nítjándu aldar, hafði hann þróað stærðfræðikenningar sínar um tíðnigreiningu á sveiflukendum hreyfingum og alls kyns bylgjukenndum tímamerkjum. Fourier greining eða Fourier ummynd- un er enn þann dag í dag grundvöllur tíðnigreiningar á öllum slíkum merkjum. Hann birti að lokum niðurstöður sínar um hitabúskap loft- hjúpsins í viðamikilli vísindagrein 1824, þar sem hann kallaði hjúpin risastóran heliometer, og setti fram flóknar stærðfræðilíkingar til að skýra mál sitt.⁴ Hann talar ekki beinlínis um gróðurhúsaáhrif, en líkir áhrifum andrúmsloftsins við það að leggja glerplötu yfir skál, sem er einmitt hugsunin á bak við gróðurhúsið. Kom þessi skýring fram í seinni grein hans um hitastig andrúmslofts jarðar 1827, en sú hefur náð meiri athygli fræðimanna. Sænski veðurfræðingurinn Nils Gustav Ekholm varð líklega fyrstur manna til að kalla þetta gróðurhúsaáhrif, eins og kemur fram í grein hans frá 1901 um fornsögulegar loftslags- breytingar og hvað hafi valdið þeim.⁵ Mynd 3 sýnir hitalíkan Fourier í grófum dráttum.

Ýmsir fræðimenn á nítjándu öld, svo sem Frakkinn Claude Pouillet, Englendingarnir John Tyndall og Robert Boyle, Bandaríkjamaðurinn Samuel Pierpoint Langley og Svíarnir Svante Arrhenius og Nils Ekholm skrifuðu um gróðurhúsaáhrifin og tóku undir kenningar Fourier um hitakerfi gufuhvolfsins og útskýrðu þær betur. Meðal annars varð mönnum ljóst, að fyrir utan vatnsgufuna í andrúmsloftinu, væru ýmsar fleiri lofttegundir sem hefðu sams konar áhrif, kolsýra eða koltvíoxíð mikilvægust þeirra. Gróðurhúsalofttegundirnar eru annars þessar helztar: Vatnsgufa (H_2O), virkni 36–70%, koltvíoxíð (CO_2), 9–26%, metan (CH_4), 4–9%, ózón (O_3), 3–7%. Virkni er miðuð við getu til að fanga lágtíðnigeislana, en hún fer nokkuð eftir tíðnisviði þeirra og er mis- munandi eftir lofttegundum. Flestar tveggja frumefna lofttegundir og

þær, sem hafa a.m.k. þrjár frumeindir eða fleiri, teljast einnig til gróð- urhúsalofttegunda. Þannig valda t.d. metan, nituroxíð, ýmis halógen- og klórflúorkolefnissambönd svo og ózon gróðurhúsaáhrifum, en aðal- lofttegundir andrúmslofts, N_2 (nitur), O_2 (súrefni) og Ar (argon) ekki. Þær ná ekki að fanga myrku geislana.

Hinar ýmsu gróðurhúsalofttegundir valda mjög mismunandi áhrifum. Fyrir tilstilli Loftslagsráðs Sameinuðu þjóðanna (IPCC) hefur sú venja skapast að umbreyta öllum slíkum lofttegundum nema vatnsgufu í jafngildi koltvíoxíðs. Aðgerðum annarra gróðurhúsalofttegunda er breytt í áhrif koltvíoxíðs með því að nota hugtakið hnattrænt hlýnunar- gildi (e. global warming potential eða GWpT) tegrað yfir tímanna t. Eitt kíló af metan (CH_4) jafngildir þannig 28–36 kg af kolsýru (CO_2) yfir 100 ár.

Ari Ólafsson, eðlisfræðingur og dósent við Háskóla Íslands, hefur skrifað fræðilega yfirlitsgrein um eðlisfræði gróðurhúsaáhrifanna. Þeim



Mynd 3. Líkan Josephs Fourier af gróðurhúsaáhrifum af völdum vatnsgufu í gufuhvolfinu.

sem vilja öðlast dýpri skilning á þessum áhrifum er bent á grein hans frá 2007 í tímaritinu um raunvísindi og stærðfræði.⁶ Með nútíma vit- nesku um tíðniróf sólargeisla, litróf þeirra, ásamt aukinni þekkingu á varmageislun mismunandi efna, er rétt að endurskilgreina gróðurhúsa- áhrifin á eftirfarandi hátt.

Varmageislar frá sólu (björtu geislarnir) einkennast af yfirborðshita hennar um 6000 gráður Kelvin. Tíðni sólargeislanna er að meginhluta

⁴ Joseph Fourier, 1824. Remarques générales sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires, *Annales de chimie et de physique* (Paris), 27, 136–167.

⁵ Nils Ekholm, 1901. On the variations of the climate of the geological and historical past and their causes. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 27(117), 1–67.

⁶ Ari Ólafsson, 2007. Eðlisfræði gróðurhúsaáhrifa. *RAUST, Tímarit um raunvísindi og stærðfræði*, 4 (1), 27–40.

innan sýnilega litrófsins, og mestur hluti þeirra fer rակleidis gegnum lofthjúpinn og hittir fyrir yfirborð jarðar. Um 30% þeirra endurspeglast út í himingeiminn, en jörðin losar sig við 70% þeirra (kólnar) með varmageislun á tǫnisviði djúpt í innrauða litrófinu, en eiginleikar geislaanna ráðast af meðalyfirborðshita á jörðu, 289°K (15–16 gráður). Í lofthjúpunum eru sameindir, gróðurhúsalofttegundirnar, sem eru ljósvirkar á innrauða bilinu. Þær drekka dimmu geisla síg og senda frá sér varmageislun sem er jafndreifð í allar áttir. Hún stefnir jafnt niður til jarðar og út í himingeiminn. Á litrófsbilum með háan ísogsstuðul verður geislun gróðurhúsalofttegunda jafn kröftug og geislun yfirborðs, svo að jörðin kælir sig ekki gegnum þetta litrófsbil. Það eru gróðurhúsahrifin.

Kolsýran kemur til sögunnar

Fourier hafði aðallega talað um, að vatnsgufan í andrúmsloftinu hitnaði og endurkastaði myrku geislunum. Þegar líða tók á nítjándu öld, fóru margir vísindamenn að íhuga áhrif annarra gróðurhúsalofttegunda, einkum koltvíoxíðs, sem fræðimenn á 19. öld og langt fram á þá tuttugustu kölluðu kolsýru. Rannsóknir sænska eðlisfræðingsins Svantes Arrhenius (1859–1927) skiptu sköpum í þessu sambandi. Hann birti niðurstöður vinnu sinnar í tímamóta vísindagrein 1896.⁷ Arrhenius byggði rannsóknir sínar á verkum Fourier og annarra nítjándu aldar fræðimanna, einkum Johns Tyndall⁸ og Samuels Langley,⁹ en sá síðarnefndi mældi innrauða (myrka) hitageislun frá koltvíoxíði í andrúmslofti. Þannig gat Arrhenius ályktað, að breytileiki styrks koltvíoxíðs í andrúmslofti myndi hafa veruleg áhrif á hitabúskap jarðar. Með því að nota beztu fánlegu gögn yfir mælingar á koltvíoxíði í lofti og gefa sér ýmsar forsendur og tilgátur, sýndi hann með útreikningum sínum áhrif þess, að magn kolsýru í lofthjúp jarðar ýmist minnkaði eða ykist. Hann dró þannig fram, að ef ekkert koltvíoxíð myndi í gufuhvolfinu, myndi hitastig við yfirborð jarðar falla um 21 gráðu. Í slíku andrúmslofti myndaðist mun minni vatnsgufa. Myndi hitastig því lækka um aðrar 10 gráður af þeim sökum og verða um -15 gráður við yfirborð jarðar. Hann leitað einnig svara við orsökum síðustu ísaldar, en þær eru um margt óljósar. Samkvæmt útreikningum hans hefði styrkur koltvíoxíðs í andrúmslofti þurft að minnka í 0,65–0,55 af þáverandi styrk (sem var talinn vera 0,03% af samtímamanni Arrhenius, sænska jarðfræðingnum Arvid Högbom) til þess að lækka meðalhita lofts um 4–5 gráður milli 40. og 50. breiddargráðu, eins og gerðist á síðustu ísöld. Áður hafði John Tyndall komizt að svipaðri niðurstöðu um tilurð ísaldar, þótt ekki fengist skýring á því, hvers vegna magn kolsýru í andrúmslofti minnkaði svona mikið. Þá hafði Högbom birt merka grein um langtímasveiflur í magni kolsýru í andrúmslofti og veðurfarsbreytingar vegna þeirra tveimur árum áður.¹⁰ Högbom fann það m.a. út, að losun koltvíoxíðs frá iðnaði og öðrum mannlegum athöfnum á ári hverju, aðallega vegna mikils bruna á kolum, væri orðin jöfn þeirri sem yrði af náttúrulegum orsökum. Árleg viðbót væri að vísu mjög lítil miðað við uppsafnað koltvíoxíð í lofthjúpunum, líklega um einn þúsundasti hluti. Arrhenius ályktaði því, að andrúmsloft jarðar myndi óhjákvæmilega fara hlýnandi af þessum sökum, þótt það tæki langan tíma. Útreikningar hans sýndu m.a., að lofthiti á heimsskautssvæðum myndi hækka um 8–9 gráður á Celsius, ef styrkur koltvíoxíðs í andrúmslofti yrði 2,5 til þrisvar sinnum meira en hann var 1896, og meðalhitastig hækkaði um 5–6 gráður, ef hann tvöfaldaðist. Það myndi hins vegar taka fleiri þúsund ár miðað við þáverandi losun koltvíoxíðs frá iðnaði.

Þessi grein Svantes Arrhenius vakti mikla athygli fræðimanna um



Mynd 4. Sænski eðlisfræðingurinn Svante August Arrhenius (1859–1927) vakti einna fyrstur manna athygli á því, að vaxandi styrkur koltvíoxíðs í andrúmslofti myndi valda hlýnun þess.

allan heim, og hann varð eftirsóttur fyrirlesari til að útskýra kenningar sínar. Hann fékk svo Nóbelsverðlaunin í efnafræði 1903, en það var reyndar fyrir annars konar rannsóknir. Sagði þó ekki skilið við kolsýruna og gaf út mikla bók¹¹ um rannsóknir sínar á áhrifum koltvíoxíðs í andrúmslofti 1908 sem höfðaði frekar til almennings. Þá hafði kola-brennsla aukist verulega frá 1896, svo að Arrhenius taldi nú, að á nokkur hundruð árum í stað þúsunda áður, myndi andrúmsloft jarðar hlýna mikið. Hann áleit þó ásamt öðrum fræðimönnum þess tíma, að mannkyni stafaði lítil ógn af hugsanlegri hlýnun andrúmslofts. Það myndi líða svo langur tími þar til hún gæti orðið veruleg, og eins voru uppi hugmyndir um, að hafið myndi taka við öllu umframmagni af kolsýru, sem stafaði af manna völdum. Reyndar hafði Högbom þegar bent á, að hafið gæti auðveldlega ráðið við 5/6 hluta af allri viðbót kolsýru.

Nú kom babb í bátinn

Þrátt fyrir að kenning Arrhenius nyti almennt stuðnings fræðimanna, töldu þó sumir þeirra margt við hana að athuga. Bent var á, að Arrhenius hefði einfaldað loftslagskerfið um of. Það væri miklu margbrotnara og flóknara en svo, að hægt væri að draga þær ályktanir sem hann hefði gert. Myndi skýjafar ekki breytast verulega, ef loft hlýnaði? Síðan kom rothöggid. Samlandi Arrhenius, eðlisfræðingurinn Knut Ångström, ásamt aðstoðarmanni sínum J. Koch, mældi endurspeglun ljósgeisla í tveimur glerrörum, sem voru annars vegar fyllt með venjulegu lofti og hins vegar blandað með koltvíoxíði.¹² Fór tilraunin fram á eldfjallinum Pico del Teide á Tenerif eyju. Þeir komust að þeirri niður-

7 Arrhenius, Svante, 1896. On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground. *Philosophical Magazine and Journal of Science*, Series 5, 41 (237–276).

8 Tyndall, John, 1872. Contributions to Molecular Physics in the Domain of Radiant Heat. *Philosophical Transactions & Philosophical Magazine*, Longmans, Green and Co., London

9 Winkelman, A., 1893. *Handbook der Physik* (6 bindi). Verlag Eduart Trewendt, Breslau.

10 Högbom, Arvid, 1894. Om Sannolikheten För Sekulära Förändringar I Atmosfärens Kolsyrehalt. *Svensk kemisk Tidskrift*, 6, 169–177.

11 Arrhenius, Svante, 1907. *Das Werden der Welten*. Akademisches Verlagsgesellschaft, Leipzig.

12 Ångström, Knut, 1900. Über die Bedeutung des Wasserdampfes und der Kohlensäure bei der Absorption der Erdatmosphäre. *Annalen der Physik*, Bd 3., 720–732.

stöðu, að magn kolsýru í rörinu skipti litlu máli fyrir endurkast varmageislanna. Geislaróf¹³ vatnsgufu og kolsýru, sem þeir töldu vera samfellt, skaraðist það mikið. Heildaráhrif koltvíoxíðs í andrúmslofti, þ.e. geta þess til ísogs og varmageislunar, yrði aldrei meiri en 16% af því sem vatnsgufan fengi áorkað, alveg sama hversu mikið magn af kolsýru fyndist í loftinu. Þar með væru kenningar Svantes Arrhenius um hlýnun andrúmslofts vegna vaxandi styrks koltvíoxíðs í því byggðar á sandi. Bandaríski vísindamaðurinn Frank W. Very komst að svipaðri niðurstöðu með tilraunum sínum sama ár.¹⁴

Þetta varð til þess, að vísindamenn misstu allan áhuga á koltvíoxíði í andrúmslofti. Vatnsgufan sæi ein um að halda áfram að ylja okkur. Hugmynd Arrhenius um hlýnun lofts af völdum aukinnar losunar á koltvíoxíði var talin villukenning, og stuðningsmenn hennar játuðu sig sigraða. Arrhenius svaraði að vísu fyrir sig með langri grein,¹⁵ þar sem hann gagnrýndi mælinganiðurstöður J. Koch, aðstoðarmanns Ångström, harðlega og reyndi að skýra betur út endurkastaáhrif vatnsgufu og kolsýru á mismunandi tíðnisviðum með flóknum líkingum. En skaðinn var skeður. Svargrein Arrhenius vakti litla athygli, og þeir sem lásu hana skildu hana illa. Þannig liðu margir áratugir án þess, að mikið væri fjallað um loftslagsbreytingar eða hlýnun andrúmslofts.

Árið 1931 birtist grein eftir bandaríska eðlisfræðinginn E. O. Hulburt¹⁶ um hvernig hitastig lægri hluta andrúmslofts (0–20 km) er háð ísogi og endurspeglunareiginleikum ýmissa lofttegunda, þar sem sólarljós er eini orkugjafinn. Hann beitti mun nákvæmari reikningsaðferðum en nítjándu aldar vísindamennirnir og komst að þeirri niðurstöðu, að kenning Tyndall um að síðasta ísöld hafi stafað af mikilli minnkun kolsýru í andrúmslofti, sem olli hitalækkun um 4–5 gráður, hafi verið rétt. Hann kemst enn fremur að svipaðri niðurstöðu og Arrhenius, að tvö- eða þrefaldist styrkur koltvíoxíðs í andrúmslofti, hækki meðallofthiti um fjórar og sjö gráður Kelvín við sjávarmál.

Því miður fór grein Hulburt fram hjá flestum veðurfræðingum og vísindamönnum þess tíma, enda greinarhöfundur lítt þekktur. Nokkrum árum síðar, eða 1938, birti brezki verkfræðingurinn Guy Stewart Callendar grein, þar sem hann dustaði rykið af tilgátu og kenningum Svantes Arrhenius.¹⁷ Hann taldi sig geta sýnt fram á, að bæði hitastig og koltvíoxíð í andrúmslofti hafi farið vaxandi síðustu hálfu öld, og koltvíoxíð væri mjög kröftug lofttegund til að fanga innrauða geisla. Grein Callendar vakti nokkra athygli, en veðurfræðingar tóku hana lítt trúanlega. Vísindamenn héldu áfram að þræta fyrir eða horfa framhjá kenningunni um koltvíoxíðáhrifin. Það var því enn bið á því, að eitthvað nýtt gerðist í loftslagsmálum. Í úttekt Félags bandarískra veðurfræðinga frá 1951 er sagt, að sú hugmynd að koltvíoxíð í lofthjúpnnum gæti haft áhrif á loftslag jarðar hafi aldrei náð miklu fylgi. Vísindamenn hafi orðið afhuga henni, þegar það var upplýst, að vatnsgufan ein gæti séð um að fanga alla langbylgjugeislun, og koltvíoxíð í lofti bætti litlu þar við. Þá var almennt álitnið, að jörðin sæi sjálf um að viðhalda jafnvægi í lofthjúpnnum, og vísindamenn bentu einnig á, að hafið gæti innbyrt allt umframmagn af gastegundum úr andrúmsloftinu, þar með talið koltvíoxíð. Áfram var þó minnst á kenningar Arrhenius í flestum kennslubókum, þótt ekki væri til annars en segja frá því, að þær væru rangar.

Kenning Arrhenius rís upp frá dauðum

Upp úr 1950 var farið að rannsaka lofthjúp jarðar af miklum móð. Hvattinn að slíkum rannsóknum var þó aðallega hernaðarlegur - banda-

13 Hugtak úr ljósfræði. Táknað svörum vatnsgufu og kolsýru við myrkum geislum á mismunandi tíðnisviði þeirra.

14 Very, Frank W., 1900. Atmospheric radiation : a research conducted at the Allegheny Observatory and at Providence, R.I., *Bulletin / Weather Bureau*, U.S. Department of Agriculture ; no. 221, 134 bls.

15 Arrhenius, Svante, 1901a. Ueber die Wärmeabsorption durch Kohlensäure, *Annalen der Physik*, 4, 690–705

16 Hulburt, E. O., 1931. The Temperature of the Lower Atmosphere of the Earth. *Physical Review*, 38, 1876–1890

17 Callender, G.S., 1938. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 64 (275), 223–240.

ríski herinn vildi vita hvað yrði um eldflaugar sínar í himinhvolfinu, og titið var á könnun á veðurfari og eiginleikum úthafanna sem þjóðarör-yggismál. Meðal annars hófust viðamiklar rannsóknir á ísogi og endurspeglun innrauðra geisla (myrku hitageislarnir) á nýjan leik, nú með miklu meiri þekkingu á eðlisfræði þeirra en nítjándu aldar mennirnir höfðu yfir að ráða, svo að ekki sé talað um tölvuna sem nú var komin til sögunnar. Vísindamenn gerðu sér fljótlega grein fyrir, að tilraun Knuts Ångström, þar sem sólarljósi var hleypt gegnum glerrör með lofti og kolsýru, var mjög ábótavant og túlkun hans á niðurstöðunum röng. Þá kom einnig fram, að aðstoðarmaður hans, J. Koch, hafði ef til vill hagrætt niðurstöðum mælinganna eða ofútlakað þær. Nýjar og nákvæmari mælingar sýndu, að ekki er um að ræða skörun milli vatnsgufu og koltvíoxíðs á breiðu tíðnisviði við ísog innrauðra geisla. Róf þessara lofttegunda innihalda þrönga, staka tíðnistrimla, þannig að geislarnir sleppa í gegn á milli þeirra. Koltvíoxíðið getur því drukkið í sig geisla sem sluppu gegnum vatnsgufuna og öflugt.

Bandarísku eðlisfræðingarnir Lewis D. Kaplan og Gilbert N. Plass notuðu flókin tölvuforrit til að reikna feril innrauðra geisla gegnum andrúmsloft og endurspeglun þeirra.¹⁸ Þeir staðfestu kenningar Arrhenius, um að aukinn styrkur koltvíoxíðs myndi valda meiri gróðurhúsaáhrifum, og Plass reiknaði hitaaukningu upp á 3–4 gráður, ef hann tvöfaldaðist. Hann taldi enn fremur, að líklegt væri að hitastig á yfirborði jarðar myndi hækka um 1,1 gráðu á öld, ef losun koltvíoxíðs af manna völdum héldi áfram óbreytt. Reiknilíkan Plass þótti ansi gróft, og gagnrýnendur bentu strax á, að hann gerði ekki ráð fyrir að hafið myndi smám saman innbyrða umframmagn. Hann reiknaði nefnilega með, að koltvíoxíðið sem komið væri upp í loftið, héldist þar í þúsundir ára.

Lengi tekur sjórinn við er sagt, og það töldu menn svo sannarlega eiga við um koltvíoxíðið. Þess vegna þyrfti ekki að hafa áhyggjur af uppsöfnun þess í andrúmslofti. Bandarísku vísindamennirnir Hans Suess (efnafræðingur) og Roger Revelle (haffræðingur) fundu hins vegar út, m.a. með athugun á dreifingu geislavirka kolefnisins C14, að sjórinn myndi eiga í erfiðleikum með að innbyrða koltvíoxíðið, og það gerðist mjög hægt.¹⁹ Eins og Revelle orðaði það, væri yfirborð sjávar í raun ein efnakássa, sem hefði mjög sérkennilegan dúaeiginleika er sæi um að halda sýrustigi sjávarins stöðugu. Þessi yfirborðskássa gæti í raun ekki innbyrt mikið CO₂ – varla einn tíunda af því, sem áður var talið. Sænsku veðurfræðingarnir Bert Bolin og Erik Erikson skýrðu svo dúaeiginleika sjávar betur út og staðfestu niðurstöður Suess og Revelle um getu hafins til að taka við koltvíoxíði.²⁰ Þeir ályktuðu að þótt sjórinn fangi koltvíoxíð tiltölulega fljótt, muni mest af því gufa aftur upp í loftið áður en hafstraumarnir ná að sökkva því í hinum miklu sökkbrunnnum, þar sem heitir og kaldir sjávarstraumar mætast. Einn slíkur er austur af Íslandi. Að lokum mun sjórinn taka við öllu koltvíoxíðinu, en það getur tekið þúsundir ára. Á meðan er það til staðar í andrúmsloftinu og veldur auknum gróðurhúsaáhrifum.

Þessar rannsóknaniðurstöður urðu til þess, að fleiri bandarískir vísindamenn vöktu athygli almennings og fjölmiðla á þeirri hættu sem aukin gróðurhúsaáhrif gætu haft í för með sér. Enn var þó langt í land, að vísindamenn tæku almennt undir þessi sjónarmið. Og flestir þeirra fullir efasemda. Þróun kenningarinnar um hlýnun andrúmslofts vegna aukins styrks koltvíoxíðs í lofthjúp jarðar minnir um margt á viðbrögð við landrekskenningunni. Þegar Alfred Wegener setti hana fyrst fram 1908, fékk hún dræmar undirtektir jarðfræðinga og annarra vísindamanna. Flestir þeirra höfnuðu alfarið þeirri hugmynd Wegener, að

18 Kaplan, Lewis D., 1952. On the Pressure Dependence of Radiative Heat Transfer in the Atmosphere. *Journal of Meteorology* 9, 1-12. Plass, G.N., 1956a. The Carbon Dioxide Theory of Climatic Change. *Tellus* 8, 140-54

19 Revelle, Roger, & Hans E. Suess, 1957. Carbon Dioxide Exchange between Atmosphere and Ocean and the Question of an Increase of Atmospheric CO₂ During the Past Decades. *Tellus*, 9, 18-27.

20 Bolin, Bert, and Erik Eriksson, 1959. Changes in the Carbon Dioxide Content of the Atmosphere and Sea Due to Fossil Fuel Combustion. Í: *The Atmosphere and the Sea in Motion* (Bert Bolin Ed.), bls. 130-42. Rockefeller Institute Press, New York.

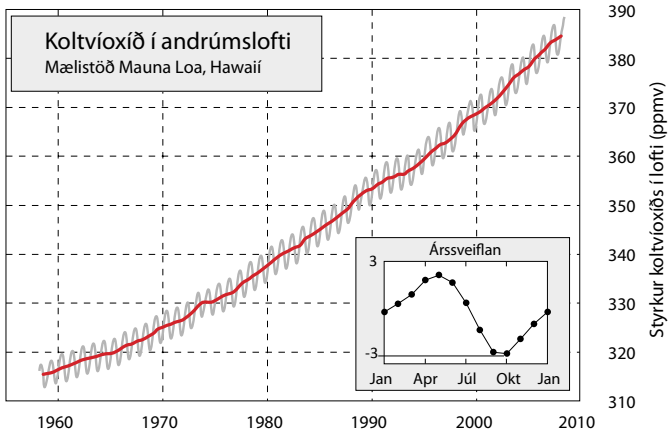
heimsálfurnar hefðu einu sinni verið fastar saman í Pangeu, al-landinu, og síðan rekið brott hver frá annarri. Það var ekki fyrr en rúmlega fimmtíu árum síðar, að kenningin um jarðskorpuflekana, sem sigla ofan á línholfinu, hafi almennt verið viðurkennd. Má segja að smíðshögggið hafi verið rekið í Kröfluldum 1975–1984, þar sem hún fékkst endanlega staðfest.²¹

Kenningin um hlýnun andrúmslofts festir rætur

Fleiri og fleiri vísindamenn fóru nú að rannsaka gróðurhúsaáhrifin og hugsanlega hnattræna hlýnun af manna völdum. Og smám saman áttuðu veðurfræðingar sig á því, að vegna þess hversu langan tíma það tæki sjóinn að innbyrða koltvíoxíð, hlyti það að safnast fyrir í lofti. Það væri hins vegar nauðsynlegt að mæla styrk og fylgjast með þróun þess.

Fyrstu mælingar, sem fóru fram á Norðurlöndunum, gengu hins vegar illa og reyndust marklausar. Það var því ekki fyrr en bandaríski efnáfræðingurinn Charles D. Keeling fann leið til þess að mæla styrk koltvíoxíðs í lofti á áreiðanlegan hátt, að eitthvað fór að gerast. Mælinganiðurstöður hans frá stöðvum á Suðurskauti jarðar og á eldfjallinu Mauna Loa á Hawaií sýndu svo að ekki var um villzt, að styrkur koltvíoxíðs í andrúmslofti fór vaxandi.²² Þótt Keeling hafi orðið að loka stöðinni á Suðurskautinu vegna fjárskorts, tókst honum að halda mælingum á Mauna Loa nær óslitið áfram til dauðadags 2005, og er stöðin enn virk (mynd 5).

Ferillinn sýnir stöðuga aukningu koltvíoxíðs í andrúmslofti. Á hálfri öld frá því að mælingarnar hófust, hefur hún aukizt úr u.þ.b. 310 ppmv (e. parts per million by volume) í 390 og er nú um 400. Högbom taldi magnið vera 300 ppmv um 1890, eins og áður er komið fram, en mælingar hans voru ekki mjög nákvæmar. Á rúmri öld hefur styrkur koltvíoxíðs í andrúmslofti því aukizt um 30–40%.



Mynd 5. Keeling ferillinn. Hann sýnir styrk koltvíoxíðs í andrúmslofti á fjallinu Mauna Loa á Hawaií frá 1958 til 2008. Mælieiningin er fjöldi koltvíoxíðssameinda í rúmmálseiningu sem inniheldur milljón sameindir lofts (ppmv), (mynd á Wikimedia).

Uppgötvun geislavirku kolefnissamsættunnar C14 um 1940 olli straumhvörfum í jarð- og loftslagsvísindum. Með henni var nú hægt að rekja feril kolefnis í lofti, sjó, jarðvegi, bergi og lífandi verum. Vísindamenn með mismunandi rannsóknarmarkmið og bakgrunn fóru að bera saman bækur sínar á sjöunda áratugnum, og fyrstu reiknilíkönin, sem hermdu eftir raunverulegu loftslagi á jörðinni urðu til. Fyrstu niðurstöður þeirra gáfu til kynna, að hitastig andrúmslofts við jörðu myndi hækka um tvær gráður, ef styrkur koltvíoxíðs í lofti tvöfaldaðist.²³

21 Júlíus Sólnes og fleiri, 2013. *Náttúruvá á Íslandi* Júlíus Sólnes, Freysteinn Sigmundsson og Bjarni Bessason, ritstjórar, bls. 27–29. Háskólaútgáfan & Viðlagatrygging Íslands.

22 Keeling, C. D., 1960. The Concentration and Isotopic Abundances of Carbon Dioxide in the Atmosphere. *Tellus*, 12, 200–203.

23 Manabe, Syukuro og Richard T. Wetherald, 1967. Thermal Equilibrium of the Atmosphere with a Given Distribution of Relative Humidity. *Journal of Atmospheric Sciences*, 24(3), 241–259.

Fram undir miðjan níunda áratuginn, tókust vísindamenn um allan heim á um hnattræna hlýnun af völdum aukins styrks koltvíoxíðs í andrúmslofti. Sumir töldu mjög ósennilegt, að mannskepnan gæti yfirleitt haft einhver áhrif á loftslag með gerðum sínum. Aðrir sýndu fram á bein tengsl milli hækkingar hitastigs og vaxandi magns kolsýru í lofti. Brezki veðurfræðingurinn John S. Sawyers reyndist þannig nokkuð sannspár, þegar hann spáði því í grein í tímaritinu *Nature* 1972,²⁴ að meðalhitastig á jörðu myndi hækka um 0,6 gráður fram að lokum aldar, en það hefur að mestu gengið eftir.

Bandaríkjamaðurinn Wallace Smith Broecker var sennilega fyrstur manna til að tala um hnattræna hlýnun (e. global warming) í grein um aukinn styrk CO₂ í andrúmslofti, er birtist í vísindatímaritinu *Science* 1975.²⁵ Í greininni leiðir Broecker rök að því, að sú kólnun sem hafi verið ríkjandi frá því um 1940, sé hluti af eðlilegri sveiflu veðurfars samkvæmt mælingum á súrefnissamsættunni 18^o (atómþungi 18) í Grænlandsjökli. Á næstu árum og áratugum muni áhrif koltvíoxíðs til hlýnunar lofts verða ríkjandi, og hitastig á fyrsta áratug 21. aldar verða hærra en nokkru sinni síðastliðin þúsund ár. Broecker verður þó væntanlega fyrst og fremst minnt fyrir framlag sitt til að greina áhrif sjávar og sjávarstrauma á loftslag jarðar. Hann talaði þannig um hnattrænt færiband sjávar, sem lýsir sjávarstraumum heimshafanna og átti frumkvæði að því að koma fyrir sporefnum í sjó til að rekja leiðir straumanna (sjá mynd 10).²⁶ Broecker lagði enn fremur grundvöll að rannsóknum á kolefnishringrás jarðar, sem nánar verður fjallað um síðar í þessari grein (sjá myndir 9a og 9b).

Upp úr 1980 fóru svo rannsóknaniðurstöður úr ísborholum að berast, bæði úr Grænlandsjökli og frá Suðurskautslandinu. 1985 náði fransk-rússneskur leiðangur tveggja kílómetra löngum ísborkjarna við Vostok stöðinni á Suðurskautinu, sem spannaði 150 þúsund ár.²⁷ Innihald koltvíoxíðs í loftbólum í kjarnanum sveiflaðist upp og niður í takt við hitastig á hverjum tíma. Þarna voru loftsyni frá miðri síðustu ísöld, sem sýndu helmingi lægri styrk koltvíoxíðs en nú, um 180 ppmv, eitthvað sem John Tyndall hafði talað um 100 árum áður. Tveimur árum síðar hafði Vostok leiðangurinn náð borkjörnum með loftsynum vel yfir 400 þúsunda ára tímabil, en það spannar fjögur kulda- og hlýskeið (sjá mynd 6). Lægstur varð styrkur koltvíoxíðs í lofti 180 ppmv, en komst aldrei í meira en 294 á hlýskeiðum milli ísaldanna. Í lofti við Vostok stöðina mældist hann hins vegar 350 árið 1987, sem passar vel við Keeling ferilinn (sjá mynd 6).²⁸ Þannig hafði beint samband milli styrks koltvíoxíðs í lofti og meðalhitastigs á jörðu verið staðfest.

Öreindir valda ýmist kólnun eða hlýnun

Vísindamenn og almenningur í eldfjallalöndum hafa lengi gert sér grein fyrir því, að í kjölfar mikilla eldgosa breytist veðurfar og loft kólnar. Þannig gætti áhrifa Skaftárelda 1783 um mest allt norðurhvel jarðar, þar sem næsti vetur varð mun kaldari en fólk átti að venjast.²⁹ Eldgosið mikla í Krakatau 1883 í Indónesíu sendi gífurlegt magn af gosefnum upp í loftið, þannig að öskuslæðan dró mjög víða úr birtu sólarljóss. Næstu tveir vetur voru óvenju harðir um allan heim, og víða varð uppskerubrestur. Sumir vísindamenn töldu því, að mikil eldgos á forsögulegum tíma hefðu getað orsakað ísaldirnar.³⁰

Um miðja 20. öld fóru veðurfræðingar og aðrir vísindamenn að gefa

24 Sawyers, John. S., 1972. Man-Made Carbon Dioxide and the Greenhouse Effect. *Nature*, 239, 23–26.

25 Broecker, Wallace Smith, 1975. Climatic Change: Are We on the Brink of a Pronounced Global Warming? *Science*, New Series, 189 (4201), 460–463.

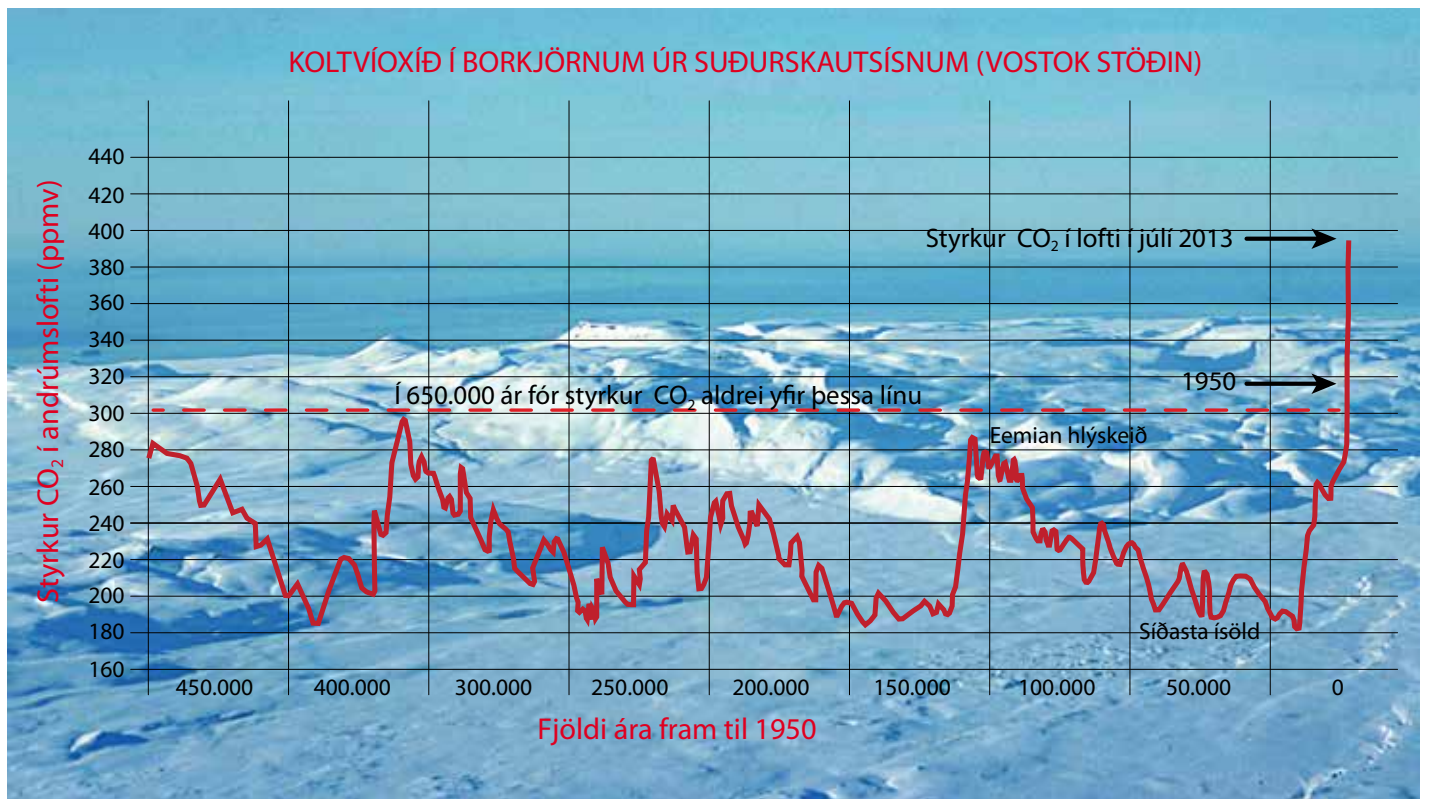
26 Broecker, Wallace Smith, 2000. Was a change in thermohaline circulation responsible for the Little Ice Age? *Proceedings National Academy of Sciences (PNAS)*, 97 (4), 1339–1342.

27 Lorius, Claude og fleiri, 1985. A 150,000-Year Climatic Record from Antarctic Ice. *Nature*, 316, 591–596.

28 Genthon, C. og fleiri, 1987. Vostok Ice Core: Climatic Response to CO₂ and Orbital Forcing Changes over the Last Climatic Cycle. *Nature*, 329, 414–418

29 Þorvaldur Þórðarson, 2013. Skaftáreldar. Í *Náttúruvá á Íslandi* (ritstj. Júlíus Sólnes, Freysteinn Sigmundsson og Bjarni Bessason), bls. 458–462.

30 Humphreys, W. J., 1913. Volcanic Dust and Other Factors in the Production of Climatic Changes, and Their Possible Relation to Ice Ages. *Journal of the Franklin Institute*, 176, 131–72.



Mynd 6. Styrkur koltvíoxíðs í lofti skv. mælingum á loftinnihaldi ísborkjarna frá Vostok stöðinni á Suðurskautinu. (Mynd Nasa (http://climate.nasa.gov/climate_resources/24/) endurteiknuð, ljósm. Oddur Sigurðsson).

betur gaum að áhrifum örsmárra agna, svokallaðra öreinda (e. aerosols), sem berast upp í andrúmsloftið af náttúrlegum völdum (eldgos (brennisteinstvíoxíð: SO_2 , saltsýra: HCl og aska), sandstormar, rykský og jarðvegsrof) og vegna athafna mannskepnunar (bruni jarðeldsneytis (kol og olía), sót og ryk, mengun frá umferð og margt fleira). Þessar agnir sitja eftir í loftinu, og þegar þær eru nægilega stórar, geta þær tvístrað sölargeislunum (björtu geislunum), dregið úr birtu (mistur), og sólsetur og sólarupprás verða rauðleit. Þannig dregur úr gróðurhúsaáhrifum vegna þess, að færri bjartir geislar komast til jarðar (sjá mynd 3), og það getur valdið staðbundinni kólnun. Vatnsdropar og ískristallar í lofti hafa sömu áhrif.

Í háloftunum, í meira en 100 km hæð, er þrýstingur minni og einfaldari efnissameindir ná að tvístra sölangeislunum á bláa tíðnisviðinu (um 640 TeraHerz). Þess vegna er himininn blár. Loftþrýstingur hefur nefnilega mikil áhrif á ísog og geislun gróðurhúsalofttegunda.³¹

Stór eldgos hafa gríðarleg áhrif á andrúmsloftið. Mikið magn brennisteinstvíoxíðs og saltsýrusameinda ásamt ösku berst upp í háloftin (heiðhvolfið). Saltsýrueindirnar þéttast fljótt með vatnsgufu og þeim rignir niður úr gosmekkinum. Brennisteinstvíoxíðið hvarfast hins vegar við gufuna og verður að sýrueindum. Þær þéttast og hlaðast í klösum utan á rykagnir í loftinu. Þannig skapast stórar öreindir sem eru mjög duglegar við að tvístra björtu geislunum og hafa þannig kólnun í för með sér. Bruni jarðeldsneytis í orkuverum veldur einnig mikill brennisteinsmengun, aðallega í veðrahvolfinu (0–10 km). Brennisteinstvíoxíð frá verksmiðjum og orkuverum umbreytist hins vegar fljótt í súlfat- eða sýruagnir, er mynda þær öreindir sem eru hvað virkastar við að tvístra sölangeislunum. Líftími slíkra öreinda er örfáar vikur í veðrahvolfinu, en þeim rignir oft niður sem súru regni. Í heiðhvolfinu endast þær mun lengur eða í nokkur ár, og þess vegna urðu veturnir eftir mikil eldgos svo harðir. Koltvíoxíð hefur hins vegar margfalt lengri líftíma í andrúmslofti og endurnýjast stöðugt með kolefnishringrásinni (sjá mynd 9b). Áhrifa þess gætir því miklu lengur.

Sótagnir geta ýmist valdið kólnun eða hlýnun, allt eftir því hvort þær

eru loftbornar eða mynda sótslikju á yfirborði jarðar. Í lofti sjúga þær sölangeislana í sig og hitna, loft hitnar, en draga annars úr gróðurhúsaáhrifum, þannig að yfirborð jarðar kólnar. Þar sem mikið er brennt af kolum og viði í ófullkomnum brennsluofnum eða við opin eld, verður sótmengun í lofti mikil. Í sumum sveitahéruðum Indlands er talið, að aðeins helmingur áhrifa sölangeislanna nýtist til hlýnunar vegna brúnna sótskýa.³² Þegar sótslikja hylur jörð, sérstaklega ísbreiður á heimskautsvæðum, lækkar endurkastsstuðull sölangeisla sem verður til þess að yfirborð hitnar meir en ella.³³

Tölvuöldin heldur innreið sína

Þegar vísindamenn fóru að beina sjónum sínum að öreindum í lofti upp úr miðri síðustu öld, voru hugmyndir þeirra um áhrif loftmengunar og öreinda í lofti þokukennar og lítið um samræmdar vísindalegar aðgerðir og rannsóknir. Öllum var ljóst, að loftmengun fór sívaxandi og áhrif hennar á andrúmsloft margvísleg. Sumir fræðimenn töldu, að mengunin myndi valda hlýnun lofts en aðrir kólnun þess. Þeir voru til sem álitu, að kólnun andrúmslofts af völdum öreinda myndi upphelja hlýnun vegna koltvíoxíðsins, svo að ekki þyrfti að hafa neinar áhyggjur af loftslaginu. Náttúran sjálf myndi sjá um að viðhalda eðlilegu jafnvægi.

Írski eðlisfræðingurinn Sean Twomey sýndi fram á með rannsóknum sínum við Arizona háskólann, að endurspeglun sölangeisla frá skýjum væri aðallega háð gufumyndandi kjörnum (e. cloud condensation nuclei) sem gætu skapað með öreindum í lofti. Fyrir þunn ský myndi fjölgun öreinda auka tvístrun sölangeisla og þannig valda kólnun, en í þykkum skýjum valda öfugum áhrifum með miklu ísogi sólarorku og hlýnun lofts.³⁴ Það var því ljóst, að vísindamönnum var mikill vandi á höndum að túlka öll þessi áhrif rétt. Öll reiknilíkon um hlýnun af völdum aukins koltvíoxíðs yrðu að taka fullt tillit til öreinda í lofti. Án

32 Ramanathan, V. og fleiri, 2005. Atmospheric brown clouds: Impacts on South Asian climate and hydrological cycle. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102 (15), 5326–5333.

33 Ramanathan, V. og fleiri, 2008. Útdráttur skýrslu: *Atmospheric Brown Clouds: Regional Assessment Report with Focus on Asia*. United Nations Environment Programme.

34 Twomey, 1977a. The Influence of Pollution on the Shortwave Albedo of Clouds. *Journal of Atmospheric Sciences*, 34, 1149–52.

31 Ari Ólafsson, 2007. Eðlisfræði gróðurhúsaáhrifa. *Tímarit um raunvísindi og stærðfræði*, 4 (1), 27–40.

þeirra væri niðurstaðan einfaldlega röng. Smám saman urðu vísindamenn þó sammála um, að kólnun andrúmslofts vegna öreinda, einkum þeirra sem brennisteinstvíoxíð frá mengandi orkurverum og iðnaði skapar, væri mun minni en hlýnun af völdum koltvíoxíðs. Reyndar sýna nýjustu rannsóknir,³⁵ að heildaráhrif (kólnun) eða neikvæð geislunarþvingun (e. radiative forcing) öreinda af manna völdum (um $-0,35$ W/m² á yfirborði jarðar) er minni heldur en jákvæð þvingun annarra gróðurhúsalofttegunda en koltvíoxíðs (um 1 W/m²), sem maðurinn losar.³⁶ Mikil brennisteinstvíoxíðmengun í lofti getur vissulega valdið tímabundinni kólnun, eins og gerist í miklum eldgosum, en þau áhrif dvína hratt, og kolsýran heldur sínu striki.

Upp úr 1970 mynduðust samstarfshópar vísindamanna af ýmsum toga um allan heim, er hófu að reikna áhrif gróðurhúsalofttegunda, öreinda og loftmengunar svo og sjávar í miklum tölvureiknilíkönum. Reiknilíkön fyrir loftslagsbreytingar og hlýnun lofts urðu æ viðameiri og flóknari, þar sem reynt var að taka tillit til allra hugsanlegra þátta, sem kynnu að hafa áhrif á hlýnunarferilinn. James Edward Hansen, loftslagsfræðingur og forstöðumaður Goddard geimvísindastofnunar NASA í New York, leiddi stóran hóp vísindamann er höfðu þróað mjög öflugt reiknilíkan fyrir loftslagsbreytingar vegna aukins koltvíoxíðs um 1980. Þeir reiknuðu með kólnun af völdum allra eldgosa á seinni tímum ásamt mengun af manna völdum og einnig með breytileika sólar. Þannig tókst þeim að fá allgott samræmi milli reiknaðs meðalhita og þess sem hann varð í raun.³⁷ Vísindamenn við Hadley rannsóknarmiðstöðina fyrir loftslagsspár í Stóra Bretlandi notuðu reiknilíkan sem tók tillit til koltvíoxíðs í lofti og samspils lofts og sjávar. Þeir reiknuðu hitaferla frá árinu 1860, ýmist með eða án áhrifa öreinda, og báru saman við hitamælingar. Þegar öreindirnar voru með, fékkst miklu betra við mæld gildi en ella.³⁸ Þessi niðurstaða vakti mikla athygli fræðimanna á þeim tíma.

Fleiri og fleiri vísindamenn, bæði loftslagsfræðingar, félagsfræðingar og hagfræðingar, fóru nú að velta fyrir sér alvarlegum afleiðingum hækkandi hitastigs á jörðu. Áhyggjur þeirra náðu eyrum stjórnálmanna víða um heim. James E. Hansen forstöðumaður Goddard stofnunarinnar kom fyrir fulltrúadeild bandaríska þingsins 1988 til þess að gera þingmönnum grein fyrir þeirri ógn sem stafaði af hlýnun andrúmslofts jarðar. Skömmu áður hafði hann ásamt samstarfsmönnum sínum birt grein um fyrstu loftslagsspár sínar á grundvelli nýrra útreikninga með mun fullkomnara reiknilíkani en áður hafði þekkt. Var nú gert ráð fyrir mismunandi sviðsmyndum fyrir vaxandi, minnkandi eða óbreytta losun koltvíoxíðs af manna völdum og þannig hægt að reikna breytingar á meðalhitaþingi við yfirborð jarðar. Hansen og félagar komust að þeirri niðurstöðu, að hlýnun andrúmslofts jarðar vegna mannlegra athafna væri óhjákvæmileg á næstu áratugum, ef ekkert yrði gert til að draga úr losun koltvíoxíðs.³⁹

Loftslagsráð Sameinuðu Þjóðanna, IPCC

Loftslagsráð Sameinuðu Þjóðanna (IPCC: International Panel of Climate Change) var stofnað 1988 af Alþjóðlegu Veðurstofnuninni (WMO) og Umhverfisstofnun Sameinuðu Þjóðanna (UNEP). Það hlaut formlega viðurkenningu Allsherjarþings Sameinuðu Þjóðanna með samþykkt 43/53, 6. des. 1988. Sænski veðurfræðingurinn Bert Bolin, sem hafði lagt svo mikið til málanna um samspil lofts og sjávar, var kjörinn fyrsti formaður ráðsins. Undir forystu hans tók ráðið til óspilltra málanna og lagði fram fyrstu skýrslu sína um loftslagsmál á annarri loftslagsráð-



Mynd 7. Loftslagsfræðingurinn og umhverfisverndarsinninn James Edward Hansen handtekinn fyrir framan Hvíta húsið 2011 fyrir að mótmæla lagningu Keystone olíuleiðslunnar frá Kanada til Bandaríkjana. (tarsandsaction, Wikimedia).

stefnu Sameinuðu Þjóðanna í Genf 1990. Þá ráðstefnu sóttu um 700 fremstu vísindamenn heims á sviði veðurfars- og loftslagsvísinda sem höfðu tekið þátt í semja skýrsluna eða lagt til efni í hana. Í fyrsta sinn birtist mikil samstaða þeirra um óhjákvæmilega hækkun hitastigs á jörðu vegna aukins styrks koltvíoxíðs í andrúmslofti, ef ekkert yrði að gert. Greinarhöfundur sótti ráðherrafund ráðstefnunnar í kjölfar vísindahluta hennar sem fyrsti umhverfisráðherra landsins. Þar átti hann meðal annars langt samtal við formanninn Bert Bolin um stöðu Íslands í þessu samhengi. Var þá meðal annars rætt um áhrif mikilla eldgosa á loftslag og kólnunaráhrif vegna brennisteinstvíoxíðs (SO₂) sem berst með gosmekkinum. Brennisteinsmengun frá Íslandi myndi halda aftur af gróðurhúsááhrifum, en ekki ná til meginlands Evrópu sem súrt regn að mati Bolin.

Eftir að Loftslagssamningur Sameinuðu Þjóðanna (UNFCCC) var samþykktur á Ríó ráðstefnunni 1992, hefur Loftslagsráðið tekið saman stöðuskýrslur fyrir samningsaðila með reglulegu millibili. Þess ber að geta, að ráðið stendur ekki fyrir neinum loftslagsrannsóknnum eða mælingum á eigin vegum. Skýrslur þess byggjast á rannsóknum og vísindagreinum loftslagsvísindamanna um allan heim. Hundruð þeirra ásamt öðrum sérfræðingum leggja sjálfviljugir til efni til ráðsins og taka þátt í að skrifa og fara yfir skýrslur án endurgjalds. Þær eru síðan yfirfarnar af fulltrúum ríkisstjórna landa, sem hafa staðfest loftslagsáttmálann, áður en þær eru birtar. Þannig hefur Loftslagsráð Sameinuðu Þjóðanna öðlazzt alþjóðlega viðurkennt áhrifaávald og myndugleika gagnvart loftslagsmálum. Skýrslur ráðsins sýna í raun sameiginlegt sjónarmið helztu loftslagsvísindamanna heims og eru um leið sameiginlegt álit allra ríkisstjórna fyrir hönd þátttökulandanna. Loftslagsráðið hlaut friðar-

35 Myhre, Gunnar og fl., 2013. Atmospheric Chemistry and Physics, 13, 1853–1877.

36 Butler, J.H. & S.A. Montzka, 2013. The NOAA Annual Greenhouse Gas Index (AGGI). NOAA/ESRL Global Monitoring Division. (<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/aggi.html>, sótt í marz 2016).

37 Hansen, James E. og fleiri, 1981. Climate Impact of Increasing Atmospheric Carbon Dioxide. *Science*, 213, 957–66.

38 Mitchell, John F. B. og fleiri, 1995. Climate Response to Increasing Levels of Greenhouse Gases and Sulphate Aerosols. *Nature*, 376, 501–504.

39 Hansen, James E. og fleiri, 1988. Global climate changes as forecast by Goddard Institute for Space Studies three-dimensional model. *Journal of Geophysical Research*, 93, 9341–9364.

verðlaun Nóbels ásamt fyrrum varaforseta Bandaríkjanna Al Gore árið 2007.

Fimmta stöðuskýrsla ráðsins kom út 2014. Í yfirliti hennar eru mörg álitamál afgreidd á afgerandi hátt. Í fyrsta lagi: Áhrif manna á loftslagskerfið eru greinileg, og losun gróðurhúsalofttegunda af manna völdum hefur í seinni tíð aldrei verið meiri. Loftslagsbreytingar á seinni tímum hafa haft víðtæk áhrif á menn og náttúru. Í öðru lagi: Hlýnun andrúmslofts er ótvíræð, og miklar loftslagsbreytingar sem hafa átt sér stað síðan 1950 eru fordæmalausar, þótt lítið sé yfir áratugi, jafnvel árbúsundir. Andrúmsloft og höf hafa hitnað, magn snævar og ís minnkað og sjávarýfirborð hækkað. Í þriðja lagi: Losun gróðurhúsalofttegunda hefur aukizt verulega frá því fyrir iðnbyltingu á átjándu öld, aðallega vegna fólksfjölgunar og hagvaxtar, og styrkur þeirra í andrúmslofti hefur aldrei verið meiri. Meira koltvíoxíð, metan og nituroxíð finnst í lofti en fordæmi eru fyrir síðastliðin 800 þúsund ár. Áhrif þessara lofttegunda greinast alls staðar í loftslagskerfinu. Þau eru mjög líklega aðalorsök þeirrar hlýnunar, sem orðið hefur frá miðri síðustu öld. Í fjórða lagi: Uppsafnað koltvíoxíð í andrúmslofti ræður mestu um hlýnun við yfirborð jarðar, þegar dregur að lokum 21. aldar og á næstu öld. Spár um frekari losun gróðurhúsalofttegunda eru mjög breytilegar. Þær eru bæði háðar félagslegri og efnahagslegri þróun og stefnumörkun í loftslagsmálum. Skýrslan var ítarlega rædd á ráðstefnunni í París 2015, og var hún undirstaða þeirra ályktana, sem þar voru samþykktar.

Kolefnisbúskapur jarðar

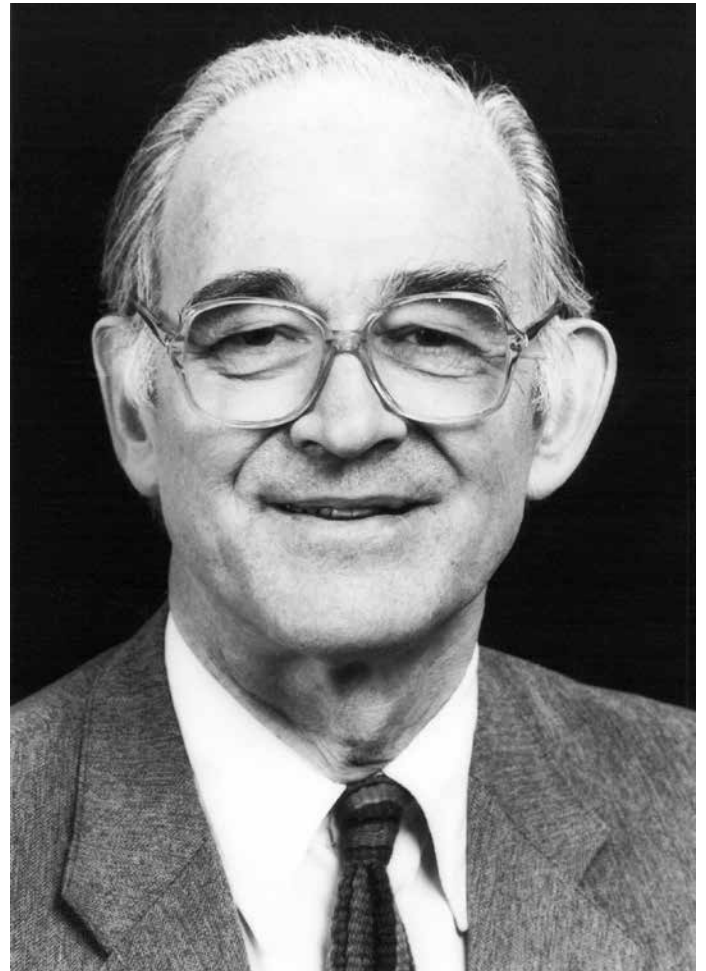
Vísindamenn veltu lengi fyrir sér hvernig kolefnisbúskapur jarðar væri háttad. Menn gerðu sér grein fyrir, að mikið magn koltvíoxíðs bærst upp í andrúmsloftið frá rotandi lífverum og gróðri, bæði á landi og í sjó. Þá myndu plöntur og gróandi nota mikið magn af kolsýru úr lofti með ljóstillífun. Þarna væri því um að ræða mikla hringrás kolefnis milli jarðar og lofts, og einhvers konar jafnvægi hlyti að ríkja í þessu tilliti. Í þessu samhengi skiptir og miklu máli hversu langan aldur koltvíoxíðsameindirnar eiga í andrúmsloftinu.

Baldur Elíasson eðlisfræðingur, sem starfaði lengi hjá sænsk-svissneska fyrirtækinu ABB (Asea-Brown Boveri) í Sviss, stundaði miklar rannsóknir á loftslagsmálum og kolefnisbúskapur jarðar samhliða störfum sínum hjá fyrirtækinu. Í fyrirlestri sem hann hélt á Íslandi 1999, kynnti hann einfaldaða mynd af kolefnishringrásinni, þar sem koltvíoxíð hefur verið umreiknað í hreint kolefni.⁴⁰ Kerfi Baldurs byggist á því, að á hverju ári sendi jörðin frá sér koltvíoxíð upp í andrúmsloftið af náttúrulegum orsökum, sem samsvarar 140 gígatonnum af hreinu kolefni (sjá mynd 9a). Þar af koma 75 Gt frá landi (gróður og jarðvegur), en 65 Gt úr hafinu (uppgufun og rotnun). Jörðin tekur síðan við nokkurn veginn sama magni með ljóstillífun plantna og ísogi jarðvegs. Og hafið gleypir svipað magn og það sendir frá sér. Fram að iðnbyltingunni á 18. öld ríkti nánast fullkomið jafnvægi í kolefnishringrásinni milli jarðar og lofts. Stóra sveiflan á hringrásinni, sem kemur fram á Vostok ferlinum (sjá mynd 6), breytir engu þar um, en hún stafar aðallega af breytingum á öxulhalla jarðar í svokölluðum Milankovitch lotum.⁴¹

Með iðnbyltingunni byrjar maðurinn að trufla þessa hringrás með mikilli losun koltvíoxíðs frá iðnaði, samgöngum og orkuverum, og nemur hún nú 7–8 Gt á ári. Baldur gerir ráð fyrir, að náttúrulega hringrásin geti bætt hluta af þessari losun við sig, 4–5 Gt, og því safnist rúmlega 3 Gt, þrjú milljarðar tonna, á ári fyrir í andrúmsloftinu, eins og Keeling ferillinn sýnir (sjá mynd 5).

Kolefnislíkan IPCC

Kolefnisbúskapur jarðar, eins og Baldur setur hann fram, er mjög einfölduð mynd af kolefnishringrásinni og byggist á ófullkomnum upplýsingum þess tíma. Eitt af stóru verkefnum Loftslagsráðs Sameinuðu þjóðanna hefur verið að greina kolefnishringrásina betur og áætla



Mynd 8. Sænski veðurfræðingurinn Bert Rickard Johannes Bolin (1925–2007). Einn af frumkvöðlum rannsókna á loftslagsbreytingum og hlýnunaráhrifum af völdum kolsýru í lofti. Ljósmynd KVA.

magn koltvíoxíðs í henni. Vinnuhópur 1 hjá ráðinu sér um þetta verkefni, og hefur hópurinn einnig skoðað náttúrulegar hringrásir annarra höfuðefna andrúmslofts. Í kafla 6.1 í 5. Stöðuskýrslu IPCC frá 2013/2014 (auðvelt er að nálgast allar skýrslur ráðsins á heimasíðu þess, <http://www.ipcc.ch/>) er fjallað um kolefnishringrásina.⁴² Þar er gerð grein fyrir öllum uppsprettum koltvíoxíðs á jörðu svo og óvirkum forðabúrum þess, og hvernig samspili lands, sævar og lofthjúps er háttad. Mynd 6.1 í skýrslunni sýnir kolefnishringrásina. Hún er birt hér í íslenskri útgáfu með góðfúslegu leyfi Vinnuhóps 1. Hefur myndin frá 2013 verið leiðrétt af vinnuhópnum (mynd 9b) og því ekki birzt áður.

Eins og á mynd Baldurs, er koltvíoxíð umreiknað í magn hreins kolefnis, C. Tölurnar gefa til kynna kolefnismagn í forðabúrum jarðar (t.d. olíu- og kolabirgðir í jörðu) í PgC (1 petagram (10^{15} g) af kolefni samsvarar einum milljarði tonna eða einu gígatonni Gt) og árlega skiptitrauma kolefnis í PgC/ári. Svartar tölur og örvar tákna magn í forðabúrum og árlega trauma kolefnis fyrir iðnbyltingu, um 1750. Svartir straumar sýna því hina náttúrulegu hringrás kolefnis. Rauðar örvar og tölur tákna árlega trauma af manna völdum sem meðaltal árána 2000–2009. Þeir sýna þannig þá truflun sem hefur orðið á kolefnishringrásinni vegna mannlegra athafna frá 1750 til 2011. Þessir straumar (rauðar örvar) eru: Losun koltvíoxíðs, CO₂, vegna jarðeldsneytis og sementsframleiðslu (kafla 6.3.1 í skýrslu WG1), vegna breytinga á landi af völdum breyttrar notkunar (kafla 6.3.2), vegna meðalaukningar á CO₂ í andrúmslofti, einnig kallað „vaxtarhraði CO₂“ (kafla 6.3). Gleypni CO₂ af sjó og vistkerfum á landi, oft kölluð kolefnis-sökkbrunnur, er sýnd með rauðu örvunum fyrir verga land- og sjávarstrauma.

40 Baldur Elíasson, 1994. Emissions and the global environment. Statistics and Scenarios. ABB Report, *ABB Environmental Affairs*, November 1994, 44 bls.

41 <http://www.encyclopedia.com/doc/1G2-2830905919.html> (skoðuð í janúar 2016)

42 WG1, 2013. *The Climate Change 2013, The Physical Science Basis*, Chapter 6. bls. 456–570.

Rauðar tölur í forðabúrum tákna samanlagðar breytingar á kolefnisbúskapnum af manna völdum yfir iðnaðartímabilið 1750–2011 (2. dálkur í töflu 6.1. í skýrslunni). Samkvæmt viðtekinni reglu tákna þósitíf samantölgð breyting, að forðabúr hefur bætt við sig kolefni síðan 1750. Heildarbreyting á kolefnisforða af manna völdum á landi er summa þess kolefnis sem hefur tapazt vegna breyttrar landnotkunar og þess sem hefur bætt við síðan 1750 í öðrum vistkerfum á landi (tafla 6.1). Breytingar á vergum landstraumum (rauðar örvar fyrir heildartilflun plantna, heildarútöndun og bruna) hafa verið áætlaðar eftir niðurstöðum reiknilíkana sem eru hluti af CMIP5 verkefninu (e. Climate Modelling Intercomparison Project, Phase 5, kafli 6.4 í skýrslu WG1).

Kolefnistraumar frá eldgosum, bergrofi (hvörfun silíkata og karbónata leiðir til smávegis gleypni CO₂), framburður kolefnis úr jarðvegi sem berst út í ár, greftrun kolefnis í náttúrulegum vötnum og vatnslónum og framburður kolefnis í ám til sjávar eru allir taldir vera náttúrulegir og því óbreyttir tímabilið 1750–2011. Birgðahald kolefnis í andrúmslofti er reiknað með því að nota umbreytingarstuðulinn 2,12 PgC til að fá eininguna ppmv (e. parts per million by volume).

Þannig fæst lokaniðurstaðan, að árleg meðalaukning kolefnis í andrúmslofti frá 1750–2011 nemur 4 GtC. Það er ívið meira heldur en Baldur Elíasson setti fram í grein sinni 1994, en ekki svo langt frá mati hans sem var rúmlega 3 GtC. Það er þessi árlega viðbót sem kemur fram á Keelingferlinum (mynd 3) og hefur hækkað styrk koltvíoxíðs í andrúmslofti úr u.þ.b. 280 ppmv fyrir iðnbyltingu í rétt tæplega 400 ppmv 2015.

En hvað verður svo um uppsafnað koltvíoxíð í andrúmsloftinu? Þessari spurningu er svarað í kafla 6.4 í skýrslu vinnuhópsins. Fyrst breiðist það hratt um loftið og deilir sér síðan milli þess, grunnsjávar og gróðurs. Í kjölfarið heldur kolefni áfram að flytjast milli mismunandi forðabúra í kolefnishringrásinni, svo sem í jarðvegi, á djúpsævi og í bergi, og gerist það yfirleitt mjög hægt. Allt eftir því hversu mikið koltvíoxíð berst upp í loftið, verða milli 15 og 40% eftir í andrúmsloftinu í allt að 2000 ár, en þá næst nýtt jafnvægi milli andrúmslofts, lífríkis á land og hafs.

Ferli, sem endurdræfa kolefni milli jarðfræðilegra forðabúra, geta varað allt frá tugum til hundraða þúsunda ára, jafnvel lengur. Það má því vera ljóst, að aukinn styrkur koltvíoxíðs í lofti, og þær loftslagsbreytingar sem tengjast núverandi losun af manna völdum, munu vera viðvarandi langt inn í framtíðina.

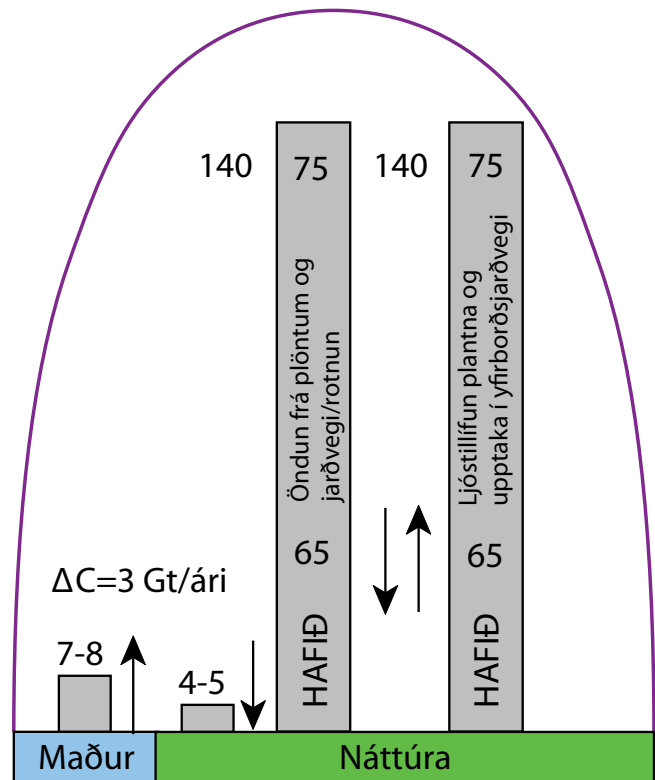
Það skal enn og aftur ítrekað, að Loftslagsráð Sameinuðu þjóðanna stendur ekki fyrir neinum sjálfstæðum rannsóknum, eða skrifar skýrslur sínar á eigin forsendum. Stöðuskýrslurnar byggjast einvörðungu á birtum, ritrýndum vísindagreinum, sem vinnuhópar ráðsins hafa farið yfir og síðan fengið höfundu þeirra til að leggja til sem efni í þær. Skýrslur IPCC byggjast því á samvinnu fleiri hundruð vísindamanna um allan heim.

Sjávarstraumar og hafísbráðnun

Mælingar á hita sjávar sýna, að varmainingald hans hefur aukizt verulega á síðustu 30 árum, sem rennir stöðum undir niðurstöður reiknilíkananna. Um 64% þeirra breytinga, sem hafa orðið á varmaorku jarðar, hafa átt sér stað í efri hluta sjávar (0–700 m). Bráðnun íss (hafís á norðurslóðum, ísalög og jökklar) hefur valdið 3% af heildarbreytingunni og hlýnun landmassans öðrum 3%. Hlýnun andrúmsloft á svo 1% hlutdeild í orkubreytingunni. Það er nú talið fullvíst, að hitaorka jarðarinnar hafi vaxið verulega á árunum 1971 til 2010, eða um 274 ZJ (1 ZettaJoule = 10²¹Joule = 2,78x10⁸ TWh).⁴³

Hér heima hafa heyrzt raddir sem gagnrýna loftslagsreikningana fyrir þær sakir, að ekki hafi verið reiknað með áhrifum hafíss í norðurhöfum. Þetta virðist byggt á misskilningi skv. upplýsingum frá Cecilíu Bitz, prófessor í loftslagsfræðum við Háskólann í Washingtonríki. Hún bendir á, að meira en 90% af þeim reiknilíkönum, sem Loftslagsráðið

Umreiknað í magn hreins kolefnis C (Gtonn/ári)



Mynd 9a. Heimshringrás koltvíoxíðs skv. rannsóknum Baldurs Elíassonar eðlisfræðings. Um þrjú gigatonn af kolefni í formi koltvíoxíðs hlaðast upp í andrúmslofti á hverju ári af manna völdum.

og vinnuhópur 1 hafa skoðað (CMIP5 verkefnið), taka tillit til áhrifa hafíss.⁴⁴ Á ráðstefnu loftslags- og veðurfræðinga á Svalbarða 2008, hélt Cecilia erindi, þar sem hún lýsir meira en tug reiknilíkana, þar sem hafís er meðal þeirra áhrifaþátta er þau byggjast á.⁴⁵

Björn Erlingsson, loftslagsfræðingur hjá Veðurstofu Íslands, hefur rannsakað áhrif hafíss og mikla þynningu hans undanfarna áratugi. Hann telur að ísbráðnunin verði ekki skýrð með gróðurhúsaáhrifunum einum saman, og núverandi líkön nái ekki að skýra á fullnægjandi hátt hvað veldur þessari miklu eyðingu á hafísbreiðunni.⁴⁶ Það er því ennþá verk fyrir höndum að fá þennan þátt rétt metinn í reiknilíkonunum.

Hópur vísindamanna undir forystu loftslagsfræðingsins James Edwards Hansen birti nýverið (í marz 2016) niðurstöður rannsókna sinna á ísbráðnum í norður og suðurhöfum og fleiri áhrifaþáttum loftslagsbreytinga.⁴⁷ Þær taka meðal annars mið af þeim breytingum sem urðu á veðurfari og hafstraumum og hækkuðu yfirborðs sjávar á Eemian hlýskeiðinu fyrir rúmlega 120 þúsund árum, en þá var meðalofthiti á jörðu tæplega einni gráðu meiri en nú (styrkur koltvíoxíðs mestur tæplega 290 ppmv, sjá mynd 6). Samkvæmt athugunum á fjöruborði víða um heim hækkaði sjávarmál á Eemian skeiðinu 6–9 metra af völdum ísbráðunar, og ummerki finnast um mikla storma og öfgakennt veðurfar. Undir lok Eemian hæggði mjög á Atlantshafshringrásinni (e. Atlantic Meridional Ocean Circulation, AMOC, sjá mynd 10), og stöðvaðist hún að lokum. Þá hófst Weichsel kuldaskiðið og þar með talin síðasta ísöld. Þar sem Golfstraumurinn er hluti af hringrásinni, gefur það vísbendingu um hverju við getum búizt við.⁴⁸

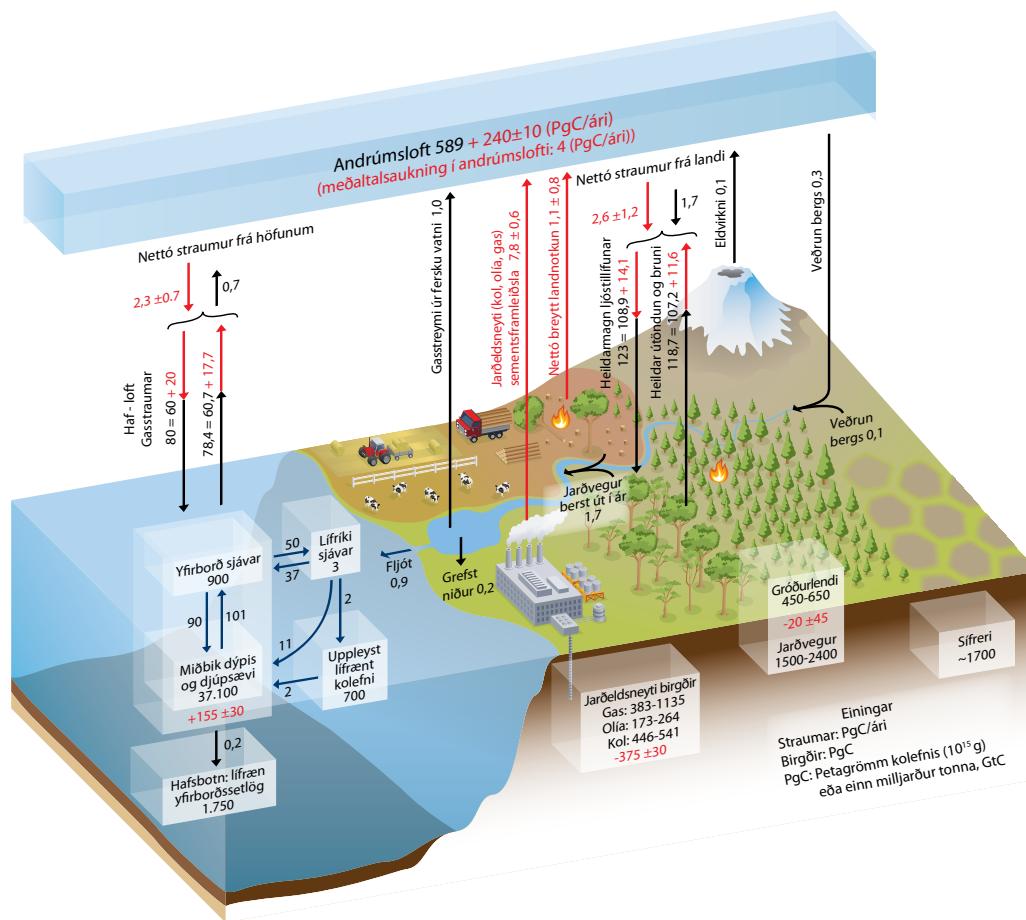
44 Bitz, Cecilia, 2016. Tölvupóstssamskipti.

45 http://www.atmos.washington.edu/~bitz/Bitz_draftchapter.pdf (skoðuð í janúar 2016)

46 Björn Erlingsson, 2016. Tölvupóstssamskipti.

47 Hansen, James et al., 2016. Ice melt, sea level rise and superstorms: evidence from paleoclimate data, climate modeling, and modern observations that 2°C global warming could be dangerous. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 3761–3812.

48 Sama heimild.



Mynd 9b. Kolefnisbúskapur jarðar. Leiðrétt mynd 6.1 í Stöðuskýrslu vinnuhóps 1, 2013. (Ciais, P., C. Sabine, G. Bala, L. Bopp, V. Brovkin, J. Canadell, A. Chhabra, R. DeFries, J. Galloway, M. Heimann, C. Jones, C. Le Quéré, R.B. Myneni, S. Piao and P. Thornton, 2013. *Carbon and Other Biogeochemical Cycles* (Í *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the 5th Assessment Report of the IPCC* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex og P.M. Midgley (ritstjórar)], bls. 465–570. Cambridge University Press).

Rannsóknarhópur James Hansen kemst að þeirri niðurstöðu,⁴⁹ að hröð bráðnun íshellunnar, bæði á Suðurskautslandinu og í Norður Atlantshafi, stafi af aukinni varmaorku á djúpsævi af völdum hnatt-rænnar hlýnunar og flóknu samspili sjávar og bræðsluvatns frá bráðnandi jöklum og hafís. Vatn frá bráðnandi ís myndar kalt yfirborðslag í hafinu, eins konar létt lok, á sjávarfletinum. Fyrir utan bein áhrif svo sem hækun sjávarýfirborðs, sem getur orðið veruleg, sbr. Eemian tímabilið, eru aðrar afleiðingar varmatengdar. Annars vegar verður vatnssúlan undir „lokun“ stöðugri, og hins vegar er ferska yfirborðslagið einangrandi, þannig að dregur úr flutningi varmaorku sjávar til lofts og út í geiminn. Við Suðurskautslandið hitnar djúpsjór af þessum sökum, einkum á dýpi grunnlínu íshellunnar (sjá mynd 10). Aukin varmaorka sjávar við undirstöðu hellunnar veikir hana, flýtir fyrir upp-broti og hægir enn fremur verulega á botnsjávarhringrásinni í Suður Atlantshafi (SMOC).

Í Norður Atlantshafinu eru áhrif bræðsluvatnsins önnur. Það getur dregið verulega úr myndun djúpsjávarvatns (NADW). Þar með hægir á AMOC hringrásinni, og hún gæti að lokum stöðvast. Bryden og fl. (2005)⁵⁰ töldu, að djúpsjávarstraumurinn (NMOC) til suðurs hafi þegar minnkað um 4 Sverdrup (1 Sverdrup (Sv) = 10^6 m³/s). Rahmstorf og fl. (2015)⁵¹ segja hins vegar, að AMOC hringrásin (meðalstreymi 17,2 Sv) hafi jafnað sig aftur að mestu leyti eftir 1990. Það hægði verulega á henni um og eftir 1970, sem olli langvarandi breytingum á sjávarhita í norðurhöfum, m.a. skapaði kuldapoll í Norður Atlantshafi suður af

Íslandi. CMIP5 líkólin hafi hins vegar ekki náð að sýna þessa kólnun (1970–1990). Margt bendi þó til þess, að aftur sé farið að hægja á hringrásinni. Robson og fl. (2014)⁵² birtu nýlega niðurstöður samfelldra mælinga á hringrásinni frá 2004 með Rapid-Mocha mælaraðinni (samsstarfsverkefni enskra (Rapid) og bandarískra (Mocha) vísindastofnana um rekstur mælakerfis með nemum þvert yfir Atlantshafið við breiddargráðu 26,5° N). Þær gefa til kynna, að hægt hafi á hringrásinni svo að áþreifanlegt sé, þ.e. $-0,5 \text{ Sv} \pm 0,2$ á ári 2004–2012, sem samsvarar $\sim 4 \text{ Sv}$ minnkun á straumnum þetta tímabil. Saba og fl. (2015)⁵³ staðfesta þessa niðurstöðu, og rannsóknarhópur Hansen⁵⁴ telur, að AMOC hringrásin muni hægja mjög á sér á næstu árum og áratugum vegna mikils innstreymis fersks bræðsluvatns í Norður Atlantshafið frá Grænlandsjökli og hafísbreiðunni. Það hefur verið áætlað 100–200 km³ á ári síðustu árin, en mældist um 360 km³ 2012, miðað við 720 km³ frá suðurskautslandsísnum sama ár.

Þessar tölur eru háðar mikilli óvissu og erfitt að sjá, að hægt sé að draga sterkar ályktanir af þeim. Þannig benda Buckley og Marshall⁵⁵ á, að miklar sveiflur séu á AMOC hringrásinni frá mánuði til mánaðar vegna vindafars. Meðalstreymið sé 17,2 Sv með 10 daga breytileika 4,6 Sv. Einnig séu árlegar og áratuga sveiflur á hringrásinni að eðlisfari

52 Robson, Jon og fl., 2014. Atlantic overturning in decline?, *Nature, Geoscience*, 7, 2–3.

53 Saba, Vincent S. og fl., 2016. Enhanced warming of the Northwest Atlantic Ocean under climate change. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121 (1), 118–132.

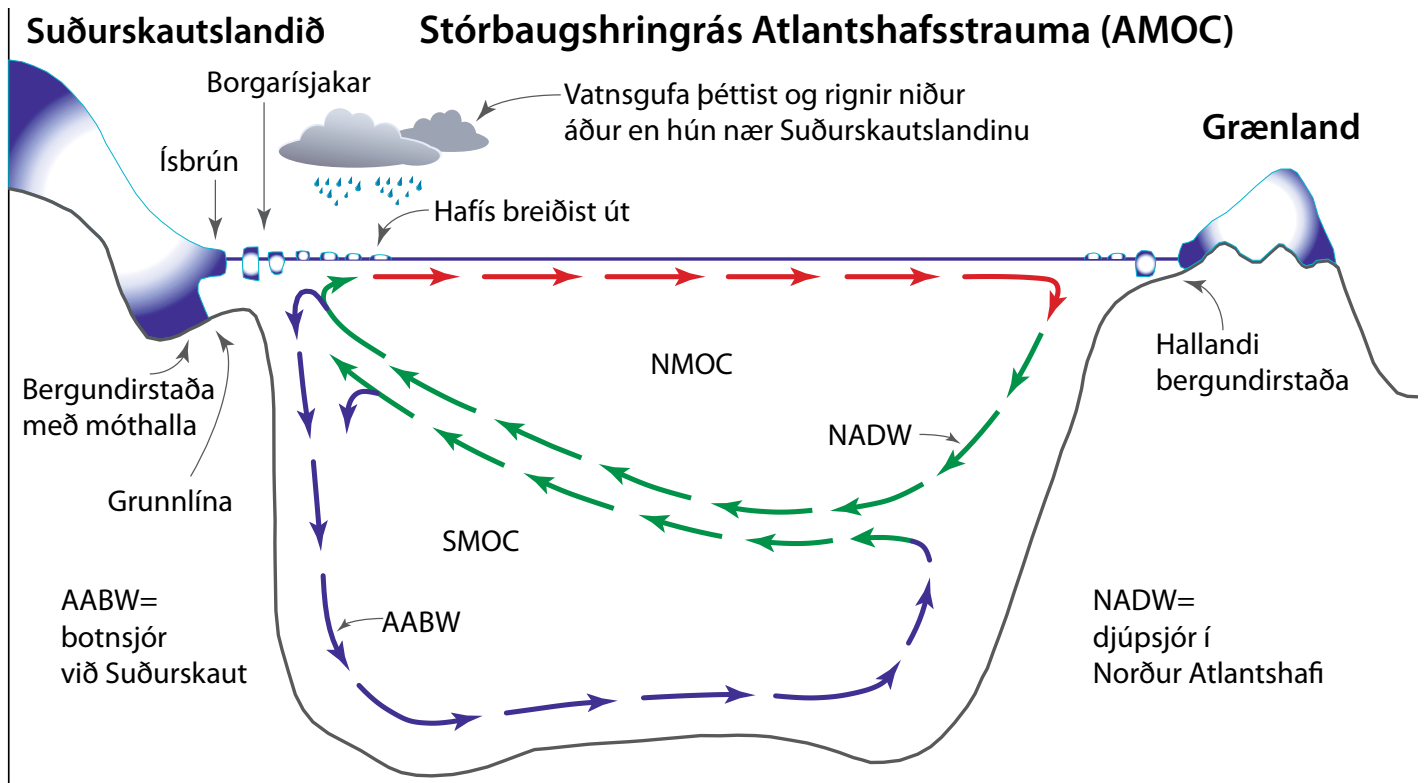
54 Hansen, James et al., 2016. Ice melt, sea level rise and superstorms: evidence from paleoclimate data, climate modeling, and modern observations that 2°C global warming could be dangerous. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 3761–3812.

55 Buckley, Martha W. & John Marshall, 2016. Observations, inferences, and mechanisms of the Atlantic Meridional Overturning Circulation: A review. *Reviews of Geophysics*, 54, 5–63.

49 Sama heimild.

50 Bryden, H. L., Hannah R. Longworth & Stewart A. Cunningham, 2005. Slowing of the Atlantic Meridional Overturning Circulation. *Nature*, 438, 655–657.

51 Rahmstorf, Stefan og fl., 2015. Exceptional twentieth-century slowdown in Atlantic Ocean overturning circulation. *Nature-climate change*, 5, 475–480.



Mynd 10. Gróf yfirlitsmynd sem sýnir Atlantshafshluta hins hnattræna færifbands sjávar-AMOC hringrásin. Lagskipting sjávar og úrkoma hefur mikil áhrif á hnattræna hlýnun (mynd 18 í grein Hansen og fl. endurteiknuð). Vaxandi útstreymi af fersku leysingarvatni minnkar eðlismassa yfirborðslags sjávar. Það dregur úr myndun suðurskautsbotnsjávar (AABW), fangar hitaorku djúpsjávar úr Norðuratlantshafi og eykur þannig ísbráðnun. Ferskvatnsinnstreymið kælir yfirborðslagið, eykur útbreiðslu hafís sem leiðir til þess, að úrkoma fellur yfir sjó, en nær ekki inn yfir Suðurskautslandið. Það hefur aftur í för með sér, að dregur úr ísmyndun á Suðurskautinu og ferskvatnsmyndun með ísbráðnun eykst út á sjó.

afstæðar (e. geostrophic, sjá Unnsteinn Stefánsson⁵⁶) og tengist breytingum á fleytiþæfni (e. buoyancy, háð þéttleika og seltu) sjávar við vesturjaðar hringrásarinnar. Sá breytileiki er þó mun minni en fyrir skammtímasveiflurnar, eða um 1 Sv. Buckley og Marshall⁵⁷ álykta því, að hæpið sé að spá fyrir um þróun AMOC hringrásarinnar til langs tíma á grundvelli Rapid-Mocha mælinganna, sem hafa einungis staðið yfir í rúmlega 10 ár.

Í þessu ljósi verður að skoða niðurstöður reiknilíkana Hansen og fl.,⁵⁸ sem sýna að haldi losun gróðurhúsalofttegunda áfram að aukast, muni AMOC hringrásin geti orðið mjög veik eða stöðvazt alveg undir lok þessarar aldar eða snemma á næstu öld. Við það eykst kuldapollurinn í Norður Atlantshafi. Miðað við að ísbráðnun tvöfaldist á 10 árum, gefur reiknilíkanið til dæmis þá niðurstöðu, að hitastig á Íslandi haldist nánast óbreytt fram til 2065 miðað við meðalhita árána 1880–1920 (3,1°C skv. mælingum á Teigarhorni og í Stykkishólmi). Um 2080 hefur það lækkað um átta gráður og 2096 um rúmlega 10 gráður. Þessi hitalækkun er mjög staðbundin, þ.e. við kuldapollinn í Norður Atlantshafi, og getur verið tímabundin (nokkrar aldir). Þótt einnig kólni á vissum stöðum á suðurhveli jarðar, eru kuldapollar þar aðallega á óbyggðum svæðum.

Þessi staðbundna kólnun, bæði á suður og norðurslóðum, hefur ekki teljandi áhrif á hnattræna hlýnun. Meðalhitastig andrúmslofts á jörðu heldur áfram að fara vaxandi og yfirborð sjávar hækkar. Kuldapollurinn í Norður Atlantshafi er hins vegar til þess fallinn að stuðla að óstöðugu veðurfari, þar sem hitastiglar milli tiltölulega nálægra svæða verða miklir. Það mun koma fram í miklum óveðrum rétt eins og gerðist á

Eemian hlýskeiðinu.⁵⁹

Eins og bent hefur verið á hér að framan, verður að gjalda varhug við þessum niðurstöðum. Þær byggjast á því, að AMOC hringrásin veikist svo um munar fram til loka aldarinnar og sé þegar farin að hægja á sér, nokkuð sem Buckley og Marshall⁶⁰ telja of snemmt að segja til um. Á fundi í Háskóla Íslands í lok maí 2016, tók Stefan Rahmstorf hins vegar dýpra í árinna og sagði, að augljós sannindamerki, bæði bein og óbein, væru komin fram um að Atlantshafshringrásin hefði hægt á sér. Það myndi auka kuldapollinn suðaustur af Íslandi, eins og James Hansen og fleiri gera ráð fyrir.⁶¹

Í grein Saba og fl.⁶² kemur fram, að CMIP5 reiknilíkonin noti reikni-net með of grófum möskva fyrir haf og loft (~100 km) til að fá áreiðanlegar niðurstöður. Kann það einnig að eiga við líkón rannsóknarhóps Hansen. Það valdi því meðal annars, að ferill Golfstraumsins sé ekki réttur í líkónunum og sjávarhiti því ofmetin á vissum stöðum. Því byggjast áætlaðar loftsloftsbreytingar CMIP5 líkananna að einhverju leyti á rangri staðsetningu Golfstraumsins. Til þess að fá gott og fullnægjandi samræmi milli reiknaðrar útkomu og mælinga á sjávarhita, þarf möskvinn að vera um 10 km. Það gerir tölvulíkanið óhemju viðamikilið, þurftarfrekt og kostnaðarsamt og kallar á enn stærri og öflugri ofurtölvur, eitthvað sem væntanlega leysist í náinni framtíð. Rannsóknarhópur Saba beinir augum sínum að áhrifum þessa á vindknúna yfirborðstraumana, þ.e. Golfstrauminn og Ekman flutningsstrauma. Þótt Golfstraumurinn hafi mælt nokkuð stöðugur frá 1980 (um 32 Sv gegnum Florida sundið⁶³) sýna rannsóknarniðurstöður Saba

56 Unnsteinn Stefánsson, 1994. *Hafrræði* 2 (19. kafli), 541 bls. Háskólaútgáfan.

57 Buckley, Martha W. & John Marshall, 2016. Observations, inferences, and mechanisms of the Atlantic Meridional Overturning Circulation: A review. *Reviews of Geophysics*, 54, 5–63.

58 Hansen, James et al., 2016. Ice melt, sea level rise and superstorms: evidence from paleoclimate data, climate modeling, and modern observations that 2°C global warming could be dangerous. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 3761–3812.

59 Sama heimild.

60 Buckley, Martha W. & John Marshall, 2016. Observations, inferences, and mechanisms of the Atlantic Meridional Overturning Circulation: A review. *Reviews of Geophysics*, 54, 5–63.

61 Hansen, James et al., 2016. Ice melt, sea level rise and superstorms: evidence from paleoclimate data, climate modeling, and modern observations that 2°C global warming could be dangerous. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 3761–3812.

62 Saba, Vincent S. og fl., 2016. Enhanced warming of the Northwest Atlantic Ocean under climate change. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121 (1), 118–132.

og fl., að þegar hafi orðið veruleg truflun á straumnum. Hann hafi flutt sig norðar við norðausturströnd Ameríku og sjór þar hitnað verulega af þeim sökum, en kólnað suðaustur af Grænlandi.

Hlýnun andrúmslofts er staðreynd

Það þarf ekki annað en horfa á Vostok ferillinn (mynd 4) til þess að gera sér grein fyrir, að meðalhiti á yfirborði jarðar er í nánú samhengi við styrk koltvíoxíðs í andrúmslofti. Á honum má nefnilega sjá nokkur kuldaskið, þegar styrkur CO₂ var lágur (180 ppmv) og hlýskeiðin milli þeirra, þegar hann var hár (um og yfir 250 ppmv). Núverandi hlýindatímabil sem hófst í lok síðustu ísaldar fyrir um 12 þúsund árum kallast nútími (Hólósen). Í byrjun þess hækkandi styrkur CO₂ tiltölulega hratt úr 180 í 260 ppmv. Því er oft talað um styrk CO₂ í lofti sem stjórntakka loftslags á jörðu.⁶⁴ Sé honum snúið breytist hitastig andrúmslofts. Ef takinn er til dæmis stilltur á ~260 ppmv, eru skilyrði fyrir hlýskeiðum eins og Hólósen. Sé hann stilltur á ~280 eru forsendur fyrir hlýindatímabilum eins og Eemian (fyrir um 120.000 árum) og Holstein (fyrir um 400.000 árum), en þá var loft hlýrra og yfirborð sjávar nokkrum metrum hærra en á Hólósen. Styrkur koltvíoxíðs í lofti verður mestur u.þ.b. 294 ppmv á fyrri hlýskeiðum milli ísalda. Hann komst í tæplega það gildi (284 ppmv) rétt fyrir lok níttjándu aldar, nokkru minni en það sem Högbom áætlaði á sínum tíma (300 ppmv). Hann er nú um 400 ppmv og hefur því hækkad um rúmlega 40% á 125 árum frá 1890.

Þótt CO₂ sé þannig helzta breytan sem hefur áhrif á hitastig andrúmslofts og loftslag, leika sjávarstraumar og bráðnun íss stórt hlutverk, einkum þó suðurskautslandsísinn. Það má þó að vissu marki segja, að áhrif síðarnefndu þáttanna séu afleiðing fremur en orsök. Vísindamenn hafa haldið áfram að þróa loftslagslíkön sín sem verða æ viðameiri og flóknari og taka orðið betra tillit til þeirra þátta, er geta haft áhrif og hér hafa verið nefndir. Þau eru vistuð á ofurtölvum stærstu rannsóknarstofnanna á þessu sviði víða um heim. Allar niðurstöður þeirra benda til hins sama, þ.e. að meðallofthiti við yfirborð jarðar fari hækkandi. Þannig fá flestir þá útkomu, að hækkun meðalhita á 20. öld hafi verið nærri 0,75 gráður.⁶⁵

Parísarsamkomulagið, sem talað var um í upphafi þessarar greinar, gerir ráð fyrir að þjóðir heims komi sér saman um aðgerðir til þess, að meðalhitastig andrúmslofts hækki ekki meira en tvær gráður á þessari öld, miðað við ástand fyrir iðnbyltingu 1750. Að mati rannsóknarhóps Hansen er það markmið ófullnægjandi og gæti raunar talizt hættulegt, þótt ekki sé hægt að segja með vissu, að yfirborð sjávar muni hækka um marga metra vegna hækkandi hitastigs, þ.e. nálgast Eemian ástand (6–9 metra hækkun sjávaryfirborðs). Í öðru lagi má benda á, að meðalhitastig andrúmslofts er ófullkomin breyta til að lýsa heilsufari jarðar, þótt það sé vissulega mikilvæg kennistærð. Nær væri að nota ójafnvægi í orkubúskap jarðar sem sjúkdómsgreiningu hvað loftslag áhrærir. Óeðlilegar breytingar á loftslagi og veðurfari víða um heim eru óyggjandi einkenni þessa, og ekki síður þær sem eru að verða á hafstraumum svo og vaxandi ísbráðnun. Til þess að endurheimta orkujafn-

vægi jarðar og skapa aftur loftslag sem telja megi eðlilegt fyrir Hólósen tímabilið, þarf að koma styrk koltvíoxíðs niður í 350 ppmv.⁶⁶

Þeir sem eiga erfitt með að trúa hugmyndinni um hlýnun andrúmslofts af völdum sívaxandi styrks koltvíoxíðs í lofti og telja allar kenningar og rannsóknir þar að lútandi vera bábiljur einar, ættu að skoða vefsíðuna <http://www.skepticalscience.com/>. Þar er hægt að fá svör við öllum spurningum um hnattræna hlýnun og loftslagsbreytingar. Farið er yfir hefðbundnar athugasemdir og efasemdir vantrúaðra, ástæða þeirra útskýrð og einnig hvers vegna þær eru rangar. Hægt er að taka vefnámskeið um gróðurhúsaáhrifin á vefsíðunni. Aðstandendur hennar eru ungir vísindamenn og áhugafólk um allan heim.

Lokaorð

Það verður að teljast vafasamt, að þjóðum heims takist að halda aftur af hlýnun andrúmslofts með því að minnka losun koltvíoxíðs, eins og stefnt er að með Parísarsamkomulaginu. Skaðinn er þegar skeður, og loft mun halda áfram að hlýna, líklega sama hvað við gerum. Sjálfsagt er þó að reyna allt sem hægt er til að halda aftur af þessari þróun og draga úr losun koltvíoxíðs eins og framast er unnt. Varúðarreglan sem samþykkt var á Ríóráðstefnunni 1992 segir okkur beinlínis að gera það, hvort sem það muni duga eður ei. Kannski verða Ragnarök af völdum hlýnunarinnar með þeim einhverjum þeim hætti sem segir í Völuspá:

Sól tér sortna,
sigr fold í mar,
hverfa af himni
heiðar stjörnur.
Geisar eimi
við aldrnara,
leikr hár hiti
við himin sjálfan.

Að lokum eru þeim Baldri Elíassyni, Ara Ólafssyni, Páli Imsland jarðfræðingi og Sveinbirni Björnssyni, fv. rektor Háskóla Íslands, færðar þakkir fyrir yfirlestur á greininni. Greinarhöfundur ber einn alla ábyrgð á villum, sem kunna að hafa farið framhjá þeim.

63 Bryden, H. L., Hannah R. Longworth & Stewart A. Cunningham, 2005. Slowing of the Atlantic Meridional Overturning Circulation. *Nature*, 438, 655–657.

64 WG1, 2013. *The Climate Change 2013, The Physical Science Basis*. 6. kafli, bls. 456–570.

65 Hansen, James et al., 2016. Ice melt, sea level rise and superstorms: evidence from paleoclimate data, climate modeling, and modern observations that 2°C global warming could be dangerous. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 3761–3812.