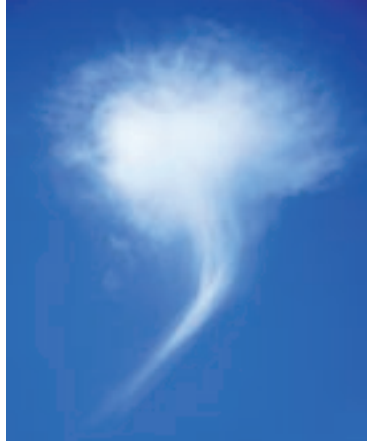
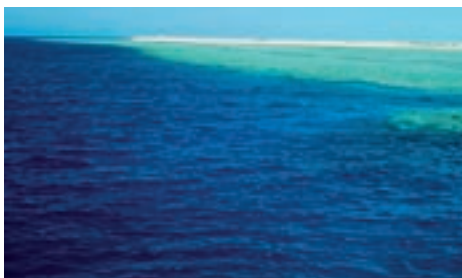
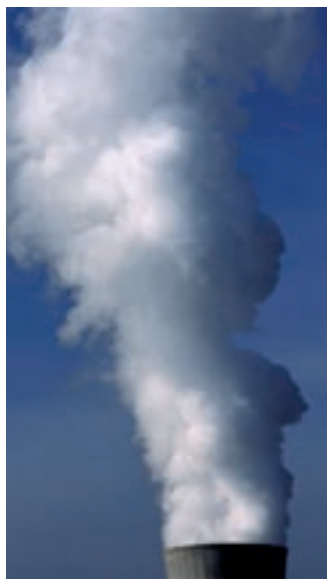


Kommissionen för
hållbar utveckling



Ny klimatvetenskap 2006–2009

Markku Rummukainen och Erland Källén



Ny klimatvetenskap 2006–2009

En kort genomgång av forskning om klimatfrågans naturvetenskapliga grunder sedan IPCC AR4/WG I från 2007

*Markku Rummukainen, SMHI
Erland Källén, Stockholms universitet*

I skriftserien från Kommissionen för hållbar utveckling har utgivits:

Hearing om klimatpolitikens vetenskapliga grunder april 2008

Four policys scenarios for Copenhagen februari 2009

Sea Change: US Climate Policy Prospects Under the Obama Administration mars 2009

A Balancing Act: China's Role in Climate Change mars 2009

Ny klimatvetenskap 2006–2009 april 2009

Skrifterna kan beställas av Åsa Dahlqvist på:
asa.dahlqvist@primeminister.ministry.se

<i>Förord</i>	7
<i>Författarnas förord</i>	9
<i>Sammanfattning</i>	10
<i>Summary in English</i>	12
<i>1 Inledning</i>	15
<i>2 Observerade klimatförändringar</i>	17
<i>3 Utsläpp av växthusgaser och stoftpartiklar</i>	33
<i>4 Beror klimatförändringarna på människan?</i>	35
<i>5 Naturliga faktorerers påverkan</i>	41
<i>6 Klimatprojektioner</i>	43
<i>7 Hur stora kan klimatförändringarna bli?</i>	49
<i>8 Slutsatser</i>	55

Förord

Regeringen inrättade 2007 en rådgivande kommission för hållbar utveckling. Kommissionen har en bred sammansättning med ledamöter från näringsliv, fristående organisationer, forskning och politik. Den är ett forum för diskussion, analys och dialog. Statsministern är ordförande och miljöministern vice ordförande. Kommissionen har ett öppet arbetssätt och vill stimulera en bredare dialog i samhället.

Klimatförändringarna är kanske den mest komplexa fråga som det internationella samfundet står inför. I slutet av 2009 samlas världens länder i Köpenhamn för att försöka enas om ett nytt klimatavtal. Vetenskapen är basen för klimatpolitiken. Rapporterna från FN:s klimatpanel IPCC, senast den fjärde utvärderingsrapporten 2007, har haft en väldig betydelse för att underbygga och tydliggöra det hot som den globala uppvärmningen utgör. IPCC kunde beakta forskning fram till 2006. Sedan dess har åtskillig ny forskning lagts fram. Frågan kan därför ställas om nyare forskning ger anledning till ändringar eller nyanseringar av IPCC:s slutsatser.

Detta är bakgrunden till att professorerna Erland Källén och Markku Rummukainen ombads att göra en uppdatering av det naturvetenskapliga underlaget om klimatförändringarna. I föreliggande rapport presenteras viktigare aktuella forskningsresultat. Rapporten har varit föremål för en mindre vetenskaplig granskningsprocess. Författarna svarar själva för innehållet.

Rapporten publiceras med förhoppningen att stimulera debatt och att förstärka den vetenskapliga basen för klimatpolitiken.

Stockholm i april 2009

Joakim Sonnégård
Kanslichef
Kommissionen för hållbar utveckling

Författarnas förord

Denna rapport har utarbetats under perioden december 2008 – mars 2009 på uppdrag av Kommissionen för hållbar utveckling. Författarna står gemensamt för hela rapportens innehåll och underlaget till rapporten har inhämtats från den internationellt publicerade vetenskapliga litteraturen. Rapporten behandlar naturvetenskaplig klimatforskning.

Vi har gjort vårt bästa för att ge en så representativ bild som möjligt av kunskapslägets utveckling mellan 2006 och början av 2009. Sammanställningen är sannolikt ofullständig. För att få en fullständig bild krävs ett IPCC-liknande arbetssätt med en större mängd forskare inblandade. Det har inte varit möjligt inom vårt uppdrag eller på den korta tid som stått till vårt förfogande.

Vi vill tacka för många konstruktiva kommentarer från de personer som granskat rapporten: professor Helge Drange vid Bergens universitet, professor Eigil Kaas vid Köpenhamns universitet och docent Jouni Räisänen vid Helsingfors universitet.

Rapporten skall refereras till som

Markku Rummukainen och Erland Källén, 2009: Ny klimatvetenskap 2006-2009. Kommissionen för hållbar utveckling, Regeringskansliet.

Sammanfattning

Vi vet att en stor del av temperaturökningen sedan mitten på 1900-talet mycket sannolikt beror på de ökande växthusgashalterna i atmosfären. Vi vet också att människan är ansvarig för denna ökning av växthusgashalterna. Vi kan dessutom göra beräkningar av framtida möjliga klimatutvecklingar. Allt detta finns publicerat i den internationellt granskade, vetenskapliga litteraturen. Vidare finns de omfattande rapporterna från FN:s klimatpanel som är synteser av den publicerade klimatforskningen.

Den publicerade forskningen visar ständigt på nya och ibland oväntade aspekter av klimatsystemet som ytterligare fördjupar vår kunskap. I denna rapport har vi sammanfattat ny kunskap som modifierat eller nyanserat vår bild av klimatsystemet jämfört med den senaste rapporten från IPCC som publicerades år 2007 (AR4). Vi har bland annat kommit fram till följande slutsatser:

- Växthusgashalterna i atmosfären fortsätter att öka. Ökningstakten är högre än tidigare.
- Det senaste årets globala medeltemperatur ligger cirka $0,1^{\circ}\text{C}$ lägre än under de närmast föregående åren. Året 2008 tillhör ändå de tio varmaste åren sedan år 1850 och den senaste 10-årsperioden är varmare än den föregående 10-årsperioden. Temperaturtrenden är stigande.
- Data om höjningen av havsytans nivå har studerats vidare för tidsperioderna 1961-2003 och 1993-2003. Resultat tyder på att höjningstakten har varit högre under den senare perioden, men eventuellt åter något lägre under de senaste 5 åren.
- Den kraftiga uppvärmningstrenden i Arktis är sannolikt nära knuten till den globala uppvärmningen. Även på Antarktis västra delar har nu en uppvärmning konstaterats, som också är knuten till den globala temperaturhöjningen.
- Nya studier av landismassors känslighet för uppvärmning och därmed deras avsmältningshastighet pekar på att havsytan kan höjas mer än vad som angavs i AR4, det kan röra sig om en meter under de närmaste 100 åren. Studierna är dock behäftade med stora osäkerheter.

- En signifikant ändring av nederbörds mängderna har kunnat bestämmas utifrån observerade data. Denna ändring stämmer med vad som förväntas som ett resultat av en växthusgasuppvärmning.
- Den dramatiska havsisminskningen i Arktis 2007-2008 kan vara det första exemplet på en observerad tröskeleffekt, om den blir bestående.
- Det kan bli svårare än vad som hittills bedömts att begränsa den globala uppvärmningen till maximalt 2°C. Till exempel stödjer senare forskning farhågorna om att kolsänkor kan bli mindre effektiva.

Vår samlade bedömning är att ny forskning som bedrivits sedan 2006 på många områden bekräftar tidigare forskningsresultat om den pågående klimatutvecklingen, mänsklig klimatpåverkan och möjliga framtida klimatändringar. Forskningen efter AR4 lägger ytterligare pusselbitar till kunskapen om klimatsystemet och det finns inte mycket som ifrågasätter de slutsatser som fördes fram i AR4. Snarare visar resultaten att framtida ändringar kan bli större än vad som tidigare redovisats. En mer definitiv uppdatering av hur stora ändringarna kan bli kommer att redovisas i nästa IPCC rapport.

Summary in English

We know that a large part of the temperature increase during the latter half of the 20th century is very likely due to an increased concentration of greenhouse gases in the atmosphere. We also know that humans are responsible for the rise in greenhouse gas concentrations. In addition, we can make projections of possible future climate change. All these facts are published in the international, peer-reviewed, scientific literature. Furthermore, a comprehensive assessment of published climate science results has recently been made by IPCC, the UN Intergovernmental Panel on Climate Change.

Published scientific research steadily finds new and sometimes unexpected results and aspects that further enhances and deepens our understanding of the climate system. In this report we attempt to summarize climate science results that have appeared in the literature since the publication of the most recent IPCC report (the IPCC Assessment Report 4, AR4, published in 2007). We focus on results that have modified or shed some new light on the conclusions presented in AR4:

- Greenhouse gas concentrations in the atmosphere continue to increase. Also the rate of increase has accelerated.
- The globally average temperature over the last year is about 0.1 degrees Centigrade lower than the temperature in previous years. The year 2008 is among the ten warmest years since 1850 and the most recent ten year period is warmer than the previous ten year period. The temperature trend is still rising.
- Previous analyses of observations of sea-level rise have been re-examined. The results suggest that the rate of increase has been higher during 1993-2003 than 1961-2003. It is possible that the rate of increase has decreased somewhat since 2003.
- The large Arctic warming trend is likely to be linked to the global warming trend. Now a warming is also found for West Antarctica. That warming is related to the global warming trend.

-
- Recent studies of land ice sensitivity to atmospheric warming and land ice melting rates suggest that future sea level rise may be higher than the values reported in AR4. The total sea level rise may be around one meter in the coming one hundred years. These estimates are still very uncertain.
 - A significant change of precipitation has been determined from observations. This change is largely consistent with the expected effects of warming.
 - The dramatic reduction in Arctic sea ice cover during the years 2007 and 2008 could be the first observed threshold effect or “tipping point” in the climate system. A confirmation of this depends on how persistent the sea ice reduction will be in the next few years.
 - It can be more difficult than previously expected to limit global warming to two degrees. For example, recent research suggests that carbon sinks may be less effective than previously thought.

Our overall assessment is that new research published since 2006 in many respects confirm earlier research results about the ongoing climate change, human influence and possible future climate change. Research published after the AR4 report adds new pieces of knowledge to climate science but there is nothing to suggest a weakening of the conclusions presented in AR4. We rather believe that the published results show that some of the effects of the continued global warming are more severe than previously thought and that future climate warming can be larger than previously estimated. A more definite revision of previous estimates must, however, await the next IPCC report.

I Inledning

Naturvetenskaplig grundforskning är basen för vår förståelse av den globala uppvärmningen och dess samband med människans agerande. Genom systematiska observationer, fysikaliskt baserade teorier och matematisk modellering har vi kunskap om orsak och verkan i klimatsystemet.

FN:s klimatpanel IPCC har alltsedan 1990 arbetat fram stora kunskapssynteser med ett intervall på 5-6 år. Den senaste publicerades år 2007 (IPCC 2007, nedan kallad AR₄) och innehåller forskningsresultat som publicerats fram till 2006. Klimatforskningen är ett mycket aktivt och dynamiskt forskningsområde. Det har lagts fram ett flertal studier sedan 2006. Dessa kommer att beaktas i IPCC:s nästa kunskapssyntes som planeras till 2013-14.

Det finns en stor slagkraft i IPCC:s process, inte minst på grund av den omsorgsfulla granskningen och den breda förankringen som ingår. Resultat och nya forskningsrön som kommer fram blir satta i ett brett perspektiv. Såväl mer robusta som mer osäkra kunskaper blir allsidigt belysta. På det sättet är IPCC rapporterna något helt annat än specifika nya rön som ständigt kommer fram i vetenskapliga tidskrifter. Alla nya forskningsrön måste betraktas som mycket preliminära i väntan på att bli bekräftade, preciserade eller omkullkastade av den fortsatta forskningen. Den allra senaste forskningen måste först få mogna och jämföras med andra forskningsresultat inom området innan den kan beaktas vid beslutsprocesser. Samtidigt är det på många sätt orimligt att inte uppdatera kunskapsläget under resans gång, eftersom beslutsprocesserna är dynamiska.

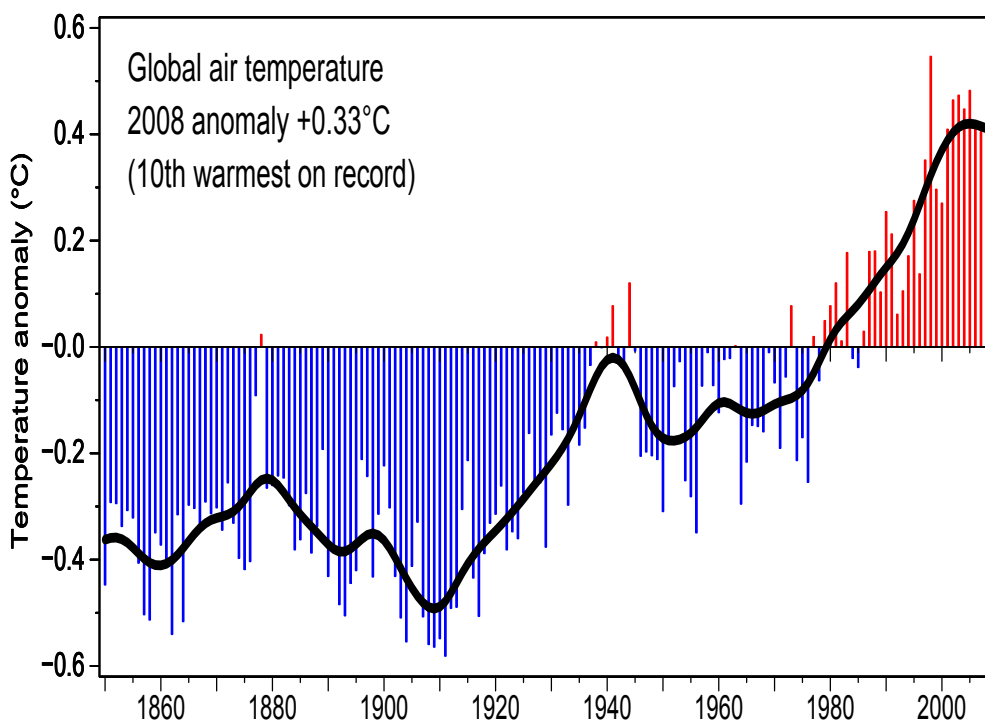
Eftersom IPCC-processen är så omsorgsfull hinner det hända mycket inom klimatforskningen innan nästa sammanställning blir klar. Samtidigt, som beskrivits ovan, är det en balansgång mellan att vänta in tillräckligt många nya rön och att ge sig in på en uppdaterad beskrivning av forskningsläget.

Vår studie avser lägga fram en genomgång av nya forskningsresultat om klimatsystemet och klimatförändringar som kommit fram sedan AR4. Studien avgränsas till de frågeställningar som behandlas inom IPCC:s arbetsgrupp I, det vill säga klimatobservationer, -systemet, -modellering och -projektioner.

2 Observerade klimatförändringar

Global temperaturutveckling 2006-2008

I AR4 slås fast att den globala medeltemperaturen har stigit med $0,74^{\circ}\text{C}$ under perioden 1906 till och med 2005. Elva av de tolv varmaste åren under perioden 1850-2006 inträffade under tolvårsperioden 1995-2006. Åren därefter, 2007 och 2008 har varit förhållandevis varma, men något kallare än de närmast föregående åren (se figur 1).



Figur 1. Global medeltemperaturutveckling sedan 1850
Årsvärden visas som avvikelser från medelvärdet för 1961-90^a.

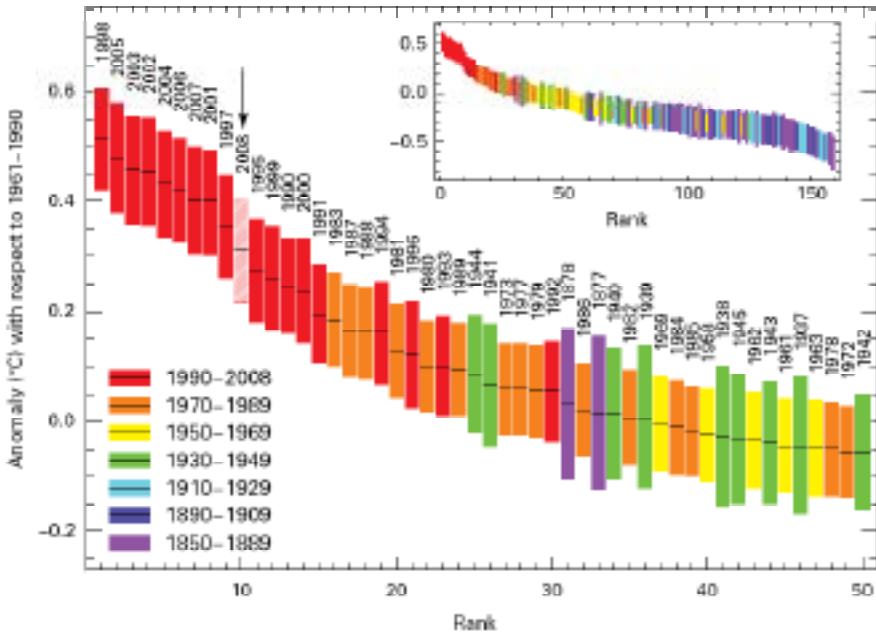
^a Baserad på Brohan, P., J.J. Kennedy, I. Harris, S.F.B. Tett and P.D. Jones, 2006: Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: a new dataset from 1850. *J. Geophysical Research* 111, D12106, doi:10.1029/2005JD006548. © Copyright 2009, Climatic Research Unit.

Det är inte fråga om något signifikant avbrott i den globala uppvärmningstrenden. De senaste två åren tillhör de tio varmaste åren sedan 1850 och jämfört med 1991-2000 har hela perioden sedan dess (2001-2008) varit nästan 0,2°C varmare. Att varje nytt år inte blir varmare än alla föregående år handlar om ett samspel mellan den pågående uppvärmningen och tillfälliga interna klimatsvängningar i det globala systemet, i synnerhet i världshaven. En orsak till att 2008 inte var varmare än 2007 var troligen de så kallade La Niña-förhållandena som rådde från mitten av 2007 till mitten av 2008, vilket tillfälligt drar ner den globala, ytnära medeltemperaturen^b. La Niña-förhållanden återkom i slutet av 2008 och rådde även i början av 2009.

Temperaturmätningar finns att tillgå från ett stort antal mätstationer, men dessa är ojämnt fördelade över jordklotet. Speciellt gles är det mellan mätstationer i polarområdena och över hav. Det leder till en viss osäkerhet i bestämningen av den globala medeltemperaturen. Till exempel gäller att medan den analys som visas i figur 1 ger vid handen att 2008 var det tionde varmaste året, ger en analys med en annan tänkbar ihopvägning av stationsdata att 2008 var det åttonde varmaste året^b. Denna aspekt illustreras vidare i figur 2 som också visar att det inte alltid är så att ett nytt år är varmare än de föregående åren, trots att den långsiktiga trenden är stigande.

I AR4 visas att uppvärmningen de senaste 50 åren stämmer väl överens med de ökande växthusgashalterna i atmosfären. Den slutsatsen baseras på temperaturutvecklingen fram till och med 2005. Ett sätt att illustrera hur de globala temperaturändringarna under senare år kan jämföras med simuleringar som gjorts av det globala klimatet för perioden 1990-2010 visas i figur 3. Här har resultat från 21 olika simuleringar av det globala klimatet, alla hämtade från den databas som användes i AR4, jämförts med den observerade temperaturutvecklingen fram till och med 2008. Man ser att trots avsaknaden av en temperaturuppgång under de senaste åren så ligger den observerade kurvan väl inom det intervall som fås från simuleringar där hänsyn tagits till både ökande växthusgashalter och naturlig klimatvariabilitet.

^b WMO 2009. WMO Statement on the status of the global climate in 2008. WMO-No. 1039, 14 pp. 2009.

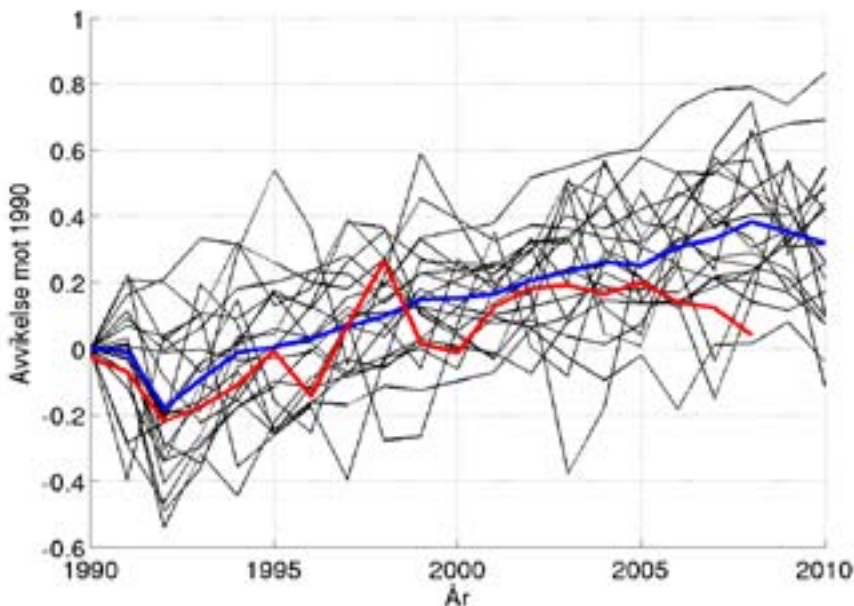


Figur 2. Global ytnära medeltemperatur (så kallade HadCRUT3 data) för de 50 varmaste åren sedan 1850
 Årsvärden visas som avvikelser från medelvärdet för 1961-90. Längden av varje årsstapel anger osäkerhetsuppskattningen (95%) i analyserna^a.

Hittills har klimatprojektionerna i första hand behandlat klimatets respons på utsläppen. Det redovisas ett stort antal sådana projektioner i AR4. Sammantaget ger dessa en global temperaturhöjning på 1,1-6,4°C från 1990 till cirka 2095^c. Beräkningsmodellerna bygger på klimatsystemets fysikaliska egenskaper och förmår därmed beskriva även sådana interna variationer som uppstår till exempel genom värmeutbyte mellan atmosfären och havet. Beräkningar startas med ett realistiskt, men inte det observerade, tillståndet för klimatsystemet. Därmed avser den simulerade variabiliteten ett möjligt förlopp men inte just det förloppet som sker i verkligheten. Detta är ett sätt att ta hänsyn till den oförutsägbara, naturliga variabiliteten i klimatsystemet. Med hjälp

^c Utöver klimatmodellerna, ingår i detta spann antaganden om framtida utsläpp och osäkerhet om hur kolcykeln påverkas av successiva klimatförändringar. Explicita antaganden om klimatpolitik är inte medtagna. Figuren är tagen från WMO 2009. WMO Statement on the status of the global climate in 2008. WMO-No. 1039, 14 pp. 2009, där den anges härstamma från Met Office/Hadley Centre och Climatic Research Unit, Univ. East Anglia, Storbritannien.

av många sådana beräkningar kan sannolikhetsbeskrivningar åstadkommas av såväl klimatförändringar som variabilitet. Där-
emot kan man inte beskriva hur ett enskilda år eller ens ett givet
decennium kommer att te sig (se figur 3).



Figur 3. Globala klimatsimuleringar

Beräknade globala årsmedeltemperaturer mellan 1990 och 2010 (tunna linjer) från 21 olika globala klimatmodellssimuleringar som användes i AR4. Beräkningarnas medelvärde anges med en tjock blå linje. Observerade globala medeltemperaturer (från HadCRU3) är angivna med en tjock röd linje. Alla beräknade temperaturer har normaliserats till ett referensvärde år 1990. Källa: SMHI.

Sedan AR4 har försök att göra korta klimatprognoser, 20-30 år fram i tiden, publicerats. I dessa startas simuleringar av klimatförändringar fram i tiden utgående från den aktuella interna klimatvariabiliteten²³. Dessa resultat ger vid handen att de närmaste åren karakteriseras av en naturlig klimatvariabilitetsfas som sänker den globala ytnära medeltemperaturen, samtidigt som en underliggande uppvärmningstrend på grund av ökande växthusgashalter består. Det finns idag ingen anledning att ifrågasätta den slutsats om temperaturökningen som redovisas i AR4:

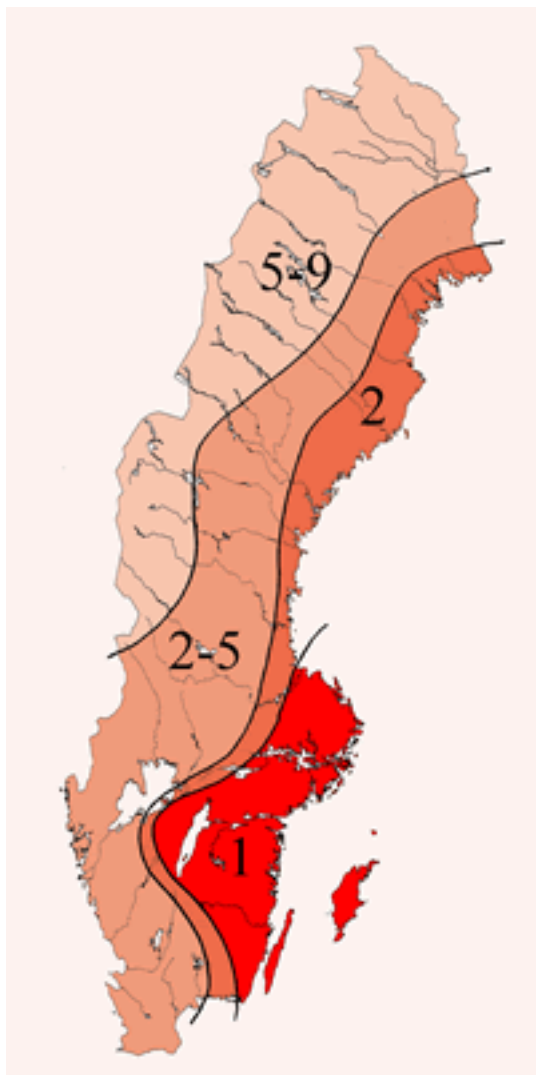
Observationer av ökade globala genomsnittliga luft- och havstemperaturer, utbredd snö- och issmältning och en höjning av den genomsnittliga globala havsytanivån visar entydigt på en pågående uppvärmning av klimatsystemet.

Sveriges temperaturutveckling 2006-2008

Perioden 1991-2005 var i Sverige väsentligt varmare jämfört med den så kallade klimatnormalperioden 1961-90^d. Även 2007 respektive 2008 var tämligen varma. Speciellt vintern 2007/2008 blev mycket mild. I delar av östra Sverige var vintern den mildaste inom perioden för meteorologiska mätningar, inklusive Sveriges längsta temperaturmätserier från 1700-talet (se figur 4). Skillnaden i östra Svealand till de tidigare högsta värdena är cirka en halv grad. Det är ändå inte möjligt att entydigt knyta uppvärmningen till den globala ökningen av växthusgashalterna. Sverige representerar en så liten del av jordens yta att rent naturligt orsakade regionala temperatursvängningar kan vara en möjlig förklaring till de senaste varma åren. Å andra sidan motsäger inte data från Sverige kopplingen mellan ökande växthusgashalter och ökande temperaturer.

^d SMHI Faktablad nr 29, 2006. Klimat i förändring, 8 pp.

(http://www.smhi.se/content/1/c6/02/35/52/attachments/faktablad_klimat.pdf, 2009-03-29).



Figur 4. Rangordning regionalt av vintern 2007-08 avseende de varmaste vintrarna

I östra Götaland och östra Svealand blev vintern 2007-2008 den hittills varmaste som uppmätts sedan rikstäckande mätningar inleddes för 150 år sedan. Längs Norrlandskusten hamnar den i allmänhet på andra plats. I västra delarna av Götaland och Svealand samt i inre Norrland hamnar vintern på plats 2-5, och i västligaste och nordligaste Norrland på plats 5-9. (Källa: www.smhi.se 2008-03-04.)

Global havsytenivå

Att den globala havsytenivån stiger beror främst på två faktorer: Den första är termisk expansion av havsvatten när det blir varmare och den andra är tillförsel av vatten från avsmältning av is på land. En viss påverkan fås också från förändringar av mängden färskvatten som befinner sig i vattendrag, grundvatten eller konstgjorda sjöar. I AR₄ sammanfattades observerade havsnivåhöjningar och uppskattningar av hur olika faktorer bidragit (se tabell 1). I AR₄ påpekas att det finns en skillnad mellan summan av de individuel-

la bidragen från termisk expansion/avsmältning och den observerade totala höjningen av havsytans nivå. Denna skillnad är relativt stor för perioden 1961-2003 medan de båda skattningarna stämmer bättre överens för perioden 1993-2003. Skillnaderna ligger som regel inom ramen för osäkerheterna i de olika skattningarna.

Den osäkerhet som uppstår i data före och efter 1993 beror på att 1993 är skarven mellan en period med enbart vattenståndsmätningar från större hamnstäder och den period då data från satelliter med altimetrar också finns tillgängliga⁴. Analyser av satellitdata ger en något snabbare höjning av havsytans nivå än data från konventionella vattenståndsmätningar. Studier sedan AR₄ bekräftar att havsnivåhöjningen sedan 1993 har gått snabbare än enligt data för perioden 1961-2003^{5,6}. Det påpekas i AR₄, vilket också bekräftas i senare forskning, att över korta perioder kan naturlig variabilitet snabba upp eller försvaga havsnivåförändringarna men över längre tidsperioder följer havsnivån den successiva globala uppvärmningen.

Tillkomsten av satellitmätningar har gett en förbättrad bild av regionala variationer i havsnivåändringarna. Denna information är viktig i sig och den kan också användas för att förbättra jämförelsen mellan konventionella mätningar som bara finns från ett begränsat antal platser och modellresultat som ger en storskalig bild av havsnivåändringarna. Detta förhållande har även utnyttjats för att jämföra modellerade och observerade data om värmelagring i havet⁷. Tidigare konstaterade skillnader minskar väsentligt när bättre hänsyn tas till den ojämna täckningen av mätningar, effekten av förändringar i mätteknik och annan vidareutveckling av såväl analys av mätningar som av modeller.

Vattnets termiska expansion är en viktig komponent i havsytans höjning. Enligt AR₄ förklarar den cirka en fjärdedel av den totala observerade höjningen mellan 1961 och 2003. För perioden 1993-2003 står den termiska expansionen för uppemot hälften av höjningen. Resten kommer från smältvatten från mindre glaciärer och under den senare perioden även från landisarna på Grönland och Antarktis. För de senaste åren skiljer sig resultat beträffande förhållandet mellan bidrag från termisk expansion och isavsmält-

ning. Medan en studie visar att de senaste årens observerade havsnivåhöjning till 70-80% beror på isavsmältning⁵, kommer man i en annan studie fram till en jämnare fördelning mellan isavsmältning och termisk expansion⁶.

Överensstämmelsen mellan observerade höjningar och summering av bidragen från de olika bakomliggande faktorerna har studerats vidare. Det har argumenterats för att konstruktion av konstgjorda vattenreservoarer och ökad användning av grundvatten har haft jämförbara men motsatta effekter på havsytenivån⁴. En annan studie kommer fram till att en ökad lagring av färskvatten i konstgjorda vattenreservoarer har motverkat havsytenivåns höjningar under de senaste 50 åren med ungefär 3 cm⁸. Detta skulle innebära att den sammanlagda bruttoeffekten på havsytenivån av dels termisk expansion som isavsmältning skulle ha varit nästan 2,3 mm/år (cirka 1,7 mm/år enligt tabell 1 och tillkommande knappt 0,6 mm/år) under samma period. För en senare kortare period, 2003-2006, anges att en del vatten transporterats från terrestra reservoarer tillbaka till havet, motsvarande en global havsytenivåhöjning av ett par tiondels millimeter per år.

Tabell 1. Höjning av havsytenivån(mm/år) enligt observationer i olika studier

Uppräkningar av förväntade effekter av havsvattnets termiska expansion och isavsmältningar anges i parenteser. I AR4-uppgiften för 1961-2003 ingår inte eventuella ändringar i färskvattenlagring.

	1961-2003	1993-2003	2004-2007
AR4	1,8±0,5 (1,1±0,5)	3,1±0,7 (2,8±0,7)	
Ref ⁴	1,6±0,2	2,3 ^x	
Ref ⁶			1,5±1,0
Ref ⁶			2,4±1,1
Ref ⁶			2,7±1,5
Ref ⁵		3,1±0,4 (3±0,5)	2,5±0,4 ^y (2,6±0,3 ^y)

^x Studien anger inte någon osäkerhetsuppskattning.

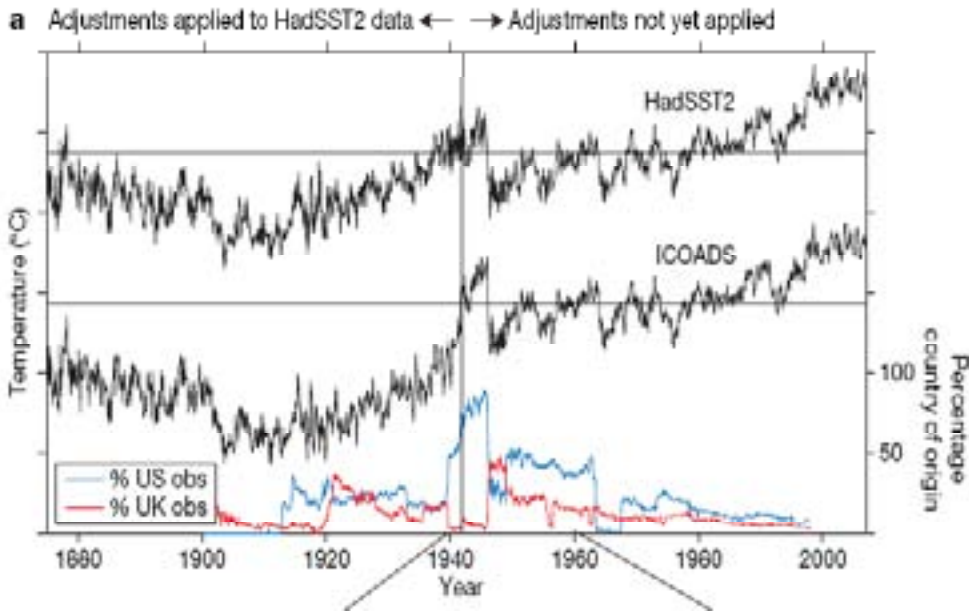
^y Avser 2003-2008.

Diskussionen kring havsytenivån visar tydligt hur nya rön kan precisera eller modifiera tidigare resultat, vilket leder till ett förbättrat kunskapsläge.

Korrigerade globala dataunderlag – temperatur

Temperaturstatistik bygger på ett observationsunderlag som samlas in från en mängd olika datakällor. Varje datakälla har sina karakteristiska fel och osäkerheter. Observationstekniken förändras med tiden och observationsplatser tillkommer, flyttas eller försvinner. Det läggs stor vikt vid att studera noggrannheten i observationsunderlaget, eftersom det utgör grunden för vår kunskap om pågående klimatförändringar. Dataanalyserna, som innefattar stora mängder av komplext sammansatta observationer, är ständigt under omprövning och utvärdering. Sedan AR₄ har det framkommit några systematiska fel som inte uppdagats i tidigare framlagda dataanalyser. Dessa ändrar inte slutsatserna om signifikansen i de pågående förändringarna, men ger ändå väsentliga förbättringar av kunskapsläget.

En aspekt av de globala temperaturvariationer som klimatmodeller inte kunnat fånga i simuleringar av 1900-talets klimat är den begränsade men snabba temperatursänkningen i mitten av 1900-talet. Man har nu lokaliserat en hittills okorrigerad effekt i observationerna som rör förändringar i metoder för insamling av temperaturdata ute till havs⁹. Förändringen handlar om det relativa antalet mätningar som gjordes av amerikanska fartyg (mätningar i motorernas kylvattenintag), respektive brittiska fartyg (mätningar med hjälp av vattenuppsamlingshinkar), se figur 5. Under andra världskriget gjordes flertalet av dessa mätningar av amerikanska fartyg, medan förhållandet var mer jämnt fördelade såväl före som strax efter kriget. Dessa skillnader i mätteknik har tidigare inte uppmärksammats. Däremot är det välkänt att olika mätmetoder ger upphov till olika systematiska fel. De nya insikterna förväntas inte ge någon förändring i bilden av en signifikant och successiv uppvärmning under 1900-talet. Däremot kan en korrektion nedåt av temperaturerna under mitten av 1940-talet förväntas, vilket leder till en bättre överensstämmelse mellan klimatmodellsimuleringar och mätningar för samma period. Det nämns i samma artikel att förändringar i datainsamlingen under senare år, i samband med ett ökande antal mätningar från havsbojar, också leder till systematiska avvikelser som det måste tas hänsyn till. Bojmätningar ger typiskt något lägre värden jämfört med mätningar från fartyg, vilket borde leda till en något större uppvärmningstrend under senare år.



Figur 5. Två havsytetemperaturanalyser (HadSST2 och ICOADS) samt andel data som samlats av amerikanska (blå linje) respektive brittiska (röd) fartyg^e

Urbaniseringseffekter

I AR₄ nämns att urbaniseringseffektens påverkan på felgränserna i bestämningen av den globala medeltemperaturen är mindre än 0,006°C per årtionde, det vill säga ytterst marginell. Havsyte-temperaturer påverkas inte alls. Lokalt kan emellertid urbaniseringseffekterna på temperaturen vara stora. Den gängse bilden av en global temperaturhöjning har inte förändrats i och med nya studier. I två studier visas att urbaniseringseffekter inte har någon storskalig betydelse^{10,11} medan en annan påstår att trenderna över land mellan 1980 och 2002 kanske bara är hälften så stora som tidigare angetts¹². Den senare studien bygger på en metodik som utvecklats i ett tidigare arbete som diskuterades i AR₄. Denna studie kritiserades i AR₄ och metoden anses inte vara tillförlitlig. Senare har det dessutom visats¹³ att de samband som utnyttjas inte motsäger slutsatserna angående urbaniseringseffekter i AR₄.

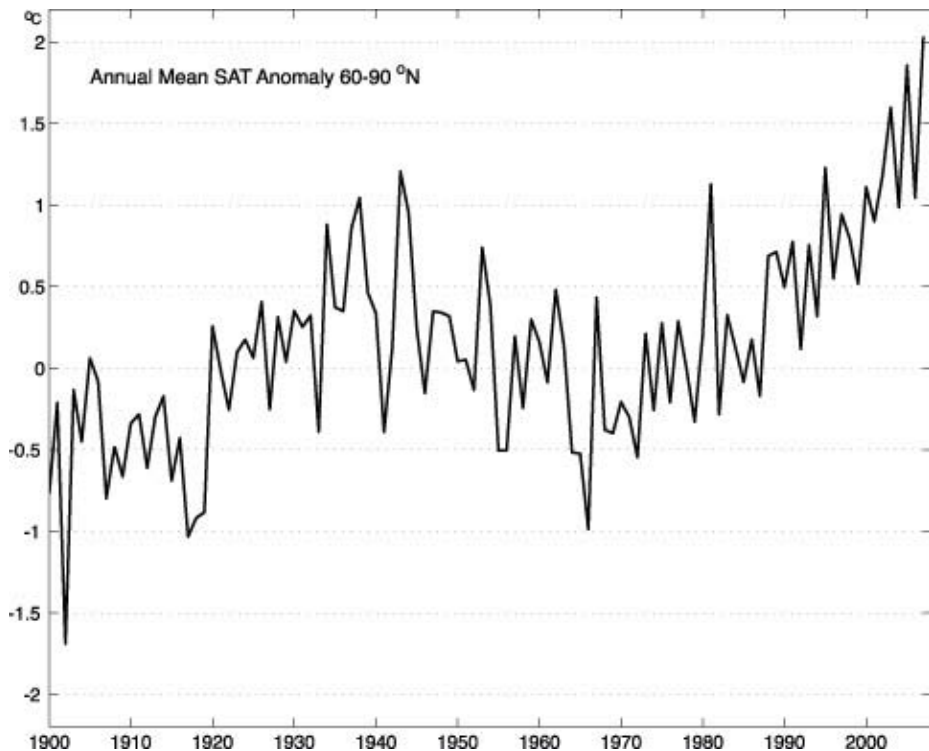
^e Figur reproducerad/anpassad med tillstånd från Macmillan Publishers Ltd: Nature Thompson, D. W. J et al. 2008. A large discontinuity in the mid-twentieth century in observed global-mean surface temperature. Nature 453, 646-650. Copyright 2008.

Utvecklingen i Arktis och Antarktis – temperatur

Klimatprojektioner i AR₄ visar genomgående att den förväntade regionala temperaturhöjningen blir störst i det arktiska området, medan en mer måttlig utveckling förväntas i Antarktis. Samtidigt är den naturliga variabiliteten också stor i Arktis.

Uppvärmningen i Arktis har fortsatt under det senaste årtiondet¹⁴ (se figur 6). Jämfört med regionala värmeperioden under 1930-talet har medeltemperaturen i det arktiska området nått nya rekordnivåer under slutet av 1900-talet och början av 2000-talet.

I AR₄ framkom att Antarktis är den enda kontinenten där det hittills inte konstaterats någon tydlig påverkan från den globala uppvärmningen. Det påpekades också att både tjockleken på det antarktiska istäcket och dominansen av havsområden runt Antarktis gör att uppvärmningen går långsamt i detta område och naturliga klimatsvängningar dominerar de förändringar som observerats. Även i Antarktis har nu en uppvärmning observerats^{15,16} på kontinentens västra delar, dock inte lika stor eller utbredd som i Arktis. Till skillnad från det arktiska området är den antarktiska kontinenten nästan helt täckt av ett tjockt lager landis. En uppvärmning kan därför inte förstärkas på samma sätt som i Arktis. Den antarktiska halvön har redan i tidigare studier konstaterat visa en tydlig uppvärmning.



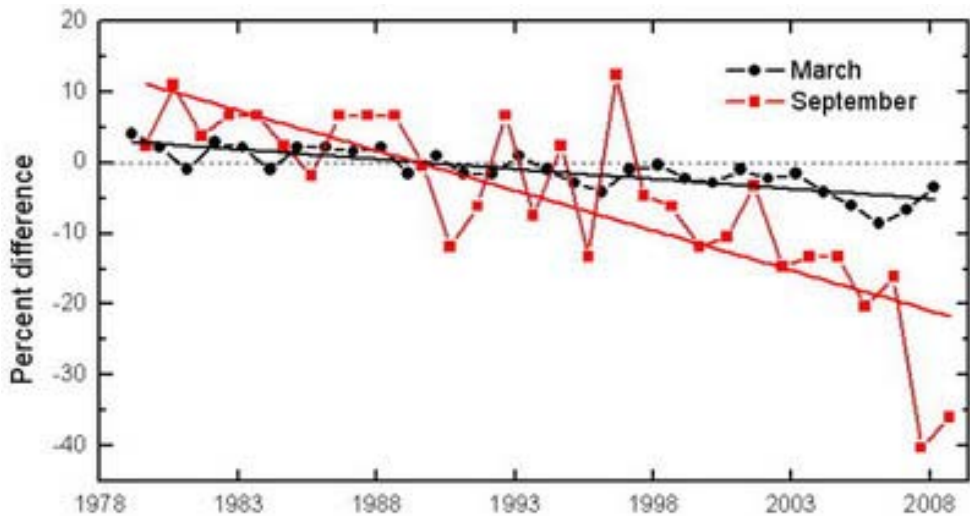
Figur 6. Ytnära temperatur (Surface Air Temperature, SAT) i Arktis^f
De angivna årsvärdena är avvikelser från medelvärdet för perioden 1961-90.

Utvecklingen i Arktis och Antarktis – havsis

I samklang med temperaturökningen har även det arktiska havsistäcket fortsatt att minska. Under de senaste 50 åren har istäcket under sensommaren och början av hösten minskat med cirka 30%. År 2007 var istäcket det minsta som hittills observerats i mitten av september månad, cirka 5,5 miljoner km². Detta är ungefär 2 miljoner km² mindre jämfört med året innan. Medeltrenden i minskningen per år under de senaste 50 åren ligger på cirka 0,06 miljoner km² per år. År 2008 var minimumet något mindre men ändå mer jämförbart med året innan än tidigare år (se figur 7).

Havsistäckets omkring Antarktis visar inte någon tydlig systematisk trend.

^f Richter-Menge, J. et al. 2008. Arctic Report Card 2008, Se <http://www.arctic.noaa.gov/reportcard> (2009-04-01).



Figur 7. Relativa avvikelser av havsisutbredningen i Arktis i mars och i september från medelvärden för 1979–2007⁸

Utvecklingen i Arktis och Antarktis – landisarna

Grönlandsisen har under senare år visat en del tecken på en ökad avsmältning¹⁷ jämfört med början av 1970-talet. Satellitdata pekar faktiskt på tillfällena med oväntad snabb avsmältning under början av 2000-talet^{18,19}. Landisarnas dynamiska respons på en uppvärmning är komplex. Det kan till exempel förekomma något som kallas en "smörjningseffekt", med vilket menas att smältvatten som rinner ner från ytan till glaciärbasen genom hål och tunnlar leder till en minskad friktion mellan glaciären och underlaget. Denna smörjningseffekt kan underlätta glaciärens nedglidning mot havet. Observationer stödjer inte kategoriskt detta^{20,21,22} utan antyder att det kan finnas stabiliserande mekanismer, alternativt att i stället för en smörjningseffekt kan de iakttaga snabba förändringarna bero på lokalt varma havsvattentemperaturer. Därmed kan de noterade avsmältningseffekterna bli kortvariga.

Den antarktiska isavsmältningen är än mer osäker. I princip finns möjligheter både att det antarktiska istäcket växer i ett varmare klimat på grund av ökad nederbörd och att avsmältningen ökar i de delar som ligger nära havsytans nivå. Vilken av dessa effekter

⁸ Richter-Menge, J. et al. 2008. Arctic Report Card 2008, Se <http://www.arctic.noaa.gov/reportcard> (2009-04-01).

som dominerar är mycket svårt att avgöra. Nya mätningar, som får stöd av regional klimatmodellering, tyder på en sammanlagd isminskning som dessutom kan ha accelererats mellan 1992 och 2006, den tidsperiod som studien gäller²³. Det visar sig också att olika delar av Antarktis påverkas olika. På kontinentens östra delar är förändringarna små eller obefintliga, medan delar av västra Antarktis och inte minst den antarktiska halvön förlorar is.

En eventuellt accelererad avsmältning skulle öka den förväntade höjningen av havsytans nivå (se avsnittet Havsnivåhöjning på sid. 43).

Den meridionala havscirkulationen i Nordatlanten

En global uppvärmning kan leda till ändringar i havens strömningsmönster. I AR4 redogjordes för modellsimuleringar som tyder på att Golfströmmens styrka skulle avta vid en kraftig global uppvärmning. I Norden skulle fortfarande den globala uppvärmningen dominera trots den minskande uppvärmningen från Golfströmmen. I AR4 redovisades också enstaka studier som rapporterade att i observationer sågs tecken på en minskning av Golfströmmens styrka. Senare studier i sin tur antyder dock att variabiliteten i havscirkulationen från år till år är så stor att enstaka års data inte räcker till för att leta efter eventuella långtidstrender²⁴. I en studie som sträcker sig över 10 år, från 1995-2005, hittar man inte heller några signifikanta förändringar från mätningar i farvattnen kring Island och Färöarna²⁵.

Tusenårsperspektivet

Historiska klimatändringar före den instrumentella perioden (innan cirka 1850) kan skattas med hjälp av paleoklimatologiska data. I AR4 behandlas paleoklimatologin ingående, bland annat visas att temperaturuppgången under slutet av 1900-talet är unik i åtminstone ett 1300-års perspektiv. Forskning under senare år har bekräftat detta samt att slutsatserna i AR4 fortfarande håller²⁶, men det finns också kritiska synpunkter på valet av den statistiska metod som använts och urvalet av data²⁷. Ett flertal studier under senare år pekar emellertid på att kritiken varken är robust eller särskilt befogad^{28,29,30,31,32}. Temperaturnivåerna i slutet av 1900-talet lär inte

ha överträffats under någon längre period de senaste dryga tusen åren och kanske även så långt tillbaka som de senaste 1700 åren, alltså sedan år 300 AD.

3 *Utsläpp av växthusgaser och stoftpartiklar*

Växthusgashalterna stiger, partikelhalterna är mer osäkra

Atmosfärens halt av koldioxid har fortsatt att stiga. Mellan juli 2007 och juni 2008 uppmättes koldioxidhalter som ligger strax under 384 ppmv^h. Som redan noterades i AR4, har de globala utsläppen ökat snabbare sedan år 2000 än tidigare. Även ökningstakten av atmosfärens koldioxidhalt har accelererat i början av 2000-talet, vilket kopplas ihop med ökande utsläpp, men kan delvis också handla om en möjlig försvagning av naturliga kolsänkor³³. Det är emellertid oklart hur bestående de senaste årens snabbare ökningsar är³⁴.

En relaterad aspekt är att medan ökningstakten av atmosfärens metanhalt generellt minskat från början av 1980-talet, har en global vändning konstaterats år 2007³⁵. Den skulle kunna vara tillfällig, samtidigt som den verkar skilja sig från tidigare tillfälliga ökningsar kring 1998, vilket kan ha berott på den då kraftfulla El Niño-effekten på metanutbyte i ekosystem, och kring 2002-2003 när ökningsar gällde för norra halvklotets del. Ökningen av metanhalt under senare år beror sannolikt på större nettoutsläpp än till exempel ändringar i atmosfärkemin. Det finns viss anledning att anta att det handlar mer om ökningsar på norra halvklotet än på det södra.

Beträffande stoftpartiklar i atmosfären, ger den senaste forskningen något varierande resultat om förändringar i de globala halterna. Över Europa påvisas entydigt regionala haltminskningsar³⁶, medan halterna ökar i till exempel Sydostasien³⁷. Satellitmätningars ger stöd för en minskning av partikelmängderna sedan 1980-talet³⁸, men slutsatsen är indikativ med tanke på osäkerheter i satellitmätningarna. Sammanställningars av markbaserade observationer mellan 1973 och 2007 tyder på de ovan nämnda olikartade regionala förändringarna³⁹, medan de för det globala landområdet som helhet ger en ökning⁴⁰. Kolpartiklar – sot – har fått en hel del uppmärksamhet^{41,42}. Beräkningars visar att de kan ge upphov till en kraftig regional uppvärmningseffekt i Sydostasien. Eventuellt kan också sotpartiklar som deponeras på is och snö i Arktis bidra till den arktiska uppvärmningens.

^h http://cdiac.esd.ornl.gov/pns/current_ghg.html (2009-03-27)

4 *Beror klimatförändringarna på människan?*

I AR4 visas tveklöst att temperaturen vid jordytan stigit under 1900-talet samt att flera andra relaterade ändringar i klimatet blivit tydliga. Exempel är ökad glaciäravsmältning, minskning av havsistäcket i Arktis, ökad förekomst av värmeböljor och torrperioder, ökande havstemperaturer och stigande havsnivåer. Senare forskningsrön har utvidgat detektionen (det vill säga identifiering av signifikanta ändringar i klimatvariabler) till ännu fler aspekter av och variabler i klimatsystemet. Exempel på detta är förändringar i atmosfärens fuktighet, en mer omfattande temperaturhöjning på Antarktis än den som tidigare diskuterats, förändrad vattenföring i floder och älvsystem samt ändringar i nederbörd över land. Medan detektion avser identifikation av huruvida en signifikant förändring har skett, tar man ett steg till i attribution. Med attribution menas en bestämning av kausala samband mellan en tänkbar påverkan och konstaterade förändringar.

Arktis

I AR4 finns inte någon tydlig slutsats angående ett orsakssamband mellan människans påverkan av den globala medeltemperaturen och den snabba arktiska uppvärmningen. Forskningsresultat under senare år pekar emellertid tydligt i denna riktning.

Den långsiktiga trenden i uppvärmningen av Arktis och minskningen av havsisen hänger sannolikt samman med den globala uppvärmningen under samma period. Isavsmältningen i sig bidrar förstärkt till att förstärka den arktiska uppvärmningen. När istäcket minskar under sommarhalvåret reflekteras en mindre del av solinstrålningen tillbaka till rymden och det arktiska området mottar därmed mer värme. En ny studie¹⁶ visar dessutom att det inte går att förklara den arktiska uppvärmningen under de senaste decennierna som ett resultat av naturliga klimatsvängningar. Enbart en successiv uppvärmning räcker ändå inte för att förklara en så pass snabb minskning av havsisen som inträffade 2007 och 2008, utan det handlar också om ovanliga förhållanden i atmosfären och havet som eventuellt ryms inom naturliga variationer.

Det har visats⁴³ att uppvärmningen över Arktis är störst på cirka tre kilometers höjd och att ändringar av atmosfärens värmetransport kan förklara väsentliga delar av den arktiska uppvärmningen. Det finns svårigheter i att bestämma uppvärmningen över den arktiska havsbassängen; konventionella data från väderballonger saknas och datastudierna baseras på satellitmätningar. Genom en särskild analysmetod, så kallade återanalyser, kombineras satellitdata med extrapolerad information från andra observationskällor i det arktiska närområdet. Användningen av denna metod har kritiserats med hänvisning till olika observationsdata som tyder på att resultaten kan handla om systematiska fel i återanalysdata^{44,45,46}. Författarna anser att inom ramen för den osäkerhet som finns i metodiken är ändå resultaten tydliga⁴⁷. Dessa resultat motsäger inte att människans klimatpåverkan förklarar den drastiska uppvärmningen i Arktis. Snarare visar det att orsakssammanhangen i det arktiska området är komplexa.

Antarktis

Även klimatändringar i Antarktis¹⁵ kan till viss del förknippas med den globala uppvärmningen¹⁶. Mönstret i temperaturvariationerna och uppvärmningen över delar av den antarktiska kontinenten kan förklaras som ett kombinerat resultat av den människoinducerade globala uppvärmningen och rubbningar i atmosfärens cirkulationsmönster som observerats över södra halvklotet. De sistnämnda kan i sin tur bero på den pågående uppvärmningen, men även ha påverkats av förtunningen av ozonskiktet över Antarktis⁴⁸.

Nederbördsförändringar

I ett varmare klimat ökar mängden vattenånga i atmosfären. I AR₄ hänvisades till studier som påvisar en signifikant ökning av atmosfärens vattenångeinnehåll över de senaste 20 åren, vilket kan leda både till kraftigare nederbörd i medeltal och att det regnar mer intensivt när det regnar. Samtidigt blir det torrare över områden som redan har lite nederbörd. I AR₄ fanns emellertid inga studier som visade nederbördstrender i observationer från de senaste 50 åren. Sedan dess har en sådan trend identifierats⁴⁹ om man delar in jorden i latitudbälten. Generellt har nederbörden minskat över subtropiska områden medan den har ökat över mellanbreddgrader.

En senare undersökning av satellitdata ger vid handen att nederbörden ökar i paritet med atmosfärens vatteninnehåll^{50,51} vilket skulle vara starkare än slutsatserna i många tidigare studier av såväl mätningar som simuleringar med klimatmodeller.

Tropiska cykloner

Tropiska cykloner bildas i subtropiska delar av Atlanten, Stilla Havet och Indiska Oceanen. Dessa cykloner får sin energi från varmt havsvatten. När de kommer in över land dör de snabbt ut. En uppvärmning av havet kan därför påverka styrkan hos och frekvensen av tropiska cykloner.

I AR₄ konstateras att ett ökande antal kraftiga tropiska cykloner har drabbat den tropiska och subtropiska delen av Atlantområdet sedan 1970-talet och att denna trend är i överensstämmelse med ökande havsytetemperaturer^{52,53}. Över andra delar av tropikerna finns inte någon klar trend, det kan bero på bristande dataunderlag. Sett som ett medeltal över hela det tropiska området finns inte någon trend i antalet tropiska cykloner.

Senare studier av tropiska cyklondata ger inte någon entydig bild av en ökande trend. Det har till exempel rapporterats att antalet tropiska cykloner som nått USA faktiskt har minskat i takt med ökande havsytetemperaturer⁵⁴. Detta skulle kunna bero på ökande höjdvindar i tropiska områden, vilka kan leda till en minskad frekvens av tropiska cykloner. En fortsatt global uppvärmning kan leda till ökande höjdvindar i delar av de tropiska områdena⁵⁵. Det är emellertid inte klarlagt om det är detta fenomen som ligger bakom en sådan observerad minskningen av tropiska cykloner som nämns ovan.

Projektioner av framtida ändringar i tropisk cyklonintensitet och antal tropiska cykloner är mycket osäkra. Antalet tropiska cykloner skulle kunna minska i ett framtida klimat med högre havstemperaturer⁵⁶, samtidigt som cyklonerna kan bli intensivare⁵⁷. Båda studierna utgår från projectioner av ändringar i storskaliga strömningmönster som redovisas i AR₄ men använder detaljerade modeller över begränsade områden för att simulera tropiska cykloner. Det går alltså inte att dra några generella slutsatser om scenarier

för framtida tropiska cykloner. Det är möjligt att det blir fler intensiva tropiska cykloner vid en fortsatt global uppvärmning men å andra sidan kan totala antalet tropiska cykloner minska.

Uppvärmning av troposfären och en avkylning i stratosfären

Uppvärmningen vid markytan är den tydligaste temperatursignalen idag. I den så kallade fria atmosfären (troposfären) finns också en uppvärmning, men signalen är inte lika tydlig. Uppvärmningsmönstret stämmer inte helt överens med vad som förväntas utifrån fysikaliska grunder, vilket har varit föremål för en intensiv diskussion i den vetenskapliga litteraturen. Under 2008 klargör ett flertal studier varför avvikelserna förefaller vara stora. Dessa studier för fram nya analyser av observationsdata som stämmer mycket bättre överens med fysikaliska/teoretiska modellresultat än som tidigare har varit fallet.

Genom väderballonger har vi temperatur- vind- och fuktighetsdata sedan 1950-talet. Ett grundläggande problem är emellertid avsaknaden av tillräckligt många tillförlitliga observationer i fria atmosfären, särskilt i det tropiska området. Ett speciellt problem med väderballongernas temperaturmätningar i den övre troposfären är solstrålningens direkta inverkan. Solens strålar värmer både ballongen och temperatursensorn. Den temperatur som registreras måste därför korrigeras för systematiska felkällor som hänger samman med solstrålningen. Dessa korrektioner har gjorts på olika sätt och det har varit svårt att bedöma tillförlitligheten hos temperaturmätningar från väderballonger i övre troposfären. Sedan slutet av 1970-talet har satellitdata ökat den geografiska täckningen, men de begränsas av noggrannheten och den vertikala upplösningen.

I AR4 visades att uppvärmningstrenden de senaste 50 åren i den lägre delen av troposfären stämmer väl överens med markobservationer. I den övre delen av troposfären är uppvärmningen inte lika tydlig, medan det i stratosfären syns ett tydligt avkylningsmönster. Medan det sistnämnda stämmer överens med vad som förväntas av en ökad växthuseffekt är avsaknaden av uppvärmning i övre troposfären, särskilt i tropiska områden, inte i överensstämmelse med vad som förväntas av en ökad växthuseffekt. I tropikerna sker

en intensiv värmetransport från markytan upp till övre troposfären med hjälp av molnbildning och kondensationsuppvärmning. Vattenångan övergår i ett moln till vattendroppar och iskristaller. Denna kondensationsprocess genererar stora mängder värme. Vid en ökad växthusgasuppvärmning vid marken borde en ökad värmetransport i samband med molnbildning ge avtryck i form av en kraftig uppvärmning i övre troposfären.

Genom en noggrann kvalitetskontroll av väderballongsdata och korrektioner av systematiska fel i temperaturmätningar från övre troposfären i tropiska områden har en ny bild av uppvärmningstrenden i fria atmosfären växt fram. Över tropikerna framträder en uppvärmning som stämmer överens med satellitdata och modellsimuleringar⁵⁸. En ny metod för att bestämma uppvärmningstrenden från vindobservationer⁵⁹ visar likaså en uppvärmningstrend i övre troposfären som väl överensstämmer med resultat från fysikalisk/teoretiska beräkningar och modellsimuleringar. Fördelen med vindobservationerna är att de inte påverkas av den intensiva solstrålningen i övre troposfären och därmed inte är behäftade med samma felkällor som temperaturobserveringar från väderballonger.

Med andra ord har förbättrad kvalitetsgranskning av väderballongsdata och utvidgningar av modellobservationsjämförelser lett till en bättre samstämmighet mellan observationsdata och modellsimuleringar i övre troposfären än den som redovisades i AR4.

5 Naturliga faktorerers inverkan

Även om det framstår allt tydligare att det mesta av de klimatförändringar som idag observeras är antropogena, påverkas klimatet förstås även av naturliga faktorer. Det klimat som råder är vid varje tillfälle en kombination av extern påverkan samt klimatsystemets internt genererade variationer. Dessa olika faktorer känner vi olika bra till. Solens eventuella roll för klimatförändringarna under 1900-talet är en sådan fråga. I AR₄ sammanfattades att ändringar i solens instrålning har gett en tydlig men mycket begränsad uppvärmningseffekt under samma tid som mänsklig klimatpåverkan har vuxit. Andra hypoteser, som till exempel ändringar i solens magnetfält, kosmisk strålning och molnbildning, diskuteras ingående i AR₄ men slutsatsen är att dessa faktorer sannolikt inte påverkat klimatutvecklingen under 1900-talet i någon större utsträckning. Dessa slutsatser bekräftas även i senare forskning.

Solen och klimatförändringarna idag

Ett eventuellt samband mellan den globala medeltemperaturens variationer och den så kallade solfläckscykeln diskuterades ganska tidigt. En del forskare hittade korrelationer mellan dessa, men kunde inte ge någon fysikaliskt välgrundad förklaring. Senare har man konstaterat att den globala medeltemperaturen kanske svänger med 0,2°C mellan solfläckscykeln maximum och minimum⁶⁰. Vidare föreslås i samma studie att för att förklara effekten på medeltemperaturen av de små skillnaderna i instrålningen under en solfläckscykel, måste samma förstärkningsmekanismer spela in som förstärker temperatureffekten av ökande växthusgashalter i atmosfären. Däremot har det inte konstaterats någon väsentlig ökning i solens instrålning under de senaste decennierna⁶¹. Dessa resultat ligger i stort i linje med det som angavs i AR₄.

Letandet efter en signal av snabba ändringar i molnigheten vid tillfälliga ökningar i inkommande kosmisk strålning har inte gett några entydiga resultat som skulle stödja hypoteser om ett samband⁶². De satellitdata som använts omfattar fler molnegenskaper än i tidigare studier. Vidare undersöks flera geografiska regioner. Även om laboratoriestudier indikerar⁶³ att kosmisk strålning som joniserar atmosfäriska molekyler kan leda till nya kondensations-

kärnor för molnbildning, visar inte studier av atmosfärdata att detta är av vikt globalt. Mer indirekt stöds detta av studier⁶⁴ som tyder på att mängden inkommande kosmisk strålning inte har ändrats på det sätt som hypoteserna förutsätter under de senaste decennierna då den globala medeltemperaturen har ökat.

Att solen är en naturkraft som ligger bakom en del klimatvariationer får stöd av forskning som handlar om historiska och förhistoriska perioder. Till exempel har man i en studie⁶⁵ som bland annat handlar om samband mellan solvariabilitet, temperatur och monsun-cirkulationer konstaterat att historiska samband har brutits efter 1900-talets mitt. Detta tolkas hänga ihop med en tilltagande antropogen klimatpåverkan. Studier med klimatmodellering leder till likartade slutsatser⁶⁶.

Den senaste forskningen befäster resultaten att ändringar i solens egenskaper inte kan ha spelat någon avgörande eller viktig roll för klimatutvecklingen under de senaste årtiondena. En del hypoteser som föreslagits är för komplexa för att kunna testas med tillgängliga observationsdata.

6 Klimatprojektioner

Havsnivåhöjning

Ett forskningsområde där det har hänt mycket under de allra senaste åren är bedömningar av hur den globala havsytenivån kan stiga under detta århundrade och senare. I många fall har man utvidgat det intervall som lades fram i AR4, det vill säga en global havsytenivåhöjning från 1990 till 2095 på 18-59 cm. Man bör dock erinra sig att det intervallet inte omfattade en eventuell acceleration av landisarnas avsmältning, för vilket underlaget bedömdes som alltför osäkert. Fortsatt forskning har visat att de skattningar av havsytehöjningar som redovisades i AR4 fortfarande är giltiga, men i flera fall betonas risken för betydligt större havsnivåhöjningar än så.

Beräkningar finns som visar att världshaven kan stiga med upp mot 0,8 meter fram till år 2100 om isavsmältningen sker i en snabb takt⁶⁷. I samma studie visas också att en havsnivåhöjning över 2 meter fram till år 2100 är fysikaliskt orimlig och en stigning på 2 meter skulle kräva att alla de ingående osäkerheterna drar åt samma håll.

I en ansats som handlar om den minsta tänkbara havsytenivåhöjningen kommer en studie fram till omkring 0,5 meter⁶⁸. Strikt taget handlar denna forskning om hur mycket alpina glaciärer och liknande (de stora landisarna är inte medräknade) kommer att fortsätta bidra till havsnivåns höjning på grund av den redan inträffade globala uppvärmningen. Detta fås till cirka 0,18 meter, vilket tillsammans med en tänkbar fortsatt termisk expansion⁵ skulle ge en global havsnivåhöjning på minst 0,5 meter fram till år 2100. Ett antagande om en fortsatt uppvärmnings effekt på alpina glaciärer under 2000-talet ökar detta till knappt 0,7 meter.

En del av argumentationen för en betydligt större havsnivåhöjning än vad som tidigare projicerats förs med stöd av kunskaper om historiska klimatperioder i samband med den senaste istiden (i storleksordningen 0,7-1,5 m över 100 år)^{69,70} och klimatperioder ännu längre tillbaka i tiden^{71,72}. Likartade slutsatser baseras även på en extrapolation^{73,74} av det senaste århundradets observerade

havsyttenivåhöjningar eller förenklad modellering som kalibrerats med kunskaper om historiska havsnivådata⁷⁵. En svaghet med att utnyttja historiska perioder är de stora skillnader som kan finnas jämfört med idag i grundläggande egenskaper hos klimatsystemet, till exempel fördelning av isvolymen mellan istäcken på norra halvklotet och i Antarktis, samt eventuella icke-linjära samband och återkopplingar inom klimatsystemet.

Tröskeleffekter

Tröskeleffekter ("tipping points", se figur 8) innebär att det i klimatsystemet finns kritiska tröskelvärden vars överskridande signifikant påverkar en tydlig effekt, till exempel en kraftig isavsmältning eller en plötslig ökning av växthusgashalterna. Tröskleffekter har sedan ganska länge diskuterats i samband med kunskapsläget om klimatförändringar, under namn som till exempel "abrupta förändringar" eller "plötsliga klimatförändringar". Ett ofta citerat exempel är en eventuell kollaps av Golfströmmenⁱ vilket skulle få följderna för klimatutvecklingen över Nordatlanten och i närliggande regioner. Några andra exempel är en möjlig avsmältning av landisarna på Grönland eller delar av Antarktis (till exempel den västantarktiska shelfisen, WAIS)^{76,77}, vilket skulle öka havsyttenivåns höjning. Andra exempel är en möjlig omvandling av Amazonas regnskogar till savanner, utflöden av metangas från tinande permafrostområden^{78,79,80} eller från hydrater⁸¹. Skulle det sistnämnda ske, kan följden bli kraftigt höjda växthusgashalter i atmosfären och än större klimatförändringar än de som hittills förutsetts. Alternativt skulle än större utsläppsminskningar behövas för en klimatstabilisering.

Det saknas i mångt och mycket kvantitativa kunskaper om var de olika tröskeleffekterna finns i termer av antingen storleken eller hastigheten på globala och regionala klimatförändringar.

ⁱ Egentligen menas en förändring i den storskaliga havscirkulationen på Nordatlanten.



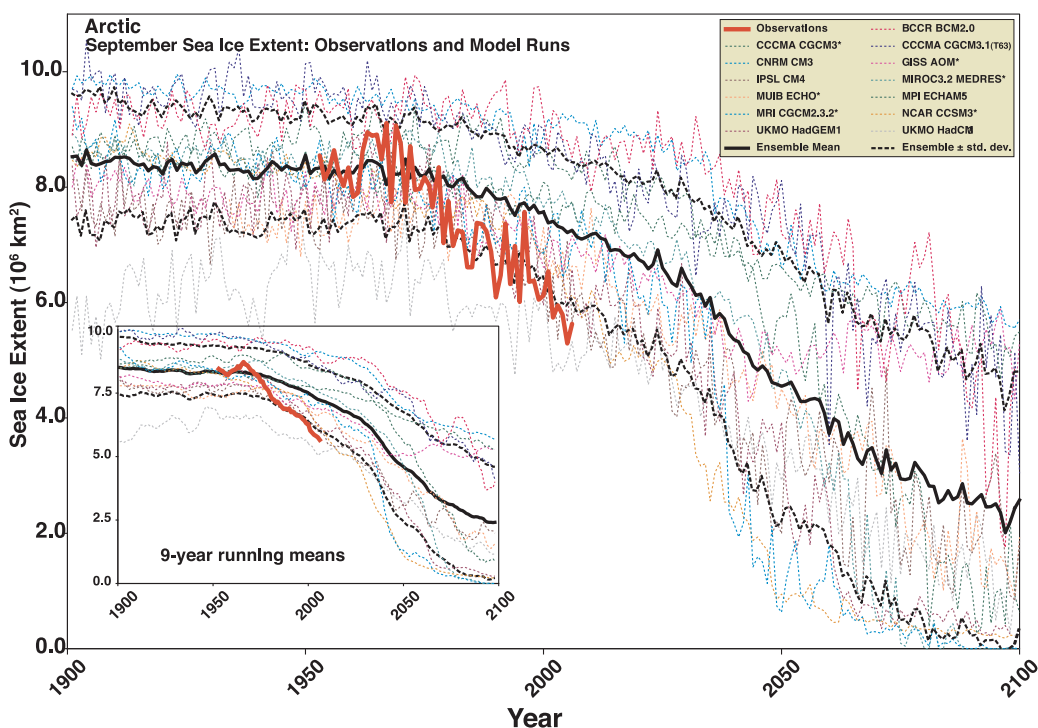
Figur 8. Olika tänkbbara tröskeleffekter i jordsystemet⁸²

© Copyright 2008 National Academy of Sciences, U.S.A.

Ett sätt att belysa dessa frågor är via expertbedömningar⁸². Både sannolikheten för att en fortsatt global uppvärmning kan leda till att kritiska tröskelvärden passeras samt säkerheten i kunskaperna om respektive tröskeleffekter bedöms. Bedömningen leder till slutsatsen att frågan om tröskeleffekter är relevant. De mest överhängande tröskeleffekterna i klimatsystemet är tillbakadragandet av den arktiska havsisen och en hastig avsmältning av Grönlandsisen. Grönlandsisens effekter på världshavens nivå har diskuterats ovan i samband med "Klimatprojektioner". Projektioner av havsisen i Arktis diskuteras nedan.

Under sensommaren och början av hösten 2007 uppmättes rekordlåga nivåer av havsistäcket i Arktis⁸³. Havsistäcket var nästan 50% mindre än medelstäcket under perioden 1950 till 1970⁸⁴. I AR4 diskuterades den pågående minskningen av istäcket i Arktis ingående och en tydlig nedåtgående trend sedan mitten av 1900-talet finns dokumenterad. Ändå kom den drastiska minskningen år 2007 som en överraskning. Det har även diskuterats som en "tipping point"⁸⁵. Det finns argument för att vi nått ett kritiskt tröskelvärde i utbredningen av havsis i Arktis men det finns också forskare som argumenterar emot detta synsätt⁸⁶. Havsisens utbredning beror både på energibalansen i Arktis under isavsmältningssäsongen, utbredningen av is under den föregående vinterperioden och cirkulationsmönster i atmosfären och i havet^{87,88}. Under 2007

samverkade flera av dessa faktorer vilket resulterade i en markant avsmältning under sommaren⁸⁹. År 2008 blev också ett år med lite sensommaris i Arktis, även om den kraftiga avsmältningen inte påbörjades förrän i augusti. Under vissa år samverkar de olika faktorerna medan under andra år kan till exempel atmosfärcirkulationen vara annorlunda och hindra en snabb avsmältning under delar av sommarsäsongen. Hur ett visst år kommer att bli är nästintill omöjligt att förutsäga. Ismängden kommer därför fortsättningsvis att variera från år till år. Det är emellertid troligt att trenden med minskande havsis kommer att fortsätta i takt med den globala uppvärmningen (se figur 9)⁹⁰.



Figur 9. Beräkningar av historiska och framtida ändringar av Arktis havsis⁹¹

Ett flertal modeller från CMIP3¹ har analyserats. Den tjocka röda kurvan visar den observerade utvecklingen fram till och med 2006.

Projektioner av framtida isavsmältning har gjorts med hjälp av klimatmodeller under antaganden om ökande växthusgashalter⁹¹. Simuleringarna visar tydligt ett fortsatt minskande istäcke men ingen simulering lyckades fånga den kraftiga avsmältningen år 2007-2008. Även avsmältningstakten under de senaste årtiondena är större än den i modellsimuleringarna. Det är oklart varför modellerna underskattar takten i avsmältningen. Energibalansen i det arktiska området är känslig för en rad faktorer kring vilka vi idag endast har en begränsad kunskap. Exempel på sådana faktorer är molnigheten, atmosfärens och havens värmetransport⁹² samt istäckets tjocklek⁹³. Mängden flerårig is i den arktiska havsbassängen har minskat kraftigt, en 50%-ig minskning har påvisats under de senaste 50 åren⁹⁴. Minskningen av flerårig is innebär att den ettåriga is som bildas varje vintersäsong blir mer utbredd. Den ettåriga isen är tunnare än flerårsisen och smälter därför lättare under sommarsäsongen⁹⁵. Vi kan därför förvänta oss en fortsatt minskning av havsistäcket i Arktis. När Arktis blir isfritt under någon del av sommaren är mycket svårt att förutsäga men det skulle kunna inträffa någon gång framemot mitten av detta århundrade^{90,91}.

7 *Hur stora kan klimatförändringarna bli?*

Klimatkänsligheten

Klimatkänsligheten är ett mått på hur stor temperaturökningen blir vid en viss ändring av atmosfärens koldioxidhalt (man kan även tänka i termer av koldioxidekvivalenter, om än med viss försiktighet). Ändringar av koldioxidhalten påverkar växthuseffekten som i sin tur leder till en ändrad temperatur vid jordytan. I AR4 sammanfattas kunskapsläget så att temperaturökningen vid jordytan för en fördubbling av koldioxidhalten ligger någonstans mellan 2 och 4,5°C med en bästa skattning kring 3°C. Vidare anges att det är osannolikt att känsligheten är mindre än 1,5°C, medan högre värden än 4,5°C inte kan uteslutas. I flera studier under senare år har både justeringar uppåt och nedåt föreslagits. En kort sammanfattning av klimatsystemets strålningsbalans och de faktorer som påverkar strålningsbalansen, som bakgrund för diskussionen nedan, redovisas i Appendix A.

En ny studie visar hur tidigare uppskattningar av klimatkänsligheten från komplexa modeller kan sammanfattas i en mycket enkel modell. En tydlig slutsats är att osäkerheten i riktning mot en högre klimatkänslighet är mer sannolik än osäkerheter i riktning mot en lägre klimatkänslighet⁹⁶, vilket även påpekades i AR4. Samtidigt har den gängse bilden av klimatkänsligheten ifrågasatts då man pekat på osäkerheter i havens tröghet⁹⁷. Man argumenterar att havstemperaturen i stort sett redan anpassats till en förändrad strålningsbalans och därför skulle temperaturen vid jordytan inte öka särskilt mycket till om dagens koldioxidhalter antas vara konstanta (det vill säga klimatkänsligheten är snarare låg än hög). Detta är inte konsistent med diskussionen i AR4 som tyder på att havet inte är i energibalans. Författaren av studien som föreslog en låg klimatkänslighet har senare angett⁹⁸ att han underskattat klimatkänsligheten. Hans reviderade resultat ligger i närheten av de resultat som redovisas i AR4. Studier som tar proxy data från de senaste 700 åren som en utgångspunkt ramar likaså in en bild av klimatkänsligheten i linje med intervallet i AR4⁹⁹, om än med ett något bredare spann.

En speciell aspekt av klimatkänsligheten har också lyfts fram. Den gängse definitionen tar inte hänsyn till eventuella mer långsiktiga effekter av en uppvärmning. Om man inkluderar återkopplingen av smältande landisar, vilket är en möjlig om än fortfarande osäker konsekvens av en global uppvärmning, kan klimatkänsligheten bli runt 6°C trots att uppskattningarna av moln- och havseffekter är ungefär samma som i de studier som underbygger uppskattningen i AR4.

En aspekt av aerosoler som fått ökad uppmärksamhet är uppvärmningen från svarta kolpartiklar som sker på en höjd av någon kilometer över jordytan^{37,42}. De förekommer huvudsakligen i tropiska områden, till stor del som ett resultat av vedeldning. Förutom deras effekter på temperatur och skadliga effekter på människors hälsa kan kolpartiklarna också bidra till en förändring av tropiska nederbördsmönster. Detta fenomen kan ha påverkat monsunregnen över Indien och delar av Himalaya under de senaste decennierna⁴². Lokalt i starkt förorenade områden kan uppvärmningseffekten från kolpartiklar överstiga den uppvärmning som ökningen av växthuseffekten ger upphov till.

En ökad växthuseffekt leder till mer vattenånga i luften som i sin tur förstärker uppvärmningen. Detta är faktiskt den starkaste återkopplingen som vi känner till, och därmed central i klimatberäkningar. I AR4 konstateras att framförallt satellitmätningar visar att atmosfärens vattenångeinnehåll ökat under slutet av 1900-talet i takt med ökande temperaturer. Detta har bekräftats i senare studier^{100,101,102}. Ett undantag utgör en studie¹⁰³ som påvisar att vattenångehalten minskat i övre delen av den tropiska troposfären. Här stödjer man sig på ett speciellt dataset, en av de så kallade återanalyserna, från NCEP/NCAR. Det är känt att denna återanalys är behäftad med svagheter i behandlingen av satellitdata och att i tropikerna kommer fuktighetsinformationen enbart från radiosonder. Trots avsaknaden av en fuktighetsökning i den tropiska övre troposfären uppvisar denna återanalys en uppvärmningstrend som motsvarar den som hittats i andra återanalyser, till exempel ERA-40. Vidare, när man undersöker hur atmosfärens halt av vattenånga svarar på temperaturvariationer¹⁰⁴, uppstår en

god överensstämmelse mellan observationer och beräkningar med klimatmodeller. Detta stödjer uppskattningarna i AR4 av klimatkänslighetens storlek.

Den oundvikliga fortsatta uppvärmningen

De senaste årens forskning har även berört vad den minsta – oundvikliga – globala temperaturhöjningen är. I AR4 togs det upp att om växthusgashalterna hade stabiliserats i atmosfären till nivåerna som uppmättes runt år 2000, skulle jorden i framtiden bli drygt en halv grad varmare.

Skattningar av aerosolers strålningspåverkan visar att osäkerheten kan vara större än vad som anges i AR4^{105,106}. Enligt en del studier är effekten större än tidigare beräkningar visat och i så fall skulle vi få en större oundviklig fortsatt uppvärmning vid varje stabiliseringsnivå. Man har dock även hävdad att beräkningar av framtida klimatändringar inte påverkas så mycket av aerosolosäkerheten eftersom den ökande växthusgasdrivningen dominerar så kraftigt över aerosoldrivningen¹⁰⁷.

Ytterligare ett perspektiv på den oundvikliga fortsatta uppvärmningen fås när inte bara klimatets utan även samhällets tröghet¹⁰⁸ vägs in, det vill säga att det tar tid att väsentligt minska utsläppen. Föga överraskande kommer man fram till att den fortsatta temperaturhöjningen då är större än annars. Lika väntat är resultatet att antaganden om bestämda utsläppsminskningar minskar klimatförändringarna väsentligt, kanske närmare en halvering av det ursprungliga temperaturintervallet. För en rad scenarier med bestämda utsläppsminskningar halveras i det närmaste den kommande uppvärmningen fram till år 2100 räknat från 1990. Detta innebär en minskning av uppvärmningen med 0,3-3,4°C. Den uppvärmning som ändå återstår ligger i intervallet 0,5-4,4°C. Hur stor den fortsatta globala uppvärmningen kan bli beror därför i första hand på utsläppen.

I mer kompletta betraktelser skiljs dessutom mellan klimatpåverkan som blir långvarig (koldioxidutsläpp) och klimatpåverkan som försvinner snabbt (partiklar) eller i alla fall klingar av relativt snabbt (till exempel metan). Skulle partiklars klimatpåverkan vara

större än som angetts i AR4¹⁰⁹, kan växthusgasutsläppen hittills orsaka en oundviklig temperaturökning på minst 2,4°C jämfört med förindustriella temperaturnivåer. De 2,4 graderna består dels av den redan konstaterade uppvärmningen dels den delen som än så länge maskerats av havets långsamma respons och antropogena atmosfäriska partiklars avkylande effekt. Samtidigt kan man påminna sig att antropogena växthusgaser som metan och troposfärozon, liksom partiklarna, skulle kunna reduceras relativt effektivt¹¹⁰. Detta innebär i sin tur att även om det skulle bekräftas att partiklars klimatpåverkan underskattas i AR4, behöver det inte leda till minst 2,4°C uppvärmning, om metan och troposfärozonhalten skulle klinga av i samma takt som partikelhalterna.

Att klimatförändringar som orsakas av antropogena utsläpp är mer eller mindre oåterkalleliga för en lång tid framöver är i sig inte nytt, men aktuell forskning har mer konkret visat detta¹¹¹.

Kolsänkorna kan förändras när klimatet förändras

Det är väl etablerat att de naturliga kolsänkorna som finns i havet samt i biosfären på land tar emot cirka hälften av de antropogena bruttoutsäppläppen av koldioxid. I AR4 belystes hur dessa sänkor efterhand kan bli mindre effektiva, vilket för varje given utsläppsutveckling skulle ge en positiv återkoppling med större temperaturhöjning som följd¹¹². Den terrestra sänkan kan till och med omvandlas till en källa.

Att ekosystemens förmåga att binda kol kan försvagas vid fortsatt global uppvärmning får stöd av senare studier^{113,114,115,116,117,118}. Till exempel kan en utbredd torka påverka terrestra kolsänkor. Som redan nämnts i AR4, kan detta öka den globala uppvärmningen jämfört med stabila kolsänkor, vilket i sin tur minskar det "utsläppsutrymme" som finns om klimatförändringar ska begränsas på ett givet sätt.

En regional försvagning av havssänkan har noterats i Södra Atlanten kring Antarktis sedan början av 1980-talet¹¹⁹. Det spekuleras att orsaken kan vara en förändring i det regionala vindklimatet som ändrar omsättningen av koldioxid mellan havet och atmosfä-

ren. Vindförändringarna i sin tur antas bero på den antropogena uppvärmningen eller, som tidigare redan berörts, även på förtunningen av ozonskiktet över Antarktis⁴⁸. Denna utveckling förväntas fortsätta framgent i takt med temperaturhöjningarna. Detta är ett exempel på en förändring (försvagning) av den fysikaliska koldioxidsänkan. När det gäller den biologiska sänkan (plankton), skulle den kunna bli något effektivare^{120,121}. Enligt nya studier, har kolsänkornas effektivitet minskat något i början av 2000-talet, inte minst havssänkan.

Debatten om 350 ppm

Det vi vet om klimatsystemet från mätningar, studier av orsaker bakom tidigare klimathändelser och experiment med klimatmodeller är basalt i diskussioner och beslut om åtgärder. Den naturvetenskapliga kunskapsbasen är en nödvändig förutsättning för att bedöma hur olika åtgärder kan påverka det framtida klimatet. I AR4 betonas att vi vet tillräckligt mycket för att med stor säkerhet kunna säga att de ökande växthusgashalterna har påverkat jordens klimat. Vi vet också att framtida koldioxidhalter kan ge klimatändringar som kraftigt påverkar stora delar av jordens befolkning negativt. Forskningen efter AR4 lägger ytterligare pusselbitar till kunskapen om klimatsystemet och det finns inte mycket som försvagar de slutsatser som fördes fram i AR4. Snarare visar resultaten att effekterna av uppvärmningen är kraftigare än vad vi hittills trott och att framtida ändringar kan bli större än vad som tidigare visats. Brådskan med att vidta åtgärder för att minska utsläppen och anpassa oss till framtida klimatändringar har därför snarare blivit större än mindre om vi jämför med kunskapsläget för några år sedan.

Den så kallade 350 ppm debatten är ett belysande exempel^{71,72,122}. Den utgår bland annat från klimatepisoder mycket långt tillbaka i tiden. Om landisarna skulle reagera betydligt snabbare än vad som hittills antagits, skulle det kunna vara aktuellt att förändra den gängse definitionen av klimatkänsligheten och öka den till omkring 6°C. Följdriktigt läggs förslag fram om att atmosfärens koldioxidhalt borde stabiliseras inledningsvis på runt 350 ppm, för att senare läggas på en ännu lägre nivå. Vidare argumenteras för en gräns för högsta "acceptabel" global uppvärmning på 1,7°C, vilket

vore lägre än EU:s tvågradersmål.

Varje klimatstabiliseringsmål är förknippat med en sannolikhet för uppfyllelse, eller en risk för att målet inte uppnås, efter att den framtida utsläppsutvecklingen är fastställd. Detta beror dels på osäkerheten kring klimatsystemets känslighet samt eventuella ändringar i kolsänkornas kapacitet¹²³. Dessa aspekter har redan diskuterats i denna rapport. Därmed är det inte enkelt att besluta om klimatmål, men vetenskapen ger ändå utgångspunkter som en vägledning för beslut^{124j}.

ⁱ EU Climate Change Expert Group 'EG Science' 2008. The 2°C target. Information reference document 55p. (http://ec.europa.eu/environment/climat/pdf/brochure_2c.pdf 2009-04-06)

8 *Slutsatser*

Klimatforskningen har under de 2-3 senaste åren ytterligare fördjupat vår kunskap om klimatsystemet. Vi sammanfattar nedan de punkter där vi anser att ny kunskap tyder på en något modifierad eller nyanserad bild av klimatsystemets egenskaper jämfört med den som redovisades i AR4:

1. Växthusgashalterna i atmosfären fortsätter att öka. Koncentrationen av koldioxid uppgår år 2008 till 384 ppm. Ökningstakten är högre än tidigare. Det finns även indikationer att koncentrationen av metan har börjat stiga igen efter att ha varit ganska konstant under flera års tid.
2. Den globala medeltemperaturen år 2008 ligger cirka 0,1°C lägre än under de närmast föregående åren. En temperaturskillnad på 0,1°C är inom gränserna för den osäkerhet som är förknippad med globala temperaturanalyser och dessutom inom ramen för en karakteristisk mellanårsvariabilitet som beror på havets och atmosfärens växelverkan. Året 2008 tillhör ändå de tio varmaste åren sedan år 1850 och den senaste 10-årsperioden är varmare än den föregående 10-årsperioden. Temperaturtrenden är stigande.
3. Data om höjningen av havsytans nivå har studerats vidare för tidsperioderna 1961-2003 och 1993-2003. Resultat tyder på att höjningstakten har varit högre under den senare perioden. När observationsunderlaget förlängs med data från de senaste åren förefaller höjningstakten åter ha blivit något lägre, men fortfarande högre än under 1900-talet.
4. En markant minskning av den arktiska havsisen inträffade under sensommaren 2007 och 2008. Den kraftiga uppvärmningstrenden i Arktis är sannolikt nära knuten till den globala uppvärmningen. Även på Antarktis västra delar har nu en uppvärmning konstaterats, som också är knuten till den globala temperaturhöjningen.
5. I huvudsak ligger nya skattningar om klimatkänslighet inom de osäkerhetsintervall som redovisades i AR4.

6. Nya studier av landismassors känslighet för uppvärmning och därmed deras avsmältningshastighet pekar på att havsytan kan höjas mer än vad som angavs i AR4, det vill säga kring en meter. Studierna är dock behäftade med stor osäkerhet. Det anges vidare att det är fysikaliskt orimligt att vattennivån stiger globalt mer än 2 meter under de närmaste 100 åren.
7. En signifikant ändring av nederbördsmängderna under perioden 1950-2000 har kunnat bestämmas utifrån observerade data. Denna ändring stämmer med vad som förväntas som ett resultat av en växthusgasuppvärmning, samtidigt som den observerade trenden överstiger modellresultaten.
8. Exempel på möjliga tröskeeffekter i klimatsystemet har publicerats. Den dramatiska havsisminskningen i Arktis (se punkt 4 ovan) kan vara ett exempel på en tröskeeffekt om den blir bestående. I så fall är detta det första exemplet på en observerad tröskeeffekt.
9. Ny forskning tyder på att det kan bli svårare än vad som hittills bedömts att begränsa den globala uppvärmningen till maximalt 2°C. Dels har kanske partiklars klimatpåverkan underskattats, vilket skulle innebära att den intecknade växthusgasuppvärmningen är större än vad som hittills antagits, dels stödjer senare forskning farhågorna om att kolsänkorna kan bli mindre effektiva i framtiden.

Forskning är en ständigt pågående process. IPCC syftar till att med regelbundna mellanrum redovisa kunskapsläget inom klimatforskningen. Nya IPCC-rapporter publiceras med 6-7 års mellanrum. Det tar tid att genomföra en omfattande granskning av forskningsläget. Det räcker oftast inte med ett nytt publicerat arbete för att etablera ny kunskap, utan en mer allsidig belysning behövs av en frågeställning för att dra slutsatser.

Vi har inte kunnat göra en sammanställning med samma tyngd och omfattning som en IPCC rapport. Vi har utgått från vår kännedom om och kartläggning av den litteratur som publicerats sedan 2006 och belyst nya utvecklingar inom områden som behandlades i AR4. Vår bedömning är att ny forskning som bedrivits

sedan 2006 bekräftar tidigare forskningsresultat om den pågående klimatutvecklingen, mänsklig klimatpåverkan och möjliga framtida klimatändringar. Kunskapsläget har inte förändrats på något väsentligt sätt. En del nyanseringar har skett och forskningen har fortsatt att belysa områden där tillfredsställande underlag har saknats.

Slutsatserna i den naturvetenskapliga delen av IPCC rapporten från 2007 står sig fortfarande väl sett i ljuset av nya forskningsresultat som publicerats under de senaste 2-3 åren. På vissa områden har tidigare skattningar bekräftats, på andra områden har justeringar gjorts. Inom några områden har en mer nyanserad bild trätt fram. Kunskapsläget inom klimatforskningsområdet är inte statistiskt, men dess huvudsakliga grunder framstår även i ljuset av den senaste forskningen som robust.

Appendix A: *Sammanfattning av klimatsystemets strålningsbalans och de faktorer som påverkar strålningsbalansen*

Jordens temperatur bestäms av en balans mellan inkommande strålning från solen och utgående värmestrålning mot världsrymden. Den utgående värmestrålningen beror framförallt på jordens temperatur. Högre temperaturer leder till en ökad värmestrålning. Genom atmosfärens växthuseffekt fångas en stor del av jordytans värmestrålning upp i de lägre delarna av atmosfären. Det blir därför varmare vid jordytan än det skulle ha varit utan en växthuseffekt. En ändring av växthusgashalter i atmosfären påverkar denna effekt. Ökar till exempel koldioxidhalten fångas mer av värmestrålningen in och temperaturen vid jordytan stiger. En uppvärmning av atmosfärens lägre delar påverkar vidare vattenångemängden och molnbildningen vilket i sin tur ändrar strålningsbalansen ytterligare vid markytan. En temperaturökning leder till en ökad mängd vattenånga vilket förstärker uppvärmningen vid jordytan. Vattenånga är nämligen den mest betydelsefulla växthusgasen.

Molnighetens ändringar som ett resultat av ändringar i klimatsystemets värme- och strålningsbalans är komplexa. Beroende på hur molnigheten förändras, kan effekterna bli olika på strålningsbalansen.

- Molnen påverkar den inkommande solstrålningen genom reflektion av solstrålningen. Mer moln leder till ökad reflektion och därmed en avkylning, medan mindre moln har en motsatt effekt. Särskilt effektiv är en ökning eller minskning av molnen i den nedre delen av troposfären, på 1-2 km höjd.
- En ökad molnighet leder också till en ökning av molnens bidrag till växthuseffekten, vilket ger en uppvärmning vid jordytan. Mer molnighet på högre nivåer i troposfären, vid 5-12 km höjd, leder till en uppvärmning vid jordytan.

Dessa motsatta effekter tar delvis ut varandra. Även om nettoeffekten är liten sett i relation till molnens totala strålningseffekt så är den ändå betydelsefull. Hur molnigheten ändras vid en ökad växthuseffekt bestäms av ett komplext samspel mellan ändringar i avdunstningen, temperaturändringar, ändringar i ismoln och vat-

tendroppsmoln samt ändringar i atmosfärens cirkulationsmönster. Molnighetens ändringar är den enskilt största osäkerheten i vår förståelse av klimatsystemets känslighet för ändringar i strålningsbalansen. Därefter kommer ändringar i den totala reflektionen av solstrålningen, även kallad albedo. Förutom molnigheten påverkas albedot också av isutbredningen och landytans egenskaper. Eftersom istäcket minskar ju varmare det blir finns här ytterligare en positiv återkopplingsmekanism i klimatsystemet.

Slutligen finns en tröghet i klimatsystemet som styrs av havet. En obalans mellan utgående värmestrålning och inkommande solstrålning vid havsytan påverkar havets temperatur långsamt, det tar hundratals år att uppnå strålningsbalans över havet efter en ökning av växthusgashalterna. Detta beror på det tämligen långsamma utbytet av vattenmassorna närmast ytan och i världshavens djup.

Noter

- ¹ Meehl, G. A. et al. 2007. THE WCRP CMIP₃ Multimodel Dataset: A New Era in Climate Change Research. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 88:9, 1383-1394.
- ² Smith, D. M. et al. 2007. Improved surface temperature prediction for the coming decade from a global climate model. *Science* 317, 796-799.
- ³ Keenlyside, N. S. et al. 2008. Advancing decadal-scale climate prediction in the North Atlantic sector. *Nature* 453, 84-88. Doi:10.1038/nature06921.
- ⁴ Domingues, C. M. et al. 2008. Improved estimates of upper-ocean warming and multi-decadal sea-level rise. *Nature* 453, 1090-1094.
- ⁵ Cazenave, A., A. Lombard and W. Llovel 2008. Present-day sea level rise: A synthesis. *Comptes Rendus Geoscience* 340, 761-770.
- ⁶ Leuliette, E. W. and L. Miller 2009. Closing the sea level budget with altimetry, Argo and GRACE. *Geophys. Res. Lett.* 36:L04608. Doi:10.1029/2008GL036010.
- ⁷ AchutaRao, K. M. et al. 2007. Simulated and observed variability in ocean temperature and heat content. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 104:26, 19768-10773.
- ⁸ Chao, B. F., Y. H. Wu and Y. S. Li 2008. Impact of artificial reservoir water impoundment on global sea level. *Science* 320:5873, 212-214.
- ⁹ Thompson, D. W. J et al. 2008. A large discontinuity in the mid-twentieth century in observed global-mean surface temperature. *Nature* 453, 646-650.
- ¹⁰ Parker, D. 2006. A demonstration that large-scale warming is not urban. *J. Climate* 19:12, 2882-2895.
- ¹¹ Jones, P. D., D. H. Lister and Q. Li 2008. Urbanization effects in large-scale temperature record, with an emphasis on China. *J. Geophys. Res.* 113:D16122. Doi:10.1029/2008JD009916.
- ¹² McKittrick, R. R. and P. J. Michaels 2007. Quantifying the influence of anthropogenic surface processes and inhomogeneities on gridded global climate data. *J. Geophys. Res.* 112:D24S09. Doi:10.1029/2007JD008465.
- ¹³ Schmidt, G. A. 2009. Spurious correlations between recent warming and indices of local economic activity. *Intl. J. Climatol.*, Published online in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com) DOI: 10.1002/joc.1831.
- ¹⁴ Overland, J. E., M. Wang and S. Salo 2008. The recent Arctic warm period. *Tellus*, 60A, 589-597.
- ¹⁵ Steig, E. J. et al. 2009. Warming of the Antarctic ice-sheet surface since the 1957 International Geophysical Year. *Nature* 457, 459-462.
- ¹⁶ Gillett, N. P. et al. 2008. Attribution of polar warming to human influence. *Nature Geoscience* 1, 750-754.
- ¹⁷ Mote, T. L. 2007. Greenland surface melt trends 1973-2007: Evidence of a large increase in 2007. *Geophys. Res. Lett.* 34:L22507. Doi:10.1029/2007GL031976.
- ¹⁸ Chen, J. L., C. R. Wilson and B. D. Tapley 2006. Satellite gravity measurements confirm accelerated melting of Greenland ice sheet. *Science* 313, 1958-1960.
- ¹⁹ Velicogna, I. and J. Wahr 2006. Acceleration of Greenland ice mass loss in spring 2004. *Nature* 443, 329-331.
- ²⁰ Van de Wal, R. S. W. et al. 2008. Large and Rapid Melt-Induced Velocity Changes in the Ablation Zone of the Greenland Ice Sheet. *Science* 321, 111-113.
- ²¹ Nick, F. M., A. Vieli, I. M. Hovat and I. Joughin 2009. Large-scale changes in Greenland outlet glacier dynamics triggered at the terminus. *Nature Geoscience* 2, 110-114.

- ²² Holland, D. M., R. H. Thomas, B. de Young, M. H. Ribergaard and B. Lyberth 2008. Acceleration of Jakobshavn Isbrae triggered by warm subsurface ocean waters. *Nature Geoscience* 1, 659-664.
- ²³ Rignot, E. et al. 2008. Recent Antarctic ice mass loss from radar interferometry and regional climate modelling. *Nature Geoscience* 1, 106-110.
- ²⁴ Cunningham, S. A. et al. 2007. Temporal variability of the Atlantic meridional overturning circulation at 26.5°. *Science* 317, 935-938.
- ²⁵ Olsen, S. M., B. Hansen, D. Quadfasel and S. Østerhus 2008. Observed and modelled stability of overflow across the Greenland-Scotland ridge. *Nature* 455, 519-523.
- ²⁶ Mann, M. E. et al. 2008. Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 105, 13252-13257.
- ²⁷ McIntyre, M. and R. McKittrick 2009. Proxy inconsistency and other problems in millennial paleoclimate reconstructions. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 106:E11.
- ²⁸ Juckes, M. N. et al. 2007. Millennial temperature reconstruction intercomparison and evaluation. *Clim Past* 3, 591-609.
- ²⁹ Wahl, E. R. and C. M. Ammann 2007. Robustness of the Mann, Bradley, Hughes reconstruction of surface temperatures: Examination of criticisms based on the nature and processing of proxy climate evidence. *Clim Change* 85, 33-69
- ³⁰ Mann, M. E., S. Rutherford, E. Wahl and C. Ammann 2007. Robustness of proxy-based climate field reconstruction methods. *J Geophys Res* 112:D12109. Doi:10.1029/2006JD008272.
- ³¹ Lee, T. C. K., Zwiers, F. W. and M. Tsao 2008. Evaluation of proxy-based millennial reconstruction methods. *Clim Dyn.* 31, 263-281.
- ³² Mann, M. E., R. S. Bradley and M. K. Hughes 2009. Reply to McIntyre and McKittrick: Proxy-based temperature reconstructions are robust. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 106, E10.
- ³³ Canadell, J. G. et al. 2007. Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 104:47, 18866-18870.
- ³⁴ Van Vuuren, D. P. and K. Riahi 2008. Do recent emission trends imply higher emissions forever? (Editorial) *Clim. Change* 91:237-248.
- ³⁵ Rigby, M. et al. 2008. Renewed growth of atmospheric methane. *Geophys. Res. Lett.* 35:L22805. Doi:10.1029/2008GL036037.
- ³⁶ Vautard, R., Yiou, P. and G. J. van Oldenborgh 2009. Decline of fog, mist and haze in Europe over the past 30 years. *Nature Geoscience* 2, 115-119.
- ³⁷ Ramanathan, V. et al. 2007. Warming trends in Asia amplified by brown cloud solar absorption. *Nature* 448, 575-578.
- ³⁸ Mischchenko, M. I. et al. 2007. Long-term satellite record reveals likely recent aerosol trend. *Science* 315, 1543.
- ³⁹ Streets, D. G., Y. Wu and M. Chin 2006. Two-decadal aerosol trends as a likely explanation of the global dimming/brightening transition. *Geophys. Res. Lett.* 33:L15806. Doi:10.1029/2006GL026471.
- ⁴⁰ Wang, K., R. E. Dickinson and S. Liang 2009. Clear sky visibility has decreased over land globally from 1973 to 2007. *Science* 323, 1468-1470.

- ⁴¹ Gustafsson, Ö. et al. 2009. Brown Clouds over South Asia: Biomass or Fossil Fuel Combustion? *Science* 323, 495-498.
- ⁴² Ramanathan, V. and G. Carmichael 2008. Global and regional climate changes due to black carbon. *Nature Geoscience* 1, 221-227.
- ⁴³ Graversen, R. G., T. Mauritsen, M. Tjernström, E. Källén and G. Svensson 2008. Vertical structure of recent Arctic warming. *Nature* 451, 53-57.
- ⁴⁴ Thorne, P. W. 2008. Arctic tropospheric warming amplification? *Nature* 455, E1-E2. (Brief communications.)
- ⁴⁵ Grant, A. N., S. Brönnimann and L. Haimberger 2008. Recent Arctic warming vertical structure contested. *Nature* 455, E4-E5. (Brief communications.)
- ⁴⁶ Bitz, C. M. and Q. Fu 2008. Arctic warming aloft is data set dependent, *Nature* 455, E3-E4. (Brief communications.)
- ⁴⁷ Graversen, R. et al. 2008. Graversen et al. reply. *Nature* 455, E4-E5. (Brief communications.)
- ⁴⁸ Cai, W. and T. Cowan 2007. Trends in Southern Hemisphere Circulation in IPCC AR4 Models over 1950-99: Ozone Depletion versus Greenhouse Forcing. *J Climate* 20, 681-693. Doi:10.1175/JCLI4028.1.
- ⁴⁹ Zhang, X., Zwiers, F. W., Hegerl, G. C., Lambert, F. H., Gillett, N. P., Solomon, S., Stott, P. A. and T. Nozawa 2007. Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends, *Nature* 448, 461-465.
- ⁵⁰ Wentz, F. J. et al. 2007. How much more rain will global warming bring? *Science* 317, 233-235.
- ⁵¹ Allan, R. P. and B. J. Soden 2008. Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes. *Science* 321, 1481-1484.
- ⁵² Saunders, M. A. and A. S. Lea 2008. Large contribution of sea surface warming to recent increase in Atlantic hurricane activity. *Nature* 451, 557-560.
- ⁵³ Santer, B. D. et al. 2006. Forced and unforced ocean temperature changes in Atlantic and Pacific tropical cyclogenesis regions. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 103:38, 13905-13910.
- ⁵⁴ Wang, C. and S.-K. Lee 2008. Global warming and United States landfalling hurricanes. *Geophys. Res. Lett.* 35:L02708, doi:10.1029/2007GL032396.
- ⁵⁵ Vecchi, G. A. and B. J. Soden 2007. Increased tropical Atlantic wind shear in model projections of global warming, *Geophys. Res. Lett.* 34, 10.1029/2006GL028905.
- ⁵⁶ Knutson, T. R., J. J. Sirutis, S. T. Garner, G. A. Vecchi and I. M. Held 2008. Simulated reduction in Atlantic hurricane frequency under twenty-first-century warming conditions. *Nature Geoscience* 1, 359-364.
- ⁵⁷ Emanuel, K., R. Sundararajan and J. Williams 2008. Hurricanes and Global Warming: Results from Downscaling IPCC AR4 Simulations. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 89, 347-367.
- ⁵⁸ Thorne, P. W. 2008. The answer is blowing in the wind. *Nature Geoscience* 1, 347-348.
- ⁵⁹ Allen, R. J. and S. C. Sherwood 2008. Warming maximum in the tropical upper troposphere deduced from thermal winds. *Nature Geoscience* 1, 399-403.
- ⁶⁰ Camp, C. D. and K. K. Tung 2007. Surface warming by the solar cycle as revealed by the composite mean difference projection. *Geophys. Res. Lett.* 34:L14703. Doi:10.1029/2007GL030207.

- ⁶¹ Foukal, P. et al. 2006. Variations in solar luminosity and their effect on the Earth's climate. *Nature* 443, 161-166.
- ⁶² Kristjánsson, J. E. et al. 2008. Cosmic rays, cloud condensation nuclei and clouds – a reassessment using MODIS data. *Atmos. Chem. Phys.* 8, 7373-7387.
- ⁶³ Svensmark et al. 2007. Experimental evidence for the role of ions in particle nucleation under atmospheric conditions. *Proc. Roy. Soc. A* 463, 385-396.
- ⁶⁴ Lockwood, M. and C. Frölich 2007. Recent opposite trends in solar climate forcings and the global mean surface air temperature. *Proc. Roy. Soc. A* 463, 2447-2460.
- ⁶⁵ Zhang, P. et al. 2008. A test of climate, sun, and culture relationships from an 1810-year Chinese cave record. *Science* 322, 940-942.
- ⁶⁶ Ammann, C. M. et al. 2007. Solar influence on climate during the past millennium: Results from transient simulations with the NCAR Climate System Model. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 104:10, 3713-3718.
- ⁶⁷ Pfeffer, W. T., J. T. Harper and S. O'Neel 2008. Kinematic Constraints on Glacier Contributions to 21st-Century Sea-Level Rise. *Science* 321, 1340-1343.
- ⁶⁸ Bahr, D. B., M. Dyurgerov and M. F. Meier 2009. Sea-level rise from glaciers and ice caps: A lower bound. *Geophys. Res. Lett.* 36:L03501. Doi:10.1029/2008GL036309.
- ⁶⁹ Carlsson, A. E. et al. 2008. Rapid early Holocene deglaciation of the Laurentide ice sheet. *Nature Geoscience* 1, 620-624.
- ⁷⁰ Rohling, E. J. et al. 2008. High rates of sea-level rise during the last interglacial period. *Nature Geoscience* 1, 38-42.
- ⁷¹ Hansen, J. et al. 2006. Global temperature change. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 103:39, 14288-14293.
- ⁷² Hansen, J. et al. 2008. Target Atmospheric CO₂: Where Should Humanity Aim? *The Open Atmospheric Science Journal* 2, 217-231.
- ⁷³ Rahmstorf, S. 2007. A Semi-Empirical Approach to Projecting Future Sea-Level Rise. *Science* 315, 368-370.
- ⁷⁴ Horton, R. et al. 2008. Sea level rise projections for current generation CGCMs based on the semi-empirical method. *Geophys. Res. Lett.* 35:L02715. Doi:10.1029/2007GL032486.
- ⁷⁵ Grinstedt, A., J. C. Moore and S. Jevrejeva 2009. Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100 AD. *Clim. Dyn.* Doi:10.1007/s000382-008-0507-2. (Published online 6 January 2009.)
- ⁷⁶ Naish, T. et al. 2009. Obliquity-paced Pliocene West Antarctic ice sheet oscillations. *Nature* 458, 322-328.
- ⁷⁷ Pollard, D. and R. M. DeConto 2009. Modelling West Antarctic ice sheet growth and collapse through the past five million years. *Nature* 458, 329-332.
- ⁷⁸ Walter, K. M. et al. 2006. Methane bubbling from Siberian thaw lakes as a positive feedback to climate warming. *Nature* 443, 71-75.
- ⁷⁹ Schuur, E. A. G. et al. 2008. Vulnerability of permafrost carbon to climate change: Implications for the global carbon cycle. *BioScience* 58:8, 701-714.
- ⁸⁰ Khvorostyanov D. V., P. Ciais, G. Krinner, S. A. Zimov 2008. Vulnerability of east Siberia's frozen carbon stores to future warming, *Geophys. Res. Lett.* 35:L10703. Doi:10.1029/2008GL033639.
- ⁸¹ Fyke, J. G. and A. J. Weaver 2006. The effect of potential future climate

- change on the marine methane hydrate stability zone. *J. Climate* 19:22, 5903-5917.
- ⁸² Lenton, T. et al. 2008. Tipping elements in the Earth's climate system. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 105:6, 1786-1793.
- ⁸³ Comiso, J. C., C. L. Parkinson, R. Gersten and L. Stock 2008. Accelerated decline in the Arctic sea ice cover. *Geophys. Res. Lett.* 35, L01703, doi:10.1029/2007GL031972.
- ⁸⁴ Stroeve, J., M. Serreze, S. Drobot, S. Gearhead, M. Holland, J. Maslanik, W. Meier and T. S. Scambo 2008. Arctic sea ice extent plummets in 2007. *Eos, Trans. Amer. Geophys. Union* 89, 13.
- ⁸⁵ Winton, M. 2006. Does the Arctic sea ice have a tipping point? *Geophys. Res. Lett.* 33:L23504. Doi:10.1029/2006GL028017.
- ⁸⁶ Eisenman, I. and J. S. Wettlaufer 2009. Nonlinear threshold behavior during the loss of Arctic sea ice. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 106, 28-32.
- ⁸⁷ Ogi, M. and J. M. Wallace 2007. Summer minimum Arctic sea ice extent and the associated summer atmospheric circulation. *Geophys. Res. Lett.* 34:L12705. Doi:10.1029/2007GL029897.
- ⁸⁸ Kwok, R. 2008. Summer sea ice motion from the 18 GHz channel of AMSR-E and the exchange of sea ice between the Pacific and Atlantic sectors. *Geophys. Res. Lett.* 35:L03504. Doi:10.1029/2007GL032692.
- ⁸⁹ Perovich, D. K., J. A. Richter-Menge, K. F. Jones and B. Light 2008. Sunlight, water, and ice: Extreme Arctic sea ice melt during the summer of 2007. *Geophys. Res. Lett.* 35:L11501. Doi:10.1029/2008GL034007.
- ⁹⁰ Serreze, M. C., M. M. Holland and J. Stroeve 2007. Perspectives on the Arctic's shrinking sea-ice cover. *Science* 315, 1533-1536.
- ⁹¹ Stroeve, J., M. Holland, W. Meier, T. Scambos and M. Serreze 2007. Arctic sea ice decline: Faster than forecast. *Geophys. Res. Lett.*, 34:L09591. Doi:10.1029/2007GL029703.
- ⁹² Steele, M., W. Ermold and J. Zhang 2008. Arctic Ocean surface warming trends over the past 100 years. *Geophys. Res. Lett.* 35:L02614. Doi:10.1029/2007GL031651.
- ⁹³ Rothrock, D. A., D. B. Percival and M. Wensnahan 2008. The decline in arctic sea-ice thickness: Separating the spatial, annual, and interannual variability in a quarter century of submarine data. *J. Geophys. Res.* 113:C05003. Doi:10.1029/2007JC004252.
- ⁹⁴ Nghiem, S. V., I. G. Rigor, D. K. Perovich, P. Clemente-Colon, J. W. Weatherly and G. Neumann 2007. Rapid reduction of Arctic perennial sea ice. *Geophys. Res. Lett.* 34:L19504. Doi:10.1029/2007GL031138.
- ⁹⁵ Maslanik, J. A., C. Fowler, J. Stroeve, S. Drobot, J. Zwally, D. Yi and W. Emery 2007. A younger, thinner Arctic ice cover: Increased potential for rapid, extensive sea-ice loss. *Geophys. Res. Lett.* 34:L24501. Doi:10.1029/2007GL032043.
- ⁹⁶ Roe, G. H. and M. B. Baker 2007. Why is climate sensitivity so unpredictable? *Science* 318, 629-632.
- ⁹⁷ Schwartz, S. E. 2007. Heat capacity, time constant, and sensitivity of Earth's climate system, *J. Geophys. Res.* 112:D24S05. Doi:10.1029/2007JD008746.
- ⁹⁸ Schwartz, S. E. 2008. Reply to comments by G. Foster et al., R. Knutti et al., and N. Scafetta on "Heat capacity, time constant, and sensitivity of Earth's cli-

- mate system". *J. Geophys. Res.* 113:D15105. Doi:10.1029/2008JD009872.
- ⁹⁹ Hegerl, G. C. et al. 2006. Climate sensitivity constrained by temperature reconstructions over the past seven centuries. *Nature* 440, 1029-1032.
- ¹⁰⁰ Santer, B. D. et al. 2007. Identification of human-induced changes in atmospheric moisture content. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 104, 15248-15253.
- ¹⁰¹ Wentz, F. J., L. Ricciardulli, K. Hilburn and C. Mears 2007. How Much More Rain Will Global Warming Bring? *Science* 317, 233-235.
- ¹⁰² Willett, K. M., N. P. Gillett, P. D. Jones and P. W. Thorne 2007. Attribution of observed surface humidity changes to human influence. *Nature* 449, 710-712.
- ¹⁰³ Paltridge, G., A. Arking and M. Pook 2009. Trends in middle- and upper-level tropospheric humidity from NCEP reanalysis data. *Theor. Appl. Climatol.* Doi:10.1007/s00704-009-0117-x. (Published online 26 February 2009.)
- ¹⁰⁴ Dessler, A. E., Z. Zhang and P. Yang 2008. Water-vapor climate feedback inferred from climate fluctuations. *Geophys. Res. Lett.* 35: L20704. Doi:10.1029/2008GL035333.
- ¹⁰⁵ Schwartz, S. E., R. J. Charlson and H. Rodhe 2007. Quantifying climate change – too rosy a picture? *Nature Reports Climate Change.* Doi:10.1038/climate.2007.22.
- ¹⁰⁶ Knutti, R. 2008. Why are climate models reproducing the observed global surface warming so well? *Geophys. Res. Lett.* 35:L18704. Doi:10.1029/2008GL034932.
- ¹⁰⁷ Kiehl, J. T. 2007. Twentieth century climate model response and climate Sensitivity. *Geophys. Res. Lett.* 34:L22710. Doi:10.1029/2007GL031383.
- ¹⁰⁸ Van Vuuren, D. P. et al. 2008. Temperature increase of 21st century mitigation scenarios. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 105:40, 15258-15262.
- ¹⁰⁹ Ramanathan, V. and Feng, Y. 2008. On avoiding dangerous anthropogenic interference with the climate system: Formidable challenges ahead. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 105:38, 14245-14250.
- ¹¹⁰ Schellnhuber, H. J. 2008. Global warming: Stop worrying, start panicking? *Proc. Natl. Acad. Sci.* 105:38, 14239-14240. Doi:10.1073/pnas.0807331105.
- ¹¹¹ Solomon, S. et al. 2009. Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 106:6, 1704-1709.
- ¹¹² Matthews, H. D. and D. W. Keith 2007. Carbon-cycle feedbacks increase the likelihood of a warmer future *Geophys. Res. Lett.* 34: L09702. Doi:10.1029/2006GL028685.
- ¹¹³ Heimann, M. and M. Reichstein 2008. Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks *Nature* 451, 289-292
- ¹¹⁴ Piao, S. et al. 2008. Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming. *Nature* 451, 49-52. Doi:10.1038/nature06444.
- ¹¹⁵ Scheffer, M., V. Brovkin and P. Cox 2006. Positive feedback between global warming and atmospheric CO₂ concentration inferred from past climate change. *Geophys. Res. Lett.* 33: L10702. Doi:10.1029/2005GL025044.
- ¹¹⁶ Phillips, O. L. et al. 2009. Drought sensitivity of the Amazon rainforest. *Science* 323, 1344-1346.
- ¹¹⁷ Kurz, W. A. et al. 2008. Mountain pine beetle and forest carbon feedback to climate change. *Nature* 452, 987-990. Doi:10.1038/nature06777.
- ¹¹⁸ Buermann, W. et al. 2007. The changing carbon cycle at Mauna Loa Observa-

tory. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 104:11, 4249-4254.

¹¹⁹ Le Quere, C. et al. 2007. Saturation of the Southern Ocean CO₂ Sink Due to Recent Climate Change. *Science* 316, 1735-1738

¹²⁰ Riebsell, U. et al. 2007. Enhanced biological carbon consumption in a high CO₂ ocean. *Nature* 450, 545-548.

¹²¹ Hofmann, M. and H.-J. Schellnhuber 2009. Oceanic acidification affects marine carbon pump and triggers extended marine oxygen holes. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 106:9, 3017-3022.

¹²² Hansen, J. et al. 2007. Dangerous human-made interference with climate: a GISS model study. *Atmos Chem Phys* 7, 287-312.

¹²³ Anderson, K. and A. Bows 2008. Reframing the climate change challenge in light of post-2000 emission trends. *Phil. Trans. R. Soc. A.* Doi:10.1098/rsta.2008.0138. (Published online.)

¹²⁴ Smith, J. B. et al. 2009. Assessing dangerous climate change through an update of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) "reasons for concern". *Proc. Natl. Acad. Sci.* 206:11, 4133-4137. Doi:10.1073/pnas.0812355106.



REGERINGSKANSLIET

Statsrådsberedningen

103 33 Stockholm