



## Loftslagsbreytingar og áhrif þeirra á endurnýjanlega orkugjafa á 21. öld

Lokaskýrsla um sameiginlegt rannsóknaverkefni Norðurlanda og Eystrasaltslanda:  
*Climate and Energy Systems.*

**Samantekt.** Norræna ráðherranefndin hefur gefið út nýja skýrslu um áhrif loftslagsbreytinga á 21. öld á endurnýjanlega orkugjafa á Norðurlöndum og í Eystrasaltslöndum. Skýrslan er afrakstur viðamikils samvinnuverkefnis 30 stofnana og fyrirtækja í þessum löndum, sem Veðurstofa Íslands stýrði á árunum 2007-2011. Sérstök áhersla var lögð á að meta áhrif loftslagsbreytinga á nýtingu vatnsorku, vindorku og lífrænna orkugjafa og benda niðurstöður til þess að hlýnunin geti leitt til aukinnar orkuframleiðslu á svæðinu á komandi áratugum.

Á vegum verkefnisins voru reiknaðar sviðsmyndir loftslags fyrir tímabilið 2021-2050 og niðurstöður bornar saman við tímabilið 1961-1990. Gert er ráð fyrir áframhaldandi hlýnun og verður hún mest um 3°C að vetrarlagi í Finnlandi og á norðanverðum Skandinavíuskaga. Hlýnun er áætluð 1-2°C á svæðinu öllu að sumarlagi. Úrkoma mun að líkindum aukast um 5-15% en litlar breytingar verða á meðalvindhraða. Jöklar munu rýrna mjög og hörfa og afrennsli frá þeim verður í hámarki á tímabilinu 2040-2070. Hlutur snævar í heildarúrkomu mun minnka og dregur þá að sama skapi úr umfangi vorleysinga. Aftakaflóð munu sums staðar minnka en stækka á svæðum þar sem úrkoma fer vaxandi. Aukin jöklaleysing og úrkoma mun víða leiða til vaxandi afrennslis til uppistöðulóna og verður þá mögulegt að auka raforkuframleiðslu um 10% á Norðurlöndum utan Íslands, en um allt að 20% hérlendis. Miklir möguleikar eru enn til aukinnar nýtingar vindorku á Norðurlöndum og í Eystrasaltslöndum, jafnvel þótt vindafl á svæðinu muni ekki taka miklum breytingum í hlýnandi loftslagi. Hraðari vöxtur skóga mun gera kleift að auka orkuframleiðslu sem byggir á lífrænum orkugjöfum, auk þess sem stefnt er að auknum mónytjum í sumum landanna, m.a. til eldsneytisframleiðslu.

Viðskipti með raforku milli einstakra landa á svæðinu (utan Íslands) munu aukast og útflutningur raforku til annarra Evrópulanda fara vaxandi. Lögð er áhersla á verulega óvissu í sviðsmyndum og líkanreikningum af veðurfari, vatnafari, jöklabreytingum og skógavexti í framtíð og því var á vegum verkefnisins fengist við áhættumat varðandi fjárfestingar í orkuviðnaði. Verkefnið Climate and Energy Systems hefur treyst samstarf norrænna loftslagsfræðinga og orkugeirans og leitt af sér ný samstarfsverkefni með skyldar áherslur.

**Verkefnisstjóri:** Árni Snorrason, forstjóri Veðurstofu Íslands ([arni.snorrason@vedur.is](mailto:arni.snorrason@vedur.is))  
**Aðalritstjóri lokaskýrslu:** Þorsteinn Þorsteinsson, jöklafr., Veðurstofu Íslands ([thor@vedur.is](mailto:thor@vedur.is))



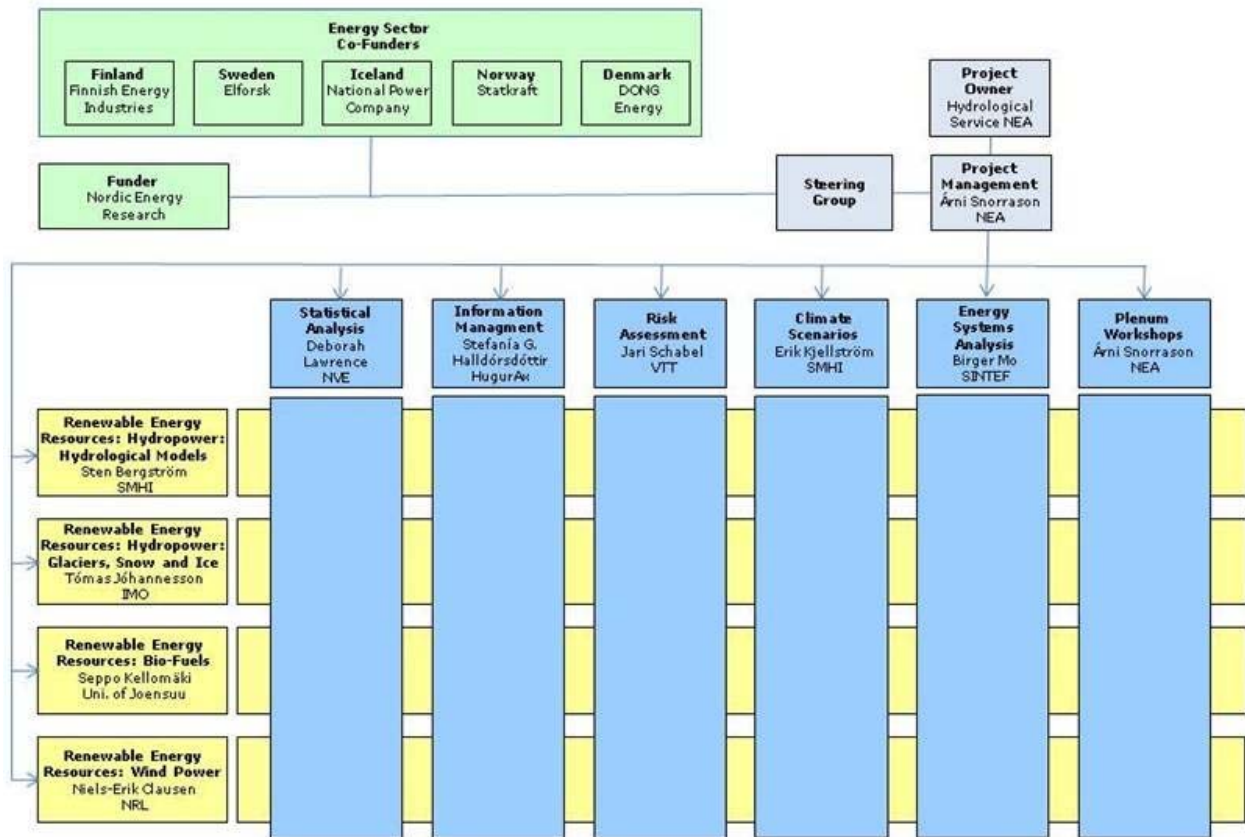
**Endurnýjanleg orka.** Árið 2009 byggðust 81% af orkuframleiðslu Jarðarbúa á bruna kola, olíu og jarðgass en þýðing endurnýjanlegra orkugjafa fer sívaxandi og var þáttur þeirra samtals um 16% orkuframleiðslunnar 2009. Endurnýjanlegir eru þeir orkugjafar sem ekki eyðast, þegar af er tekið en endurnýjast sífellt af skini sólar og veðurfarsþáttum eða af hita úr iðrum jarðar. Má þar til nefna sólarorku, vatnsorku, vindorku, sjávarfallaorku, lífmassaorku og jarðhitaorku. Lönd Evrópusambandsins settu sér það markmið árið 2008 að auka hlut þessara orkugjafa í 20% árið 2020 en á Norðurlöndum er hlutfallið nú þegar talsvert hærra og langhæst í Noregi og á Íslandi vegna umfangsmikillar nýtingar vatnsorku (og jarðhita á Íslandi). Sjá töflu hér að neðan.

**Tafla 1.** Hluttur (%) endurnýjanlegrar orku í heildarorkunotkun á Norðurlöndum og í Eystrasaltlöndunum þrem 2008 og markmið um hlutfallið árið 2020.

Sjá: <http://www.energy.eu/> og <http://www.nordicenergysolutions.org>

Land	2008	2020
Danmörk	19	30
Finnland	30	38
Ísland	81	85
Noregur	62	66
Svíþjóð	44	49
Eistland	19	25
Lettland	30	40
Litháen	15	23

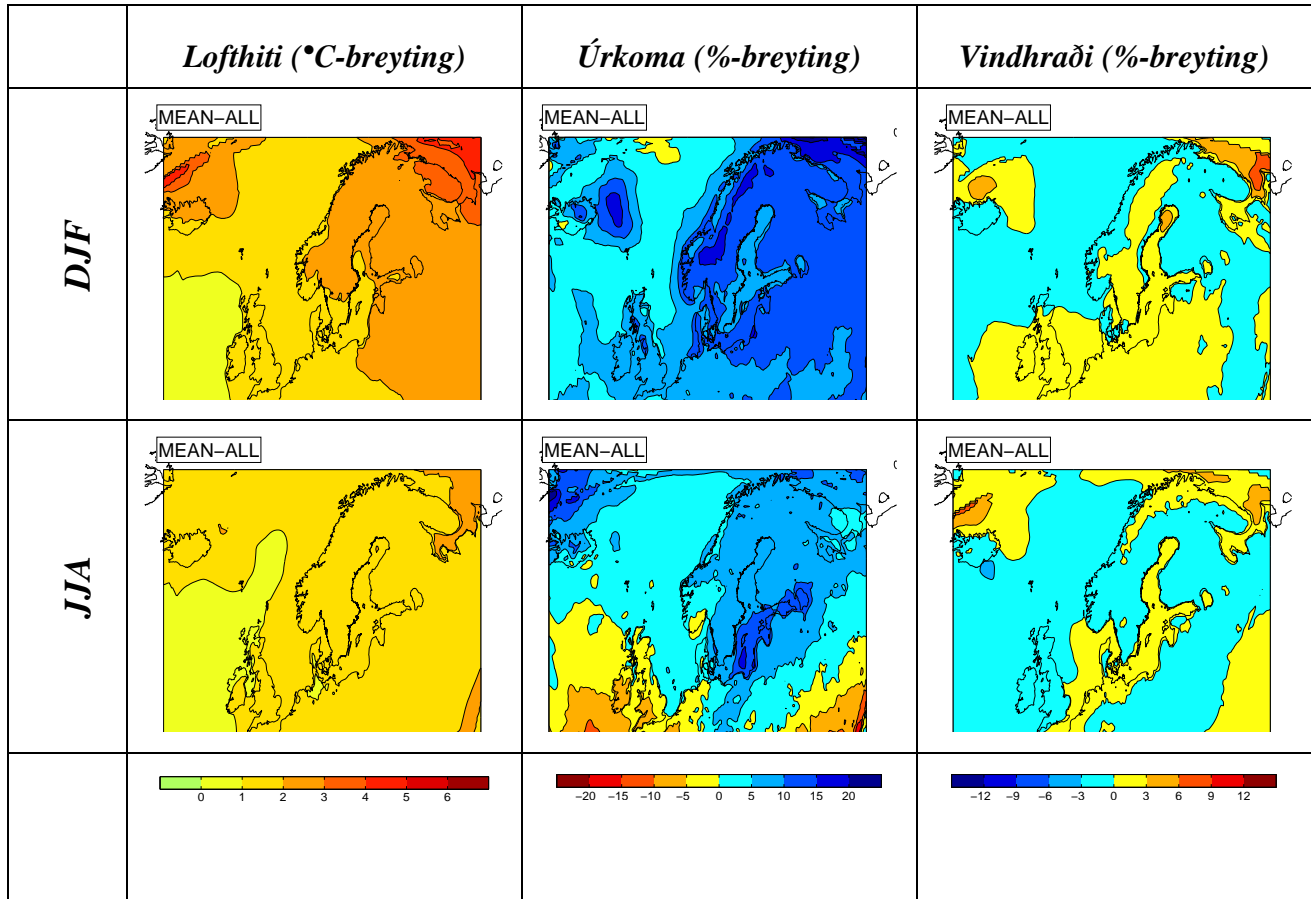
**Yfirlit um CES verkefnið.** Veðurstofa Íslands hefur á undanförunum árum stýrt verkefninu *Climate and Energy Systems (CES)*, með þátttöku um 100 vísindamanna við 30 stofnanir á Norðurlöndum og í Eystrasaltlöndum (1. mynd). Tilgangur verkefnisins var að reikna sviðsmyndir veðurfars (e: climate scenarios) fyrir þetta svæði fram til miðrar 21. aldar (og í sumum tilvikum allt til aldarloka) og nýta spár um þróun lofthita, úrkomu og afrennslis til að meta breytingar á innrennslis til vatnsaflsvirkjana, breytingar á vindhraða m.t.t. nýtingar vindorku og breytingar á vaxtarhraða skóga m.t.t. nýtingar lífrænnar orku. Er vatnsorkan einkum mikilvæg á Íslandi og í Noregi, vindorkan í Danmörku og lífmassaorka úr skógartrjám og mó í Finnlandi og Eystrasaltlöndum, en Svíar nýta þessa orkugjafa alla í nokkuð jöfnum mæli.



1. mynd. Skipulag verkefnisins *Climate and Energy Systems*. Verkefnið var fjármagnað af Nordic Energy Research (stofnun á vegum Norrænu ráðherranefndarinnar), norrænum orkufyrirtækjum og þátttökustofnunum. Verkefnisstjórn var á Veðurstofu Íslands (áður á Vatnamælingum Orkustofnunar, fyrir sameiningu þeirra við VÍ).

Heimasíða verkefnisins: <http://en.vedur.is/ces>

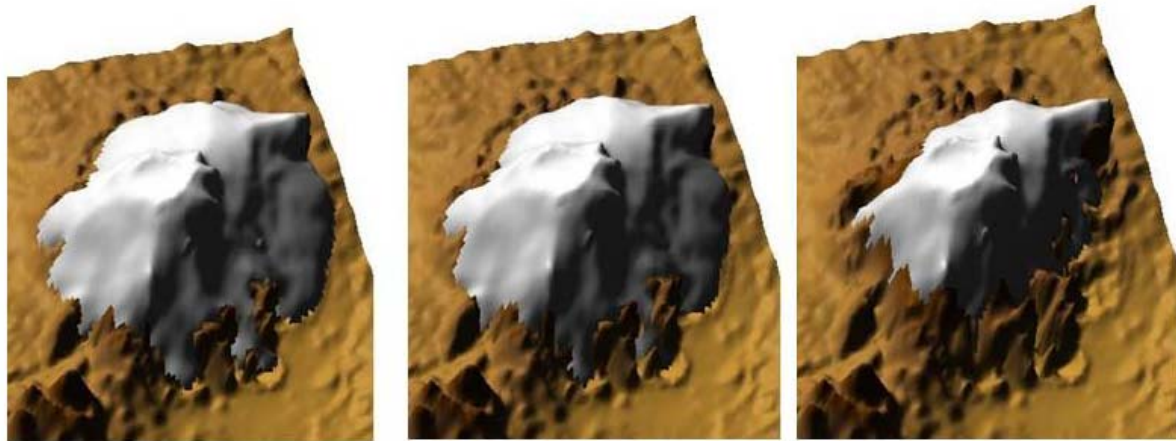
**Loftslagsspár.** Í CES-verkefninu voru svæðisbundin loftslagslíkön nýtt til að reikna líklega þróun lofthita, úrkomu og vindhraða á svæði, sem nær yfir Norðurlöndin öll auk Eystrasaltslandanna. Eins og sjá má á 2. mynd er mestri hitaaukningu (allt að 3°C) spáð á svæðinu norðaustanverðu að vetrarlagi, en líkleg hlýnun hérlendis er 1-2°C að sumarlagi og heldur meiri að vetrarlagi. Er hér miðað við meðaltal tímabilsins 1961-1990 og er hluti þessarar hlýnunar þegar kominn fram. Líklegt er að úrkoma muni heldur fara vaxandi á stærstum hluta svæðisins, en ólíklegt er að aukningin verði umfram 10% hérlendis. Ekki er spáð miklum breytingum á vindhraða. Niðurstöður úr svæðisbundnum líkönum voru bornar saman við niðurstöður hnattrænna loftslagslíkana, sem fram voru settar í nýjustu loftslagsskýrslu SP, IPCC skýrslunni, árið 2007. Niðurstöðum ber nokkuð vel saman en svæðisbundnu líkönin veita nákvæmari upplýsingar um líkur á breyttu loftslagi á tilteknum svæðum innan Norðurlanda og Eystrasaltslanda.



**2. mynd.** Reiknuð breyting á lofthita, úrkomu og vindhraða í Norður-Evrópu milli tímabilanna 1961-1990 og 2021-2050. Sýnt er meðaltal 15 loftslagslíkana. Sjá litakvarða neðan við myndirnar. Efri myndirnar sýna spá um vetrarmeðtal (DJF), þær neðri sumarmeðtal (JJA).

**Spár um jöklabreytingar.** Í lokaskýrslu CES-verkefnisins eru birtir nýir reikningar á líklegum jöklabreytingum á Íslandi, í Noregi og Svíþjóð fram til aldarloka. Miðað við meðalrúmmál jöklanna á tímabilinu 1981-2000 er því spáð að rúmmál Langjökuls hafi minnkað um 30% árið 2050 og rúmlega 80% við aldarlok. Samsvarandi tölur fyrir Hofsjökul (sjá 3. mynd) eru 20% (2050) og 40% (2100) og áþekkar niðurstöður fást fyrir smærri jökla í Skandinavíu. Afrennsli leysingarvatns frá jöklunum mun aukast við rýrnunina og verða í hámarki á árabílinu 2040-2070.

CES-verkefnið hefur treyst samstarf norrænna jöklafræðinga og í framhaldi af því var veittur styrkur úr Öndvegisáætlun norrænu ráðherranefndarinnar til nýs samvinnuverkefnis, sem ber heitið SVALI (= Stability and Variations of Arctic Land Ice). Meginmarkmið þess verkefnis er að rannsaka breytingar á jöklum á Norður-Atlantshafssvæðinu, Grænlandi og Svalbarða og meta framlög þessara jökla til sjávarborðshækkunar.



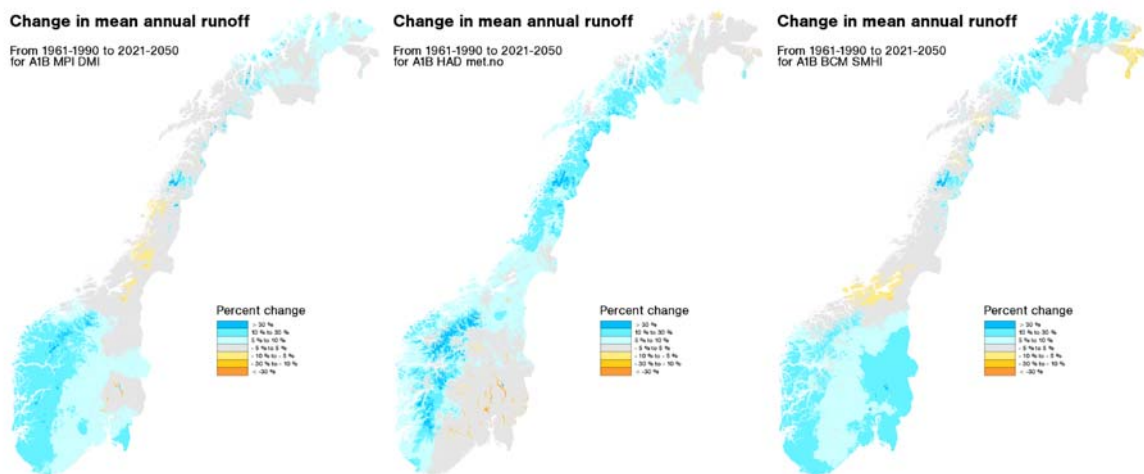
1990

2050

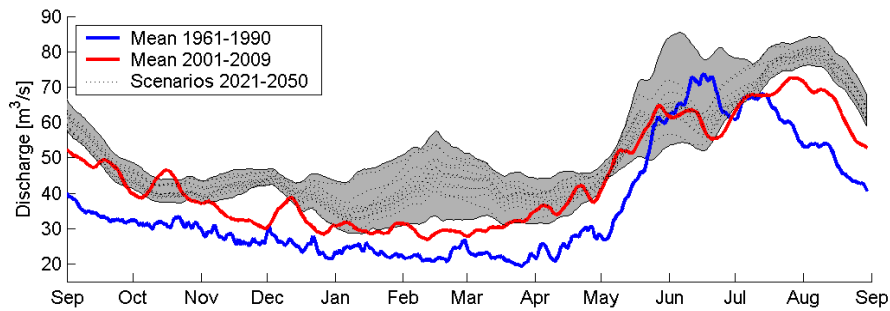
2100

**3. mynd.** Nýjar niðurstöður líkanreikninga á rúmmálsbreytingu Hofsjökuls á 21. öld. Notuð er loftslagssviðsmynd sem er nærri meðaltali 13 líkana, sem nýtt voru í CES verkefninu. Sérstök líkön reikna afkomu jökulsins og ísskrið við breytt loftslag. Lögun jökulsins, útlínur og rúmmál árið 1990 eru notuð við upphaf reiknitímabils og myndirnar í miðju og t.h. sýna ástand hans árin 2050 og 2100. Um þessar mundir er þvermál Hofsjökuls 40 km, flatarmálið 850 km<sup>2</sup> og rúmmálið um 200 km<sup>3</sup>.

**Afrennslisbreytingar og áhrif á vatnsorkunýtingu.** Árstíðasveifla afrennslis (4. og 5. mynd) og þar með innrennslis til uppistöðulóna mun breytast í hlýnandi loftslagi. Hlutfallslega minni úrkoma mun falla sem snjór og vorleysingar verða því ekki eins miklar og áður. Leysingarflóðum að vetrarlagi mun hins vegar fjölga og úrkomuflóð verða stærri en áður. Stórflóð af því tagi, sem einungis eiga sér stað einu sinni á öld munu sums staðar fara minnkandi (t.d. vegna minnkandi snjóhulu), en annars staðar munu þau stækka vegna aukinnar úrkomu, t.d. í Suður-Svíþjóð. Sérstaklega var metið í verkefninu hvort stíflugarðar standist aukna flóðahættu og stækkandi flóð á sumum svæðum Norðurlanda. Fram til 2050 er spáð vaxandi afrennslis frá jöklum á Íslandi og í Noregi og einnig er búist við auknu innrennslis til uppistöðulóna í Svíþjóð, Finnlandi og Lettlandi. Aukin vatnsorkuframleiðsla verður því möguleg víðast hvar.



**4. mynd.** Spár þriggja mismunandi líkana um breytingar á afrennslis í Noregi milli tímabilanna 1961-1990 og 2021-2050. Blár litur táknar aukið afrennslis, grár litla breytingu og gulur minna afrennslis. Líkönin spá öll aukningu í Vestur-Noregi en niðurstöður eru nokkuð mismunandi fyrir aðra hluta landsins.



**5. mynd.** Spá um meðalrennsli Austari Jökulsár í Skagafirði (við mælistöð ofan byggða) á árabílinu 2021-2050 í samanburði við meðalrennsli á tímabilunum 1961-1990 og 2001-2009. Niðurstöður sýna að rennslisaukning hefur þegar orðið að vetrarlagi á fyrsta áratug 21. aldar. Spáð er frekari aukningu vetrarrennslis auk þess sem sumarrennsli mun haldast hátt fram eftir sumri vegna aukinnar leysingar á Hofsjökli. Gráa svæðið sýnir óvissumörk utan um líklegustu niðurstöðu.

**Spár um vindhraðabreytingar.** Nýting vindorku eykst nú hröðum skrefum á Norðurlöndum og í Eystrasaltslöndum og raunar út um alla Jörð. Hafa Danir verið forystuþjóð við nýtingu vindorku og framleiðslu vindrafstöðva, sem nú eru staðsettar jafnt meðfram ströndum sem úti á hafi (6. mynd). Spár um breytingar á vindhraða eru mikilli óvissu háðar en ekki er búist við miklum breytingum á vindafli á svæðinu á þessari öld. Í CES-verkefninu var einnig rannsakað hvort búast megi við breytingum á tíðni ofsaveðra (sem áhrif hafa á hönnunarforsendur vindrafstöðva). Í framhaldi af verkefninu var veittur styrkur til norræna verkefnisins Ísvindar (ICEWIND) og á vegum þess verður m.a. unnið að gerð vindakorts af Íslandi.



**6. mynd.** Middelgrunden vindorkuverið á Eyrarsundi, nærri Kaupmannahöfn.

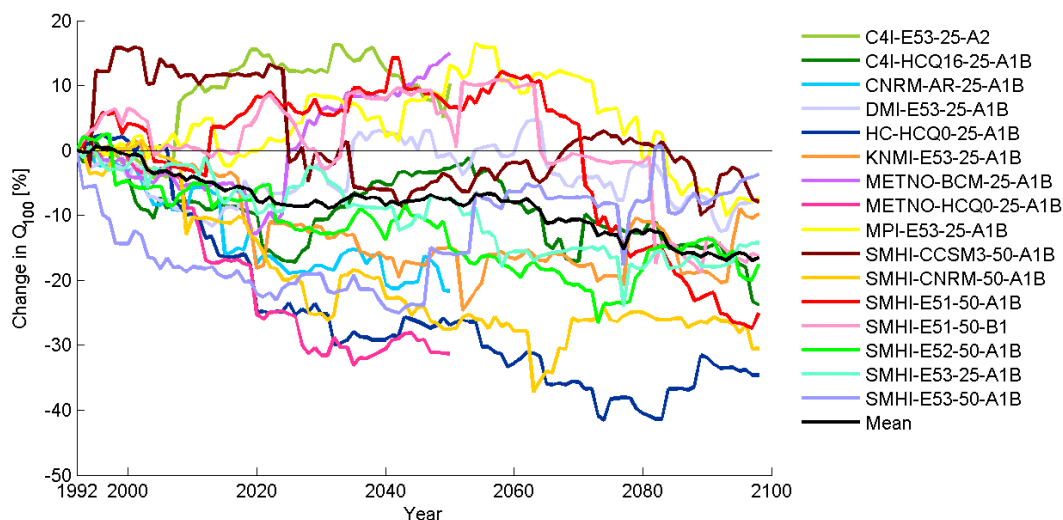
**Áhrif á skógarnytjar.** Finniskur rannsóknahópur innan CES stýrði rannsókn á því hvaða áhrif áætluð hlýnun muni hafa á vöxt skóga og þar með á skógarnytjar. Hlýnun verður einna mest í Finnlandi á svæðinu öllu og er því búist við að verulega megi auka þar framleiðslu á eldsneyti og öðrum orkugjöfum úr lífmassa (framleiddum úr trjám, sjá 7. mynd). Líkanreikningar benda til að auk megi framleiðslu á lífrænum orkugjöfum um allt að 75% á árabílinu 2071-2100 í samanburði við tímabilið 1961-1990. Í Eystrasaltslöndunum er einnig stefnt að aukinni notkun lífmassa við orku- og eldsneytisframleiðslu, með skógarhöggi og mónytnum.



7. mynd. T.v. Þéttur skógur í Vesijako, Finnlandi. T.h. Eldsneytiskubbar úr sögunarmylsnu og tréspónum.

**Þróun orkukerfa á Norðurlöndum.** Norðurlöndin (utan Íslands) eru aðilar að sameiginlegum orkumarkaði (NordPool) og í CES-verkefninu voru spár um loftslags- og afrennslisbreytingar nýttar til þess að meta líklegar breytingar á raforkuframleiðslu á svæðinu fram til 2020, með sérstakri áherslu á vatnsorku. Spáð er rúmlega 10% aukningu í framleiðslugetunni og nokkrum breytingum á orkusölu milli landa innan svæðisins, ennfremur er áætlað að útflutningur raforku til meginlands Evrópu aukist. Á Íslandi gerir Landsvirkjun ráð fyrir nær 20% aukningu í nýtanlegri vatnsorku í virkjuðum vatnsföllum fram til 2050, vegna aukins afrennslis frá jöklum. Núverandi hönnun virkjana hérlandis mun aðeins geta annað nálægt 40% þessarar aukningar.

**Mat á óvissu og áhættu.** Sérfræðingar sem þróa spálíkön veðurfars, afrennslis og jöklabreytinga áratugi og jafnvel aldir fram í tímann leggja mikla áherslu á þá óvissu, sem er um niðurstöðurnar. Sem dæmi er hér sýnt á 8. mynd mat á breytingum á stærð 100 ára aftakaflóða í Klarälven í Norður-Svíþjóð (þ.e. flóða af þeirri stærð, sem einungis má vænta einu sinni á öld). Sýndar eru niðurstöður byggðar á 16 mismunandi loftslagslíkönum og meðaltal þeirra. Útfrá þessu er ekki hægt að fullyrða að slíkt aftakaflóð, ef það ætti sér stað árið 2050, yrði minna en viðmiðunarflóð árið 1992, þótt meirihluti líkananna spái slíku. Sérstök athugun fór fram á því í CES-verkefninu hvernig taka bæri tillit til óvissu á borð við þessa við hönnun orkuvera og flutningskerfa.



8. mynd. Lóðrétti ásinn sýnir %-breytingu á stærð reiknaðra 100 ára aftakaflóða í Klarälven á 21. öld. Fyrir árið 2050 spá tvö líkön 10-15% aukningu en eitt rúmlega 30% minnkun. Líkönin spá því öll að búast megi við minni aftakaflóðum við lok aldarinnar, en %-minnkun er breytileg frá 5% til 35%.



**Niðurstöður.** Norðurlöndin eru í fremstu röð við nýtingu endurnýjanlegra orkugjafa og búast má við að hlutfall þeirra í heildar-orkuframleiðslu á svæðinu muni fara stöðugt vaxandi á næstu áratugum. Eyrstrasaltlöndin stefna einnig að því að auka hlut endurnýjanlegrar orku og aukinni tengingu við orkukerfi Norðurlanda, t.d. verður 700 MW sæstrengur milli Litháens og Svíþjóðar tekinn í notkun árið 2015. Viðbúnaður vegna líklegra áhrifa loftslagsbreytinga er góður í öllum löndum á svæðinu og líklegt er að þær auðveldi aukningu á hlut vatnsorku, vindorku og lífrænnar orku á þessari öld. Bætt loftslags-, afrennslis- og jökklalíkon munu minnka óvissu í sviðsmyndum (e: scenarios) af framtíðarþróun veðurfars. Verkefnið *Climate and Energy Systems* hefur treyst samstarf norræna loftslagsfræðinga og orkugeirans og leitt af sér ný samstarfsverkefni með skyldar áherslur.

### **Stofnanir sem tóku þátt í CES-verkefninu**

Veðurstofa Íslands / Icelandic Meteorological Office (IMO)  
Danish Climate Centre, DMI  
Danish Meteorological Institute (DMI)  
Ea Energy Analyses, Copenhagen  
Finnish Environment Institute (SYKE)  
Finnish Meteorological Institute (FMI)  
Geological Survey of Denmark and Greenland (GEUS)  
HugurAx Software Solutions, Reykjavík  
Institute for Meteorological Research, Reykjavík  
Institute of Earth Sciences, University of Iceland  
IVL Swedish Environmental Research Institute  
Landsvirkjun (National Power Company), Iceland  
Latvian Environment, Geology and Meteorology Centre  
Lithuanian Energy Institute  
National Environmental Research Institute, Denmark  
Norwegian Meteorological Institute (NMI)  
Norwegian Water Resources and Energy Directorate (NVE)  
Risø DTU National Laboratory for Sustainable Energy  
Rossby Centre of the Swedish Meteorological and Hydrological Institute  
SINTEF Energy Research, Norway  
Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)  
Tallinn University of Technology  
University of Alaska  
University of British Columbia  
University of Eastern Finland  
University of Helsinki  
Uppsala University  
Voeikov Main Geophysical Observatory, St. Petersburg  
VTT Technical Research Centre of Finland