

Kristján Jónasson

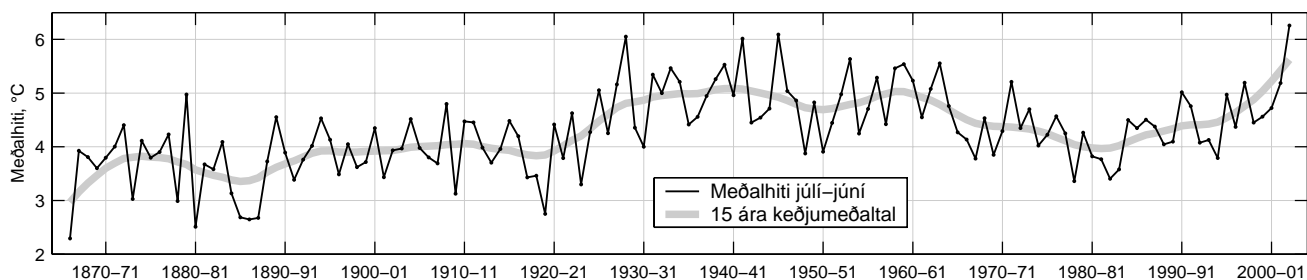
Spá um meðalhita í Reykjavík 2004 - 2035

Ágrip

Gerð er spá um ársmeðalhita í Reykjavík árin 2004–2035 með því að tengja sjálffylgnilíkan af náttúrulegum hitasveiflum við nýlegar rannsóknir og mat á væntanlegri gróðurhúsahlýnun á Íslandi. Sjálffylgnilíkanið er byggt á hitamælingum í Reykjavík 1867–2003 og að nokkru á öðrum hitamælingum á Íslandi og í nágrannalöndum. Með hermun er lagt mat á skekkju í þessari spá og einnig skoðað hvernig dæmigerð hitaþróun gæti orðið. Árið er reiknað frá júlí–júní og jafnframt er gerð sérstök spá fyrir vetrarhita nóvember–apríl. Samkvæmt spánni verður meðalhiti næstu 10 ár 5.17 °C og næstu 10 ár þar á eftir 5.42°, en meðalhiti undanfarinna 10 ára var 4.76° og næstu 10 ára þar á undan 4.33°. Hljýjustu 10 júlí-til-júní-ár í röð síðan mælingar hófust í Reykjavík voru árin 1939–1949, en þá var meðalhiti 5.15°. Gert er ráð fyrir að gróðurhúsahlýnun verði meiri á veturna, en spáskekkja að vetri reynist jafnframt talsvert meiri.

Inngangur

Undanfarin ár hafa verið mjög hlý, og meðalhiti síðustu 7 ára, 1996–2002 var 4.90 °C í Reykjavík, en meðalhiti næstu 20 ára þar á undan (1976–1995) var 4.15°. Árið 2003 hefur síðan verið mjög hlýtt það sem af er, meðalhitinn í janúar til október var 6.84° en til samanburðar var hiti sömu mánaða 5.53° árin 1996–2002 og 4.85° árin 1976–1995. Meðalárshiti í Reykjavík síðan mælingar hófust er sýndur á 1. mynd (tölurnar sjálfar eru aftar, í 6. töflu), og eins og sjá má er hlýnun lík þeirri sem orðið hefur síðustu ár ekki einsdæmi og meðalárshiti hefur sveiflast að því er virðist á tilviljanakenndan hátt allt tímabilið. En myndin sýnir líka meðalhlýnun yfir allt tímabilið, sem samkvæmt línulegu aðhvarfi er 0.77° á öld. Sú hlýnun er lík meðalhlýnun á jörðinni allri á sama tímabili, sem er aftur í samræmi við líkön af gróðurhúsaáhrifum vegna aukningar koltvísýrings í andrúmsloftinu yfir þetta tímabil. Samkvæmt þessum líkönum er hraði hlýnunarinnar um 0.25° á áratug um þessar mundir, sem sé nokkru minni en hlýnunarhraðinn í Reykjavík að undanfögnu.



1. mynd. Meðalhiti í Reykjavík 1867–2003

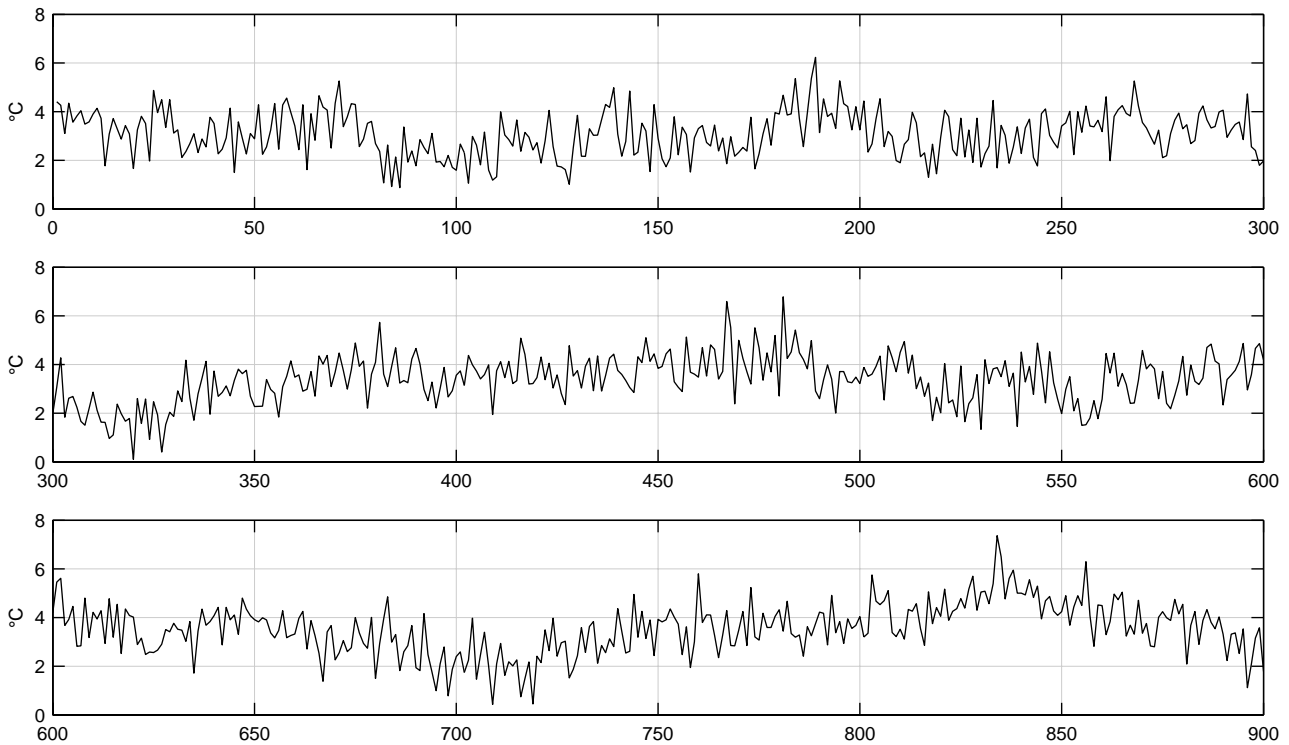
Markmið þessarar skýrslu er að gera líkan af meðalhita í Reykjavík, sem tekur bæði tillit til slembihegðunar hans og gróðurhúsaáhrifa, og nota í framhaldi líkanið til að reikna með hermun tölfræðilega dreifingu meðalhitans næstu 30 ár. Sérstakur áhugi er á vetrarmeðalhita og er gerð sérstök spá fyrir meðalhita mánaðanna nóvember–apríl. Til að auðvelda samanburð er meðalárshitinn yfirleitt reiknaður fyrir tímabilið frá júlí til júní, bæði sögulegur (eins og á 1. mynd) og spáður.

AR-líkan

Líkanið sem lagt er til grundvallar hér er svokallað AR-líkan (*Autoregressive-*), nánar tiltekið

$$(1) \quad x_k = a_1 x_{k-1} + a_2 x_{k-2} + \dots + a_m x_{k-m} + z_k,$$

þar sem x_k er meðalhiti á k -ta ári, a_1, \dots, a_m eru stíkar líkansins og z_k eru óháðar normaldreifðar slembistærðir með meðaltal μ og staðalfrávik σ^2 ; sjá t.d. [1] og [11]. Ef stikarnir a_i uppfylla ákveðin skilyrði (sem fela í sér að þeir séu ekki of stórir) verður líkanið tímastöðugt, sem þýðir að væntigildi x_k er óháð k og jafnt $\mu/(1 - a_1 - \dots - a_m)$. Auðvelt er að meta stíka AR-líkans með hálíknamati (*maximum likelihood estimation*) og í framhaldi má herma og þá fást raðir sem hegða sér líkt og mældar hitaraðir. Það skiptast á hlý tímabil og köld, stundum verður snögg hlýnun eða kölnun að því er virðist fyrir tilviljun og stundum hægari, og stundum koma tímabil þar sem hlý og köld ár skiptast tilviljanakennt á. Á 2. mynd er sýnt dæmi um slíka hermun.



2. mynd. Hitaröð sem er hermd í 900 ár með 7 liða AR-líkani og stikum metnum útfra Stykkishólmsröð (án gróðurhúsaáhrifa; sjá 6. mynd og 3. töflu). Meðaltal raðarinnar er 3.25 °C og staðalfrávik 0.87 °C.

Ef gefnar eru hitamælingar á veðurstöð í n ár fæst hálíknamat á $\mathbf{a} = [a_1, \dots, a_m]^T$ með því að leysa jöfnuhneppi:

$$(2) \quad \mathbf{X}^T \mathbf{X} \hat{\mathbf{a}} = \mathbf{X}^T (\mathbf{x}^+ - \bar{\mathbf{x}}).$$

Hér er \mathbf{x}^+ vigur með þekktum hitamælingum að frátöldum m fyrstu árunum, $\bar{\mathbf{x}}$ er meðaltal allra hitamælinganna og \mathbf{X} er fylki með m dálkum; sá j -ti er jafn $[x_{1+m-j}, \dots, x_{n-j}] - \bar{\mathbf{x}}$. Tveir stikar eru ótaldir, μ og σ^2 , og er hefð fyrir því að meta μ útfra meðaltali mældu x -raðarinnar:

$$(3) \quad \hat{\mu} = (1 - \hat{a}_1 - \dots - \hat{a}_n) \bar{\mathbf{x}} = \frac{1 - \hat{a}_1 - \dots - \hat{a}_n}{n} \sum_{k=1}^n x_k$$

(það er reyndar ekki hálíknamatið, en mjög nærri því). Hálíknamat σ^2 er

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n - m} \sum_{k=j+1}^n r_k^2$$

þar sem r_k er k -ta leifin,

$$(4) \quad r_k = x_k - (\hat{a}_1 x_{k-1} + \hat{a}_2 x_{k-2} + \dots + \hat{a}_m x_{k-m}) - \hat{\mu},$$

en þetta mat er bjagað. Óbjagað mat á σ^2 fæst með því að draga fjölda metinna stika frá nefnaranum $n - m$:

$$(5) \quad s^2 = \frac{1}{n - 2m - 1} \sum_{k=j+1}^n r_k^2.$$

Um þessar líkingar má lesa í [7] eða [11].

Yfirlit um gróðurhúsaáhrif

Styrkur gróðurhúsalofttegunda í andrúmslofti hefur aukist umtalsvert síðan um 1750, koltvíoxíðs um 33%, metans um 150% og tvíköfnunarefnisoxíðs, N_2O , um 16%, sjá [13]. Styrkur annarra gróðurhúsalofttegunda, sem þó eru taldar hafa minni áhrif en framantaldar, hefur einnig aukist. Meðal þeirra eru kolflúorkolefni,

vetniskolflúorkolefni, vetnisflúorkolefni, sexflúorbrennisteinn og óson í veðrahvolfi. Gróðurhúsalofttegundir hafa áhrif til aukningar á svonefndan geislunarbúskap andrúmsloftsins og eru þessi áhrif mæld í wöttum á fermetra, W/m^2 . Aukning í geislunarbúskap veldur síðan aftur hlýnun andrúmsloftsins. Á móti kemur að sót (frá bruna) í andrúmsloftinu hefur aukist af mannavöldum, og sama má segja um ýmsar aðrar agnir.

Mjög miklar vísindarannsóknir hafa farið fram á gróðurhúsaáhrifum undanfarna áratugi, og er ítarlega samantekt að finna í stórri (900 bls.) skýrslu milliríkjanefndar um loftslagsbreytingar frá árinu 2001 [3]. Íslenska skýrslan [13] er að nokkru byggð á samsvarandi alþjóðlegri skýrslu frá 1996 [2]. Auðveldara er að meta breytingu í geislunarbúskap en hækkun hita og sýnir 1. tafla breytingu hans samkvæmt [13].

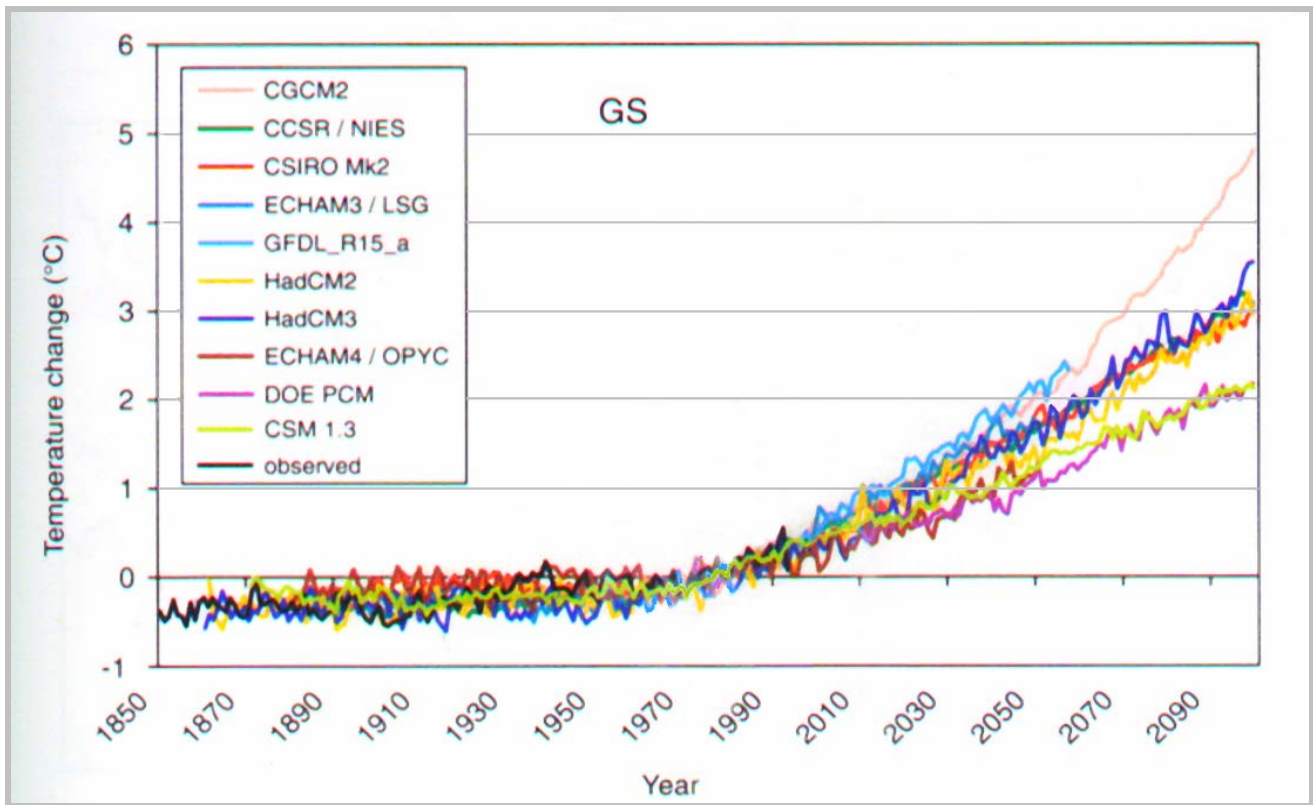
Gróðurhúsalofttegund	Aukning geislunarbúskaps, W/m^2
Koltvísýringur	1.56
Metan	0.47
Tvíköfnunarefnisoxíð	0.14
Kolflúorkolefni og vetnisflúorkolefni	0.25
Óson í veðrahvolfi	0.40
Aðrar lofttegundir	0.05
Gróðurhúsalofttegundir alls	2.87
Áhrifavaldar til mótvægis	
Ryk, sót og aðrar agnir, bein áhrif	-0.50
Ryk, sót og aðrar agnir, óbein áhrif	-0.50
Óson í heiðhvolfi	-0.10
Mótvægisbreyting alls	-1.10
Nettóbreying	1.77

1. tafla. Breyting geislunarbúskaps jarðar af mannavöldum síðan í byrjun iðnbyltingar, tölur fyrir 1992.

Rannsóknnum á líklegri framþróun gróðurhúsaáhrifa má skipta í tvo þætti: annarsvegar mat á framþróun breytingar á styrk gróðurhúsalofttegunda og ryks, og hinsvegar rannsóknir á áhrifum þessara breytinga á hita.

Reyndar er rétt að segja hér örlítið um orðanotkun. Um eitthvert tiltekið mat á framtíðarstyrk (og geislunarbúskap) er gjarnan notað á ensku orðið *scenario*, en um útreikning á framtíðarhita sem byggist á slíku mati er oft notað *projection* en stundum er *scenario* látið ná yfir hvoru tveggja. Á Íslensku hefur *scenario* verið þýtt með *sviðsmynd* og til dæmis í [13] er notað það orð notað bæði um framtíðarstyrk og -hita. Opinberar nefndir og ýmsir vísindamenn sem fjalla um gróðurhúsaáhrif forðast orðin *prediction* og *predict* (spá) og á það við bæði um [3] og [13]. Í tölfræði er hinsvegar algengt að kalla aðferðir til að segja fyrir um framtíðina *spár*, og með þeirri orðanotkun er ekki endilega lagður dómur á nákvæmni forsendnanna sem spáin byggir á. Í þessari skýrslu eru öll orðin notuð dálítið jöfnum höndum og ekki sérstaklega reynt að forðast að spá (samanber titil hennar).

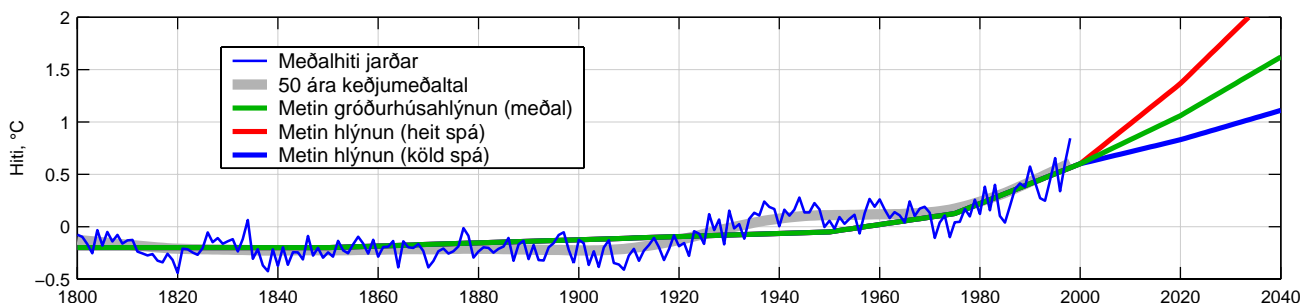
Til að meta styrkþróunina þarf að gefa sér forsendur um framtíðarlosun, en einnig að nota niðurstöður rannsókna á efnafræði andrúmslofts og sjávar, meðal annars á upptöku hafsins á koltvísýringi og öðrum gróðurhúsalofttegundum. Ennfremur þarf að reikna með upptöku gróðurs á koltvísýringi. Til að meta hitabreytingu að gefnum forsendum um styrk lofttegundanna eru notuð svonefnd veðurfarslíkön. Talsverð framþróun hefur orðið undanfarið í gerða slíkra líkana og segja má að vísindasamfélagið sé nú farið að trúá á þær hlýnunar-sviðsmyndir sem þeim fást. Það er þó talsvert breytilegt milli líkana hve mikil hlýnunin reiknast, og bætist sá breytileiki við skekkju í mati á framtíðarlosun og styrk koltvísýrings, metans og annarra lofttegunda. Á 3. mynd, sem fengin er af bls. 541 í [3] eru sýndar niðurstöður úr keyrslu 10 slíkra líkana, sem allar byrja um eða fyrir árið 1900. Sjö þeirra ná fram til ársins 2100, einni lýkur 2065 og tveimur 2050. Auk þess sýnir myndin með svörtum ferli mældan (og metinn) meðalhita jarðar 1850–1993 samkvæmt [5]. Átta af keyrslunum sem sýndar eru á 3. mynd byggja á sömu sviðsmynd um losun gróðurhúsalofttegunda, sem í grófum dráttum jafngildir 1% árlegri aukningu koltvísýrings frá 1990 og út 21. öldina en þær tvær sem reikna minnsta hlýnun (DOE PCM og CSM 1.3) byggja á annarri sviðsmynd. Allar keyrslurnar taka mótvægisáhrif ryks með í reikninginn.



3. mynd. Niðurstöður úr keyrslu 10 mismunandi veðurfarslíkana ásamt meðalhita jarðar 1850–1993. Sjá nánari skýringar í meginmáli.

Gróðurhúsaáhrifin á Íslandi

Til að geta metið framtíðarhita með þeirri aðferð sem notuð er í þessari skýrslu þarf að meta gróðurhúsaáhrifin bæði í fortíð og framtíð. Hér hefur það verið gert með því að leggja þrjú bútalínuleg föll að ferlum á 3. mynd. Í fortíð falla þau saman, en í framtíð eru þrjár spár: heit spá (byggð á CGCM1, ECHAM3 og GFDL-R15a), köld spá (byggð á ECHAM4 og DOE-PCM) og meðalspá (byggð á hinum 5 keyrslunum). Þessar spár eru sýndar á 4. mynd og í 2. töflu.



4. mynd. Meðalhiti jarðar 1800–1998 samkvæmt [9] ásamt metnum gróðurhúsaáhrifum útfrá 3. mynd.

Tímabil	Hlýnun, °C á áratug			Uppsöfnuð hlýnun meðalspár í lok tímabils, °C
	Meðalspá	Heit spá	Köld spá	
fyrir 1850	0,000	0,000	0,000	0,00
1850–1950	0,015	0,015	0,015	0,15
1950–1975	0,070	0,070	0,070	0,33
1975–2000	0,190	0,190	0,190	0,80
2000–2020	0,230	0,383	0,115	1,26
2020–2100	0,280	0,467	0,140	3,50

2. tafla. Spá um gróðurhúsaáhrif byggð á 3. mynd.

Sú leið að nota jarðarmeðaltalið til að meta gróðurhúsaáhrif við Ísland kallar á nokkrar skýringar. Veðurfarslíkön gefa almennt meiri hlýnun eftir því sem nær dregur heimskaunum, en hins vegar minni á norðanverðu Atlantshafi en á öðrum svæðum á sömu breiddargráðum (sjá [16] og bls. 12–13 í [13]). Í greininni [16] er fjallað um norrænt rannsóknarverkefni, og eru þar niðurstöður ýmissa keyrslna vegnar saman og metnir ýmsir þættir sem áhrif geta haft. Niðurstaðan er að hlýna muni á Íslandi um 0.30° á áratug næstu áratugi; heldur meira á veturna (0.35°) en á sumrin (0.25°). Vísindanefndin sem ritaði skýrsluna [13] gerir síðan þessa sviðsmynd að sinni (á bls. 13 þar), og má lesa um bakgrunn þeirrar ákvörðunar í [14]. Þessi norræna rannsókn byggir að mestu á sömu gögnum og keyrslum og skýrsla milliríkjanefndarinnar frá 1996 [2]. Raunar er vitnað til þess strax í upphafi inngangs [16] að jarðarmeðalhiti muni hækka um 0.30° á áratug næstu áratugi, sem sé jafnmikið og Íslandshitinn.

Í samnorrænu rannsóknarverkefni um „veðurfar vatn og orku“ (CWE, climate, water and energy) sem nú er unnið að (sjá os.is/cwe) hafa menn notað nokkru lægri tölur um væntanlega hlýnun á Íslandi á næstu áratugum. Í [15] er reiknað með 0.225° hlýnun á áratug (0.15° um hásumar og 0.30° um hávetur), og á mynd 2.3 í [12] er sýnd 1.0° hlýnun 1990–2050 á línu sem fer nánast í gegn um Reykjavík, eða 0.17° á áratug. Í [15] er reyndar jafnframt reiknað bæði með sviðsmyndinni úr [16], 0.30° á áratug, og með sviðsmyndinni úr [12].

Í ljósi allra þessara upplýsinga, og með það í huga að hér er þörf á mati á gróðurhúsaáhrifum í fortíð jafnt sem framtíð, virðist sú ákvörðun að nota niðurstöðurnar á 3. mynd til að meta hlýnun við Ísland vera eins nærri réttu lagi og hægt er að komast. Eins og 4. tafla sýnir þýðir það 0.23° hlýnun á áratug fram til 2020 og 0.28° eftir það.

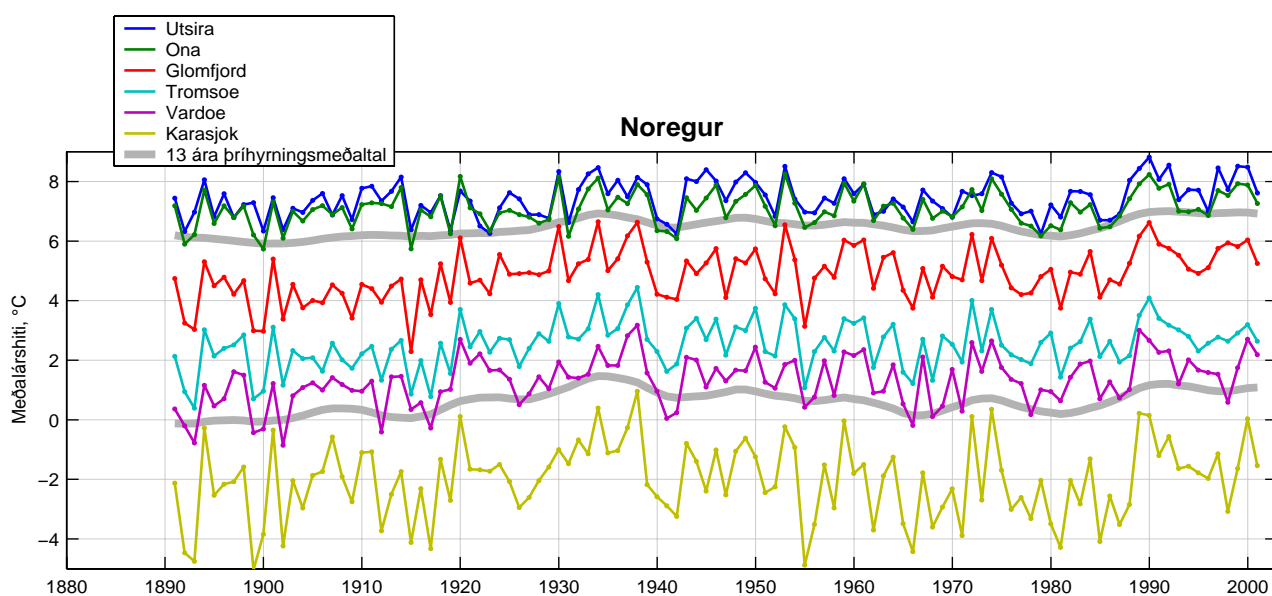
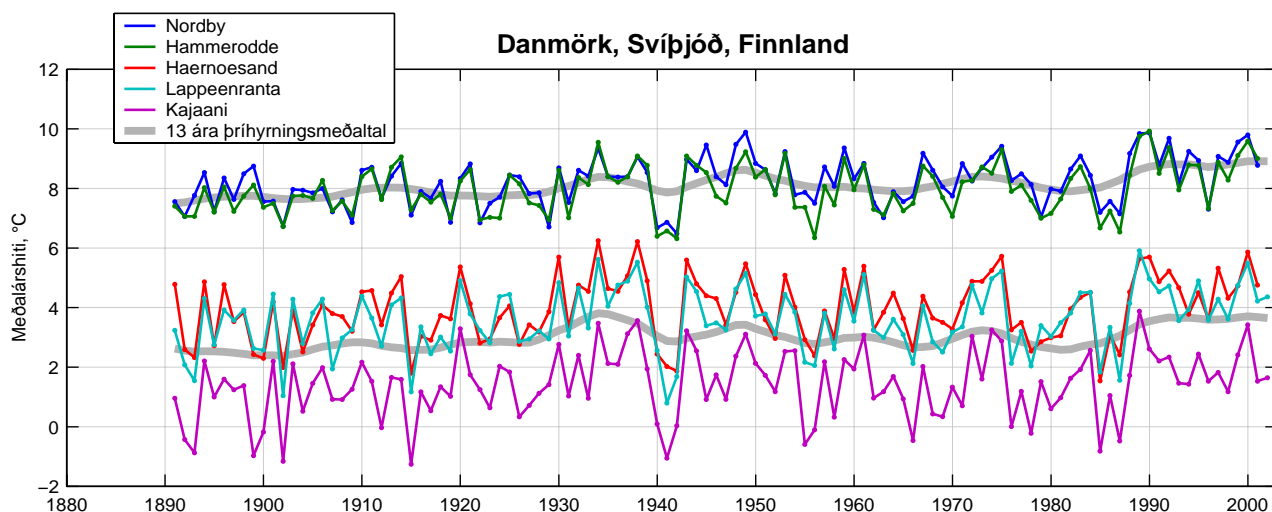
	Veðurstöð	Númer	Lengd	Breidd	Tímabil	Medalt.	St.fráv.	Hlýnun	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	Skýrir
Ísland	Reykjavík	4030	-21.9	64.1	1867-2003	4.3	0.7	0.83	0.18	0.16	0.003	0.15	0.14	0.10	0.09	33%
	Stykkishólmur	4013	-22.7	65.1	1831-2003	3.4	0.8	0.66	0.13	0.08	-0.03	0.21	0.11	0.06	0.17	23%
	Akureyri	4063	-18.0	66.5	1883-2003	3.3	0.8	1.02	0.28	0.02	0.04	0.18	-0.04	0.14	0.01	20%
	Grimsey	4065	-18.1	65.7	1875-2003	2.3	0.9	1.23	0.34	0.03	0.03	0.15	0.08	0.10	0.03	35%
	Vestmannaeyjar	4048	-20.3	63.4	1878-2003	4.9	0.6	0.61	0.29	0.06	0.07	0.13	0.09	0.13	0.06	37%
	Meðaltal							0.87	0.24	0.07	0.02	0.16	0.08	0.11	0.07	30%
Grænland og norðureyjar	Upernavik	4210	-56.2	72.8	1873-2000	-7.6	1.5	1.29	0.31	0.10	0.20	0.02	0.11	-0.11	0.16	36%
	Ilulissatflugvöllur	4221	-51.1	69.2	1873-2000	-4.9	1.6	1.37	0.35	0.03	0.08	0.10	0.06	-0.11	0.15	24%
	Nuuk	4250	-51.8	64.2	1890-1999	-1.4	1.2	0.31	0.46	-0.06	0.05	0.08	0.05	0.02	0.13	29%
	Narsarsuaq	4270	-48.2	61.2	1873-2000	0.7	1.2	0.81	0.38	0.04	0.05	-0.04	0.09	-0.03	0.11	20%
	Tasiilaq	4360	-37.6	65.6	1894-1999	-1.2	1.0	0.35	0.38	0.18	0.00	0.17	-0.02	0.17	-0.05	48%
	Þórshöfn-Færeyjum	6011	-6.8	62.0	1890-2000	6.5	0.5	0.5	0.26	0.14	0.01	0.17	-0.03	0.04	0.13	23%
	Bjarnarey	99710	19.0	74.5	1920-1999	-1.9	1.2	-0.21	0.27	0.06	0.08	-0.12	0.10	-0.15	0.07	12%
	Svalb.flugv.endurg.	99841	15.5	78.3	1911-1999	-6.3	1.7	1.29	0.29	0.17	0.01	-0.03	-0.05	-0.07	0.08	16%
	Jan-Mayen	99950	-8.7	70.9	1921-1999	-0.8	1.0	-1.04	0.43	0.20	-0.14	0.19	-0.07	-0.01	0.10	34%
	Meðaltal						0.52	0.35	0.10	0.04	0.06	0.03	-0.03	0.10	27%	
Skandinavía	Lappeenranta	1701	28.1	61.1	1890-2002	3.6	1.1	0.77	0.10	0.07	-0.18	-0.09	0.03	-0.10	-0.04	6%
	Kajaani	4601	27.7	64.3	1890-2002	1.4	1.1	0.74	0.12	0.02	-0.06	-0.09	0.03	-0.10	0.06	4%
	Hammerodde	6193	14.8	55.3	1890-2001	8.0	0.8	0.76	0.27	0.09	-0.34	0.02	0.06	-0.11	0.01	16%
	Hämeönsand	12738	17.9	62.6	1890-2001	3.9	1.1	0.73	0.29	0.09	-0.20	0.04	0.04	-0.10	0.03	12%
	Nordby	25140	8.4	55.4	1890-2001	8.2	0.8	0.95	0.23	0.10	-0.19	-0.07	0.02	-0.01	-0.01	10%
	Utsira	47300	4.9	59.3	1890-2001	7.4	0.6	0.55	0.24	0.15	-0.12	0.00	0.01	-0.05	0.06	9%
	Ona	62480	6.5	62.9	1890-2001	7.1	0.6	0.43	0.15	0.16	-0.07	0.05	-0.13	-0.07	0.11	8%
	Tromsø	90450	18.9	69.7	1890-2001	2.5	0.8	0.74	0.16	0.07	0.03	0.07	-0.05	0.06	0.17	10%
	Karasjok	97250	25.5	69.5	1890-2001	-2.0	1.3	0.35	0.11	0.13	0.08	0.02	0.00	-0.07	0.06	5%
	Vardø	98550	31.1	70.4	1890-2001	1.3	0.8	0.89	0.27	0.09	0.12	-0.17	-0.04	-0.02	0.22	16%
Glomfjord	80700	14.0	66.8	1890-2001	4.9	0.9	1.14	0.14	0.17	0.04	0.11	-0.08	0.04	0.15	12%	
	Meðaltal						0.73	0.19	0.10	-0.08	-0.01	-0.01	-0.05	0.08	10%	
	Meðaltal meðaltala						0.71	0.26	0.09	-0.01	0.07	0.03	0.01	0.08	22%	
	Meðaltal Íslands, Grænlands og norðureyja							0.3	0.08	0.029	0.11	0.05	0.04	0.09	28%	

3. tafla. Yfirlit um nokkrar norrænar hitaraðir. Dálkurinn „hlýnun“ sýnir meðalhlýnun á öld yfir mælt tímabil, reiknaðri með því að finna hallatölu í línulegu aðhvarfi. Athugið að hlýnun á Grænlandi og norðureyjum dregst mjög niður vegna kólnunar á Bjarnarey og Jan Mayen, en þar var hlýnuninni í upphafi 20. aldar lokið þegar mælingar hófust. Dálkarnir í $a1$ – $a7$ eru stíkar í metnu AR-líkani sbr. (1), sem fengið er með (2) eftir að metin gróðurhúsaáhrifun (meðalspá skv. 4. mynd) hefur verið dregin frá röðinni. Dálkurinn „skýrir“ segir hve stóran hluta af dreifni raðarinnar (eftir frádrátt hlýnunar) líkanið skýrir (hér er birt R^2 en ekki R_a^2 sem notað er hér að aftan). Gröf þessara hitaraða eru á 5. og 6. mynd.

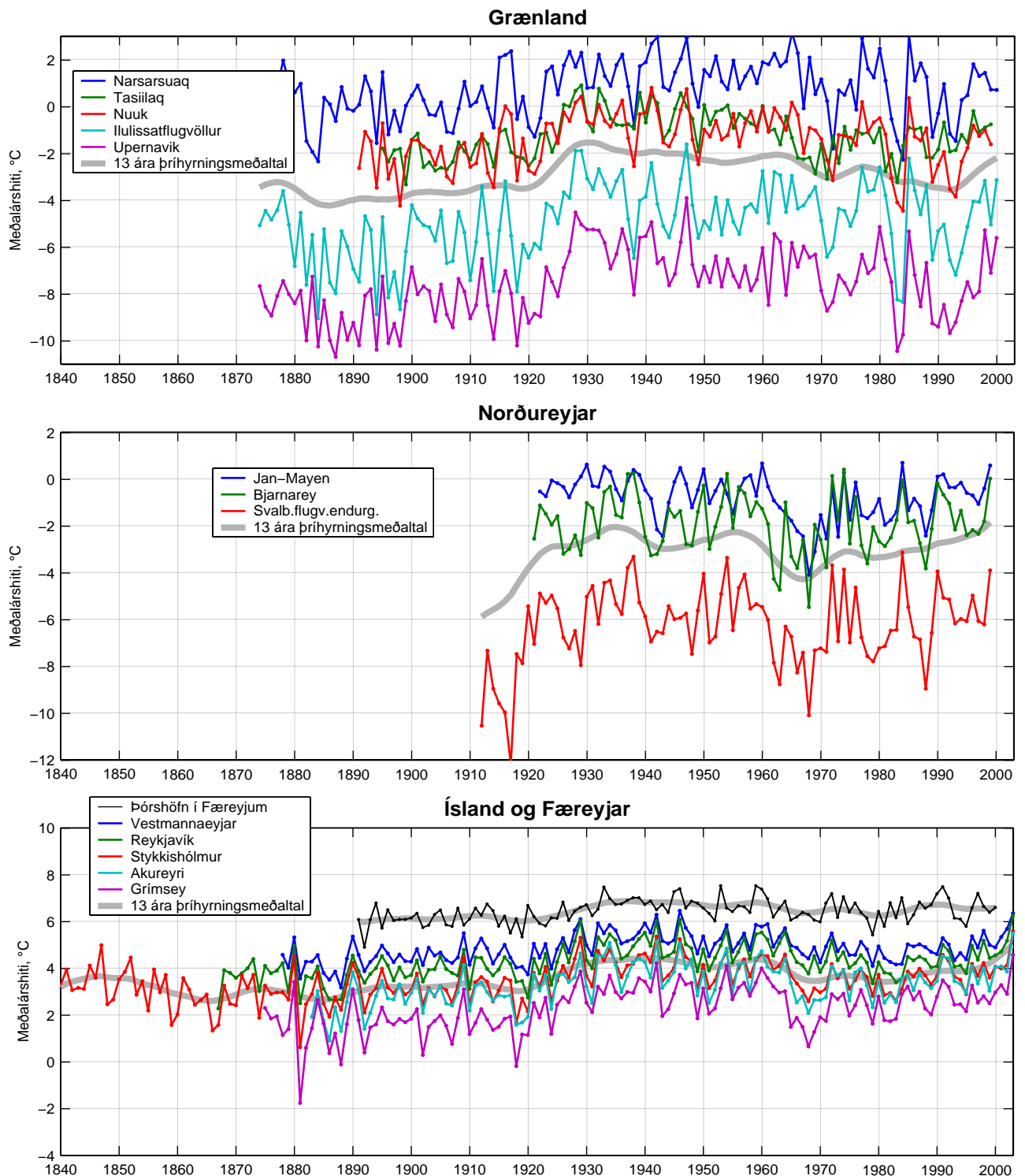
Hitamælingaraðir

Fjölmargar hitaraðir sem ná aftur á 19. öld og byggjast á reglulegum veðurathugunum eru til, og gerðar hafa verið umfangsmiklar rannsóknir til að leiðrétta þessar raðir (einkum fyrir flutningi á athugunarstöðum, breytingum á mælitækni og hlýnun í borgum), fylla í eyður í þeim, og búa til meðalraðir fyrir ákveðin svæði, heimshluta eða jörðina alla. Þegar hafa verið nefndar jarðarröðin [5] (sem er svört inn á milli ferlanna á 3. mynd) og röðin fyrir Reykjavík á 1. mynd. Til viðbótar má nefna nýrri jarðarröð [9], ýmsar norrænar raðir [6] og [17] og röð frá Mið-Englandi [8] og [10], en allar þessar raðir er auðvelt að finna á netinu nema [5]. Á 4. mynd má sjá jarðarröðina [9] ásamt metinni gróðurhúsaflýnun sem rædd var í síðasta kafla, og 5. og 6. mynd sýna nokkrar valdar norrænar raðir (þar á meðal íslenskar).

Allar þessar mælingaraðir sýna einkenni sem nefnd voru í kaflanum um AR-líkan að framan: Það skiptast á hlý og köld tímabil að því er virðist handahófskennt, og stundum hlýnar eða kólnar hratt og stundum hægt. En auk þess sýna allar raðirnar jafnaðarhlýnun, sérstaklega undanfarin 80–100 ár. Ef reiknuð er meðalhlýnun raðarinnar á 4. mynd með línulegu aðhvarfi árin 1900–1998 fæst meðalhlýnun 0.67° á öld. Metnu gróðurhúsaáhrifin í 2. töflu og á 4. mynd gefa hlýnun á 20. öld um 0.725° . Á norrænum og grænenskum veðurstöðvum hefur hlýnað að meðaltali um 0.71° á öld síðan mælingar hófust, og einstakar stöðvar eru flestar með meðalhlýnun af svipaðri stærð (sjá 3. töflu). Skýrsla [3] staðhæfir að á 20. öld hafi hlýnað um $0.6^\circ \pm 0.2^\circ$ (bls. 2). Að lokum er meðalhlýnun í Reykjavík 0.83° á öld síðan mælingar hófust 1867. Allar eru þessar tölur í góðu samræmi hver við aðra og styrkir það enn þá leið að meta Reykjavíkurhlýnun með jarðarhlýnun.



5. mynd. Hiti á nokkrum stöðum í Skandinavíu 1890–2000.



6. mynd. Hiti á eyjum í Norður-Atlantshafi á 19. og 20. öld.

AR-spá og skekkjumat

Til að AR-líkanið (1) sé viðeigandi verður röðin sem verið er að líkja eftir að vera tímastöðug. Í tímaraða- greiningu er stundum farin sú leið að gera líkan af fyrsta mismun raðar, $\Delta x_k = x_{k+1} - x_k$, og fæst þá svonefnt ARI-líkan (*AR-integrated*). Þessi leið á ekki við hér því að gróðurhúsahlýnunin hefur ekki verið föst þau ár sem mælt hefur verið, en hins vegar ætti að fást tímastöðug röð ef gróðurhúsahlýnunin er dregin frá mælinga- röðinni. Stika niðurstöðuraðarinnar má meta með (2), (3), (4) og (5) og í framhaldi má spá með því að fram- leiða margar raðir með þessa stika og bæta gróðurhúsahlýnun við hverja þeirra til að fá raðir sem fela í sér hlýnun.

Nú er óvissa í þeirri spá sem fæst úr sviðsmyndum af gróðurhúsaflýnun og til að taka tillit til þess hefur verið valin sú leið að reikna með að 25% líkur séu á að „kalda spáin“ rætist, 25% líkur á „heitu spánni“ og 50% líkur á „meðalspánni“ (sjá 2. töflu).

Ein skekkja er enn ónefnd og það er skekkja í stikamatinu. Ef mælingaröð væri þekkt mjög langt aftur í tímann yrði sú skekkja hverfandi, en ekki með 137 ára röð eins og Reykjavíkurröðinni. Best er að meta þessa skekkju með því að líta á stikana sem slembistærðir (við getum til dæmis hugsað okkur að sú Reykjavíkurröð sem við höfum sé fengin með því að draga árabilið sem hún nær yfir af handahófi). Af (1) og (2) fæst $\hat{\mathbf{a}} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} (\mathbf{X} \mathbf{a} + \mathbf{z})$ þar sem \mathbf{a} er föst og \mathbf{z} er slembin margvöld normalhending með samdreifni $\sigma^2 \mathbf{I}$. Þar með er samdreifni $\hat{\mathbf{a}}$ (táknud $\text{Cov}(\hat{\mathbf{a}})$) jöfn $\sigma^2 (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} (\sigma^2 \mathbf{I}) = \sigma^2 (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1}$, og af því leiðir að

$$(6) \quad \text{Cov}(\hat{\mathbf{a}}) \approx s^2 (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1}$$

(sjá bls. 549 í [7] eða bls. 354 í [11]). Nokkru flóknara er reikna út dreifni s^2 en af reikningum á bls. 550 í [7] fæst að

$$(7) \quad \text{Var} s^2 = \frac{2\sigma^4}{n-2m-1} \approx \frac{2s^4}{n-2m-1}.$$

Flóknast er að reikna dreifni $\hat{\mu}$. Nákvæmt gildi er gefið með

$$(8) \quad \text{Var}(\hat{\mu}) = \frac{(1 - a_1 - \dots - a_n) \sigma_x^2}{n} \left(1 + 2 \sum_{r=1}^{n-1} (1 - r/N) \rho(r) \right)$$

þar sem ρ er sjálfyllgnifall raðarinnar (sjá [11]). Hér þarf að meta stikana a_i , σ_x^2 og ρ ; a_i er metið með \hat{a}_i en nokkrar leiðir koma til greina til að meta σ_x^2 og ρ . Hér hefur verið valið að meta σ_x^2 með $s_x^2 = \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2 / (n-1)$ og ρ með því að setja matið á \mathbf{a} inn í svonefndar Yule–Walker jöfnur:

$$\rho(r) = a_1 \rho(r-1) + a_2 \rho(r-2) + \dots + a_k \rho(r-k), \quad r = 1, 2, \dots$$

(og nota $\rho(1) = 1$). Í línulegu aðhvarfi er vel þekkt að dreifnimatið er óháð stikamatinu og líklega má útfrá líknafalli líkansins sjá að það gildir líka hér, en hér var staðfest með hermun að $\text{Cov}(\hat{\mathbf{a}}, s^2) = 0$ og sömuleiðis að $\text{Cov}(\hat{\mu}, s^2) = \text{Cov}(\hat{\mathbf{a}}, \hat{\mu}) = 0$.

Nú má framleiða raðir sem taka tillit til skekkjunnar í matinu á stikunum með því að nota fyrir hverja þeirra handahófskennda normaldreifða stika með væntigildi samkvæmt (2)–(5) og (sam)dreifni samkvæmt (6), (7) og (8). Við hverja slíka röð er síðan bætt slembinni gróðurhúsaflýnun eins og fyrr segir (25% líkur á kaldri, 50% á meðal- og 25% á heitri).

Framtíðarspáin fæst nú sem meðaltal þessara framleiddu eða *hermdu* raða, og nákvæmni spár má meta með því að skoða dreifingu hermds hita. Tökum sem dæmi að búnar séu til 10000 raðir, að meðaltal þeirra fyrir árið 2006 sé 5.8 °C, 500 raðir séu með meira en 7.1° hita og 500 raðir séu með minna en 4.7° hita. Þá eru 90% vikmörk fyrir meðalhitann 2006 bilið [4.7°, 7.1°].

Fækkun stika í AR-líkani

Í 3. töflu eru sýndir metnir AR-stikar fyrir 25 norrænar og grænlenskar meðalárshitaradur. Ástæða þess að teknir eru sjö stikar er að í mörgum tilvikum bætir 7. stikinn marktækt við skýrða dreifni í líkaninu (1) en sá 8. ekki. Við sjáum að stikarnir eru flestir jákvæðir, og það er einmitt grundvöllur þess að líkan gefi hegðun eins og þá sem 2. mynd sýnir, þar sem skiptast á hlý og köld tímabil. Áberandi er að líkón fyrir veðurstöðvar í Skandinavíu skýra almennt mun minni hluta af dreifninni en eyjalíkönin.

Við gerð líkans og í framhaldi spá með líkaninu er markmiðið oft tvíþætt: (a) að öðlast skilning á þeim raunveruleika sem líkt er eftir og (b) að ná sem mestri nákvæmni í spánni. Þegar líkanið er fengið með aðhvarfi (sem á við um AR-líkan) stangast þessi markmið gjarnan á. Ef veruleikanum er rétt lýst með AR-líkani með mörgum stikum felur (a) í sér að þeir skuli allir metnir, en til að fá nákvæma spá borgar sig oft ekki að meta þá alla. Hver stiki sem metinn er gerir að vísu væntigildi spárinnar réttara en eykur hinsvegar spáskekkjuna, og ef stikinn er lítill og/eða mælingaröðin stutt vegur seinna atriðið þyngra. Til eru ýmsir mælikvarðar sem nota má til að ákvarða hve marga stika borgar sig að taka með í aðhvarfi til að spá verði sem réttust. Velþekkt er að

hafa það markmið að sem mest af dreifni mælingaraðarinnar sé skýrt með líkaninu, en sú aðferð er hinsvegar vilhóll markmiðinu (a). Til að vinna að markmiði (b) og lágmarka spáskekkju má nota stærðir nefndar AIC (*Akaike information criterion*), BIC (*Bayesian information criterion*) og C („stöðluð væntanleg heildarvilla í mati“), sjá t.d. [11]. Í 4. töflu eru sýnd gildi allra þessara mælikvarða fyrir AR-líkön af Reykjavíkurröð (að frádreginni gróðurhúsahlýnun) með 1–7 stikum.

n	R2	R2a	C	AIC	BIC
1	0.183	0.1828	22.25	523.7	526.5
2	0.252	0.2466	11.45	514.1	519.8
3	0.262	0.2505	11.67	514.4	523.0
4	0.295	0.2784	7.59	510.4	521.9
5	0.317	0.2952	5.57	508.3	522.7
6	0.325	0.2982	6.03	508.7	525.9
7	0.331	0.2984	7.00	509.7	529.7

4. tafla. Nokkrir mælikvarðar á stikafjölda sem ástæða væri til að hafa með í AR-líkani af Reykjavíkurröð. R2 og R2a ættu að vera sem stærstir en hinir mælikvarðarnir sem minnstir.

Stærðirnar R^2 og R_a^2 (merktir R2 og R2a) sýna hlutfall dreifni raðarinnar sem líkanið skýrir, R^2 án leiðréttingar fyrir því að stikar hafa verið metnir og R_a^2 með slíkri leiðréttingu (á ensku er stærðin R^2 nefnd *coefficient of determination* og a táknað *adjusted*). Allir stikarnir ættu að vera með samkvæmt R_a^2 , 5 stikar samkvæmt C og AIC en aðeins tveir stikar samkvæmt BIC. Vegna þess að allir sjö stikarnir eru jákvæðir (sjá 3. töflu, a_3 er 0.003) má hinsvegar búast við að sjálffylgni stytts líkans verði of lítil; „minni“ raðarannar verður styttra og hlýju og köldu tímabilin styttri en í veruleikanum. Til dæmis reiknast sjálffylgni x_k og x_{k-5} í sjö stika líkani 0.30 en í tveggja stika líkani er hún 0.13. Til að fækka stikum og ná fram betri spá án þess að sjálffylgnin minnki má nota aðferð sem á ensku er nefnd *distributed lags method*, sjá t.d. [4]. Þá er líkanið af gerðinni:

$$(9) \quad x_k = a_1 f_1(x_{k-1}, \dots, x_{k-p}) + \dots + a_m f_m(x_{k-1}, \dots, x_{k-p}) + z_k,$$

þar sem f_1, \dots, f_m eru fyrirfram valin einföld föll og $m < p$. Einfaldur möguleiki sem kemur í hugann við skoðun a -stikanna í 3. töflu er:

$$(10) \quad m = 1 \text{ og } f_1 = 7x_{k-1} + 6x_{k-2} + 5x_{k-3} + 4x_{k-4} + 3x_{k-5} + 2x_{k-6} + x_{k-7},$$

annar er:

$$(11) \quad m = 2, \quad f_1 = 6x_{k-1} + 5x_{k-2} + \dots + x_{k-6} \text{ og } f_2 = x_{k-2} + 2x_{k-3} + \dots + 6x_{k-7}.$$

og sá þriðji:

$$(12) \quad m = 3, \quad f_1 = x_{k-1}, \quad f_2 = 5x_{k-2} + 4x_{k-3} + \dots + x_{k-6} \text{ og } f_3 = x_{k-3} + 2x_{k-4} + \dots + 6x_{k-7}.$$

Stikarnir a_i í 3. töflu fara almennt minnkandi með i og það gæti vel verið tilviljun að a_3 fyrir Reykjavík er um það bil 0 (sjá t.d. a_3 fyrir Vestmannaeyjar, Upernavik og Vardø).

Með slíku líkani má áfram nota (2) til að finna hálíknamat \mathbf{a} , en nú verður (i, j) -stak \mathbf{X} jafnt $f_j(x_{p+i-1}, \dots, x_i) - f_j(\bar{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{x}}, \dots, \bar{\mathbf{x}})$. Mat á μ fæst sem $\hat{\mu} = 1 - \sum_j \hat{a}_j f_j(\bar{\mathbf{x}}, \dots, \bar{\mathbf{x}})$ og (4), (5) og (6)–(8) má nota óbreytt að öðru leyti en því að í nú er

$$r_k = x_k - (\hat{a}_1 f_1(x_{k-1}, \dots, x_{k-p}) + \dots + \hat{a}_m f_m(x_{k-1}, \dots, x_{k-p})) - \hat{\mu}.$$

Eftir að hafa prófað líkönin sem gefin eru með (9)–(12) og nokkur önnur svipuð var niðurstaðan að fyrir Reykjavík væri einfaldasta líkanið, (9) og (10), best. Með því fæst $R_a^2 = 0.313$, $AIC = 501.1$ og $BIC = 503.9$ (sjá 4. töflu). Athyglisvert er að samkvæmt mælikvarðanum R_a^2 skýrir þetta líkan meira af dreifni raðarinnar en sjö stika AR-líkan.

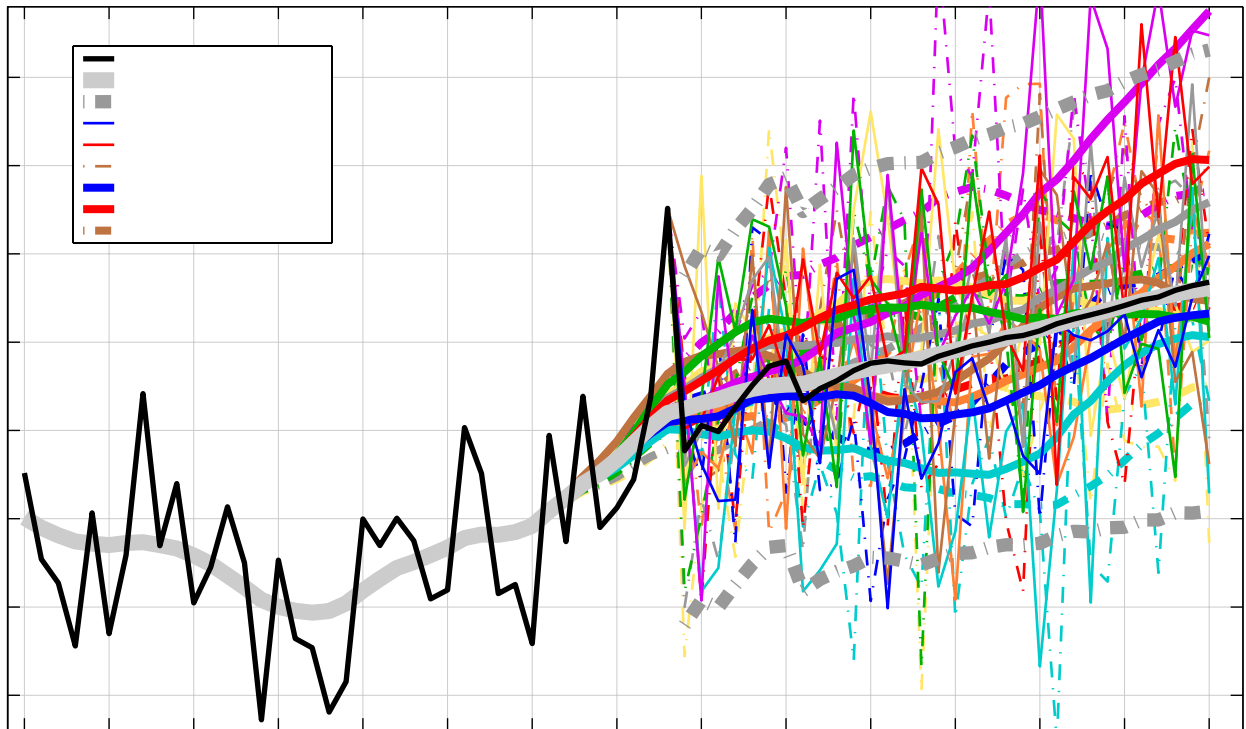
Þróun meðalárshita – niðurstöður

Gróðurhúsahlýnunin sem gefin er í 2. töflu var dregin frá meðalárshitanum í Reykjavík sem sýndur er á 1. mynd og síðan voru metnir stikar og skekkjur í stikamati fyrir líkanið (9) og (10) eins og lýst er að framan og er niðurstaðan í 5. töflu.

Stærð	tákn	gildi	staðalfrávik
meðalhiti	\bar{x}	4.065°	0.051°
AR-stiki í (9) og (10)	\hat{a}_1	0.0282	0.0037
dreifni leifa	s^2	0.360	0.045
skýrð dreifni	R_a^2	31.3%	

5. tafla. Niðurstöður stikamats AR-líkans af meðal-
árshita í Reykjavík að frádreginni gróðurhúshálfun.

Næst voru hermdar 350000 raðir eins og lýst er í kaflanum *AR-spá og skekkjumat*. Meginniðurstöður þessarar hermunar eru á 7. mynd.



7. mynd. Júlí–júní ársmeðalhiti í Reykjavík 1964–2035, 15 ára keðjumeðaltal og spá fyrir árin 2003–2035. Myndin sýnir einnig 90% vikiörk fyrir spá stakra ára, 18 dæmigerðar framtíðarrunur og tilheyrandi 15 ára keðjumeðaltöl. Sjá nánari skýringar í meginmáli.

Svarta línan sýnir annarsvegar ársmeðalhita 1964–2003 samkvæmt mælingum, og hins vegar spá fyrir árin 2003–2035 og breið grá lína sýnir 15 ára keðjumeðaltal. Samkvæmt henni er því spáð að hlýna muni um 0.7° á 32 árum frá 2003–2035 eða um 0.22° á áratug. Einnig eru sýnd 90% vikiörk fyrir spáðan hita einstakra ára, reiknuð eins og lýst er aftast í kaflanum *AR-spá og skekkjumat*. Ljóst er að hitinn mun ekki fylgja væntigildinu og til að gefa vísbendingu um hvernig það gæti þróast sýnir myndin 18 dæmigerðar framtíðarraðir (mjóar marglitar línur) ásamt tilheyrandi keðjumeðaltölum (breiðari línur í sömu litum). Athyglisvert er að samkvæmt spánni þarf að bíða um tveimur áratugum lengur en myndin nær (þ.e. til u.þ.b. 2055) eftir að væntanlegur hiti verði meiri en meðalhiti júlí 2002–júní 2003 (þótt næsta öruggt sé að stök ár verði hlýrri). Við sjáum líka á myndinni að ólíklegt er að nein af komandi árum verði jafn köld og árin 1977–8, 1982–3 og 1983–4.

Tölur um mældan meðalhita eru í 6. töflu og spáin sjálf á talnaformi og fleiri höfnunargildi eru í 7. töflu. Höfnunargildin má nota til að búa til ýmis vikiörk, til dæmis má lesa úr töflunni að 95% vikiörk fyrir hitann 2034–35 eru [4.31°C, 7.42°C]. Einnig má búa til einhliða vikiörk og prófa tilgátur. Til dæmis eru 95% líkur á að 2034–35 verði kaldara en 7.16° og tilgátu um að hitinn þá verði 8° mætti hafna á 1% prófstigi.

Ár	1867-1870	1870-1880	1880-1890	1890-1900	1900-1910	1910-1920	1920-1930	1930-1940	1940-1950	1950-1960	1960-1970	1970-1980	1980-1990	1990-2000	2000-2003
0-1		3.80	2.51	3.89	4.35	4.47	4.42	4.00	4.96	3.91	5.23	4.29	3.82	5.02	4.72
1-2		4.00	3.67	3.39	3.43	4.45	3.79	5.34	6.02	4.45	4.55	5.21	3.77	4.76	5.19
2-3		4.40	3.58	3.76	3.93	3.98	4.63	5.00	4.45	4.98	5.08	4.35	3.40	4.08	6.26
3-4		3.03	4.09	4.02	3.97	3.71	3.30	5.46	4.54	5.63	5.55	4.70	3.58	4.13	
4-5		4.11	3.13	4.53	4.52	3.96	4.27	5.21	4.71	4.25	4.76	4.02	4.50	3.79	
5-6		3.80	2.69	4.13	3.98	4.48	5.05	4.42	6.09	4.71	4.27	4.23	4.35	4.97	
6-7		3.90	2.65	3.49	3.80	4.20	4.25	4.56	5.04	5.29	4.14	4.57	4.50	4.37	
7-8	2.29	4.23	2.68	4.05	3.69	3.43	5.16	4.94	4.86	4.42	3.78	4.25	4.38	5.19	
8-9	3.93	2.99	3.73	3.62	4.80	3.46	6.05	5.26	3.88	5.46	4.53	3.36	4.05	4.45	
9-0	3.81	4.97	4.55	3.71	3.13	2.75	4.36	5.53	4.83	5.54	3.85	4.26	4.10	4.56	

6. tafla. Mældur meðalárshiti °C júlí-júní í Reykjavík 1867–2003. Til dæmis var meðalhiti júlí 1867–júní 1868 2.29°.

Ár	spáður júli-júní	alfa								
		hiti	1%	2.5%	5%	10%	90%	95%	97.5%	99%
2003-04	4.88	3.48	3.71	3.90	4.11	5.66	5.87	6.07	6.29	
2004-05	5.02	3.62	3.84	4.03	4.25	5.79	6.01	6.20	6.43	
2005-06	5.00	3.58	3.80	4.00	4.22	5.77	5.99	6.18	6.41	
2006-07	5.13	3.71	3.94	4.13	4.35	5.90	6.13	6.33	6.55	
2007-08	5.25	3.82	4.05	4.24	4.47	6.04	6.26	6.46	6.69	
2008-09	5.36	3.91	4.14	4.34	4.57	6.16	6.39	6.59	6.82	
2009-10	5.38	3.90	4.14	4.34	4.58	6.20	6.43	6.63	6.87	
2010-11	5.17	3.64	3.89	4.10	4.34	6.01	6.24	6.46	6.69	
2011-12	5.24	3.70	3.95	4.16	4.40	6.08	6.32	6.53	6.77	
2012-13	5.28	3.74	3.98	4.19	4.43	6.13	6.37	6.58	6.82	
2013-14	5.34	3.79	4.03	4.24	4.48	6.19	6.44	6.65	6.91	
2014-15	5.38	3.80	4.06	4.27	4.52	6.24	6.48	6.71	6.96	
2015-16	5.39	3.80	4.05	4.27	4.52	6.26	6.51	6.73	6.99	
2016-17	5.38	3.79	4.04	4.26	4.51	6.26	6.52	6.74	7.00	
2017-18	5.38	3.76	4.02	4.24	4.49	6.26	6.52	6.75	7.01	
2018-19	5.41	3.79	4.05	4.27	4.52	6.31	6.56	6.79	7.05	
2019-20	5.45	3.81	4.07	4.30	4.55	6.35	6.61	6.83	7.11	
2020-21	5.48	3.83	4.09	4.31	4.57	6.39	6.65	6.88	7.15	
2021-22	5.50	3.83	4.10	4.33	4.59	6.41	6.68	6.91	7.18	
2022-23	5.52	3.85	4.11	4.34	4.60	6.45	6.71	6.95	7.23	
2023-24	5.54	3.86	4.12	4.35	4.62	6.47	6.74	6.98	7.26	
2024-25	5.57	3.87	4.14	4.37	4.63	6.50	6.78	7.02	7.29	
2025-26	5.60	3.88	4.16	4.39	4.66	6.55	6.82	7.06	7.34	
2026-27	5.63	3.91	4.18	4.42	4.68	6.59	6.86	7.11	7.40	
2027-28	5.65	3.92	4.19	4.43	4.70	6.62	6.90	7.14	7.44	
2028-29	5.68	3.94	4.21	4.44	4.71	6.65	6.94	7.19	7.48	
2029-30	5.70	3.95	4.22	4.46	4.73	6.68	6.97	7.21	7.51	
2030-31	5.73	3.95	4.24	4.48	4.75	6.72	7.01	7.26	7.56	
2031-32	5.76	3.97	4.25	4.50	4.77	6.76	7.05	7.30	7.61	
2032-33	5.79	3.99	4.28	4.52	4.79	6.79	7.09	7.34	7.64	
2033-34	5.82	4.00	4.29	4.53	4.81	6.83	7.13	7.39	7.69	
2034-35	5.84	4.01	4.31	4.55	4.83	6.87	7.16	7.42	7.74	

Höfnunargildi, t þannig að $P(\text{hiti} < t) = \text{alfa}$

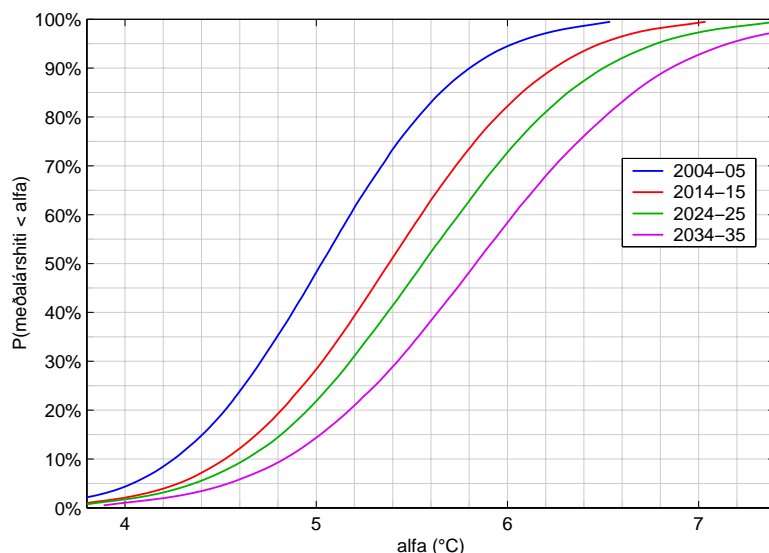
7. tafla. Spá um meðalárshita í Reykjavík 2003–2035 ásamt dreifingu sýndri með höfnunargildum (*critical values*). Árið er reiknað frá júlí til júní.

Að lokum eru nokkur dreififöll ársmeðalhitanna sýnd á 8. mynd. Af henni má til dæmis lesa að það eru 27% líkur á að 2014–15 verði kaldara en 5°.

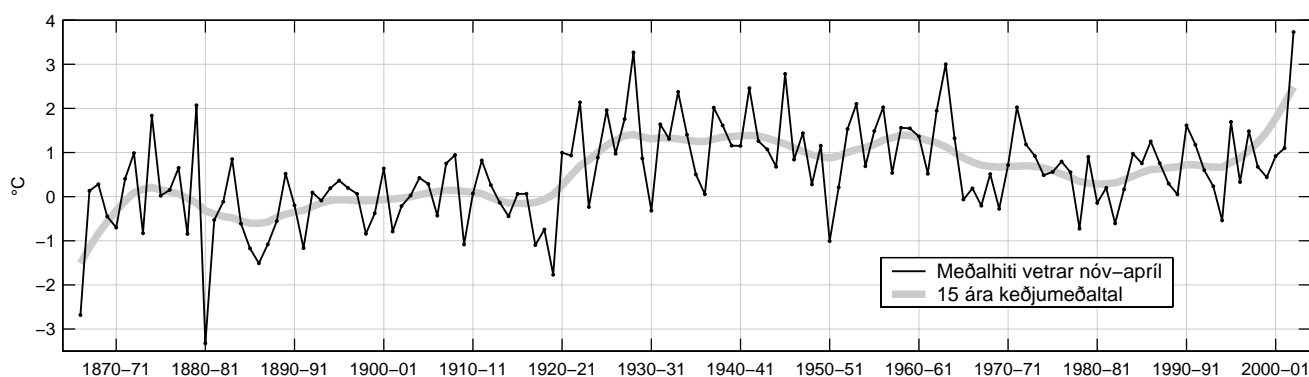
Vetrarhiti

Á 9. mynd og í 8. töflu er vetrarhiti árána 1867–2003 sýndur. Veturinn er reiknaður 6 mánuðir, frá nóvember til apríl, en apríl er talsvert kaldari (2.71°) mánuður en október (4.27°). Meðalhiti allra vetra er 0.52° C og staðalfrávik 1.049° eftir frádrátt gróðurhúsaáhrifa (skv. 9. töflu). Það er talsvert meira en staðalfrávik ársmeðalhita, sem er 0.725° eftir leiðréttingu skv. 2. töflu.

Flest líkön gera ráð fyrir heldur meiri gróðurhúsaáhrýnun á vetrum en á sumrum hér á okkar slóðum. Í [15] er gert ráð fyrir að vetrarhlýnun verði um 21% meiri en meðalhlýnun ársins (gert er ráð fyrir sínuslaga hlýnun, með hámark 0.3° á áratug um hávetur og 0.15° á áratug um hásumar; meðalhlýnunin er 0.225° og $(0.3 - 0.225) \int_0^\pi \sin x dx / \pi / 0.225 = 0.2122$). Hér er tekið mið af þessu og gróðurhúsaáhrýnunin í 2. töflu margfölduð með 1.21; sjá 9. töflu.



8. mynd. Dreififöll fyrir nokkur spáð júlí-júní ársmeðaltöl í Reykjavík



9. mynd. Vetrarmeðalhiti í Reykjavík 1867–2003.

Ár	1867-1870	1870-1880	1880-1890	1890-1900	1900-1910	1910-1920	1920-1930	1930-1940	1940-1950	1950-1960	1960-1970	1970-1980	1980-1990	1990-2000	2000-2003
0-1		-0.70	-3.32	-0.20	0.64	0.07	1.00	-0.32	1.15	-1.01	1.36	0.71	-0.14	1.62	0.92
1-2		0.40	-0.53	-1.17	-0.79	0.82	0.93	1.64	2.46	0.21	0.52	2.02	0.20	1.18	1.10
2-3		0.99	-0.11	0.10	-0.22	0.26	2.13	1.31	1.26	1.53	1.95	1.18	-0.60	0.60	3.73
3-4		-0.83	0.85	-0.09	0.02	-0.13	-0.23	2.37	1.07	2.10	3.00	0.92	0.16	0.23	
4-5		1.84	-0.61	0.19	0.43	-0.45	0.89	1.41	0.68	0.69	1.32	0.49	0.97	-0.54	
5-6		0.02	-1.17	0.36	0.29	0.06	1.96	0.50	2.78	1.49	-0.06	0.56	0.75	1.69	
6-7		0.15	-1.51	0.20	-0.43	0.06	0.97	0.06	0.84	2.02	0.19	0.80	1.25	0.33	
7-8	-2.68	0.65	-1.08	0.06	0.75	-1.10	1.76	2.02	1.44	0.54	-0.20	0.55	0.76	1.48	
8-9	0.13	-0.85	-0.55	-0.84	0.95	-0.74	3.27	1.61	0.28	1.56	0.51	-0.72	0.30	0.67	
9-0	0.28	2.07	0.52	-0.38	-1.09	-1.77	0.87	1.16	1.15	1.55	-0.27	0.90	0.05	0.44	

8. tafla. Vetrarmeðalhiti °C (nóvember–apríl) í Reykjavík 1867–2003

Tímabil	Vetrarhlýnun, °C á áratug			Uppsöfnuð hlýnun meðalspár í lok tímabils, °C
	Meðalspá	Heit spá	Köld spá	
fyrir 1850	0,000	0,000	0,000	0,000
1850–1950	0,018	0,018	0,018	0,182
1950–1975	0,085	0,085	0,085	0,393
1975–2000	0,230	0,230	0,230	0,968
2000–2020	0,278	0,463	0,139	1,525
2020–2100	0,339	0,565	0,169	4,235

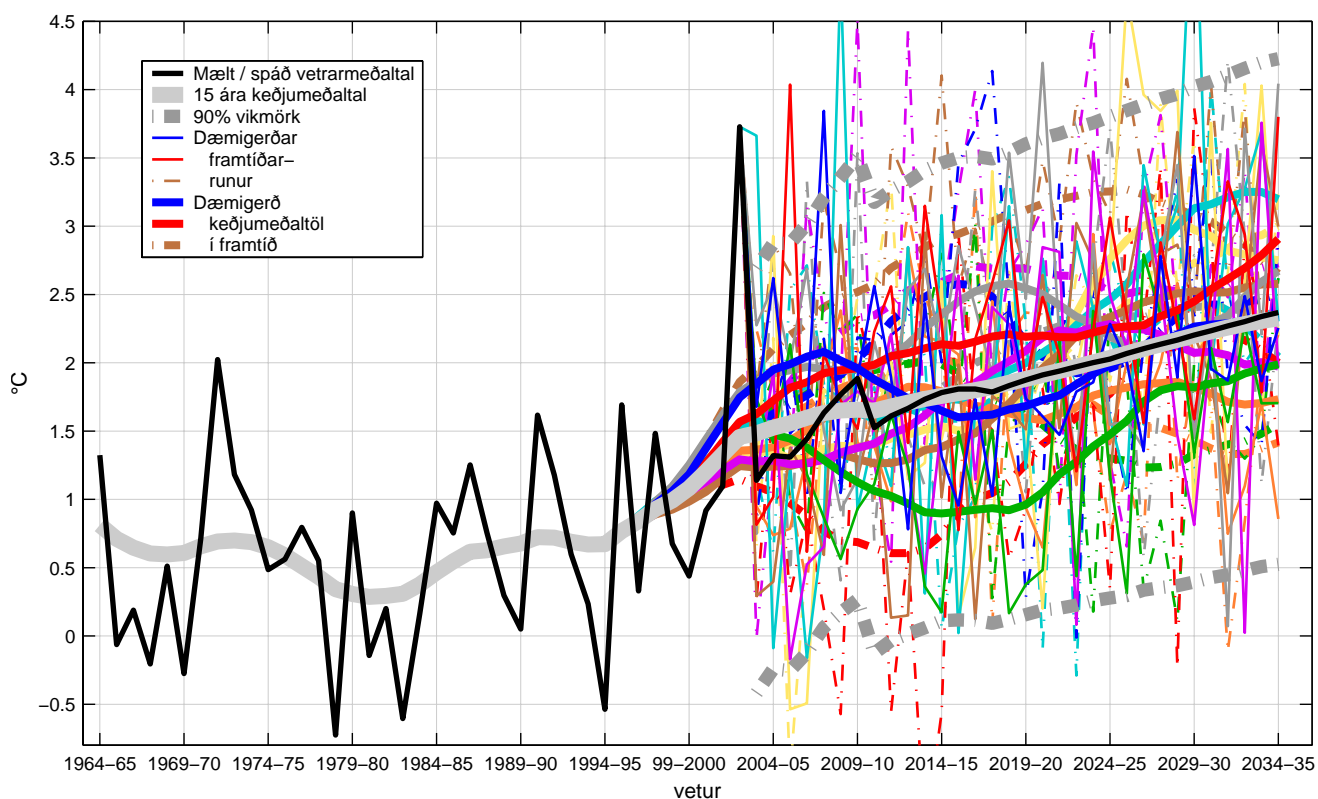
9. tafla. Metin gróðurhúsahlýnun á Íslandi nóvember–apríl.

Nú er farið nákvæmlega eins að og með meðalárshitann. Fyrst er gróðurhúshálfun (vetrar) dregin frá mæl-
ingaröð, stíkar líkansins (9) og (10) eru metnir með sömu jöfnum og fyrr og sömuleiðis skekkjur í þeim. Gildin
sem fengust eru sýnd í 10. töflu.

Stærð	tákn	gildi	staðalfrávik
meðalhiti	$\hat{\mu}$	0.251°	0.081°
AR-stíki í (9) og (10)	\hat{a}_1	0.0235	0.0046
dreifni leifa	s^2	0.896	0.112
skýrð dreifni	R_a^2	16.6%	

10. tafla. Niðurstöður stíkamats AR-líkans af vetrarhita í Reykjavík að fráðreginni gróðurhúshálfun.

Þá má herma röð með því að draga af handahófi stíka, síðan framtíðarröð með þá stíka, og loks gróðurhúshálfun (eins og fyrr, kalda röð með 25% líkum, meðalröð með 50% líkum og heita röð með 25% líkum). 350000 slíkar raðir voru hermdar og notaðar til að búa til spá og dreifingu spár sem sýnd er á 10. og 11. mynd og í 11. töflu.



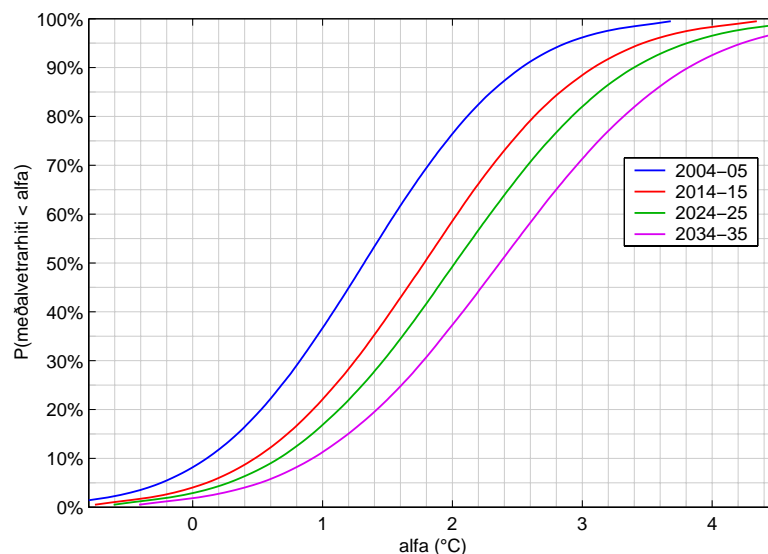
10. mynd. Vetrarmeðalhiti (nóvember–apríl) í Reykjavík 1964–2035, 15 ára keðjumeðaltal og spá fyrir árin 2003–2035. Myndin sýnir einnig 90% vikmörk fyrir spá stakra ára, 18 dæmigerðar framtíðarrunur og tilheyrandi 15 ára keðjumeðaltöl.

Nokkrar tilraunir voru gerðar til að finna betra líkan en hið einfalda, gefið með (9) og (10). Meðal annars voru líkön á borð við (10) og (11) reynd, og athugað var hvort hægt væri að bæta spána með því að nota sumarhitaröð, en þetta bar ekki árangur.

Líkur á fleiri heitum eða köldum árum í röð

Ljóst er að hitstig samliggjandi ára eru háðar hendingar, þannig að líkur þess að af n árum verði k ár hlýrri (eða kaldari) en gefið hitastig T er ekki hægt að reikna út frá líkunum á að stök ár verði hlýrri (eða kaldari) en T . Þannig reiknast t.d. líkurnar á að árin n verði öll heit ekki sem margfeldi líkinda þess að hvert ár fyrir sig verði

heitt, eins og gilda myndi væru hitastigin óháð. Hins vegar má lesa slíkar líkur út úr hermdu röðunum og hefur það verið gert fyrir 6 fimm-ára tímabil, 2005–2035. Niðurstöðurnar eru í 12. töflu. Við sjáum til dæmis að líkurnar á að árin 2005–2010 (reiknuð frá júlí–júní) verði öll hlýrri en 6° eru 10^{-4} en úr 7. töflu má lesa að fyrir hvert ár af þessum 5 eru um 10% líkur á að það verði hlýrri en 6°, svo væru líkurnar óháðar yrðu líkurnar 10^{-5} á að þau yrðu öll svo heit. Samskonar upplýsingar fyrir vetrarhita eru í 13. töflu.



11. mynd. Dreififöll fyrir nokkur spáð vetrarmeðaltöl (nóv.–apríl) í Reykjavík

Vetur	spáður hiti	----- alfa -----							
		1%	2.5%	5%	10%	90%	95%	97.5%	99%
2003-04	1.14	-1.08	-0.73	-0.42	-0.07	2.35	2.71	3.01	3.37
2004-05	1.32	-0.91	-0.56	-0.25	0.10	2.53	2.88	3.19	3.56
2005-06	1.30	-0.92	-0.55	-0.25	0.09	2.52	2.86	3.17	3.52
2006-07	1.44	-0.81	-0.44	-0.14	0.22	2.66	3.01	3.32	3.68
2007-08	1.63	-0.61	-0.25	0.06	0.41	2.86	3.21	3.51	3.87
2008-09	1.77	-0.50	-0.14	0.17	0.53	3.01	3.36	3.66	4.03
2009-10	1.89	-0.43	-0.05	0.26	0.62	3.14	3.50	3.81	4.18
2010-11	1.53	-0.83	-0.44	-0.12	0.25	2.82	3.18	3.50	3.86
2011-12	1.61	-0.74	-0.36	-0.05	0.32	2.89	3.25	3.58	3.94
2012-13	1.66	-0.72	-0.33	0.00	0.37	2.95	3.32	3.64	4.03
2013-14	1.73	-0.66	-0.27	0.05	0.43	3.02	3.40	3.71	4.09
2014-15	1.78	-0.59	-0.22	0.10	0.48	3.09	3.46	3.80	4.20
2015-16	1.80	-0.58	-0.21	0.11	0.49	3.12	3.50	3.82	4.21
2016-17	1.82	-0.59	-0.20	0.12	0.49	3.14	3.52	3.85	4.24
2017-18	1.79	-0.64	-0.24	0.09	0.47	3.12	3.50	3.84	4.23
2018-19	1.83	-0.60	-0.21	0.12	0.50	3.16	3.54	3.87	4.26
2019-20	1.87	-0.57	-0.17	0.16	0.54	3.20	3.59	3.92	4.31
2020-21	1.91	-0.53	-0.14	0.19	0.57	3.26	3.64	3.97	4.39
2021-22	1.94	-0.53	-0.13	0.20	0.60	3.30	3.69	4.03	4.44
2022-23	1.98	-0.51	-0.11	0.24	0.62	3.34	3.73	4.07	4.49
2023-24	2.00	-0.49	-0.09	0.25	0.64	3.36	3.75	4.09	4.50
2024-25	2.02	-0.46	-0.08	0.27	0.65	3.39	3.79	4.15	4.56
2025-26	2.06	-0.42	-0.04	0.29	0.68	3.44	3.84	4.19	4.59
2026-27	2.10	-0.42	-0.01	0.33	0.72	3.48	3.89	4.24	4.65
2027-28	2.14	-0.39	0.02	0.36	0.75	3.53	3.93	4.28	4.69
2028-29	2.17	-0.37	0.04	0.37	0.77	3.58	3.98	4.33	4.75
2029-30	2.20	-0.37	0.05	0.40	0.79	3.61	4.02	4.37	4.80
2030-31	2.23	-0.33	0.07	0.42	0.82	3.64	4.04	4.41	4.82
2031-32	2.26	-0.31	0.10	0.43	0.84	3.69	4.10	4.46	4.87
2032-33	2.30	-0.29	0.12	0.46	0.87	3.73	4.13	4.49	4.92
2033-34	2.34	-0.24	0.17	0.52	0.92	3.78	4.20	4.56	4.98
2034-35	2.37	-0.25	0.17	0.52	0.93	3.81	4.23	4.59	5.03

Höfnunargildi, t þannig að $P(\text{hiti} < t) = \text{alfa}$

11. tafla. Spá um vetrarmeðalhita í Reykjavík 2003–2035 ásamt dreifingu sýndri með höfnunargildum (*critical values*).

Lokaorð

Allar líkur benda til að á næstu árum muni hlýna í Reykjavík og að þegar líður á 21. öldina verði hlýrra en nokkurn tíman síðan mælingar hófust. Síðasta ár var mjög hlýtt; meðalhiti frá júlí í fyrra til júní í ár var 6.26° . Af 10. mynd sést að það var sérstaklega veturinn 2002–3 sem var óvenjuhlýr, t.d. eru engir jafnhlýir vetur næstu 20 ár í 13 af 18 „dæmigerðum framtíðarrunum“ og hinar 5 eru með einn slíkan. Það er reyndar ekki fyrr en undir næstu aldamót sem reikna má með að meðalveturinn verði jafnhlýr og sá síðasti var. En ef frá er talinn hinn óvenjuhlýi síðasti vetur er því spáð að talsvert muni hlýna strax á næstu árum. Væntanlegur meðalhiti júlí 2003 til júní 2013 reiknast 5.17° og frá miðju ári 2013 til miðs árs 2023 reiknast hann 5.42° og frávik einstakrar ára frá þessum tölum eru um $\pm 1^\circ$ (90% vikmörk). Til samanburðar var meðalhitinn 1973–1983 4.00° , 1983–1993 var hann 4.31° og frá miðju ári 1993 fram á mitt þetta ár var hann 4.76° . Um miðja síðustu öld var hins vegar talsvert hlýrra, og hlýjustu 10 árin voru frá júlí 1939–júní 1949, 5.15° .

Af öðrum athyglisverðum upplýsingum sem fram koma í þessari skýrslu má t.d. draga fram þann áberandi mun sem er á dreifnihlutfalli sem AR-líkan skýrir í Skandínavíu annars vegar (10%) og á Atlantshafseyjum hins vegar (28%). Veðrið á eyjunum hefur lengra „minni“ og veðurfarsþróun þar sem skiptast á hlý og köld tímabil hefur verið meira ráðandi þar a.m.k. síðan á seinni hluta 19. aldar.

Heimildaskrá

- [1] Chatfield, C.: *Time Series Analysis (5th edn.)*, Chapman and Hall, 1996.
- [2] *Climate Change 1995 – The Science of Climate Change*, ritstj. J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg og K. Maskell, skýrsla fyrir Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Cambridge University Press, 1996.
- [3] *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, ritstj. J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell og C.A. Johnson, skýrsla fyrir Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Cambridge University Press, 2001.
- [4] Dhrymes P.J.: *Distributed Lags: Problems of Estimation and Formulation*, Elsevier Science, 1981.
- [5] Jones, P.D.: *Hemispheric surface air temperature variations: a reanalysis and an update to 1993*, *J. Climate* **7**, bls. 1794–1802, 1994.
- [6] Laursen, E.V.: *DMI monthly climate data, 1873-2002, contribution to Nordic Arctic Research Programme (NARP)*, skýrsla Dönsku veðurstofunnar (Dansk meteorologisk institut), nr. 03-25, 2003.
- [7] Lindgren, B.W.: *Statistical Theory*, 3. útg., MacMillan Publishing Co., 1976.
- [8] Manley, G.: *Central England Temperatures: monthly means 1659 to 1973*. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **100**, 389–405, 1974.
- [9] Mann, M.E., E. Gille, R.S. Bradley, M.K. Hughes, J. Overpeck, F.T. Keimig og W. Gross: *Global temperature patterns in past centuries: an interactive presentation*, *Earth Interactions* **4**, nr. 4, 2000.
- [10] Parker, D.E., T.P. Legg, og C.K. Folland: *A new daily Central England Temperature Series, 1772-1991*, *Int. J. Climatol.*, **12**, 317–342, 1992.
- [11] Priestley, M.B.: *Spectral Analysis and Time Series*, Academic Press, 1981.
- [12] Jouni Räisänen: *CWE data documentation*, skýrsla í CWE verkefni, sjá www.os.is/cwe, 2003.
- [13] Sigurður Guðmundsson, Árný Sveinbjörnsdóttir, Gísli Viggósson, Jóhann Sigurjónsson, Jón Ólafsson, Stefán Ólafsson, Tómas Jóhannesson og Trausti Jónsson: *Veðurfarsbreytingar og afleiðingar þeirra – Skýrsla vísindanefndar um loftslagsbreytingar*, Umhverfisstofnun, 2000.
- [14] Tómas Jóhannesson: *Hlýnun að meðaltali yfir jörðina og í grennd við Ísland skv. IPCC90/95/2000*, minnisblað TóJ-2000/09, Veðurstofa Íslands, 2000.
- [15] Tómas Jóhannesson, Guðfinna Aðalgeirsdóttir, Helgi Björnsson, C.E. Bøggild, H. Elvehøy, Sverrir Guðmundsson, R. Hock, P. Holmlund, P. Jansson, Finnur Pálsson, Oddur Sigurðsson og Þorsteinn Þorsteinsson: *Climate change impacts on glaciers in the Nordic countries*, handrit sem mun birtast fljótlega sem skýrsla Orkustofnunar, 2003.
- [16] Tómas Jóhannesson, Trausti Jónsson, Erland Källén og Eigil Kaas: *Climate change scenarios for the Nordic countries*, *Climate Research* **5**, 181–195, 1995.
- [17] Tuomenvirta, H., A. Drebs, E. Førland, O.E. Tveito, H. Alexandersson, E.V. Laursen og Trausti Jónsson: *Nordklim data set 1.0 – description and illustrations*, skýrsla Norsku veðurstofunnar (Det norske meteorologiske institutt), DNMI 08/01 KLIMA, 2001.