



Haustfundur Jarðfræðafélags Íslands

Hlýnun jarðar og binding CO₂

Ágrip erinda

Haldinn í Orkugarði

8. nóvember 2007

(Samantekt: Sóley Unnur Einarsdóttir)



Haustfundur Jarðfræðafélags Íslands fimmtudaginn 8. nóvember 2007

Hlýnun jarðar og binding CO₂

Árleg hausráðstefna Jarðfræðafélags Íslands verður haldin fimmtudaginn **8. nóvember 2007** í Orkugarði við Grensásveg. Þema fundarins verður Hlýnun jarðar og binding CO₂. Um er að ræða hálf dagsfund, frá kl 13:00 til 17.00 ásamt veitingum í lok fundar. Skráning sendist á **Andra Stefánsson as@hi.is**. Þátttökugjald er 4000 kr. fyrir félagsmenn, 5000 kr. fyrir utanfélagsmenn og 1000 kr. fyrir stúdenta.

Dagskrá fundarins er

12:30-13:00	Skráning
13:00-13:10	Fundur settur
13:10-13:40	Áslaug Geirsdóttir <i>Sögur af veðurfari síðustu 2000 árin</i>
13:40-14:10	Trausti Jónsson <i>Veðurfar á síðustu áratugum</i>
14:10-14:40	Tómas Jóhannesson <i>Viðbrögð jökla við loftlagsbreytingum vegna vaxandi gróðurhúsaáhrifa</i>
14:40-15:10	Jón Ólafsson <i>Koltvíoxíð, sjór og haf</i>
15:10-15:30	<i>Kaffi</i>
15:30-16:00	Þráinn Friðriksson og Halldór Ármannsson <i>CO₂ búskapur háhitakerfa</i>
16:00-16:30	Sigurður R. Gíslason, Eric H. Oelkers, Eydís Eiríksdóttir, Marin I. Kardjilov, Guðrún Gísladóttir, Bergur Sigfússon, Árni Snorrason, Sverrir Ó. Elefsen, Jórunn Harðardóttir, Peter Torssander og Níels Óskarsson <i>Veðrun bergs, binding koltvíoxíðs og svörun við veðurfarsbreytingum</i>
16:30-17:00	Hólmfríður Sigurðardóttir <i>Binding CO₂ í basalti við Hellsheiðarvirkjun</i>
17:00	<i>Veitingar</i>

Sögur af veðurfari síðustu 2000 ára.

Áslaug Geirsdóttir (1), Gifford H. Miller (2), Gwenn E. Flowers (3), Sædís Ólafsdóttir (1), Kristín B. Ólafsdóttir (1), Yarrow Axford (1,4)

1. Jarðvísindastofnun & Jarðvísindaskor, Háskóla Íslands
2. INSTAAR & Dept. of Geological Sciences, University of Colorado, Boulder, CO, USA
3. Department of Earth Sciences, Simon Fraser University, Burnaby, British Columbia, Canada
4. Dept. of Geology, University at Buffalo, Buffalo, NY, US

Samanburður á beinum veðurfarsathugunum og þeim upplýsingum sem fyrir liggja um fornloftslag benda til þess að 20.öldin hafi verið sérstaklega hlý í samanburði við síðustu þúsund ár. Fornloftslagsgögn gefa einnig til kynna að köldustu áratugir síðustu tveggja alda hafi verið þeir köldustu á seinni hluta nútíma. Samkvæmt þessu hefur bæði kaldasta og hlýjasta tímabil nútíma átt sér stað á síðustu 200 árum. Með því að skoða loftslagsgögn lengra aftur í tímann er reynt að leita svara við orsökum þessara loftslagsbreytinga, auk þess sem unnt verður að álykta um hlutfall náttúrulegra breytinga og þeirra áhrifa sem maðurinn er talinn hafa haft á loftslag á síðustu áratugum. Slíkar fornloftslagsupplýsingar eru nauðsynlegar þegar spáð er fyrir um framtíðarhorfur í loftslagsmálum.

Botnset íslenskra stöðuvatna og set af landgrunninu hafa að geyma skýran vitnisburð breytinga í styrkleika hinna tveggja ráðandi yfirborðsstrauma við Íslandsstrendur á nútíma, þ.e. Irminger straumsins (hlýr og saltur) og Austur Grænlandsstraumsins (kaldur og ferskur). Greiningar á eðlis- og efnafræðilegum gögnum (segulviðtak, %kolefni (TOC), lífrænn kísill (BSi), rykmýslirfur, setmyndunarhraði, ísrekið efni o.fl.) nokkurra sjávar- og stöðuvatnasetskjarna eru notaðar til að byggja upp há-upplausnar gögn um umhverfisbreytingar síðustu tveggja þúsund ára. Aldursgreiningar þessara gagna byggja m.a. á magni geislavirkna efna eins og ^{210}Pb , ^{137}Cs og ^{14}C , auk segulmælinga og greiningu gjóskulaga.

Setlög Haukadalsvatns í Haukadal hafa að geyma óvenju háa upplausn gagna þar sem rekja má umhverfisbreytingar síðustu 2000 ára. Tímabilið frá því fyrir 2000 til 1400 árum (ca. 0-600 AD) einkennist af samstíga ferli lífræns kolefnis- og kísils, sem bendir til um 600 ára stöðugleika í veðurfari. Fyrir um 1400 árum verður tiltölulega snögg aukning í TOC innihaldi samhliða lækkun í BSi. Þessi andhverfa/ósamstíga hegðun TOC og BSi nær yfir u.þ.b. 300 ára tímabil eða þar til fyrir um 1100 árum. Þá tekur við nýtt stöðugleikatímabil í nær 350 ár eða þar til fyrir 750 árum, þegar á ný tekur við tímabil mikils óstöðugleika þar sem andhverf hegðun kolefnis og lífræns kísils eykst svo um munar. Þetta tímabil óstöðugleika heldur áfram þar til fyrir um 100 árum.

Athuganir sem gerðar hafa verið á breytingum í $\delta^{13}\text{C}$ í Haukadalsvatni á því tímabili sem hér um ræðir sýna að kolefnið er að mestu leyti landrænt á óstöðugleikatímabilum. Jafnframt má ætla að aukning kolefnis samfara lækkun kísils sé tilkomin vegna jarðvegsfoks í vatnið. Þetta kemur fyrst fram í einhverjum mæli um það bil 300 árum fyrir landnám. Þó ekki verði vart mikillar hlýnunar á því tímabili sem við tekur og kallað

hefur verið hlýindaskeið miðalda (Medieval Warm Period, fyrir um 1100 til 750 árum) var þó greinilega um stöðugleikatímabil að ræða. Samanburður kolefnisaukningar í Haukadalsvatni og sögulegra gagna um hafisþekju í kringum Ísland síðustu 400 árin sýnir að þegar hafisþekjan er mikil eykst landrænt kolefni í Haukadalsvatni. Þetta bendir til þurra storma á köldustu tímum litlu ísaldarinnar.

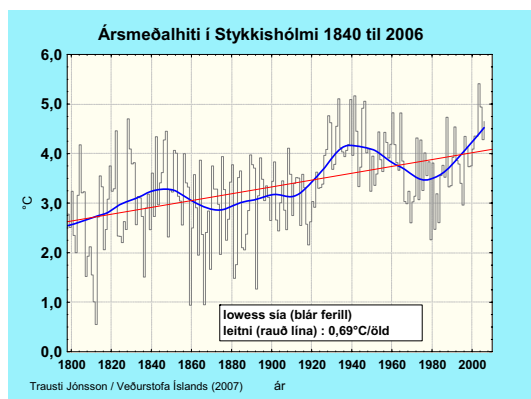
Gerð líkans af framrás og hörfun Langjökuls á þessu tímabili, sem byggir m.a. á gögnum úr botnseti Hvítárvatns, bendir til þess að jökullinn hafi náð mestu rúmmáli á litlu ísöldinni í kringum 1840 AD, þegar sumarið var um 1-2°C lægri en í dag. Norðurjökull og Suðurjökull, tveir skriðjökullar Langjökuls, náðu þá lengst út í vatnið uns þeir tóku til við að hörfa um miðja 20. öld. Ísrekið efni í seti Hvítárvatns er í hámarki á milli 1750 og 1850 AD í samræmi við hámark hafisútbreiðslu við Íslandsstrendur. Nýleg gögn frá landgrunninu suðvestur og norðvestur af Íslandi endurspeglar svipaðar breytingar og benda til sterkra hafrænna áhrifa á veðurfar.

Haustfundur JFÍ 8. nóvember 2007

Trausti Jónsson

Veðurfar á síðustu áratugum

Miklar áratugasveiflur eru í veðurfari á Íslandi. Köld ár og hlý koma í klösum frekar en eitt og eitt á stangli. Svipað á við um aðra veðurþætti, t.d. úrkomu, illviðri eða snjóalög. Komi hlýtt ár virðast talsverðar líkur á að þau komi fleiri á fáum árum, þó það verði e.t.v. ekki næsta ár. Þetta sést vel á línuriti sem sýnir hitafar í Stykkishólmi síðustu tvær aldirnar eða svo.



Mynd 1. Hitafar í Stykkishólmi 1798 til 2006. Athugið að mjög mikil óvissa er í ársmeðaltölum á fyrri hluta 19. aldar, sérstaklega fyrir 1830. Rauða línan sýnir linulega leitni tímabilsins og er hún um 0,7°C á öld. Þetta er mjög svipuð leitni og virðist vera á norðurhvelinu í heild á sama tímabili. Taka má eftir því að með því að skipta tímabilinu í tvö til þrjú undirskelið má fá allt aðra túlkun á leitninni.

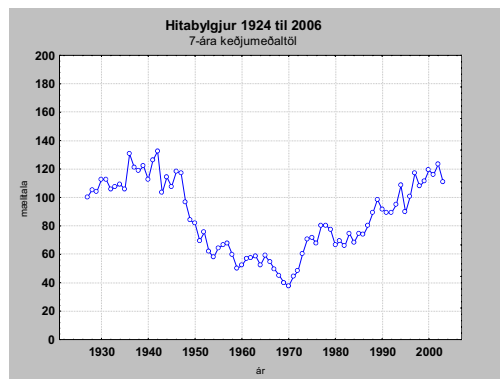
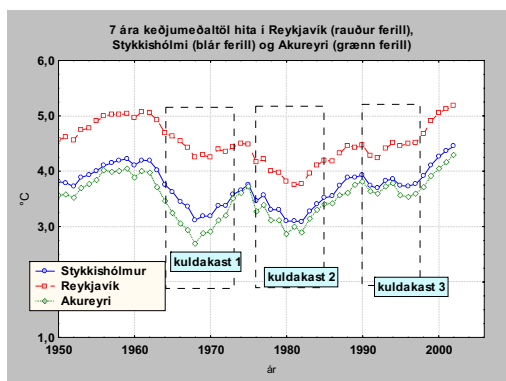
Höfuðdrættir hitafarsins eru greinilegir. Hlýskeyð 20. aldar kemur sérlega vel fram, sömuleiðis má greina annað, en minna, hlýskeyð á 19. öld. Kuldaskýðið á síðari hluta aldarinnar sést einnig vel og að greina má kuldaskýðið frá því um 1860 í tvennt, fyrri hlutinn með fáeinum afburðaköldum árum stóð til 1892, en en síðari hlutanum lauk um 1920. Hlýnunin upp úr 1920 er ámóta hröð og hlýnunin á síðari árum. Sá er munur á þessum atburðum að svo virðist sem hins fyrri hlýndaskýðsins hafi fyrst og fremst gætt á norðurslóðum – norðan við 55°N, en síðari hlýnunin nær mun sunnar og er þess vegna meiri á heimsvísu. Hlýnun milli 19. og 20. aldar er mest að vetrinum, en minnst á sumrin.

Hitapróun vetur og vor er svipuð ársmyndinni, en leitni sumarhitans er minni (myndir verða sýndar). Þar má taka eftir því að skeiði hlýrra sumra fyrir miðbik 20. aldar lauk einum til tveimur áratugum áður en veturinn kólnaði, sömuleiðis byrjuðu sumarhlýndi ekki fyrr en um 1925. Þetta er ólíkt hlýnuninni síðustu árin, en hennar gætir einnig greinilega á sumrin. Haustlínuritið er nokkuð með öðru sniði.

Veðurlag innan hlý- og kuldaskýða er ekki samfellt það sama, heldur leynist þar mikill breytileiki. Kuldaskýðið á árunum 1965 til 1995 er gott dæmi um þetta. Mynd 2 sýnir 7 ára keðjumeðaltöl hita árunna 1947 til 2005 á þremur veðurstöðvum. Við sjáum í enda hlýndaskýðsins um 1965 og síðan þrjú kuldaköst, 1965 til 1971, 1979 til 1986 og 1992 til 1995. Hafísarakuldaskýðið er kaldast á Akureyri, fyrstu tvö köstin eru jafnköld í Stykkishólmi, en kastið 1979 til 1986 er kaldast kastanna þriggja í Reykjavík. Síðasta kastið er lítið áberandi hér á landi en var mest þeirra á Grænlandi.

Eðli kuldakastanna var misjafnt. Hafísarakastið tengdist þrálátum norðanáttum, hafís og miklum sjávarkuldum fyrir norðan og austan land, þó kólnaði loftið meira en sjórinn. Loftþrýstingur var þá tiltölulega hár, hæðin yfir Grænlandi var öflug og þrálát. Miðkastið tengdist hins vegar lágum loftþrýstingi, landið var langtímum saman langt inni í köldu lofti af vestrænum uppruna. Þegar þannig hagar til vill verða kaldast að tiltölu um landið vestanvert (og kaldast á Grænlandi).

Ísland var aðeins í austurjaðri síðasta kastsins, en það varð öflugast á Vestur-Grænlandi, en þar eru áratugasveiflur í veðurfari enn meiri en hér á landi.



Mynd 2. Til vinstri: Hiti á þremur veðurstöðvum: Reykjavík (rauður ferill), Stykkishólmur (blárferill) og Akureyri (grænn ferill) Sjö ára keðjumeðaltöl. Til hægri: Hitabylgjuvísitala 1924 til 2006. Hitabylgjur eru í lágmarki á hafísárunum svonefndu.

Svipað á við hlýndaskeiðið eftir 1920. Vetur hlýnuðu strax frá og með 1921, en vor og sumar héngu í kulda nokkrum árum lengur og hausthlýndi byrjuðu ekki fyrr en um 1930. Eins og áður var minnst á stóð þetta hlýndaskeið stutt, ef lítið er á sumarið. Þetta má sjá á mynd sem á að sýna „hitabylgjuvísitölu“ landsins frá 1924 og áfram til okkar daga. Sumur 21. aldarinnar hafa verið jafngöð hvað þetta varðar og sumur fyrri hlýskeiðs. Allmörg göð sumur virðast hafa komið á 19. öld, sérstaklega fyrir miðja öldina, en munum þó óvissuna hvað mælingar frá þeim tíma varðar.

Hafísárin svonefndu skera sig úr frá öðrum köldum tímabilum á fleiri vegu. Þó álíka kalt hafi verið víðast hvar á landinu í hafísaráhluta kuldakastins og miðhlutanum voru kuldaköst mun snarpari á hafísárunum. Hitamunur norður- og suðurstranda landsins var þá meiri en annars á síðustu áratugum og hitaórói meiri. Hvoru tveggja minnir á ástandið á 19. öld. Sömuleiðis jókst hlutur norðanillviðra í heildarstormatiðni miðað við fyrri og síðari tímabil.

Stormatiðni er mjög breytileg frá einum áratug til annars. Meðalvindhraði er meiri á illviðraskeiðum en annars og órói í loftþrýstingi er þá einnig meiri. Til þessa hefur 21. öldin verið illviðrarýr miðað við fyrri tíma. Loftþrýstingur á 20. öld var ívið lægri en á þeirri 19. og kann það að tengjast rýrnun hafíssins eins og margt annað. Á síðustu 60 árum hefur heldur dregið úr austanáttinni sem er ríkjandi á Íslandi, í augnablikinu reiknast sú breyting marktæk, en lítið þarf að gerast til að eyða leitninni. Enn má tengja breytingarnar rýrnun hafíssins við A-Grænland.

Úrkoma sýnir einnig umtalsverðar áratugasveiflur og á það sameiginlegt með hitanum að náttúrulegar sveiflur eru álíka stórar eða stærri en sú breyting sem vænta má samfara hnattrænum veðurfarsbreytingum – sé eitthvað vit í líkanareikingum. Snjóhula hefur verið lítil á síðustu árum, en erfitt er að sjá nokkra áratugaleitni í henni því álíka snjóleysistímabil kom um 1960. Vel má þó vera að ástæður snjóleysis á þessum tveim tímabilum séu ekki þær sömu, það þarf nánari skoðun.

Ástæður breytilegs veðurfars eru margs háttar og bitur þar sig flest í hvers annars hala. Upplýsingar um almennt ástand loftþjúpsins eru nokkuð áreiðanlegar fimm til sex áratugi aftur í tímann, en rýrari fyrir þann tíma. Óhætt er að upplýsa að þær veðurfarsveiflur sem hafa orðið hér á landi á þessum tíma eru flestar nátengdar minniháttar hliðrunum í vinda- og straumakerfum og því skýranlegar sem slíkar. Hvort þær breytingar eru hins vegar algjörlega tilviljanakenndar, tengist breytingum á ytri mótunarpáttum, séu kerfislegar eða tengjast hnattrænum umhverfisbreytingum af manna völdum verðum við að láta liggja milli hluta hér.

Viðbrögð jökla við loftslagsbreytingum vegna vaxandi gróðurhúsaáhrifa

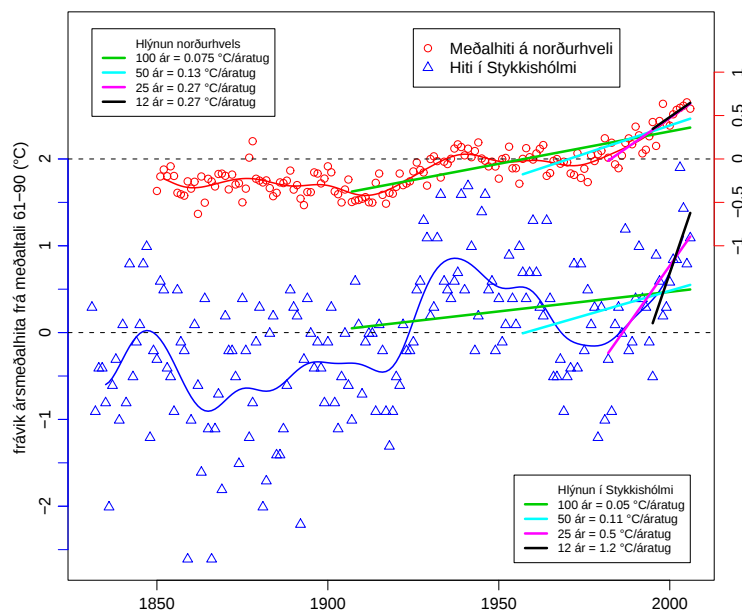
Tómas Jóhannesson

Veðurstofu Íslands
Bústaðavegi 9
150 Reykjavík

Loftslagsbreytingar af mannavöldum eru af flestum taldar meginorsök hlýnunar sem víða verður nú vart. Á 1. mynd er sýndur meðalhiti ársins á norðurhveli jarðar síðan 1850 (gögn frá bresku veðurstofunni og Climatic Research Unit, University of East Anglia) og í Stykkishólmi síðan 1831 (gögn frá Veðurstofu Íslands). Myndin sýnir verulega hlýnun síðan seint á 19. öld sem er svipuð hér á landi og að meðaltali yfir norðurhvelið þegar litið er til langs tímabils. Hröðust er hlýnunin í Stykkishólmi á tímabilunum 1920–1940 og 1981–2006. Á öðrum tímabilum sem myndin sýnir er loftslag stöðugt eða kólnandi. Myndin sýnir skýrt hvernig þróun loftslags ræðst af samspili náttúrulegs breytileika, sem ætla má að ráði miklu um sveiflur sem greinilegar eru í hitanum, sérstaklega í Stykkishólmi, og hægfara hlýnun, sem flestir sérfræðingar eru nú sammála um að sé að verulegu leyti af mannavöldum.

Áhrif jökla á umhverfi og vatnafar og mikilvægi vatnsafls í orkubúskap þjóðarinnar leiða til þess að hugsanleg hlýnun hefur hlutfallslega meiri áhrif á rennsli vatnsfalla og orkuframleiðslu hér á landi en í flestum öðrum löndum. Þessi áhrif hafa verið könnuð í nokkrum samnorrænum rannsóknarverkefnum á síðustu árum í samvinnu Vatnamælinga Orkustofnunar, Veðurstofunnar og Jarðvísindastofnunar Háskólans með stuðningi Orkusjóðs, Landsvirkjunar og fleiri aðila við ýmsar norrænar rannsóknarstofnanir og fyrirtæki á sviði vatnamælinga, veðurfræði og orkuvinnslu. Hér verða nefndar helstu niðurstöður þessara rannsókna.

Áhrif hlýnunar á afrennsli frá jöklum fela í fyrstu í sér aukið meðalafrennsli, svo og meira hámarksrennsli í flóðum, og verulega aukningu á dægursveiflu. Úr áhrifunum dregur eftir því sem jöklarnir hropa og jökulhulið svæði minnkar og þar kemur að heildarafrennslið verður aftur svipað og á þeim tímabilum fortíðar þegar jöklar voru í jafnvægi. Þá verða hins vegar bæði árstíðasveifla og dægursveifla mun minni en meðan áhrifa jöklanna gætti. Auk beinna áhrifa á afkomu jökla eru ýmis gagnvirk áhrif mikilvæg í tengslum við viðbrögð jökla við loftslagsbreytingum. Meðal annars kunna vatnaskil á jökli og farvegir vatns undir jökli að breytast, en það getur haft áhrif á hönnunarforsendur brúa, vega og margra annarra mann-



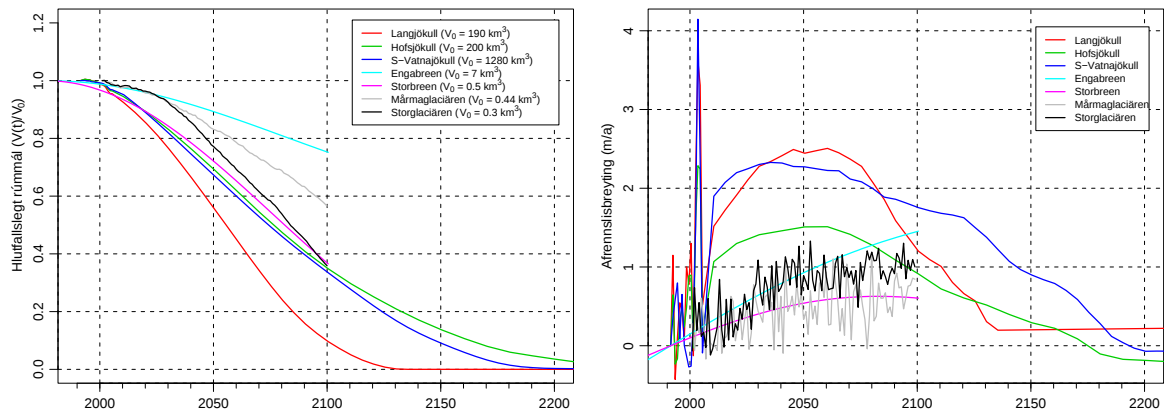
Mynd 1: Ársmeðalhiti norðurlands jarðar 1850–2006 og í Stykkishólmi 1831–2006 og vegið, hlaupandi meðaltal yfir 10–15 tímabil. Línur í mismunandi litum sýna meðalhýnunar fyrir síðustu 100, 50, 25 og 12 ára tímabil.

virka. Viðbrögð nokkurra jökla á Norðurlöndum við loftslagsbreytingum voru rannsökuð í verkefninum „Climate and Energy” (CE) og „Veðurfar og orka” (VO) (2. mynd). Beitt var líkönum sem reikna afkomu og hreyfingu jökla og þau keyrð fram í tímann miðað við sviðmyndir verkefnisins um breytingar í loftslagi.

Á 3. mynd til vinstri er sýnt hvernig rúmmál jöklanna minnkar og afrennsli frá þeim breytist næstu 100–200 árin. Samkvæmt reikningunum munu jöklarnir rýrna hratt og hverfa að mestu á þessum tíma. Engabreen í Noregi hopar hlutfallslega hægar en hinir jöklarnir vegna þess að sviðmyndin gerir ráð fyrir mun meiri aukningu í úrkomu á svæðinu sem þessi jökull þekur en fyrir hina jöklana. Afrennslisaukningin frá jöklunum er veruleg. Um 2030 er því spáð að afrennsli hafi aukist um u.þ.b. 0.4–0.7 m vatns á ári for Engabreen, Storbreen, Mårmaglaciären og Storglaciären, og um 1.5–2.5 m vatns á ári fyrir Langjökul og Hofsjökul og sunnanverðan Vatnajökul. Afrennslisaukningin nær tiltölulega flötu hámarki milli 2025 og 2075 (nema fyrir Engabreen) þegar aukið afrennsli vegna vaxandi leysingar á flatarmálsseiningu er sem næst vegið upp af samdrætti í afrennsli vegna minnkandi flatarmáls jöklanna. Í öllum tilvikum er mesta afrennslisaukningin á bilinu 50–100% af núverandi afrennsli frá því svæði sem jöklarnir þekja nú. Afrennslisaukningu íslensku jöklanna má bera saman við meðalafrennsli þeirra sem meta má á bilinu 2.4–4.1 m vatns á ári fyrir árabilið 1981–2000 en þá er talið að margir íslenskir jöklar hafi verið nærri jafnvægi. Það hefur talsverð áhrif á niðurstöðu jökullíkanreikninganna fyrir Ísland að verulegur hluti hlýnunarinnar miðað við viðmiðunar-



Mynd 2: Jöklar á Norðurlöndum sem rannsakaðir voru í CE verkefningu.



Mynd 3: Reiknað rúmmál íss (til vinstri) og afrennslisbreyting (til hægri) frá svæði, sem var hulið jökli í upphafi reikninga, fyrir sjö jökla á Íslandi, í Noregi og í Svíþjóð. Í skýringu á myndinni er tilgreint ísrúmmál í upphafi reikninganna fyrir hvern jökul. Þetta rúmmál getur verið svolítið frábrugðið réttu rúmmáli vegna þess að líkönin vanmeta eða ofmeta stærð jöklanna í sumum tilvikum.

tímabilin 1961–1990 eða 1981–2000 er þegar fram kominn vegna þess hve allmörg ár síðustu hafa verið hlý. Einnig skiptir máli að CE sviðsmyndin fyrir Ísland gerir ráð fyrir mestri hlýnun vor og haust en það hefur meiri áhrif á jöklaleysingu en hlýnun að vetri. Í reikningunum er gert ráð fyrir að hlýnun síðustu ára sé að nokkru leyti varanlega fram komin og því kemur afrennslisaukningin hraðar fram fyrir íslensku jöklana en hina. Ljóst er að jöklabreytingar eru langmikilvægasti þáttur í áhrifum hugsanlegrar loftslagsbreytinga í framtíðinni á vatnafar á Íslandi og líklega einn mikilvægasti þátturinn í breytingum á náttúrufari á landinu af þeirra völdum.

Heimildir

- Bergström, S., T. Jóhannesson, G. Aðalgeirsdóttir, A. Ahlstrøm, L. M. Andreassen, J. Andréasson, S. Beldring, H. Björnsson, B. Carlsson, P. Crochet, M. de Woul, B. Einarsson, H. Elvehøy, G. E. Flowers, P. Graham, G. O. Gröndal, S. Guðmundsson, S-S. Hellström, R. Hock, P. Holmlund, J. F. Jónsdóttir, F. Pálsson, V. Radic, N. Reeh, L. A. Roald, J. Rosberg, S. Rogozova, O. Sigurðsson, M. Suomalainen, Th. Thorsteinsson, B. Vehviläinen og N. Veijalainen. 2006. *Impacts of climate change on river runoff, glaciers and hydropower in the Nordic area. Joint final report from the CE Hydrological Models and Snow and Ice Groups*. CE Rep. no. 6, The CE Project, Reykjavík.
- Fenger, J., ritstj. 2007. *Impacts of Climate Change on Renewable Energy Sources. Their role in the Nordic energy System. A comprehensive report resulting from a Nordic Energy Research project*. Nord 2007:003, Norðurlandaráð, Kaupmannahöfn, 190 bls.

Jón Ólafsson

Koltvíoxíð, sjór og haf

Styrkur koltvíoxíðs í lofthjúpi jarðarinnar vex vegna athafna manna, einkum brennslu jarðefnaeldsneytis. Þó er vöxturinn hægari en vænta mætti þar eð höfin og þurrlendi binda hluta koltvíoxíðsins. Fjallað verður koltvíoxíðbindingu í heimshöfunum, hvernig hún gerist, hvar og hve mikil hún er talin vera. Aðstæður í N-Atlantshafi skipta miklu máli í þessu samhengi og greint verður frá niðurstöðum rannsókna á koltvíoxíði á hafsvæðum hér við land en þær hófust 1983. Þær mælingarunur sýna að viðbrögð hafsins tengjast eiginleikum sjávar, sjógerðum. Því bindur sjórinn í Íslandshafi meira koltvíoxíð úr lofti en hlýsjórinn í Irmingerhafi.

CO₂ búskapur háhitakerfa

Þráinn Friðriksson* og Halldór Ármannsson

Íslenskar orkurannsóknir, Orkugarður, Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

* thf@isor.is

Áætlað magn CO₂ sem losnar í andrúmsloft frá íslenskum jarðhitakerfum er á bilinu 1 til 2 Mt á ári. Beinar mælingar á CO₂ losun í andrúmsloft um jarðveg hafa verið gerðar á Reykjanesi og í Kröflu. Á Reykjanesi var einnig ákvarðað hversu mikið CO₂ berst í andrúmsloft um gufuaugu og leirpytti. Árið 2004 losnuðu um 5.100 tonn af CO₂ í andrúmsloft frá Reykjanesi og þar af losnuðu meira en 97 % um jarðveg. Það svæði þar sem jarðhitagaslosun fer fram á Reykjanesi er um 0.1 km² eða u.þ.b. 5% af flatarmáli jarðhitasvæðisins á Reykjanesi.

Frá jarðhitakerfinu í Kröflu (skilgreint hér sem eystri hluti Kröflu öskjunnar) losna um 120.000 tonn af CO₂ á ári um jarðveg. Þar af eru um 70% eða um 83.000 tonn á ári jarðhitagas að uppruna en afgangurinn er losun úr lífrænum jarðvegi (á sama hátt og á örðum grónum svæðum). Flatarmál þess svæðis sem hér er skilgreint sem jarðhitasvæðið í Kröflu er 20 km². Merki um jarðhitagas kemur fram á um 10% þess flatarmáls.

Ef jarðhitagaslosun frá Reykjanesi og Kröflu er dæmigerð fyrir íslensk jarðhitasvæði má áætla að árleg losun frá öllum jarðhitasvæðum landsins sé 2,4 Mt á ári.

Binding koltvísýrings í bergi jarðhitakerfa hefur verið rannsökuð á Íslenskum orkurannsóknum. Magn koltvísýrings hefur verið ákvarðað í meira en 650 svarfsýnum úr 40 borholum á Reykjanesi, Hellisheiði og í Kröflu. Verulegt magn koltvísýrings (25 – 100 kg/m³) er bundið í kalsít í efsta kílómetranum yfir jarðhitakerfunum. Mælt magn koltvísýrings í bergi yfir jarðhitakerfunum þremur má nota til að reikna magn þess koltvísýrings sem þar er bundið. Samkvæmt niðurstöðum slíkra reikninga eru 1650 Mt (megatonn) af CO₂ bundin á Hellisheiði, 2200 Mt bundin í Kröflu og 56 Mt bundin á Reykjanesi.

Unnt er að nota niðurstöður um magn CO₂ í bergi annars vegar, og mælingar á CO₂ losun í andrúmsloft, hins vegar, til að leggja mat á hversu stór hluti koltvísýrings binst í bergi miðað við hvað losnar í andrúmsloft. Gert er ráð fyrir að aldur jarðhitakerfisins á Reykjanesi sé á bilinu 10.000 til 100.000 ár (Hjalte Franzson, munnl. uppl.). Samkvæmt þessum tölum hafa um 5600 til 560 tonn af CO₂ bundist í bergi á ári að meðaltali yfir líftíma kerfisins. Eins og áður sagði er núverandi náttúruleg losun CO₂ í andrúmsloft frá svæðinu rúm 5.000 tonn á ári. Þessi samanburður sýnir að verulegur hluti koltvísýringsins sem berst frá jarðhitakerfinu situr eftir í

berginu, eða einhverstaðar á bilinu 10 % af því sem losnar í andrúmsloft og allt upp í að vera álíka mikið og það sem losnar. Sambærilegir reikningar fyrir Kröflu benda til að magn CO₂ sem binst í bergi á ári hverju sé á bilinu 10 til 25% af því sem losnar í andrúmsloft.

Ljóst er að kalsít fellur út við suðu í jarðhitakerfum og ætla má að stór hluti af því kalsíti sem hýsir CO₂ í efrihluta íslenskra jarðhitakerfa er af stórum hluta myndað vegna suðu. Hinsvegar má vera að einhver hluti þess kalsíts sem myndast hefur í efri hluta jarðhitakerfa sé myndaður við efnahvörf milli kolsýru og basalts. Kerfisbundnar athuganir á borsvarfi ættu að geta varpað ljósi á vægi þessara þátta.

Veðrun bergs, binding koltvívíoxíðs og svörun við veðurfarsbreytingum

Sigurdur R. Gíslason¹, Eric H. Oelkers², Eydís S. Eiríksdóttir¹, Marin I. Kardjilov³, Guðrún Gísladóttir³, Bergur Sigfússon¹, Árni Snorrason⁴, Sverrir Elefsen^{4*}, Jórunn Hardardóttir⁴, Peter Torssander⁵ & Níels Óskarsson¹

¹Jarðvísindastofnun Háskólans, Sturlugötu 7, 101 Reykjavík. ²Géochimie et Biogéochimie Experimentale —LMTG/Université Paul Sabatier, 14 rue Edouard Belin, 31400 Toulouse, France. ³Land – og ferðamálafræðiskor, Háskóla Íslands, Sturlugötu 7, 101 Reykjavík. ⁴Vatnamælingar Orkustofnunar, Grensásvegi 9, 108 Reykjavík. ⁵Department of Geology and Geochemistry, Stockholm University, SE-10691 Stockholm, Sweden. *Núverandi heimilisfang: VGK-Hönnun, Grensásvegi 1, 108 Reykjavík, Iceland

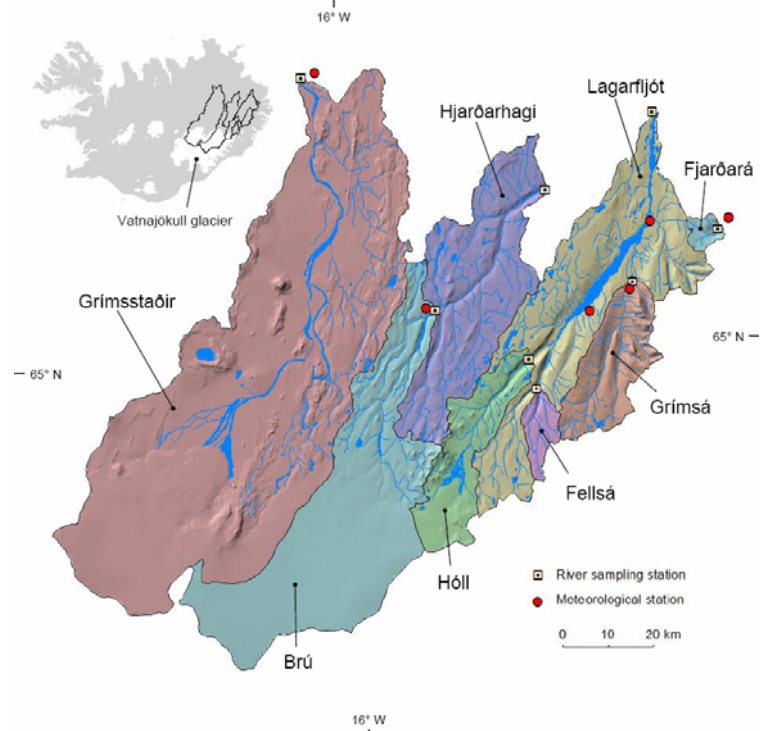
Efnahvarfaveðrun og efnahvarfarof eru talin stjórna loftslagi á jörðinni á jarðfræðilegum tímakvarða, þ.e. milljónum ára¹. Því hærra hitastig því hraðari efnahvarfaveðrun. Efnahvarfaveðrun bindur koltvívíoxíð (CO₂) úr andrúmslofti með því að leysa tvígildar katjónir eins og Ca⁺⁺, Mg⁺⁺ og Sr⁺⁺ úr kísilsteindum og gleri. Þær berast með jarðvegsvatni, lækjum, og loks með straumvötnum til sjávar þar sem þær ganga í efnasamband við kolefni og mynda kalk. Náin tengsl eru milli hitastigs, úrkomu, efnahvarfaveðrunar, efnahvarfarofs og styrks koltvívíoxíðs í andrúmslofti. Þegar hitastig og úrkoma er mikil á jörðinni eykst efnahvarfaveðrun og efnahvarfarof sem dregur þá úr styrk koltvívíoxíðs í andrúmslofti. Það leiðir til lækkunar hitastigs vegna gróðurhúsaáhrifa, minni úrkomu og afrennsli sem dregur úr efnahvarfarofi. Þar með binst minna koltvívíoxíð og styrkur þess eykst smátt og smátt í andrúmslofti og það hlýnar aftur. Þetta er svokallað neikvætt afturvirktt ferli sem dregur úr loftslagssveiflum á jörðinni á jarðfræðilegum tímakvarða. Aflrænt rof getur haft svipuð áhrif ef svifaur veðrast í sjó².

Til þess að kanna þessa tilgátu höfum við ákvarðað efnahvarfarof og aflrænt rof á átta vatnasviðum á Norðausturlandi síðastliðna fjóra áratugi³ (1. mynd). Meðalhitastig á veðurathugunarstöðvum Veðurstofunnar⁴ á svæðinu hefur hækkað um 0.4 til 1.4°C frá 1964 til 2004, aðeins meira en meðalhitastigshækkun (0.6°C) við yfirborð jarðar á sama tímabili⁵. Úrkoma ýmist minnkaði eða jókst á veðurathugunarstöðvunum frá 1964-2004⁴, en afrennsli vatns jókst af öllum vatnasviðunum. Aflrænt rof og efnahvarfarof jókst á öllum vatnasviðunum, en breytingin er mjög mismunandi eftir vatnasviðum. Efnahvarfarof, Ca⁺⁺ og ólífrænt kolefni í upplausn jókst allt frá 0,1% í Jökulsá á Dal við Hjarðarhaga til 48% í Jökulsá í Fljótsdal frá 1964-2004. Binding CO₂ við efnahvarfaveðrun og efnahvarfarof á vatnasviði Jökulsár í Fljótsdal við Hól á tímabilinu 1964-2004 er sýnd á 2. mynd. Á sama tíma jókst aflrænt rof um 7% - 525%; mest í Jökulsá á Fjöllum við Grímsstaði, en minnst í Lagarfljóti við Lagarfoss. Kornastærð svifaursins ræður miklu um viðbrögð aflrænnar veðrunar vegna lofslagsbreytinga. Því grófari sem svifaurinn er því viðkvæmari er hann fyrir loftslagssveiflum. Þessar niðurstöður staðfesta með beinum mælingum neikvætt afturvirktt ferli milli loftslags og efnahvarfarofs. Að vensl loftslags og rofs er breytilegt eftir vatnasviðum og loks að það er e.t.v. sterkari neikvæð afturvirkni milli loftslags og aflræns rofs en loftslags og efnahvarfarofs^{2,3}.

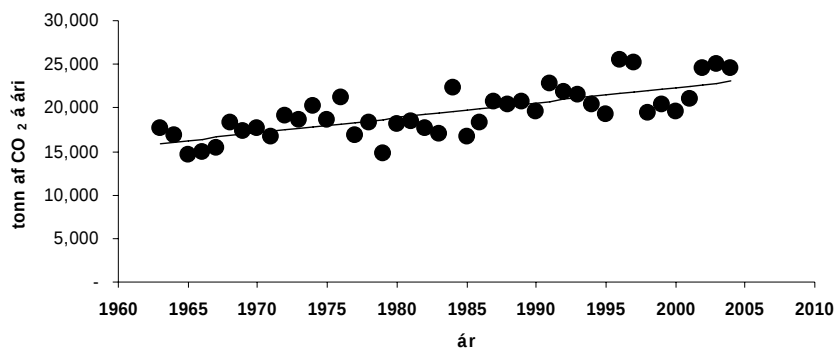
Heimildir.

1. Walker, J. C. G., Hays, P. B. & Kasting, J. F. A negative feedback mechanism for the long-term stabilization of Earth's surface temperature. J. Geophys. Res. 86, 9776-9782 (1981).

2. Gislason, S. R., Oelkers E. H. & Snorrason Á. The role of river suspended material in the global carbon cycle. *Geology* 34, 49-52 (2006).
3. Gislason, S. R., E. H. Oelkers, E. Eiríksdóttir, M. I. Kardjilov, G. Gísladóttir, B. Sigfusson, A. Snorrason, S. O. Elefsen, J. Hardardóttir, P. Torssander, & N. Oskarsson. Direct evidence of the feedback between climate and weathering. *Nature Geosciences* (2008 pending revisions).
4. The Icelandic Meteorological Office. Annual average climate information. The Icelandic Meteorological Office, Reykjavík. <http://andvari.vedur.is/vedurfar/yfirlit/medaltalstoflur/Arsgildi.html> (2007).
5. Alley, R. et al. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Summary for Policymakers*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva. http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/docs/WG1AR4_SPM_PlenaryApproved.pdf (2007).



Mynd 1. Staðsetning veðurathugunarstöðva Veðurstofunnar, sýnatöku- og vatnamælingastöðva og vatnasviðanna, sem voru rannsökuð frá vestri til austurs: 1. Jökulsá á Fjöllum við Grímsstaði. 2. Jökulsá á Dal við Brú. 3. Jökulsá á Dal við Hjarðarhaga. 4. Jökulsá í Fljótsdal við Hól. 5. Fellsá við Sturluflöt. 6. Grímsá við Þjóðveg. 7. Lagarfljót við Lagarfoss og 8. Fjarðará ofan virkjunar. Veðurathugunarstöðvar frá vestri til austurs eru: Grímsstaðir á Fjöllum, Brú á Jökuldal, Hallormsstaður, Grímsárvirkjun, Egilsstaðir og Seyðisfjörður (Hönnun myndar: Marin I. Kardjilov).



Mynd 2. Breyting í árlegri bindinu koltvíoxíðs (CO_2) á vatnasviði Jökulsár í Fljótsdal ofan Hóls.

Carb-Fix

Binding CO₂ í basalti við Hellisheiðarvirkjun

Hólmfríður Sigurðardóttir, verkefnisstjóri hjá Orkuveitu Reykjavíkur

holmfridur.sigurdardottir@or.is

Binding koltvísýrings (CO₂) í basalti við Hellisheiðarvirkjun er tilraunaverkefni sem hófst formlega í september 2007 og er ráðgert að standi yfir í þrjú til fimm ár. Að verkefninu koma Orkuveita Reykjavíkur, Háskóli Íslands, Kólumbía háskóli í Bandaríkjunum og Rannsóknarráð Frakklands í Toulouse.

Það að draga úr losun á koltvísýringi út í andrúmsloftið er talið vera eitt af stóru verkefnum þessarar aldar. Með því að fanga CO₂ úr andrúmsloftinu, en einnig frá öðrum uppsprettum, og dæla honum niður í hentug jarðlög er vonast til að unnt sé að draga úr umfangi loftslagsvandans. Til þessa hefur koltvísýringi verið dælt niður í olíu- og gaslindir og geymdur þar í formi gastegundar. Má þar t.d. nefna Sleipnisverkefnið í Norðursjó og In Salah verkefnið í Alsír. Við Hellisheiðarvirkjun er hins vegar gert ráð fyrir að binda CO₂ til langs tíma í basalti sem steind.

Basalt er ein hvarfgjarnasta bergtegund sem finnst í jarðskorpunni og inniheldur steindir sem hafa mikla getu til að binda CO₂. Meira en 90% af berggrunni Íslands er basalt. Við það að kvika storknar undir jarðhitasvæðum losnar koltvísýringur og berst inn í kerfin. Þar hvarfast hann við kalsíum í basalti og myndar bergtegundina kalsít. Þannig er koltvísýringurinn bundinn í steind í þúsundir ef ekki milljónir ára á jarðhitasvæðum.

Á athafnasvæði Orkuveitu Reykjavíkur í Þrengslum er ætlunin að líkja eftir þessu náttúrulega ferli. Þar hefur verið aflað þekkingar á svæðinu í tengslum við virkjunina og þar er fyrir margvíslegur búnaður sem nýtist við tilraunina. Þar er hvarfgjarnt basalt og CO₂ sem fæst úr gufunni sem beisluð er úr 2.000-3.000 m djúpum borholum á Hellisheiði. Ráðgert er að leysa koltvísýringinn upp í vatni undir þrýstingi. Vökvanum verður dælt niður á 400-800 m dýpi um borholur þar sem taldar eru mestar líkur á að koltvísýringurinn hvarfist við basaltið. Að nokkrum tíma liðnum er talið að kalsíum-karbónat falli út í holrými bergsins. Þannig eru bundnar vonir við að unnt sé að hvetja þá náttúrulegu ferla sem binda CO₂ á jarðhitasvæðum.

Tímaplan verkefnisins einkennist af bjartsýni og er miðað við að síðla árs 2008 eða í upphafi árs 2009 verði hægt að hefja niðurdælingu í Þrengslum. Nokkur hópur doktorsnema við Háskóla Íslands kemur að verkefninu og munu þeir vinna að líkangerð og rannsóknum í tilraunastofum hérlandis og erlendis.