

# Klimatförändringar

av Energiutskottet och Miljökommittén  
vid Kungl. Vetenskapsakademien



## Inledning

Verksamheten inom Kungl. Vetenskapsakademiens Energiutskott syftar till att få fram kunskap om aktuella energifrågor med tonvikt på vetenskapliga, tekniska och miljömässiga aspekter. Perspektivet sträcker sig cirka 50 år framåt i tiden och är globalt. Trender i tillförsel och användning av energi samt pågående forskning, utveckling och demonstrationsprojekt ligger till grund för analysen. Samverkan sker med olika internationella fora, såväl inom som utom den akademiska världen. Därtill arrangeras utfrågningar av relevant expertis samt anordnas seminarier och andra möten.

Kunskap om globala förändringar i miljö och klimat till följd av storskalig användning av fossila bränslen är givetvis av särskilt intresse. Vid förbränning av dessa bränslen bildas koldioxid samtidigt som svavel och tungmetaller, däribland radioaktiva ämnen, släpps ut. Den åtföljande aerosolbildningen leder till ökat dis och förändringar i moln och nederbörd med stora miljö- och hälsoproblem som följd. Luftföroreningar, speciellt i utvecklingsländernas storstäder, ger ett mycket stort antal dödsfall på grund av hjärt-, kärl- och lungsjukdomar samt av cancer.

Klimatförändringar från den i atmosfären ökande halten av koldioxid har kommit allt mer i fokus framför allt i den massmediala debatten. Klart är att mänskligheten står inför mycket stora utmaningar för att få fram hållbar och miljövänlig energi. De fossila bränslena kommer dock att vara helt nödvändiga även under de kommande 50 åren varför det är angeläget att i mesta möjliga mån reducera deras negativa inverkan på miljön.

I syfte att få en klarare bild av de fossila bränslenas inverkan på klimatet har Energiutskottet i samarbete med Miljökommittén genomfört en studie om klimatförändringar. Syftet har varit att få djupare insikter i de överväganden som görs av IPCC, the Intergovernmental Panel on Climate Change, med beaktande av den kritik som framförs mot IPCC:s slutsatser. I en hearing den 16 februari 2006 utfrågades en panel bestående av tre företrädare för IPCC: Lennart Bengtsson, professor i dynamisk meteorologi; Bert Bolin, professor i meteorologi och Henning Rodhe, professor i kemisk meteorologi och tre forskare som är kritiska till IPCC:s slutsatser: Wibjörn Karlén, professor i naturgeografi; Henrik Lundstedt, docent i rymdfysik och Peter Stilbs, professor i fysikalisk kemi. I ett internationellt perspektiv utgör IPCCkritiska forskare en minoritet [2].

Frågorna I – III nedan hade ställts upp av Karlén/Stilbs och frågorna IV – VII av organisationsgruppen, Karl Fredga, Dick Hedberg och Sven Kullander.

- I. Varför återspeglas inte värme- och köldperioder (t.ex. ”lilla istiden”) under historisk tid i IPCC:s sammanfattande diagram?
- II. Hur är det med urbaniseringseffekterna?
- III. Hur pålitliga är klimatmodellerna?
- IV. Finns andra indikatorer än temperaturen på ett förändrat klimat?
- V. Vilken betydelse har CO<sub>2</sub> som växthusgas?
- VI. Solens betydelse för klimatvariationer?
- VII. Hur kan människan påverka klimatet?

De inbjudna panelmedlemmarna fick besvara och kommentera frågorna skriftligt som underlag till hearingen i vilken deltog ledamöter från Energiutskottet, Energiutskottets referensgrupp, Miljökommitténs ordförande och sekreterare samt ordföranden i Vetenskapsakademiens geovetenskapliga klass.

Föreliggande rapport som utarbetats av organisationsgruppen bygger på hearingen, på referenser till publicerade arbeten, på korrespondens mellan organisationsgruppen och panelmedlemmarna efter hearingen, samt på synpunkter från Vetenskapsakademiens geovetenskapliga och tekniska klasser. Vidare har chefen för IGBP, the International Geosphere-Biosphere Programme, granskat framlagda fakta. Rapporten har behandlats och godkänts i Energiutskottet och i Miljökommittén.

I det följande ges en kort populärbeskrivning av klimat, kommentarer i 12 punkter och en genomgång av de sju frågorna.

## Innehållsförteckning

Inledning	i
Sammanfattande slutsatser	iv
Klimat	1
Kommentarer i punktform	2
De sju frågorna	7
Referenser	9

## Sammanfattande slutsatser

Man kan med stor säkerhet påstå att den ökande koldioxidhalten i atmosfären är av människan orsakad (antropogen). Exakt hur stor del av den pågående globala uppvärmningen som skall tillskrivas denna ökande halt av koldioxid och hur stor del som beror på andra faktorer, är dock fortfarande osäkert. Åtminstone hälften av den hittills registrerade uppvärmningen på ca 0,7°C anses vara antropogen [1]. Uppvärmningen har under de senaste decennierna manifesterats genom ökande global medeltemperatur, havsytans stigning samt ökad avsmältning av jordens glaciärer och havsisar, medan situationen när det gäller inlandsisar är oklarare. Den tidsperiod för vilken noggranna globala mätningar föreligger är ännu alltför kort för att kvantitativt kunna fastställa klimatförändringen.

Fortsatta satellitmätningar under de kommande decennierna förväntas bidra till säkrare prognoser såväl om klimatet som om koldioxidens roll. Om det av Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC 2001) framtagna mest extrema scenariot skulle realiseras, en höjning av den globala medeltemperaturen med 5,8°C till år 2100, skulle konsekvenserna bli enorma. Osäkerheterna är dock stora, något som också framhålls av IPCC, speciellt vad beträffar molnens och luftpartiklarnas (aerosolernas) roll för strålningsbalansen och den därmed sammanhängande förändringen av solinstrålningen vid jordytan. Trots osäkerheterna rörande storleken av människans klimatpåverkan måste en minskning av utsläppen av växthusgaser vara ett väsentligt mål i framtidens energipolitik.

## Klimat

Klimat anger genomsnittliga väderförhållanden inom ett större område över lång tid. Istiderna, värmeperioden under vikingatiden, lilla istiden under 16- och 1700-talen är exempel. Väder å andra sidan anger förhållanden under en kort tid, t.ex. om det regnar eller är solsken, om det blir 24°C eller 12°C i övermorgon.

Jordens klimat och väder bestäms av en stor mängd faktorer, som dessutom varierar i tid och rum. Energin från solen i form av inkommande kortvågsstrålning, främst ljus, är den viktigaste yttre faktorn. Den varierar med tiden på dygnet och med årstiderna, samt med solens höjd över horisonten eller var man befinner sig – mer energi vid ekvatorn än vid polerna. Solenergi absorberas vid jord- och havsytta samt i atmosfären och orsakar därvid en uppvärmning. En del av den i jord och hav absorberade solenergin värmer upp luften ovanför och bidrar dessutom till vattenavdunstning, medan en del återutsänds i form av värmestrålning. Denna utgående långvågiga strålning absorberas av atmosfärens ”växthusgaser”, som sedan återutstrålar denna energi såväl uppåt som nedåt under ”växthustaket” så att det blir varmare på jorden – förenklat uttryckt: ju mer växthusgaser, desto varmare vid jordytan.

Jordens medeltemperatur strax ovan markytan är cirka +15 °C. Växthusgaser, främst vattenånga och koldioxid, samt moln bidrar till att luften vid jordytan är flera tiotals grader varmare än den skulle vara annars. Vattenångans relativa bidrag härvidlag uppskattas vara knappt 80 %, koldioxidens cirka 20 % och övriga naturligt förekommande växthusgaser cirka 2 %. Människornas olika aktiviteter har lett till ökande halter av koldioxid men också av andra växthusgaser, främst metan, lustgas och fluorerade halogenkolväten (CFC).

Strålningsförhållandena är komplexa, bl.a. på grund av att moln och partiklar i atmosfären absorberar och reflekterar strålningen. Molnen, som huvudsakligen består av vattendroppar och ispartiklar, varierar snabbt i tid och rum vilket gör att de är komplicerade att hantera i klimatberäkningar och klimatmodeller. Partiklar i atmosfären (s.k. aerosoler) kan bestå av salt som virvlat upp från havet, sand från sandstormar, ämnen som bildas genom biogeokemiska processer (t.ex., sulfat, nitrat och organiska ämnen) eller luftföroreningar från t.ex. förbränning, vulkanutbrott, etc. Den till jorden inkommande energin, som är störst vid ekvatorn, omfördelas med hjälp av vindar och havsströmmar. De ytliga havsströmmarna drivs av vindarna, medan de djupa havsströmmarna till stor del drivs av s.k. djupvattenbildning i polartrakterna, som orsakas av att kallt och saltanrikat vatten sjunker ned mot botten och sätter fart på omgivande vattenmassor. Faktorer som ytterligare komplicerar bilden av den globala energiomsättningen är topografi och havsbottens topografi (batymetri), som påverkar vindar och havsströmmar.

## Kommentarer i punktform

1. Klimatet är liksom vädret kaotiskt men också till en del förutsägbart. De yttre randvillkor som bestämmer klimatet i det långa tidsperspektivet är främst den infallande solstrålningens variationer och fördelning över jorden. Dessa variationer beror på långperiodiska (20 000 – 100 000 år) ändringar av jordbanan, jordaxelns lutning och orientering, samt på solaktivitetens periodicitet [3]. Andra randvillkor utgörs t.ex. av långsiktiga förändringar av halten växthusgaser i atmosfären och jordens reflexionsförmåga (albedo). Klimatberäkningarnas scenarier avser tidsförlopp på minst 30 år för att utjämna ”tillfälliga” fluktuationer.

2. Solen är den främsta energikällan i vårt solsystem. Solen sänder ut såväl elektromagnetisk strålning (bl.a. synligt ljus) som partikelstrålning (solvinden). Merparten av solljuset anses ha varierat obetydligt (tiodels procent) under de ca 30 år som absolutmätningar har kunnat genomföras i rymden ovanför atmosfären. Av detta skäl har man dragit slutsatsen att den förhöjda temperaturen på jorden under de senaste 30-40 åren inte kan relateras till ändrad solinstrålning vid atmosfärens högre skikt. [4, 5]. Emellertid har den till jordytan infallande solstrålningen förändrats. Den har mätts under perioden 1983 – 2001 och visat sig öka med 0,16 watt/m<sup>2</sup> och år (0,10 %), globalt sett för denna period [6]. Instrålningen till jordytan har alltså under dessa 18 år ökat med ca  $18 \times 0,16 = 2,9$  watt/m<sup>2</sup>. Den fram till 1990 tilltagande fördunklingen har enligt mätningarna förbytts i en mer transparent atmosfär. Det är oklart om detta är en trend eller en tillfällig variation [7]. Här krävs en ingående analys och modellberäkningar som innefattar alla energiflöden som kan tänkas spela en roll. Som ett kuriosum kan tilläggas att effekten av kondensationsstrimmor som bildas på hög höjd efter flygplan har en betydligt större inverkan på temperaturen vid jordytan än vad man tidigare föreställt sig [8]. I samband med det tre dygn långa flygstoppet över USA efter den 11 september 2001 var atmosfären fri från dessa kondensationsstrimmor. Skillnaden i uppmätt temperatur under dessa tre dygn i jämförelse med tiden före visade att kondensationsstrimmorna orsakade en minskning av skillnaden mellan den maximala dagstemperaturen och den minimala nattemperaturen med 1,1°C.

3. Den andra delen av solens uteffekt, solvinden, utgör ett magnetiserat plasma som rör sig med hög hastighet ut i solsystemet. Partikelstrålningen/solvinden är en högst föränderlig strålning som varierar uppemot tre storleksordningar, i synnerhet under solfläcksmaximum då solen är mest aktiv. På samma sätt kan den kortvågiga delen av den elektromagnetiska strålningen förändras med en storleksordning. Om solvinden, solens magnetfält och det kortvågiga solljuset påverkar klimatet är ännu osäkert eftersom forskningsområdet är så nytt att inga entydiga slutsatser ännu kunnat dras. Klart är att det finns ett tydligt samband mellan de av kosmisk strålning genererade radioaktiva isotoperna kol-14 och beryllium-10 samt av den icke-radioaktiva syre-18. Samtidigt står det klart att det är solens magnetfält och solvinden som främst avlänkar den kosmiska strålningen. Under solfläcksmaximum, då solens magnetfält är starkast och solvinden mest intensiv, är den

kosmiska strålningen in mot jordatmosfären svagast. Sambandet har använts för att studera långsiktiga klimatvariationer [9]. Under senare år har stora framsteg gjorts, bl a har man funnit ett samband mellan molntäcke (sett från rymden) och kosmisk strålning [10, 11]. Mycket arbete återstår för att förstå om och hur denna naturliga process kvantitativt inverkar på klimatet, särskilt i jämförelse med de av människan orsakade effekterna.

4. Direkta temperaturmätningar har genomförts under ca 150 år. Med hjälp av temperaturdata från flera tusen mätstationer har en sammanvägd global temperatur konstruerats. Eftersom många mätstationer finns nära urbana miljöer är det viktigt att korrektioner görs av de uppmätta temperaturerna, i allt högre grad påverkade av ökad urbanisering. IPCC (2001) anger efter en noggrann analys utförd av Climate Research Unit, Norwich, UK att felet i rekonstruerad global temperatur är mindre än 0,1°C. Andra hävdar att felet p.g.a. urbaniseringseffekten är betydligt större [12] (referensen behandlar endast förhållanden i östra USA). Osäkerheten i att beräkna den globala medeltemperaturen med hög precision baserat på ett relativt fåtal mätpunkter över stora oceanvidder och polarisar kommer successivt att nedbringas i och med tillgång till mer satellitdata. NASA har exempelvis under perioden 1979 – 2002 med sina nio TITOS-N satelliter genomfört 270 000 temperaturmätningar per dygn av den nedre troposfären.

5. Temperaturer före mitten av 1800-talet, då direkta temperaturmätningar startade, uppskattas med indirekta metoder, exempelvis analys av isotopen syre-18 i isbörnkärnor, mätning av trädringars tillväxt och analyser av sedimentprover. De senaste 2 000 åren har varit särskilt omdiskuterade, eftersom den av M. E. Mann et al. konstruerade så kallade ”hockeyklubban”, inte uppvisar några tydliga temperaturvariationer fram till 1900-talet då emellertid en markant temperaturökning framträder [13]. IPCC använde detta diagram i sin 2001-rapport. Att lilla istiden omkring år 1700 och värmeperioden under vikingatiden omkring år 1000 inte kunde identifieras förklaras av IPCC med att de var lokala fenomen. I en nyligen utgiven rapport av amerikanska National Research Council sammanfattas ett flertal temperaturrekonstruktioner som utnyttjar multiproximetoder d.v.s. en kombination av olika indirekta metoder [14]. Konklusionerna är att de senaste decennierna med säkerhet varit varmare än någon gång tidigare under de senaste 400 åren. Dessutom framträder en relativt entydig bild av temperaturutvecklingen för de senaste 1100 åren i vilken såväl lilla istiden som värmeperioden under vikingatiden bekräftas.

Från prover av luftbubblor och is i börnkärnor har koldioxidhalt och temperatur kunnat följas nästan en miljon år tillbaka i tiden och de har befunnits vara i hög grad korrelerade. Koldioxidhalt bestäms ur gasinnehållet i luftbubblorna, som anses ha bibehållits efter det att de bildats (de trycks i och för sig ihop när trycket successivt växer vid ökad ackumulation, men återbildas när börnkärnorna tas upp). Temperatur beräknas från relativa halten av isotopen syre-18 i den kring luftbubblorna omgivande isen. Ett mått på metodens känslighet är att en ändring av temperaturen med 1°C svarar mot en ändring av den relativa halten syre- 18, dvs. syre-18/syre-16, med 0,7 promille i jämförelse med dess

relativa halt i ”Standard mean Ocean Water”. Luftens koldioxidhalt och temperatur i polartrakterna under de senaste hundratusentals åren (ca 900 000 i Östantarktis) har kunnat bestämmas på detta sätt. En ökning av koldioxidhalten föregås som regel av att klimatet blir varmare, vilket påverkar kolets naturliga kretslopp, bland annat genom att koldioxid frigörs ur haven varvid koldioxidkoncentrationen i luften ökar. Dessa CO<sub>2</sub>-förändringar har i sin tur, genom växthuseffekt, bidragit till att förstärka temperaturvariationerna.

6. I och med industrialiseringen under senare hälften av 1800-talet började atmosfärens halt av CO<sub>2</sub> öka genom allt större utsläpp från förbränning av fossila bränslen. Enligt FN:s energistatistik har de totala utsläppen från förbränning av fossila bränslen och cementtillverkning t.o.m. 2005 varit  $320 \pm 30$  Gt C (1170 Gt CO<sub>2</sub>) [5]. 1 Gt = 10<sup>9</sup> ton = en miljard ton. Uppskattningar av utsläpp från biosfären (netto) är betydligt osäkrare, men har gjorts genom detaljerad analys av nationell statistik över skogsbruk och markanvändning. Nettoutsläppen från biosfären t.o.m. 2005 kan sålunda uppskattas till  $140 \pm 30$  Gt C. Knappt hälften av de totala utsläppen har ackumulerats i atmosfären medan drygt hälften har tagits upp av haven och de terrestra ekosystemen. Koldioxidhalten i atmosfären är nu 380 ppmv (miljondelar av atmosfärens gaser mätt som molkvot (ej masskvot)), vilket skall jämföras med halten 280 ppmv strax före industrialiseringen, en ökning på 36 %. Skillnaden, 380-280 = 100 ppmv, svarar mot 208 Gt C. Om man inkluderar övriga växthusgaser som människan släpper ut (som koldioxidekvivalenter) innebär det att den förstärkta växthuseffekten i dag motsvarar en ökning av koldioxidkoncentrationen till över 440 ppmv.

7. IPCC anger att den direkta effekten av en fördubbling av koldioxidhalten jämfört med det förindustriella värdet (från 280 till 560) ger en temperaturökning på drygt 1°C. Det bör poängteras att koldioxidens absorption av värmestrålningen från jorden är reducerad genom att absorptionen närmast sig mättnad. Genom detaljerade beräkningar av strålningsflödet upp genom atmosfären och med hänsyn tagen till den vertikala omfördelningen av temperaturen p.g.a. turbulent omblandning, kommer man fram till att absorptionens beroende av koncentrationen är ungefärligen logaritmiskt. Koldioxidens växthuseffekt har bestyrkts av satellitmätningar [15].

8. IPCC anser att uppvärmningen av troposfären till följd av ackumuleringen av koldioxid förstärks genom att halten vattenånga ökar med förhöjd temperatur. Det globala medelvärdet av den totala fuktigheten följer enligt IPCC huvudsakligen den nedre troposfärens medeltemperatur varvid den relativa fuktigheten i stort sett bevaras. Beräkningarna visar att det i första hand är ökningen av vattenånga i övre troposfären, särskilt i tropikerna, som är mest betydelsefull. IPCC anser att en fördubbling av CO<sub>2</sub> halten medför att den ökande halten vattenånga förstärker koldioxidens direkta temperaturhöjande effekt på drygt 1°C till 2-3 °C. Det finns dock kritiker [16] som anser att vattenångans bidrag är betydligt mindre och att återkopplingen till och med kan vara negativ.

9. I IPCC:s uppskattningar av temperaturförändringarna har också indirekta återkopplande effekter såsom förändringar av vattenånga och moln inkluderats. Temperaturökningen vid en fördubbling av koldioxidhalten, efter det att jämvikt inställt sig, förväntas ligga mellan 1,5 och 4,5°C. Det stora osäkerhetsintervallet tillskrivs framför allt svårigheten att uppskatta molnens roll. IPCC:s scenarier för temperaturutvecklingen under det närmaste århundradet inkluderar antaganden om såväl CO<sub>2</sub> som andra växthusgaser och aerosoler. Dessa scenarier ger temperaturökningar i intervallet 1,4 – 5,8°C till år 2100 [17]. En stor del av osäkerheten beror på svårigheter att uppskatta de framtida halterna av växthusgaser i atmosfären. I det mest återhållsamma scenariot för år 2100 beräknas de sammanlagda utsläppen av växthusgaser bli 900 Gt CO<sub>2</sub>-ekvivalenter och i det mest expansiva scenariot 2100 Gt.

10. Den observerade temperaturökningen under perioden 1860 – 2005 uppgår enligt IPCC till  $0,7 \pm 0,2^\circ\text{C}$ . Av denna ökning kommer ca 0,4 grader från de senaste 30 åren. Den av alla växthusgaser förstärkta växthuseffekten kan idag relateras till 440 ppmv CO<sub>2</sub>-ekvivalenter i atmosfären, vilket teoretiskt ger en ökning av den globala medeltemperaturen vid jämvikt med 0,8 – 2,4°C. På grund av ökande mängder partiklar i luften, motverkas dock den förstärkta växthuseffekten globalt med 20 – 40 % (kanske mer; siffrorna är mycket osäkra). Klimatsystemets tröghet på grund av havens stora värmekapacitet fördröjer därtill uppvärmningen, vilket anses motsvara en reduktion med 20 – 30 %. Detta ger en teoretiskt beräknad uppvärmning hittills med 0,4 – 1,4°C. Det är givetvis en grov överslagsberäkning, men den stämmer ungefär med den hittills observerade temperaturökningen på 0,7 °C. De temperaturer som uppmätts under de senaste decennierna är högre än någon gång sedan 1860, d.v.s. under den period då man haft tillgång till direkta bestämningar av den globala temperaturen. Enligt IPCC är denna temperaturhöjning svår att förklara på annat sätt än som ett resultat av den ökande halten av växthusgaser. En osäkerhet är att solinstrålningen vid jordytan tycks ha stigit avsevärt under de senaste 30 åren [18,19] (se även punkt 2). I sammanhanget skall noteras att en markant temperaturökning, nära 0,5°C, uppmättes mellan 1900 och 1940 utan någon påtaglig höjning av koldioxidhalten. Denna ökning observerades dock huvudsakligen på höga latituder (<60°N) och antas vara ett kombinerat resultat av människans påverkan av strålningsbalansen och en onormalt stor påverkan från interna variabiliteter över flera årtionden i det kopplade atmosfär-ocean-systemet [20]. Utan att ge referenser till ett stort antal arbeten skall också anföras att mellan 1940 och 1965 avkyldes norra halvklotet med 0,25°C. Under samma period ökade koldioxidhalten monotont i atmosfären. Koncentrationen av sulfat och nitrat (som atmosfäriska partiklar) ökade också över norra halvklotet, och kan vara en förklaring till avkylningen under perioden.

11. Ett tecken på jordens uppvärmning är att glaciärer, havsisar och möjligen också inlandsisar totalt sett minskar i storlek sedan satellitmätningarna påbörjades 1978. Havsisen i Arktis (mätt i september) har minskat med  $0,3 - 0,4 \times 10^6 \text{ km}^2/\text{årtionde}$  under de senaste ca 30 åren, d.v.s. ca 10 % [21]. Beakta dock att variationerna över de senaste några hundratal åren är avsevärda [22,23]. Grönlands volym av is uppskattas till ca 2 000 000 km<sup>3</sup>

och den uppges minska med 50 – 100 km<sup>3</sup> per år, men detta är osäkra uppgifter. En fördubbling av förlusten av is, speciellt på grönländska östsidan, har nyligen observerats [24]. Generellt verkar det som om Grönlandsisen minskar i volym på altituder under 1500 m, men växer till med  $5,4 \pm 0,2$  cm/år på högre altituder [25]. Liknande förhållanden råder i Antarktis där isen på Antarktiska halvön har minskat drastiskt under det senaste århundradet, medan isen på Östantarktis, ca 30 000 000 km<sup>3</sup>, troligen växer till. Flera bedömare anser att den tillväxten beror på ökad nederbörd, kanske till följd av ett varmare klimat. När det gäller glaciärer kan nämnas att World Glacier Monitoring Service ([www.geo.unizh.ch/wgms](http://www.geo.unizh.ch/wgms)) regelbundet publicerar standardiserade data över förändringar av ett 30-tal bergsglaciärer fördelade över världen. Data visar att medeltjockleken av glaciärerna har minskat med 10-tals cm per år sedan 1980 och att det är en tydlig tendens till accelererande avsmältningshastighet under senare år.

12. Haven har blivit varmare och uppvärmningen har beräknats från observerade temperaturändringar till  $2 \times 10^{23}$  joule, till större delen inom skiktet 0-300 m. Ytvattnets temperatur, som dock är ojämnt fördelad, har ökat med 0,2-0,5 °C under de senaste 100 åren och trenden är en ökning på ca 0,13 °C per 10-årsperiod [26 – 28]. Som en följd av uppvärmningen steg havsytan med 1-2 mm/år under 1900-talet och för närvarande är trenden 3 mm per år enligt satellitmätningar. Höjningen av världshavens vattenstånd beror också på smältande glaciärer, men dock i mindre grad.

## De sju frågorna

I. Varför återspeglas inte värme- och köldperioder (t.ex. ”lilla istiden”) under historisk tid i IPCC:s sammanfattande diagram?

Enligt IPCC 2001 är dessa perioder begränsade till lokala områden. Exempelvis går det inte att urskilja lilla istiden för ca 300 år sedan i den omdiskuterade temperaturutredning för norra halvklotet som gjorts av M.E. Mann et al. [13] (”Hockeyklubban”) med förklaringen att den var ett lokalt fenomen. Senare forskning visar emellertid att såväl lilla istiden som värmeperioden under vikingatiden omfattade stora delar av såväl norra som södra halvklotet.

II. Hur är det med urbaniseringseffekterna?

Frågan gäller den noggrannhet med vilken en global temperatur kan rekonstrueras från ca 5000 mätstationer. Flera av dessa stationer ligger nära stora städer där temperaturen lokalt är förhöjd. Några forskare anser att en del av den rapporterade globala temperaturökningen på  $0,7^{\circ}\text{C}$  beror just på mätstationernas placering. IPCC har gjort korrektioner för dessa förhöjda mätvärden och menar att felet i rekonstruerad global temperatur är mindre än  $0,1^{\circ}\text{C}$ .

III. Hur pålitliga är klimatmodellerna?

IPCC 2001 anger intervallet i förväntad temperaturökning till  $1,5-4,5^{\circ}\text{C}$  vid en fördubblad  $\text{CO}_2$ -halt. Detta stora intervall speglar svårigheten att beräkna speciellt molnens inverkan. IPCC antar också att vattenångan i luften ökar med stigande temperatur och förstärker  $\text{CO}_2$ :s direkta bidrag på drygt  $1^{\circ}\text{C}$  till temperaturökningen med en faktor 2-3, en hypotes som dock ifrågasätts speciellt av en kritiker (punkt 8).

IV. Finns andra indikatorer än temperaturen på ett förändrat klimat?

Havsytans stigning, som har ökat från 1-2 mm/år under 1900-talet till 3 mm/år under senare år enligt satellitmätningar, är en klar indikation på vattnets expansion, framför allt till följd av uppvärmning. Världens glaciärer har sammantaget krympt avsevärt under de senaste 100 åren, liksom den arktiska havsisen under de senaste årtiondena. Förändringar i biosfären, t.ex. i form av uppåtvandrande trädgräns och vissa arters utbredning mot högre latituder, nämns också ofta i sammanhanget.

V. Vilken betydelse har  $\text{CO}_2$  som växthusgas?

I stort sett alla forskare är överens om att den direkta effekten av en fördubblad  $\text{CO}_2$ -halt från 280 till 560 ppmv ger en temperaturökning på drygt  $1^{\circ}\text{C}$ . Därutöver tillkommer effekterna av andra växthusgaser, moln, vattenånga och aerosoler.

### VI. Solens betydelse för klimatvariationer?

Den direkta solinstrålningen i atmosfärens översta skikt har varit relativt konstant enligt de senaste 28 årens satellitmätningar. En indirekt effekt är att solinstrålningen vid jordytan tycks ha ökat med ca 3 watt/ m<sup>2</sup> (nära 2 %) under de senaste 18 åren p.g.a. transparentare atmosfär (punkt 2). En annan indirekt effekt kan förknippas med solens magnetfält och partikelemission (solvinden). Infallet av galaktisk kosmisk strålning som träffar jordens atmosfär avlänkas olika mycket beroende på solens aktivitet; vid hög solaktivitet avlänkar solens magnetfält den kosmiska strålningen mer, med minskad molnbildning som följd. Forskningsresultat visar på en antikorrelation mellan mängden isotoper (t ex kol-14 producerad av kosmisk strålning) och temperaturen, något som stärker hypotesen om en koppling mellan de solära variationerna (solvinden, solens magnetfält) och klimatet på jorden. Denna hypotes har emellertid inte bekräftats. Under 2006 har nya experimentella bevis från laboratorieexperiment presenterats om bildandet av mycket små partiklar till följd av joniserande strålning, ett samband som stärker hypotesen om bildning av vissa typer av moln till följd av kosmisk strålning.

### VII. Hur kan människan påverka klimatet?

Fossilbränslena bidrar f.n. med ca 80 % av den globala energitillförseln. Det är således en svår uppgift att reducera dem avsevärt inom överskådlig tid. Dock kan t.ex. lagring av CO<sub>2</sub> i stora underjordiska akvifärer på sikt bidra till en reduktion. Vidare kan man försöka reducera utsläppen av andra växthusgaser, som metan, lustgas, och fluorerade halogenkolväten (CFC). Användningen av fossilbränslen inom transportsektorn bör kunna minskas påtagligt genom bränslesnålare bilar, övergång till andra flytande bränslen än konventionell bensin och diesel samt satsning på ”plug in” elbilar med effektivare batterier som laddas snabbt från elnätet.

## Referenser

1. N. Scafetta and B. J. West, *Geophysical Research Letters*, 33, L05708, doi: 10.1029/2005GL025539, 2006.
2. N. Oreskes, *The Scientific Consensus on Climate Change*, *Science*, 306, 1686, 2004, doi 10.1126/science.1103618.
3. North Greenland Ice Core Project members, High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period, *Nature* 431, 147, 2004.
4. C. Fröhlich, Solar irradiance variability since 1978 – Revision of the PMOD composite during cycle 21, *Space Science Review* 2006 (available from ISSI, Bern).
5. P. Foukal, C. Fröhlich, H. Spruit and T. M. L. Wigley, Variations in solar luminosity and their effect on the Earth's climate, *Nature*, 443, 161-166, doi:10.1038, 2006.
6. R. T. Pinker et al., Do Satellites Detect Trends in Surface Solar Radiation?, *Science*, 308, 850, 2005.
7. M. Wild et al., From Dimming to Brightening Decadal Changes in Solar Radiation at Earth's Surface, *Science* 308, 847, 2005.
8. D.J. Travis et al., Contrails reduce daily temperature range, *Nature* 418, 601, 2002.
9. M. Christl, A. Mangini, S. Holzkämper and C. Spötl, Evidence for a link between the flux of galactic cosmic rays and Earth's climate during the past 200,000 years, *J. Atmosph. Solar-Terr. Phys.* 66, 313–322, 2004.
10. H. Svensmark and E. Friis-Christensen, Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage - A missing link in solar-climate relationships, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 59(11), 1225-1232, 1997.
11. H. Svensmark, J. O. P. Pedersen, N. Marsh, M. Enghoff and U. Uggerhøj, Experimental Evidence for the role of Ions in Particle Nucleation under Atmospheric Conditions, *Proceedings of the Royal Society A*, October 3rd, 2006.
12. E. Kalnay and C. Ming, Impact of urbanization and land-use change on climate, *Nature* 423, 528, 2003.
13. M. E. Mann et al., Northern Hemisphere Temperatures During the Past Millennium: Inferences, Uncertainties, and Limitations, *Geoph. Res. Lett.* 26(6), 759, 1999.

14. National Research Council Committee, Surface Temperature Reconstructions for the Last 2 000 Years, ISBN: 0-309-10225-1, 2006.
15. J. H. Harris et al, Increases in greenhouse forcing inferred from the outgoing longwave radiation spectra of the Earth in 1970 and 1997, *Nature* 410, 355, 2001.
16. R. S. Lindzen, M.-D. Chou, and A. Y. Hou, Does the Earth have an adaptive infrared iris?, *Bull. Amer. Met. Soc.* 82, 417, 2001.
17. IPCC Third Assessment Report Part I, SPM, 2001.
18. J. Lean, Solar forcing of Climate change: Current status, *IGBP PAGES* 13(3), 1315, 2006.
19. W. W. Soon, *Geophysical Research Letters* 32, L16712, doi: 10.1029, 2005, GLO23429.
20. T. L. Delworth and T. R. Knutson, Simulation of Early 20th Century Global Warming, *Science* 287, 2246, 2000.
21. Arctic Climate Impact Assessment, 190, 2005.
22. E. Isaksson et al., Two ice-core  $^{18}\text{O}$  records from Svalbard illustrating climate sea-ice variability over the last 400 years, *The Holocene* 15(4) 501, 2005.
23. I. V. Polyakov et al., Variability and trends of air temperature and pressure in the Maritime Arctic 1875-2000, *Journal of Climate* 16, 2067, 2003.
24. E. Rignot and P. Kanagaratnam, Changes in the Velocity Structure of the Greenland Ice Sheet, *Science* 311, 986, 2006.
25. O. M. Johannessen et al, Recent Ice Sheet Growth in the Interior of Greenland, *Science* 310, 1013, 2005.
26. T. Barnett et al., Detection of Anthropogenic Climate Change in the World's Oceans, *Science* 292, 270, 2001.
27. S. Levitus, et al., Warming of the World Ocean, *Science* 287, 2225, 2000.
28. IPCC, Third Assessment Report Part I, 110, 646, 2001.

Detta dokument har producerats av Energiutskottet och Miljökommittén som tillhör Kungl. Vetenskapsakademien. Det speglar utskottets och kommitténs uppfattning och skall inte ses som ett uttalande eller ställningstagande av Kungl. Vetenskapsakademien.

### **Ledamöter av Energiutskottet**

Sven Kullander (ordförande), professor em. i högenergifysik, Uppsala universitet  
Gia Destouni, professor i hydrologi, hydrogeologi och vattenresurser, Stockholms universitet  
Harry Frank, professor i innovationsteknik, Mälardalens högskola  
Karl Fredga, professor em. i genetik, Uppsala universitet  
Bertil Fredholm, professor i farmakologi, Karolinska Institutet  
Karl Grandin, t.f. föreståndare, Centrum för vetenskapshistoria  
Peter Jagers, professor i matematisk statistik, Chalmers tekniska högskola  
Bengt Kasemo, professor i fysik, Chalmers tekniska högskola  
Rickard Lundin, professor i rymdfysik, Institutet för rymdfysik  
Karl-Göran Mäler, professor em. i nationalekonomi, Beijerinstitutet för ekologisk ekonomi  
Kerstin Niblaeus, generaldirektör vid Europeiska Unionens ministerråd  
Bengt Nordén, professor i fysikalisk kemi, Chalmers tekniska högskola

### **Ledamöter av Miljökommittén**

Leif Anderson (ordförande), professor i hydrosfärvetenskap, Göteborgs universitet  
Dick Hedberg (sekreterare), Fil.dr, Kungl. Vetenskapsakademien  
Kjell Danell, professor i viltekologi, Sveriges lantbruksuniversitet  
Gia Destouni, professor i hydrologi, hydrogeologi och vattenresurser, Stockholms universitet  
Carl Folke, professor i naturresurshushållning, Stockholms universitet  
Lena Gipperth, universitetslektor i miljörett, Handelshögskolan, Göteborgs universitet  
Wilhelm Granéli, professor i limnologi, Lunds universitet  
Mats Harms-Ringdahl, professor i strålningsbiologi, Stockholms universitet  
Elisabeth Kessler, chefredaktör, miljötidningen Ambio  
Sven Kullander, professor em. i högenergifysik, Uppsala universitet  
Björn Lundberg, VD, IVL Svenska Miljöinstitutet AB  
Ingrid Sandahl, professor i rymdfysik, Institutet för rymdfysik  
Cynthia de Wit, docent, Institutet för tillämpad miljövetenskap, Stockholms universitet