

Spá um meðalhita í Reykjavík á 21. öld

Kristján Jónasson

Raunvísindastofnun Háskólans

Vefútgáfa: 17. desember 2004

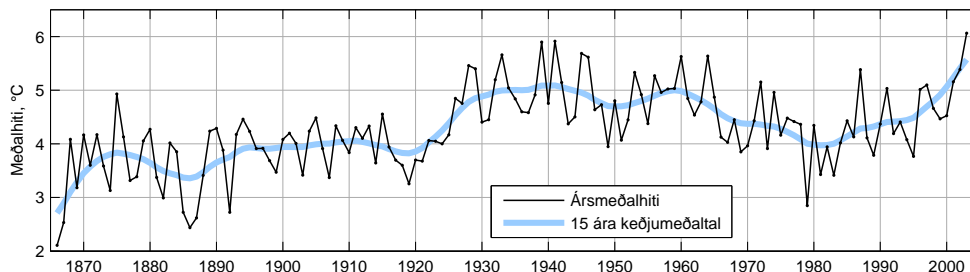
Ágrip – Gerð er spá um ársmeðalhita í Reykjavík árin 2005–2100 með því að tengja eiginaðhvarfslíkan af náttúrulegum hitasveiflum við nýlegar rannsóknir og mat á væntanlegri gróðurhúsahlýnun á Íslandi. Eiginaðhvarfslíkanið er byggt á hitamælingum í Reykjavík 1867–2003 og að nokkru á öðrum hitamælingum á Íslandi og í nágrennalöndum. Með hermun er lagt mat á skekkju í þessari spá og einnig skoðað hvernig dæmigerð hitapróun gæti orðið. Sýnt er hvernig minnka má spáskekkjuna með því að fækka stikum í eiginaðhvarfslíkaninu án þess að sjálffylgni þess lækki að marki. Samkvæmt spánni verður meðalhiti 5.4°C árin 2005–2015 og um næstu aldamót verður meðalhitinn kominn í 7.7° .

Inngangur

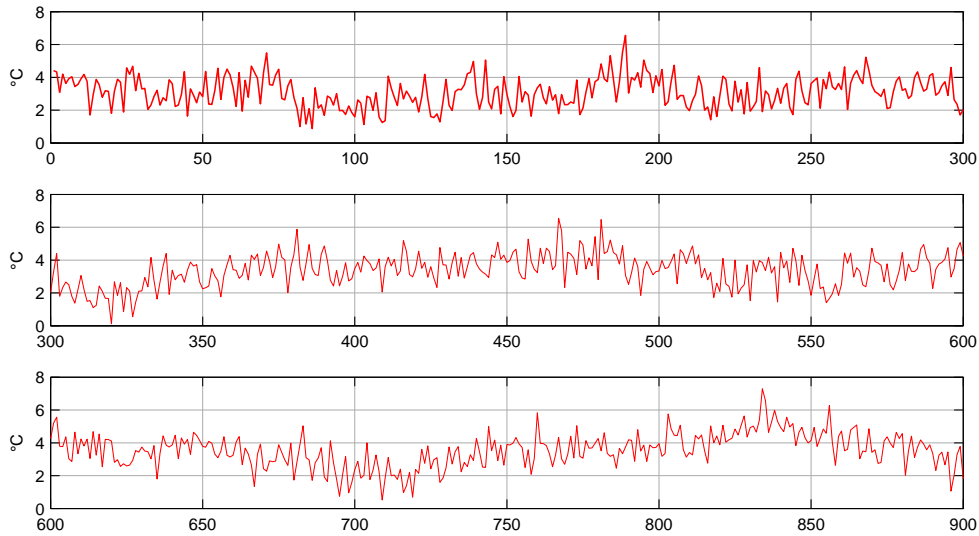
Tildrög þessara greinarskrifa voru þau að síðsumars 2003 óskaði Orkuveita Reykjavíkur eftir því við Veðurstofu Íslands að gerð yrði spá um meðalhita í Reykjavík næstu ár og áratugi og að jafnframt yrði lagt tölfræðilegt mat á spáskekkjuna. Hafði Orkuveitan hug á að nýta spána við áætlanagerð um heitavatnspörf höfuðborgarsvæðisins, en taka þarf ákvarðanir um borun eftir heitu vatni mörgum árum áður en það getur farið að renna um ofna borgarbúa. Vel þekkt er að nota eiginaðhvarfslíkön til að spá fyrir um veður, sér í lagi hita. Með slíkum líkönum má taka tillit til þess að sögulega hafa skipst á hlý tímabil og köld, og ef undanfarandi ár hafa verið köld (eða heit) aukast líkurnar á að það næsta verði sömuleiðis kalt (eða heitt).

Um þessar mundir eru flestir vísindamenn sammála um að gróðurhúsahlýnunar vegna aukins koltvísýrings og annarra gróðurhúsalofttegunda í andrúmsloftinu sé farið að gæta umtalsvert og að sú þróun muni halda áfram. Í Reykjavík hafa undanfarin ár verið mjög hlý. Meðalhiti síðustu 8 ára, 1996–2003, var 5.05°C í Reykjavík, en meðalhiti næstu 30 ára þar á undan (1966–1995) var 4.20° . Reiknað hefur verið mat á því hve mikil hlýnun vegna gróðurhúsaáhrifa er orðin auk spár um framtíðarhlýnun, en þær spár taka ekki sögulega sjálffylgni hitapróunar með í reikninginn. Ljóst er að ef fást á marktæk spá um hitapróun næstu ára verður að taka tillit til beggja þátta, sjálffylgninnar og gróðurhúsahlýnunar.

Meðalárshiti í Reykjavík síðan mælingar hófust er sýndur á 1. mynd (tölurnar sjálfar eru aftar, í 6. töflu). Eins og sjá má er hlýnun lík þeirri sem orðið hefur síðustu ár ekki einsdæmi og meðalárshiti hefur sveiflast að



Mynd 1. Meðalhiti í Reykjavík 1866-2003



Mynd 2. 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 .

Því er virðist á tilviljanakenndan hátt allt tímabilið. En myndin sýnir líka meðalhlýnun yfir allt tímabilið, sem samkvæmt línulegu aðhvarfi er 0.89° á öld. Sú hlýnun er svipuð meðalhlýnun á jörðinni allri á sama tímabili, sem er aftur í samræmi við líkön af gróðurhúsaáhrifum. Samkvæmt þessum líkönum er hraði hlýnunarinnar um 0.25° á áratug um þessar mundir, sem sé talsvert minni en hlýnunarhraðinn í Reykjavík að undanförmu.

Í skýrslunni [5] sem unnin var fyrir Orkuveituna er gert líkan af meðalhita í Reykjavík, sem tekur bæði tillit til slembihegðunar hans og gróðurhúsaáhrifunar, og í framhaldi er líkanið notað til að gera spá fyrir árin 2003–2035. Í þessari grein er gert mjög líkt líkan, en nú er spáin látin ná fram til ársins 2100. Jafnframt er almanaksárið nú lagt til grundvallar en í [5] var árið reiknað frá júlí–júní. Líkanið er síðan notað til að reikna með hermum tölfraðilega dreifingu meðalhitans út öldina. Í upphafi spárinnar er það slembihegðun hitans sem mest segir, bæði um spáðan hita og dreifni, en eftir nokkur ár fer spá um gróðurhúsaáhrifun að veða þyngra og þegar líður á öldina ræður hún mestu um spána og metna dreifni.

AR-líkan

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

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

þar sem x_k er meðalhiti á k -ta ári, a_1, \dots, a_m eru stikar líkansins og z_k eru óháðar normaldreifðar slembistærðir með meðaltal μ og dreifni σ^2 ; sjá t.d. [1] og [12]. 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 stika AR-líkans með hjálp minnstu kvaðrata. Í framhaldi má herma með því að draga slembin z_k -gildi og nota (1) til að reikna x_k og þá fást raðir sem hegða sér líkt og mældar hitaraðir. Það skiptast á hlý tímabil og köld, stundum verður snögg hlýnun eða kólnun að því er virðist fyrir tilviljun og stundum hægari, stundum koma tímabil þar sem hlý og köld ár skiptast tilviljanakennt á. Á 2. mynd er sýnt dæmi um slíka hermum.

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

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

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 . Meta má

μ útfrá meðaltali mældu x -raðarinnar:

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

og σ^2 má meta með

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n - m} \sum_{k=m+1}^n r_k^2 \quad (4)$$

þar sem r_k er k -ta leifin,

$$r_k = x_k - (\hat{a}_1 x_{k-1} + \hat{a}_2 x_{k-2} + \dots + \hat{a}_m x_{k-m}). \quad (5)$$

Metillinn $\hat{\sigma}^2$ er bjagaður metill fyrir σ^2 en óbjagaður metill fæst með því að draga fjölda metinna stika frá nefnarannum $n - m$:

$$s^2 = \frac{1}{n - 2m - 1} \sum_{k=m+1}^n r_k^2. \quad (6)$$

Framangreindir metlar fyrir stika líkansins eru mjög svipaðir sennileikametlum fyrir þá, en hinsvegar er talsvert flóknara að ákvarða sennileikamatið tölulega. Í tímaraðgreiningu er algengast að notast við þá nálgun sem felst í (2)–(6). Um þessar líkingar má lesa í [1], [8] eða [12].

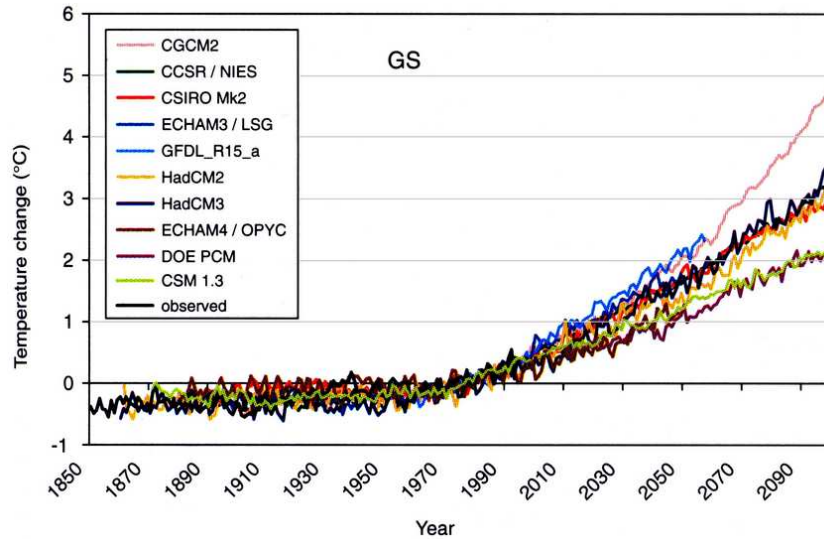
Yfirlit um gróðurhúsaáhrif

Styrkur gróðurhúsalofttegunda í andrúmslofti hefur aukist umtalsvert síðan um 1750, koltvíoxíðs um 34%, metans um 152% og tvíköfnunarefnisoxíðs, N_2O , um 18%. 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 (sjá [3]). 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 mótí kemur að sótt (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 stórrí (900 bls.) skýrslu milliríkjanefndar um loftslagsbreytingar frá árinu 2001 [3]. Íslenska skýrslan [14] er að nokkru byggð á þessari skýrslu og einnig á samsvarandi alþjóðlegri skýrslu frá 1996 [2].

Tafla 1. Breyting á geislunarbúskap jarðar af mannavöldum síðan í byrjun iðnbyltingar, tölur fyrir 1998.

gróðurhúsalofttegund	aukning geislunarbúskaps, W/m^2
koltvísýringur	1.46
metan	0.48
tvíköfnunarefnisoxíð	0.15
kolflúorkolefni og vetnisflúorkolefni	0.34
óson í veðrahvolfi	0.35
gróðurhúsalofttegundir alls	2.78
áhrifavalдар til mótvægis	.
ryk, sótt og aðrar agnir, bein áhrif	−0.50
ryk, sótt og aðrar agnir, óbein áhrif	−1.00
óson í heiðhvolfi	−0.15
mótvægisbreyting alls	−1.65
nettóbreyting	1.13

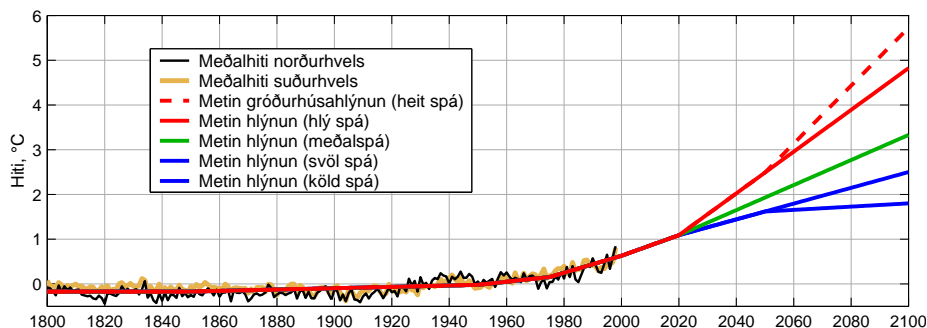


Mynd 3. Niðurstöður úr keyrslu 10 mismunandi veðurfarslíkana ásamt meðalhita jarðar 1850–1993. Sjá nánari skýringar í meginmáli (mynd úr [3]).

Auðveldara er að meta breytingu í geislunarbúskap en hækkun hita og sýnir 1. tafla breytingu búskapsins samkvæmt [14]. Til samanburðar er meðalorkuinngeislun sólar á jörðina alla 342 W/m^2 . Rannsóknun 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.

Rétt er að segja hér nokkur orð 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 [14] er 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 [14]. Í tölfraði 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. Á þessum blöðum eru öll orðin notuð jöfnum höndum og ekki sérstaklega reynt að forðast að spá (samanber titil greinarinnar).

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



Mynd 4. Meðalhiti á norður- og suðurhveli 1800–1998 samkvæmt [10] ásamt metnum gróðurhúsaáhrifum út frá 3. mynd.

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 hlýnunarviðsmyndir sem með þeim fást. Það er þó talsvert breytilegt milli líkana hve mikil hlýnunin reiknast, og bætist sá breytileiki við óvissu um 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 meðalhita jarðar 1850–1993 (metinn útfrá mælingum) samkvæmt [6]. 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.

Gróðurhúsahlýnun á Íslandi

Til að meta framtíðarhita í Reykjavík með þeirri aðferð sem notuð er í þessari grein þarf meðal annars að meta gróðurhúsaáhrifin bæði í fortíð og framtíð. Hér hefur það verið gert með því að leggja þrjú bútalínuleg föll að ferlunum á 3. mynd. Í fortíð falla þau saman, en í framtíð fást þrjár spár: hlý spá (byggð á CGCM1, ECHAM3 og GFDL-R15a), svöl 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 ásamt tveimur möguleikum til viðbótar, heitri og kaldri spá. Heitari og kaldari spárnar eru notaðar til að taka tillit til óvissu í mati á gróðurhúsaáhrifum, eins og nánar verður lýst.

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 heimskautunum, en hins vegar minni á norðanverðu N-Atlantshafi en á öðrum svæðum á sömu breiddargráðum (sjá [17] og bls. 12–13 í [14]). Í greininni [17] 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 [14] gerir síðan þessa sviðsmynd að sinni (á bls. 13 þar), og má lesa um bakgrunn þeirrar ákvörðunar í [15]. 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 [17] 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, 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 [16] er reiknað með 0.225° hlýnun á áratug (0.15° um hásumar og 0.30° um hávetur), og á mynd 2.3 í [13] er sýnd 1.0° hlýnun 1990–2050 á línu sem fer nánast í gegn um Reykjavík, þ.e.a.s. 0.17° á áratug. Í [16] er reyndar jafnframt reiknað bæði með sviðsmyndinni úr [17], 0.30° á áratug, og með sviðsmyndinni úr [13].

Í ljósi allra þessara upplýsinga, og þess 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 2. tafla sýnir þýðir það 0.23° hlýnun á áratug fram til 2020 og 0.28° eftir það.

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

tímabil	hlýnun skv. meðalspá °C á áratug	uppsöfnuð hlýnun í lok tímabils, °C				
		köld spá	svöl spá	meðal-spá	hlý spá	heit spá
fyrir 1850	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1850–1950	0.015	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
1950–1975	0.070	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
1975–2000	0.190	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
2000–2020	0.230	1.04	1.09	1.26	1.57	1.72
2020–2100	0.280	1.80	2.50	3.50	5.30	6.20

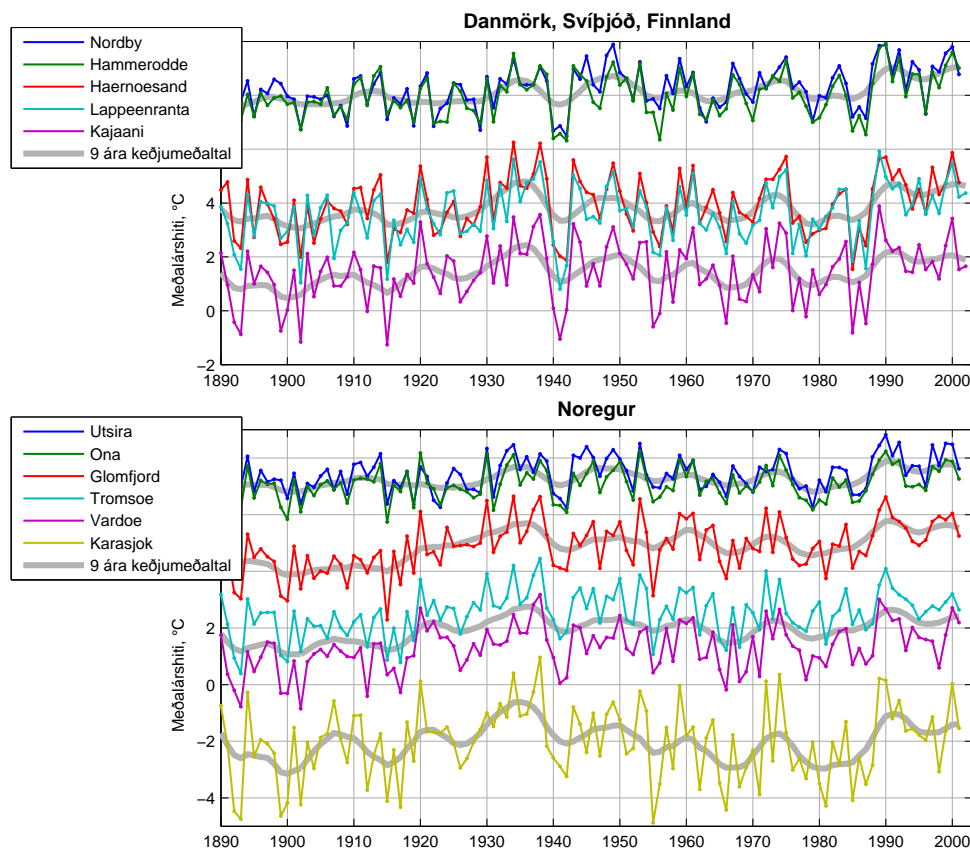
Tafla 3. Yfirlit um nokkrar norrænar hitaraðir. Dálkurinn „hlýnun“ sýnir meðalhlýnun á öld yfir mælt tímabil, reiknaðri með því að finna hallatölu í línulegu aðhvarfi. Athugið að hlýnun á Grænlandi og norðureyjum dregst mjög niður vegna kólnunar á Bjarnarey og Jan Mayen, en þar var hlýnuninni í upphafi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

	Veðurstöð	Númer	Lengd	Breidd	Tímabil	Medalt.	St.fráv.	Hlýnun	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	Skýrir
Ísland	Reykjavík	4030	-21.9	64.1	1866-2003	4.3	0.8	0.89	0.37	-0.01	0.06	0.24	0.04	0.09	0.04	39%
	Stykkishólmur	4013	-22.7	65.1	1830-2003	3.4	0.8	0.66	0.23	-0.03	0.05	0.27	0.04	0.07	0.11	25%
	Akureyri	4063	-18.0	66.5	1882-2003	3.3	0.9	1.08	0.24	0.05	0.00	0.22	-0.07	0.11	0.08	19%
	Grímsey	4065	-18.1	65.7	1874-2003	2.3	1.0	1.29	0.31	0.00	-0.01	0.36	-0.02	0.09	0.06	33%
	Vestmannaeyjar	4048	-20.3	63.4	1878-2003	4.9	0.6	0.62	0.40	0.00	0.04	0.22	-0.05	0.18	0.02	42%
	Meðaltal							0.91	0.31	0.00	0.03	0.26	-0.01	0.11	0.06	32%
Grænland og norðureyjar	Upernavik	4210	-56.2	72.8	1873-2000	-7.6	1.5	1.26	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	1.36	0.35	0.02	0.08	0.10	0.05	-0.11	0.16	24%
	Nuuk	4250	-51.8	64.2	1890-1999	-1.4	1.2	0.36	0.45	-0.05	0.04	0.08	0.05	0.02	0.13	29%
	Narsarsuaq	4270	-48.2	61.2	1873-2000	0.7	1.3	0.86	0.38	0.03	0.05	-0.04	0.08	-0.03	0.11	20%
	Tasiilaq	4360	-37.6	65.6	1894-1999	-1.3	1.0	0.46	0.40	0.16	0.01	0.17	-0.02	0.18	-0.07	48%
	Þórshöfn-Færeyjum	6011	-6.8	62.0	1890-2000	6.5	0.5	0.48	0.26	0.14	0.00	0.16	-0.01	0.05	0.11	22%
	Bjarnarey	99710	19.0	74.5	1920-1999	-1.9	1.2	-0.25	0.28	0.06	0.08	-0.12	0.09	-0.15	0.07	12%
	Svalb.flugv.endurg.	99841	15.5	78.3	1912-1999	-6.3	1.7	1.29	0.29	0.17	0.01	-0.03	-0.05	-0.07	0.08	13%
	Jan-Mayen	99950	-8.7	70.9	1921-1999	-0.8	1.0	-0.93	0.43	0.20	-0.13	0.19	-0.07	0.00	0.09	34%
		Meðaltal						0.54	0.35	0.09	0.04	0.06	0.03	-0.02	0.09	26%
Skandinavía	Kajaani	4601	27.7	64.3	1890-2002	1.4	1.1	0.71	0.15	0.02	-0.06	-0.08	0.03	-0.09	0.05	4%
	Lappeenranta	1701	28.1	61.1	1890-2002	3.6	1.1	0.73	0.12	0.05	-0.17	-0.10	0.01	-0.08	-0.06	6%
	Haernoessand	12738	17.9	62.6	1890-2001	3.9	1.1	0.68	0.29	0.07	-0.18	0.04	0.02	-0.07	0.01	12%
	Hammerodde	6193	14.8	55.3	1890-2001	8.0	0.8	0.72	0.26	0.09	-0.34	0.01	0.05	-0.10	0.00	16%
	Nordby	25140	8.4	55.4	1890-2001	8.2	0.8	0.93	0.23	0.10	-0.19	-0.07	-0.01	0.00	-0.01	10%
	Utsira	47300	4.9	59.3	1890-2001	7.4	0.6	0.50	0.24	0.15	-0.13	0.01	-0.01	-0.04	0.05	10%
	Ona	62480	6.5	62.9	1890-2001	7.1	0.6	0.39	0.16	0.16	-0.08	0.05	-0.14	-0.05	0.11	9%
	Glomfjord	80700	14.0	66.8	1890-2001	4.9	0.9	1.09	0.16	0.17	0.01	0.13	-0.08	0.04	0.14	14%
	Tromsøe	90450	18.9	69.7	1890-2001	2.5	0.8	0.70	0.15	0.14	0.05	0.06	-0.08	0.07	0.14	10%
	Karasjok	97250	25.5	69.5	1890-2001	-2.0	1.3	0.35	0.15	0.16	0.05	0.00	0.02	-0.08	0.05	7%
Vardo	98550	31.1	70.4	1890-2001	1.3	0.8	0.85	0.27	0.09	0.11	-0.19	-0.06	0.01	0.15	15%	
	Meðaltal						0.70	0.20	0.11	-0.08	-0.01	-0.02	-0.04	0.06	10%	
	Meðaltal meðaltala						0.72	0.29	0.07	-0.01	0.10	0.00	0.02	0.07	23%	
	Meðaltal Íslands, Grænlands og norðureyja							0.33	0.05	0.03	0.16	0.01	0.04	0.08	29%	

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 [6] (sem er svört inn á milli ferlanna á 3. mynd) og röðin fyrir Reykjavík á 1. mynd. Til viðbótar má nefna norður- og suðurhvelsraðir í [10] (sjá 4. mynd), ýmsar norrænar raðir [7] og [18] og röð frá Mið-Englandi [9] og [11], en allar þessar raðir er auðvelt að finna á netinu nema [6]. Á 5. mynd eru nokkrar valdar norrænar raðir sýndar, á 6. mynd eru raðir frá eyjum í Norður-Atlantshafi (þar á meðal Íslandi) og staðsetningar veðurstöðvanna eru sýndar á 7. mynd.

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, stundum hlýnar eða kólnar hratt og stundum hægt. En auk þess sýna allar raðirnar jafnaðarhlýnun, sérstaklega undanfarin 80–100 ár. Ef reiknuð er meðalhlýnun mælingaraðanna á 4. mynd með línulegu aðhvarfi árin 1899–1998 fæst meðalhlýnun 0.67° á öld á norðurhveli og 0.70° á suðurhveli. 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 0.72° á öld síðan mælingar hófust, og



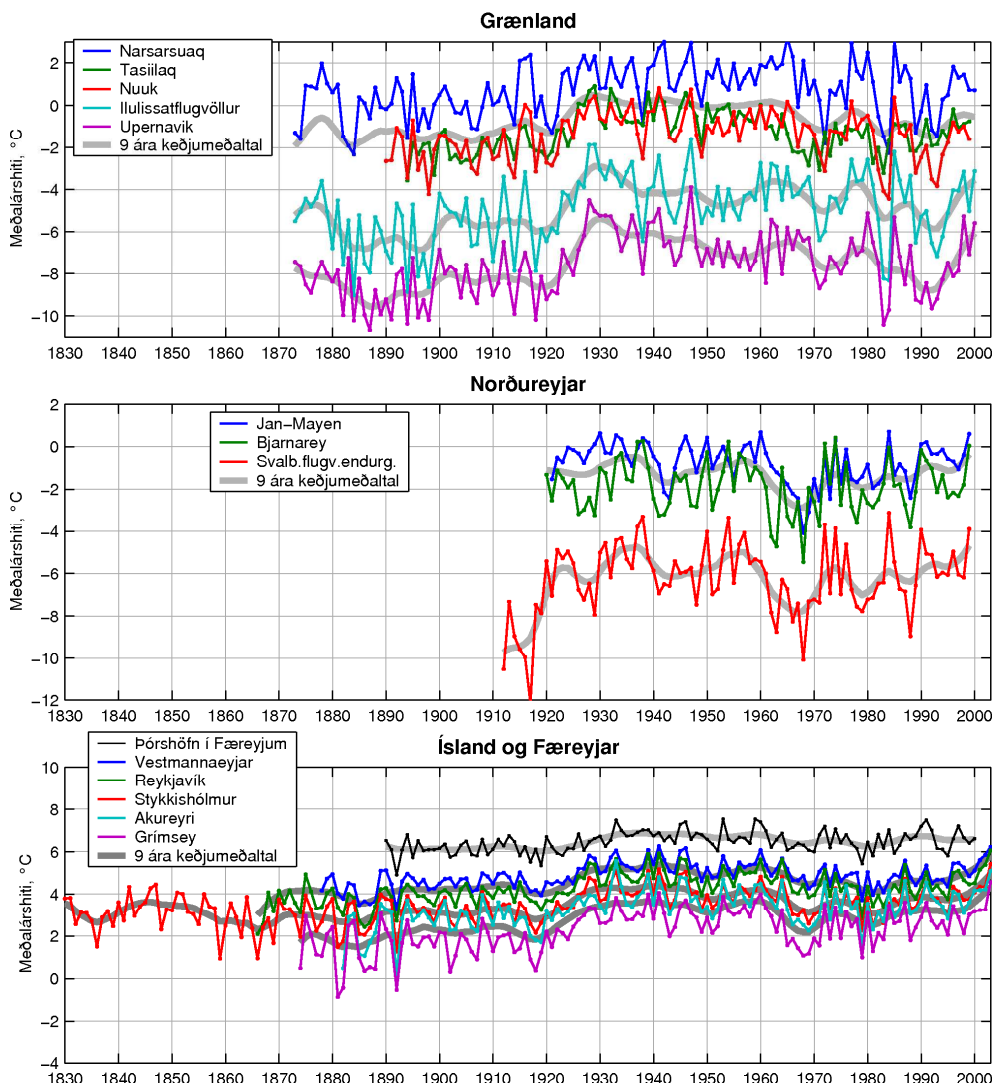
Mynd 5. Hiti á nokkrum stöðum í Skandinavíu 1890–2000.

einstakar stöðvar eru flestar með meðalhlynun 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 meðalhlynun í Stykkishólmi 0.66° á öld síðan mælingar hófust 1830 og í Reykjavík hefur hlýnað um 0.89° á öld síðan mælingar hófust þar 1866. Allar eru þessar tölur í góðu samræmi hver við aðra og styrkir það enn þá leið að meta Reykjavíkurhlynun með jarðarhlynun.

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 gróðurhúshlynunin hefur ekki verið föst þau ár sem mælt hefur verið, en hins vegar ætti að fást tímastöðug röð ef gróðurhúshlynunin er dregin frá mælingaröðinni. Stíka niðurstöðuraðarinnar má meta með (2), (3), (5) og (6) og í framhaldi má spá með því að framleiða margar raðir með þessa stíka og bæta gróðurhúshlynun við hverja þeirra til að fá raðir sem fela í sér hlynun. Hér er sem sé gengið út frá að AR-líkanið breytist ekki með auknum hlýindum.

Nú er óvissa í þeirri spá sem fæst úr sviðsmyndum af gróðurhúshlynun. Það er hins vegar mjög erfitt að leggja mat á hve mikil sú skekkja er, og segja má að hefð hafi skapast fyrir því meðal þeirra vísindamanna sem vinna á þessu sviði að tala mjög varlega. Yfirleitt er aðeins fullyrt að miðað við ákveðnar forsendur (um losun og fleira) gefi tiltekin líkón tiltekna hlynun. Til að komast áfram með reikningana er hinsvegar nauðsynlegt að miða við einhverja hlynunarspá og óvissu og hér á eftir er reiknað með að 10% líkur séu á að kalda spáin sem sýnd er í 2. töflu rætist, 15% líkur séu á svölu spánni í sömu töflu, 50% líkur á meðalspánni, 15% á hlýju spánni og 10% á þeirri heitu.



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

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 138 ára röð eins og Reykjavíkurröðinni. Ein leið til að meta þessa skekkju er 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 $\hat{\mathbf{a}} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T (\mathbf{X} \mathbf{a} + \mathbf{z})$ þar sem \mathbf{a} er föst og \mathbf{z} er slembin margvíð normalhending með meðalgildi $\mathbf{0}$ og sandreifni $\sigma^2 \mathbf{I}$. Því er sandreifni $\hat{\mathbf{a}}$ (táknud 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 mat á Cov $\hat{\mathbf{a}}$ er gefið með

$$\text{Cov } \hat{\mathbf{a}} \approx s^2 (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \quad (7)$$

(sjá bls. 549 í [8] eða bls. 354 í [12]). Nokkru flóknara er reikna út dreifni s^2 en af reikningum á bls. 550 í [8] fæst að $\text{Var } s^2 = 2\sigma^4 / (n - 2m - 1)$ svo að mat á dreifni s^2 er

$$\text{Var } s^2 = \frac{2\sigma^4}{n - 2m - 1} \approx \frac{2s^4}{n - 2m - 1}. \quad (8)$$



Mynd 7. Veðurstöðvar við Norður-Atlantshaf. Sjá 5. og 6. mynd og 3. töflu.

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

$$\text{Var}(\hat{\mu}) = \frac{(1 - a_1 - \dots - a_m)^2 \sigma_x^2}{n} \left(1 + 2 \sum_{r=1}^{n-1} (1 - r/N) \rho(r) \right) \quad (9)$$

þar sem ρ er sjálfyllgnifall raðarinnar (sjá [12]). 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 $\rho(0) = 1$). Samkvæmt (3) fæst síðan mat á $\text{Var}(\bar{x})$ með því að deila með $(1 - \hat{a}_1 - \dots - \hat{a}_m)$ upp í matið á $\text{Var}(\hat{\mu})$.

Í línulegu aðhvarfi er vel þekkt að dreifniamatið er óháð stikamatinu og líklega má útfrá sennileikafalli 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 framtíðarhitaröð sem tekur tillit til skekkjunnar í stikamatinu á eftirfarandi veg. Fyrst er búin til mælingaröð \mathbf{x} með því að draga gróðurhúsahlýnun frá eins og fyrr segir. Síðan eru dregnir normaldreifðir stikar með væntigildi samkvæmt (2)–(6) og (sam)dreifni samkvæmt (7), (8) og (9). Því næst er búin til normaldreifð \mathbf{z} -röð, líkanið (1) notað til að búa til (tímastöðuga) röð \mathbf{x} . Að lokum er bætt við slembinni gróðurhúsahlýnun eins og fyrr segir (10%, 15%, 50%, 15% og 10% líkur á kaldri, svalri, meðal-, hlýrri og heitri) og þá fæst ein möguleg framtíðarhitaröð.

Framtíðarspáin fæst nú sem meðaltal þessara framleiddu eða *hermdu* raða, og nákvæmni spár má meta með því að skoða dreifingu hermdu hita. Tökum sem dæmi að þúar 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 gefin með bilinu [4.7°, 7.1°].

Tafla 4. Nokkrir mælikvarðar á stikafjölda sem ástæða væri til að hafa með í AR-líkani af Reykjavíkurröð. R^2 og R^2_a ættu að vera sem stærstir en hinir mælikvarðarnir sem minnstir.

n	R^2	R^2_a	C	AIC	BIC
1	0.296	0.2959	15.02	585.7	588.6
2	0.307	0.3016	14.75	585.6	591.4
3	0.333	0.3228	11.38	582.5	591.2
4	0.383	0.3685	3.17	574.4	585.9
5	0.386	0.3666	4.57	575.7	590.1
6	0.393	0.3682	5.25	576.3	593.6
7	0.394	0.3644	7.00	578.1	598.2

Fækkun stika í AR-líkani

Í 3. töflu eru sýndir metnir AR-stikar fyrir 25 norrænar og grænlenstar meðalárshitarar. 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. Ef reiknað er 8 stika líkan verður 8. stikinn reyndar neikvæður fyrir allar íslensku raðirnar, og nálægt núlli fyrir allar hinar. Við sjáum hinsvegar að sjö stikar 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 líkön 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 vilhöll 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. [12]. Í 4. töflu eru sýnd gildi allra þessara mælikvarða fyrir AR-líkön af Reykjavíkurröð (að frádreginni gróðurhúsahlýnun) með 1–7 stikum.

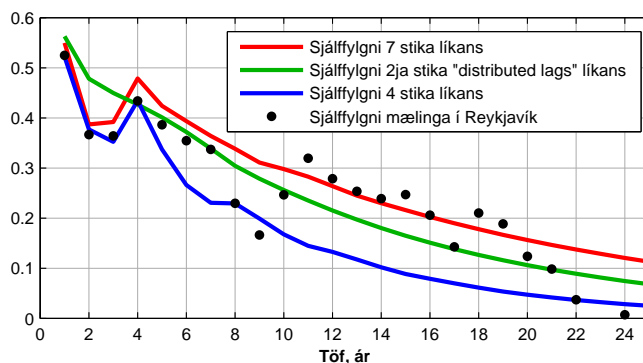
Stærðirnar R^2 og R^2_a sýna hlutfall dreifni raðarinnar sem líkanið skýrir, R^2 án leiðréttingar fyrir því að stikar hafa verið metnir og R^2_a með slíkri leiðréttingu (á ensku er stærðin R^2 nefnd *coefficient of determination* og a tákna *adjusted*). Sjö stikar ættu að vera með samkvæmt R^2 en 4 stikar samkvæmt hinum mælikvörðunum, en annars er R^2 afleitur mælikvarði til að finna líkan því gildi þess fer ævinlega vaxandi með stikafjölda. Vegna þess að allir sjö stikarnir eru annaðhvort jákvæðir eða rétt um núll (sjá 3. töflu) má hinsvegar búast við að sjálffylgni stytts líkans verði of lítill; „minni“ raðarannar verður styttra og hlýju og köldu tímabilin styttri en í veruleikanum. Til dæmis er sjálffylgni Reykjavíkurráðar að frádreginni gróðurhúsahlýnun með töl 10 (þ.e. fylgni x_k við x_{k-10}) u.þ.b. 0.29, sjálffylgni með töl 10 fyrir sjö stika líkan sem metið er með sömu röð er 0.30, en í fjögurra stika líkani er sjálffylgni með töl 10 aðeins 0.17. Talan 0.29 er fengin með því reikna sjálffylgni gagnanna sjálfra fyrir nokkrar tafir í kring um 10 og taka meðaltal, en hinar tölurnar eru eru fræðileg sjálffylgni viðkomandi líkana. Fleiri sjálffylgnitölur má síðan lesa úr 8. mynd.

Því má bæta við að ef árið er reiknað frá júlí til júní eins og gert er í [5] þá verða bæði AIC og BIC minnst fyrir $n = 2$, en sjálffylgni tveggja stika líkans með töl 10 er aðeins 0.012.

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:

$$x_k = a_1 f_1(x_{k-1}, \dots, x_{k-p}) + \dots + a_m f_m(x_{k-1}, \dots, x_{k-p}) + z_k, \quad (10)$$

þar sem f_1, \dots, f_m eru fyrirfram valin einföld föll og $m < p$. Hér hefur verið valið að láta f_i -föllin vera línulegar samantektir af stikum sínum, með samantektarstuðlum sem breytast línulega með vísu stikanna. Nokkrir



Mynd 8. Sjálffylgni Reykjavíkurráðar og líkana af henni.

möguleikar sem koma til greina (og byggjast meðal annars á skoðun a -stikanna í 3. töflu) eru:

$$m = 1 \text{ og } f_1 = x_{k-1} + \frac{6}{7}x_{k-2} + \frac{5}{7}x_{k-3} + \frac{4}{7}x_{k-4} + \frac{3}{7}x_{k-5} + \frac{2}{7}x_{k-6} + \frac{1}{7}x_{k-7}, \quad (11)$$

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

$$m = 2, f_1 = x_{k-1} \text{ og } f_2 = x_{k-2} + \frac{5}{6}x_{k-3} + \dots + \frac{1}{6}x_{k-7}, \text{ og} \quad (13)$$

$$m = 3, f_1 = x_{k-1}, f_2 = x_{k-2} + \frac{4}{5}x_{k-3} + \dots + \frac{1}{5}x_{k-6} \text{ og } f_3 = \frac{1}{5}x_{k-3} + \frac{2}{5}x_{k-4} + \dots + x_{k-7}. \quad (14)$$

Með slíku líkani má áfram nota (2) til að meta \mathbf{a} , en nú verður (i, j) -stak \mathbf{X} jafnt $f_j(x_{p+i-1}, \dots, x_i) - \bar{f}_j$ (\bar{f}_j er meðaltal allra $f_j(\dots)$ -anna). Sömuleiðis má nota (3)–(6) og (7)–(9) óbreytt að öðru leyti en því að nú er

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

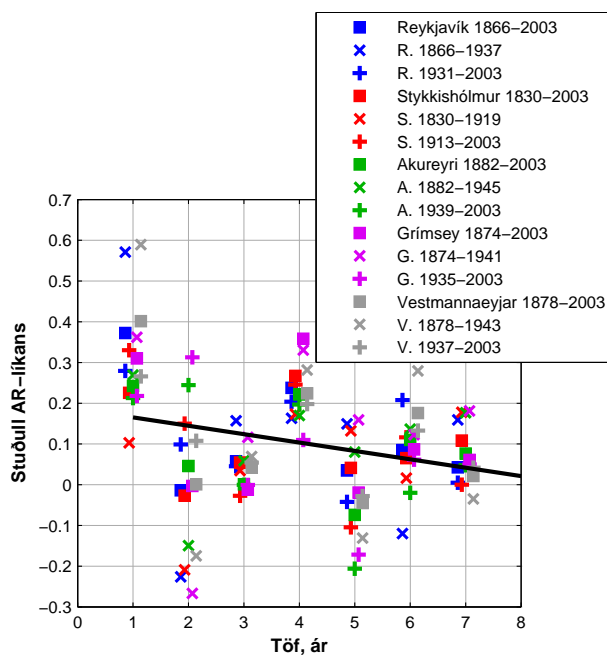
Stikarnir a_i í 3. töflu fara almennt minnkandi með i . Að vísu er a_4 mun stærri en a_2 og a_3 fyrir íslensku stöðvarnar, en það gæti vel verið tilviljun. Á 9. mynd eru sýndir stuðlar sjö stika AR-líkans fyrir íslensku raðirnar, bæði heilar og hálfar. Myndin rennir nokkrum stöðum undir þá tilgátu að hin lága fylgni með töf 2 og 3 sé til komin fyrir tilviljun, og það er a.m.k. uppörvandi fyrir notkun á líkönunum af gerðum (10)–(14) að stuðlarnir fyrir seinni helming mælitímabilanna eru nær því að minnka línulega með töf en hinir.

Eftir að hafa prófað nokkur slík líkön var niðurstaðan að fyrir Reykjavík væri líkan gefið með (10) og (14) best. Þá fæst $R_a^2 = 0.363$, $AIC = 573.6$ og $BIC = 579.4$ (sjá 4. töflu). Sjálffylgni með töf 10 reiknast 0.26 (sjá 8. mynd), sem slagar hátt í sjálffylgni mældu raðarinnar (með $\rho(10) = 0.29$), og samkvæmt mælikvarðanum R_a^2 skýrir þetta líkan jafnframt nánast jafnmikið af dreifni raðarinnar og sjö stika AR-líkan (sem hefur $R_a^2 = 0.364$ skv. 4. töflu).

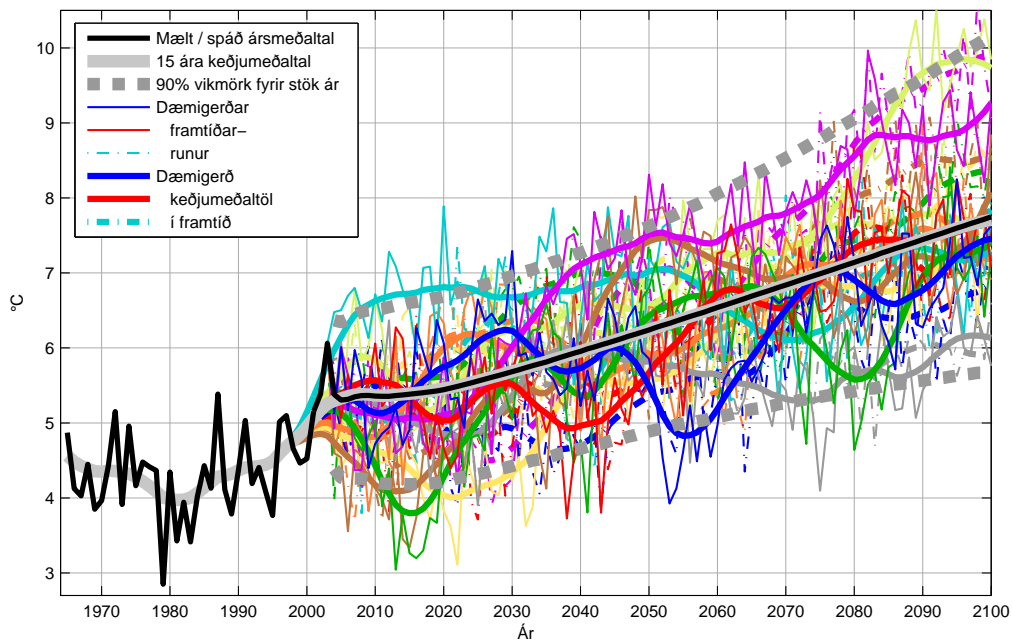
Þróun meðalárshita - niðurstöður

Gróðurhúsahlýnunin sem gefin er í 2. töflu var dregin frá meðalárshitanum í Reykjavík sem sýndur er á 1. mynd og síðan voru metnir stíkar og skekkjur í stikamati fyrir líkanið (10) og (12) eins og lýst er að framan og er niðurstaðan í 5. töflu.

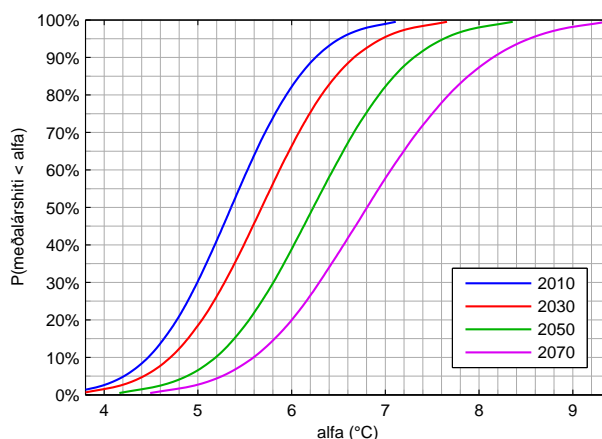
Næst voru hermdar 350000 raðir eins og lýst er í kaflanum *AR-spá og skekkjumat*. Meginniðurstöður þessarar hermunar eru á 10. mynd. Svarta línan sýnir annarsvegar ársmeðalhita 1964–2003 samkvæmt mælingum, og hins vegar spá fyrir árin 2004–2100 og breið grá lína sýnir 15 ára keðjumeðaltal. Samkvæmt þessari spá mun hlýna um 2.74° á 21. öldinni (miðað við keðjumeðaltalið), sem er í góðu samræmi við 2. töflu. Einnig eru sýnd 90% vikið fyrir spáðan hita einstakra ára, reiknuð eins og lýst er aftast í kaflanum *AR-spá og skekkjumat*.



Mynd 9. Stuðlar 7 stika AR-líkana fyrir íslenskar veðurstöðvar.



Mynd 10. Ársmeðalhiti í Reykjavík 1964–2100, 15 ára keðjumeðaltal og spá fyrir árin 2003–2035. Myndin sýnir einnig 90% vikiörk fyrir spá stakra ára, 20 dæmigerðar framtíðarrunur og tilheyrandi 15 ára keðjumeðaltöl. Sjá nánari skýringar í meginmáli.



Mynd 11. Dreififöll fyrir nokkur spáð ársmeðaltöl í Reykjavík.

Ljóst er að hitinn mun ekki fylgja væntigildinu og til að gefa vísbendingu um hvernig hann gæti þróast sýnir myndin 20 dæmigerðar framtíðarraðir (mjóar marglitar línur) ásamt tilheyrandi keðjumeðaltölum (breiðari línur í sömu litum). Athyglisvert er að samkvæmt spánni þarf að bíða til ársins 2044 eftir að væntanlegur hiti verði hærri en meðalhiti ársins 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 1979, 1981 og 1983.

Tölur um mældan meðalhita eru í 6. töflu og spá fyrir 5. hvert ár ásamt höfnunargildum eru í 7. töflu. Höfnunargildin má nota til að búa til ýmis vikmörk, til dæmis má lesa úr töflunni að 95% vikmörk fyrir hitann 2030 eru [4.18°C, 7.23°C]. Einnig má búa til einhliða vikmörk og prófa tilgátur. Til dæmis eru 95% líkur á að 2030 verði kaldara en 6.97° og tilgátu um að hitinn þá verði 8° mætti hafna á 1% prófstigi.

Lestur úr hermdum röðum

Hermun eins og sú sem hér hefur verið framkvæmd hefur ýmsa fleiri notkunarmöguleika og verða hér gefin þrjú dæmi. Með brúun í höfnunargildum má reikna dreiföll hitaspárinnar og eru fjögur slík sýnd á 11. mynd. Af henni má til dæmis lesa að það séu 18% líkur á að 2030 verði kaldara en 5°.

Ljóst er að hitastig 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 væri hiti árána óháðar stærðir. Hins vegar má lesa slíkar líkur út úr hermdu röðunum og í 8. töflu er dæmi. Við sjáum til dæmis að líkurnar á að árin 2005-2009 verði öll kaldari en 4.5° eru um 0.42%, en úr 7. töflu má lesa að fyrir hvert ár af þessum 5 eru um 10% líkur á að það verði kaldara en 4.5°, svo væru tölurnar óháðar reiknuðust líkurnar á að þau yrðu öll svo köld 0.001%.

Þriðja dæmið er um reikning á vikmörkum fyrir meðaltöl lengri tímabila sem auðvelt er að reikna út frá hermdu röðunum. Slík vikmörk verða að sjálfsögðu nokkru þrengri en vikmörk fyrir stök ár eins og sjá má með samanburði á 9. töflu og 10. mynd.

Tafla 5. Niðurstöður stikamats AR-líkans af meðalárshita í Reykjavík að frádreginni gróðurhúsháhlýnun.

stærð	tákn	gildi	staðalfrávik
meðalhiti	\bar{x}	4.058°	0.221°
AR-stikar í (10) og (12)	\hat{a}_1	0.3523	0.0878
	\hat{a}_2	0.1260	0.0330
dreifni leifa	s^2	0.307	0.038
skýrð dreifni	R_a^2	36.3%	

Tafla 6. Mældur meðalárshiti í Reykjavík 1866–2003 (tölur fengnar frá Veðurstofu Íslands). Til dæmis var meðalhiti ársins 1867 2.53°C.

ár	1866– 1869	1870– 1879	1880– 1889	1890– 1899	1900– 1909	1910– 1919	1920– 1929	1930– 1939	1940– 1949	1950– 1959	1960– 1969	1970– 1979	1980– 1989	1990– 1999	2000– 2003
00		4.17	4.27	4.29	4.08	3.84	3.70	4.41	4.75	4.80	5.63	3.96	4.34	4.37	4.52
01		3.60	3.37	3.88	4.20	4.30	3.68	4.45	5.91	4.07	4.84	4.43	3.43	5.03	5.16
02		4.17	2.99	2.72	4.01	4.10	4.06	5.20	5.14	4.45	4.54	5.15	3.94	4.19	5.39
03		3.59	4.02	4.17	3.42	4.33	4.05	5.66	4.37	5.33	4.78	3.91	3.41	4.41	6.06
04		3.13	3.85	4.46	4.24	3.64	4.00	5.04	4.50	4.92	5.64	4.96	4.02	4.08	
05		4.93	2.72	4.23	4.48	4.56	4.17	4.84	5.68	4.38	4.87	4.16	4.43	3.77	
06	2.11	4.13	2.44	3.91	3.91	3.94	4.85	4.60	5.61	5.27	4.13	4.48	4.13	5.01	
07	2.53	3.32	2.62	3.92	3.37	3.70	4.75	4.58	4.64	4.96	4.03	4.42	5.38	5.10	
08	4.08	3.39	3.41	3.69	4.34	3.60	5.46	4.91	4.73	5.02	4.45	4.36	4.11	4.66	
09	3.18	4.05	4.24	3.47	4.06	3.25	5.40	5.90	3.95	5.03	3.85	2.85	3.79	4.47	

Tafla 7. Spá um meðalárshita í Reykjavík 2005–2100 ásamt dreifingu sýndri með höfnunargildum (*critical values*). Tölurnar í töflunni eru t þannig að $P(\text{hiti} < t) = \text{alfa}$.

ár	spáður hiti	alfa								
		1%	2.5%	5%	10%	90%	95%	97.5%	99%	
2004	5.38	3.97	4.20	4.39	4.61	6.16	6.37	6.56	6.79	
2005	5.30	3.84	4.08	4.27	4.50	6.11	6.34	6.54	6.78	
2010	5.36	3.73	3.99	4.22	4.47	6.26	6.51	6.73	6.99	
2015	5.38	3.67	3.94	4.18	4.45	6.33	6.60	6.84	7.13	
2020	5.44	3.70	3.98	4.22	4.49	6.40	6.68	6.94	7.23	
2025	5.56	3.79	4.07	4.32	4.60	6.53	6.82	7.07	7.37	
2030	5.68	3.89	4.18	4.43	4.71	6.67	6.96	7.21	7.54	
2035	5.81	3.98	4.29	4.54	4.83	6.81	7.10	7.37	7.69	
2040	5.95	4.09	4.40	4.66	4.95	6.97	7.27	7.53	7.86	
2045	6.10	4.20	4.51	4.77	5.06	7.13	7.45	7.71	8.02	
2050	6.24	4.29	4.62	4.89	5.19	7.31	7.62	7.89	8.22	
2055	6.39	4.40	4.72	4.99	5.30	7.50	7.83	8.12	8.45	
2060	6.54	4.47	4.80	5.08	5.39	7.71	8.06	8.36	8.71	
2065	6.69	4.56	4.90	5.18	5.50	7.93	8.29	8.60	8.96	
2070	6.84	4.63	4.98	5.26	5.59	8.15	8.53	8.85	9.22	
2075	6.99	4.71	5.05	5.35	5.68	8.38	8.78	9.12	9.49	
2080	7.14	4.74	5.11	5.42	5.78	8.62	9.06	9.41	9.81	
2085	7.29	4.83	5.19	5.50	5.87	8.88	9.33	9.68	10.08	
2090	7.45	4.87	5.25	5.56	5.95	9.13	9.60	9.97	10.38	
2095	7.60	4.92	5.29	5.63	6.03	9.40	9.89	10.27	10.69	
2100	7.75	4.94	5.35	5.69	6.11	9.66	10.18	10.56	11.00	

Lokaorð

Þónokkrar líkur benda til að á næstu árum muni hlýna í Reykjavík og að þegar líður á 21. öldina verði hlýrra en nokkurn tíma síðan mælingar hófust. Síðasta ár var það hlýjasta í mælingasögunni með meðalhita 6.06°. Og enn er að hlýna. Meðalhiti fyrstu 10 mánaða árunna 1866–2003 var að jafnaði 0.73° undir ársmeðaltalinu. Spáin fyrir 2004 samkvæmt 7. töflu gefur þá 4.65° fyrir janúar–október (5.38° – 0.73°). Meðalhiti fyrstu 10 mánaða ársins 2004 mældist síðan langt yfir þeirri spá eða 6.50°, þótt hann hafi ekki alveg náð ofurhlýja árinu 2003 þegar meðalhiti fyrstu 10 mánaðanna var 6.97°.

Í 10. töflu eru dregnar saman nokkrar athyglisverðar tölur sem lesa má úr mælingasögunni og fyrirbyggjandi spá, og látum við töfluna tala sínu máli.

Tafla 8. Dæmi um líkindadreifingu árafjölda með meðalárshita $< t$. Tölurnar í töflunni sýna $P(k \text{ ár kaldari en } t^\circ\text{C})$ á tímabilinu 2005–2009.

hiti, t	k					
	0	1	2	3	4	5
3.5	0.9878	0.0100	0.0020	0.0002	0.0000	0.0000
4.0	0.9132	0.0666	0.0146	0.0044	0.0012	0.0000
4.5	0.6922	0.1782	0.0798	0.0282	0.0174	0.0042
5.0	0.3402	0.2420	0.1696	0.1246	0.0788	0.0448
5.5	0.0992	0.1340	0.1580	0.1908	0.2044	0.2136
6.0	0.0140	0.0350	0.0626	0.1138	0.2310	0.5436
6.5	0.0006	0.0036	0.0102	0.0350	0.1070	0.8436
7.0	0.0000	0.0002	0.0014	0.0032	0.0286	0.9666
7.5	0.0000	0.0000	0.0002	0.0002	0.0054	0.9942

Tafla 9. Spá um 11 ára meðalhita á 21. öld ásamt vikmörkum.

tímabil	meðalhiti	90% vikmörk
2010–2020	5.40°	[4.54°, 6.29°]
2020–2030	5.58°	[4.68°, 6.53°]
2030–2040	5.85°	[4.89°, 6.83°]
2040–2050	6.13°	[5.10°, 7.19°]
2050–2060	6.42°	[5.29°, 7.61°]
2060–2070	6.72°	[5.47°, 8.11°]
2070–2080	7.02°	[5.61°, 8.65°]
2080–2090	7.32°	[5.73°, 9.21°]
2090–2100	7.63°	[5.83°, 9.81°]

Tafla 10. Heit og köld tímabil í fortíð og framtíð.

tímabil	meðalhiti	athugasemd
1866–2003	4.28°	Allt mælda tímabilið í Reykjavík
1961–1990	4.31°	Algengt viðmiðunartímabil
1931–1960	4.94°	Eldra viðmiðunartímabil
1991–2003	4.76°	Síðastliðin 13 ár
1866	2.11°	Kaldasta mælt ár
1877–1887	3.37°	Köldustu 11 árin
1932–1942	5.14°	Hljýjustu 11 árin
1976–1986	3.98°	Köldustu 11 ár síðan um 1920
2003	6.06°	Heitasta árið
2005–2015	5.36°	Hlýnun 1981–2010 reiknast 0.48° á áratug
2057	6.45°	Eins og meðalhiti í Færeyjum 1890–2000
2090	7.45°	Eins og meðalhiti í Utsira 1890–2001
2100	7.75°	Meðalhiti á Borgundarhólmi 1890–2001 var 7.98°

Af öðrum athyglisverðum upplýsingum sem fram koma í þessari grein 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 (29%). 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.

Að lokum hefur sá möguleiki ekki verið skoðaður í þessari grein að nota eiginaðhvarfslíkön til að gera styttri spár fyrir skemmri tímabil t.d. misseri, ársfjórðunga eða mánuði. Annar spennandi kostur er að nýta hitameðaltöl í nágrennalöndunum til að bæta spár um Íslandshita, en fyrstu athuganir benda til að það sé hægt.

Heimildir

- [1] C. Chatfield, *Time Series Analysis* (6. útg.), Chapman and Hall, 2004.
- [2] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), *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, CUP, 1996
- [3] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), *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, CUP, 2001.
- [4] P.J. Dhrymes, *Distributed Lags: Problems of Estimation and Formulation*, Elsevier Science, 1981.
- [5] Kristján Jónasson, *Spá um meðalhita í Reykjavík 2004–2035*, skýrsla Veðurstofu Íslands, **VÍ-ÚR29**, 2003.
- [6] P.D. Jones, Hemispheric surface air temperature variations: a reanalysis and an update to 1993, *J. Climate* **7**, 1794–1802, 1994.
- [7] E.V. Laursen, *DMI monthly climate data, 1873–2002, contribution to Nordic Arctic Research Programme (NARP)*, skýrsla Dönsku veðurstofunnar (Dansk meteorologisk institut), nr. **03–25**, 2003.
- [8] B.W. Lindgren, *Statistical Theory*, 3. útg., MacMillan Publishing Co., 1976.
- [9] G. Manley, Central England Temperatures: monthly means 1659 to 1973. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* **100**, 389–405, 1974.
- [10] M.E. Mann, 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**, 2000.
- [11] D.E. Parker, T.P. Legg og C.K. Folland, A new daily Central England Temperature Series, 1772–1991, *Int. J. Climatol.* **12**, 317–342, 1992.
- [12] M.B. Priestley, *Spectral Analysis and Time Series*, Academic Press, 1981.
- [13] Jouni Räisänen, *CWE data documentation*, SMHI/Rosby Centre, Memo, 2003.
- [14] 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, Umhverfissráðuneytið, 2000.
- [15] Tómas Jóhannesson, *Hlýnun að meðaltali yfir jörðina og í grennd við Ísland skv. IPCC90/95/2000*, minnisblað TóJ-2000/09, Veðurstofa Íslands, 2000.
- [16] 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, *The impact of climate change on glaciers in the Nordic countries*, The CWE (Climate, Water, Energy) project, report no. **3**, 2004.
- [17] Tómas Jóhannesson, Trausti Jónsson, Erland Källén og Eigil Kaas, Climate change scenarios for the Nordic countries, *Climate Research* **5**, 181–195, 1995.
- [18] H. Tuomenvirta, 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, DNMI 08/01 KLIMA, 2001.

Summary: A projection of the annual mean temperature in Reykjavík in the 21st century is constructed by combining an autoregressive model of the temperature series and a local estimate of greenhouse warming. The autoregressive model is based on temperature measurements in Reykjavík 1867–2003 and partly on measurements elsewhere in Iceland and in nearby countries. An assessment of the local greenhouse warming is obtained from recently published research, both on global climate models and estimating the local development. Simulation is used to assess the error in the projection. The article shows how prediction error may be reduced by using fewer model parameters with no significant loss in model autocorrelation. According to the projection the mean temperature 2005–2015 will be 5.36°C and at the end of the century it will have reached 7.7°C.

Um höfundinn: Kristján Jónasson lauk BS prófi í stærðfræði frá Háskóla Íslands 1980 og doktorsprófi í tölulegri greiningu frá Dundee-háskóla í Skotlandi 1985. Hann hefur síðan starfað sem stærðfræðingur og kennari hjá Háskóla Íslands, Verslunarskóla Íslands, Tækniháskóla Danmerkur, Veðurstofu Íslands og Íslenskri erfðagreiningu. Kristján er nú kennari við stærðfræðiskor Háskóla Íslands.

Raunvísindastofnun Háskólans
Dunhaga 3, IS-107 Reykjavík
kristjjo@hi.is
Móttekin: 16. ágúst 2004