

Nya kunskaper om klimatproblemet

Delrapport 4
i Energimyndighetens och Naturvårdsverkets underlag till
Kontrollstation 2004

Fler exemplar av denna broschyr beställer du på:

Energimyndigheten
ER 23:2004
ISSN 1403-1892
www.stem.se
forlaget@stem.se
Orderfax: 016-544 22 59

Naturvårdsverket
ISBN 91-620-5396-5
ISSN 0282-7298
www.naturvardsverket.se/bokhandeln
natur@cm.se
Ordertelefon: 08-505 933 40
Orderfax: 08-505 933 99

500 ex
Tryck: Tryckindustri Information, Solna 2004

Förord

Naturvårdsverket och Energimyndigheten har fått regeringens uppdrag att gemensamt utarbeta ett underlag för översynen av den svenska klimatstrategin vid kontrollstationen 2004. Redovisningen av uppdraget görs i form av en sammanfattande syntesrapport samt fyra myndighetsgemensamma delrapporter:

1. Prognoser över utsläpp av växthusgaser
2. Utvärdering av styrmedel i klimatpolitiken
3. Flexibla mekanismer och mål i klimatpolitiken
4. Nya kunskaper om klimatproblemet

Denna underlagsrapport är delrapport 4 – Nya kunskaper om klimatproblemet – och syftar till att ge en uppdaterad översiktlig bild av kunskapsläget om klimatproblemet. Rapporten redovisar kunskapsläget om klimatförändringen samt pågående forskning om anpassning till ett förändrat klimat och åtgärder för att minska utsläppen av växthusgaser. Viktiga framtida forskningsbehov belyses också. Rapporten visar kopplingar mellan forskningsinsatser för klimatmålet och andra miljömål samt nyttan av forskningskommunikation.

Karin Sahlin (Statens Energimyndighet) och Eva Jernbäcker (Naturvårdsverket) har varit projektledare och ansvariga för arbetet vid respektive myndighet. Marianne Lilliesköld (Naturvårdsverket) och Kenneth Möllersten (Energimyndigheten) har varit delprojektansvariga för arbetet med kunskapsöversikten om klimatproblemet.

Underlagsmaterial till denna rapport och värdefulla bidrag har också kommit från ett antal andra medarbetare vid och utanför myndigheterna. Beskrivningen och utvärderingen av kunskapsläget inom klimatmodellering har Markku Rummukainen (Rossby Center vid SMHI) bidragit med. Inom Naturvårdsverket har Tobias Persson bidragit med analysen om långsiktiga klimatmål. I övrigt har underlagsmaterial också kommit från Klas Österberg, Anna Forsgren och Jessica Umegård, samtliga från Naturvårdsverket.

Rapporten finns tillgänglig på Naturvårdsverkets och Energimyndighetens webbplatser.

Innehåll

1	Uppdraget	11
1.1	Avgränsning av uppdraget	11
2	Bakgrund till klimatproblemet	13
3	Klimatet i framtiden – ett globalt perspektiv	17
3.1	Globala utsläppsscenarier	20
3.2	Effekter på ekosystem och samhälle.....	22
3.3	Anpassningsbehov till ett förändrat klimat.....	22
3.4	Åtgärdsbehov för att minska utsläppen	22
4	Klimatet i framtiden – ett svenskt perspektiv	25
4.1	Effekter i Sverige av en klimatförändring	26
4.2	Behov av regional anpassning	28
5	Möjligheter till stabilisering	31
5.1	Stabiliseringsscenarier	31
5.2	Långsiktiga mål.....	33
5.3	Kortsiktiga reduktionsbehov för långsiktiga mål.....	37
5.4	Ekonomiska konsekvenser.....	39
6	Strategisk forskning och systematisk observation	41
6.1	Klimatsystemet och klimatprocesser	42
6.2	Klimatmodellering.....	42
6.3	Forskning om effekter och anpassning till förändrat klimat.....	43
6.4	Åtgärds- och implementeringsforskning	44
6.5	Systematisk observation	52
7	Synergier ger snabbare måluppfyllelse	55
8	Kommunikation för bättre acceptans	57
9	Referenser	59

Sammanfattning

Genomförandet av Kyotoprotokollet och arbetet efter 2012 kommer att ställa krav på stöd från ny kunskap och från forskning. Förutom forskning avgränsad till enskilda vetenskapliga discipliner behövs systemanalyser och synteser, baserade på den stora mängden redan genomförd forskning, med utgångspunkt i de behov som finns i förhandlingsarbetet och vid framtagandet av strategier.

Det pågår mycket forskning om klimatet och vad klimatförändringar kan medföra i form av effekter på ekosystem och samhälle. Frågeställningarna analyseras både ur det globala perspektivet och ur regionala perspektiv. Vilka åtgärder som behövs för att minska utsläppen av växthusgaser är också föremål för omfattande forskning, men det pågår mindre forskning om anpassning till ett förändrat klimat. Den senaste forskningen har generellt förstärkt bilden av en allt varmare jord. FN:s klimatpanel IPCC blir också alltmer säker på att människans aktiviteter bidrar till en klimatförändring.

IPCC menar att det finns både tekniska lösningar för att kraftigt minska utsläppen av växthusgaser liksom möjligheter att hålla kostnaderna för åtgärder nere, men att hinder för att använda och utveckla klimatriktig teknik måste övervinnas. Med rätt användning av styrmedel kan samhället ledas mot ökat nyttjande av bästa tillgängliga teknik men samtidigt måste forskningen skapa förutsättningar för tekniksprång och långsiktigt bidra till att utveckla mer hållbara system för att minimera effekterna av en klimatförändring. Forskningen kan ge betydelsefulla bidrag till att förfina kunskapen om effekter av en klimatförändring, ta fram indikatorer på en klimatförändring, hjälpa till med underlag för att utforma strategier och ta fram instrument för anpassning av ekosystem och infrastruktur och, sist men inte minst, kan forskningen bidra till kunskapen om olika åtgärder för att minska utsläppen. I detta sammanhang är forskningskommunikation en viktig länk för att skapa samförstånd mellan forskare, entreprenörer och beslutsfattare.

Kunskapssammanställningar om klimatet finns förutom i IPCC:s tredje utvärderingsrapport även i det svenska klimatmodelleringsprogrammet SWECLIM:s slutrapport och i den av Naturvårdsverket utgivna boken "En varmare värld". Nyligen utgav International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP) dessutom en syntesbok "Global Change and the Earth System".

Till kommande kunskapssammanställningar hör IPCC:s fjärde utvärderingsrapport 2007, men innan dess kommer IPCC med specialrapporter om klimatet och ozonproblemet samt avskiljning och lagring av koldioxid. Mycket av forskningen som sammanställs i IPCC om klimatsystemet, effekter på ekosystem och samhälle har bedrivits inom International Geosphere Biosphere Programme (IGBP), World Climate Research Programme (WCRP), EU:s ramprogram för forskning och andra internationella kunskapsorganisationer och program.

Det vi implementerar idag var gårdagens forskning. Den forskning som bedrivs idag har siktet inställt på vad som behövs för genomförandet av Kyotoprotokollet och vad som behövs efter Kyotoprotokollets första åtagandeperiod, dvs. efter 2012.

Summary

Implementation of the Kyoto Protocol and the work after 2012 will necessitate support from new knowledge and research. As well as research limited to individual scientific areas, there is a need for system analyses and syntheses, based on the large amount of research already carried out, dictated by the needs which exist in work relating to negotiations and in the drafting of strategies.

A great deal of research is in progress on the climate and what climate change might entail in terms of effects on ecosystems and society. These issues are analysed both from the global perspective and from regional perspectives. The measures required to reduce emissions of greenhouse gases are also the object of extensive research, but less research is being done on adaptation to a changed climate. The latest research has generally reinforced the picture of an ever warmer Earth. The UN's International Panel on Climate Change (IPCC) is also becoming increasingly certain that human activities contribute to climate change.

The IPCC also considers that there are both technical solutions to sharply reduce emissions of greenhouse gases and opportunities to keep down the costs of measures, but that obstacles to using and developing environmentally correct technology need to be overcome. If policy instruments are used correctly, society can be guided towards increased use of best available technology, but at the same time research must create the necessary basis for leaps in technology and in the long term contribute towards developing more sustainable systems to minimise the effects of climate change. The research can make significant contributions to refining knowledge on the effects of climate change, devise indicators of climate change, help in providing data for the formulation of strategies and devise instruments for the adaptation of ecosystems and infrastructure, and last but not least the research can contribute to knowledge on various measures to be taken to reduce emissions. In this context research communication is an important link in creating a consensus between researchers, entrepreneurs and decision-makers.

As well as in the IPCC's third evaluation report, knowledge on the climate is compiled in the final report of the Swedish climate modelling programme SWECLIM and in the book "En varmare värld" ("A Warmer World") published by the Swedish Environmental Protection Agency. In addition, the International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP) recently published a book reviewing the situation entitled "Global Change and the Earth System".

Future compilations of knowledge include the IPCC's fourth evaluation report 2007, but before then the IPCC will publish special reports on the climate and the ozone problem and isolation and sequestration of carbon dioxide. Much of the research compiled by the IPCC on the climate system, effects on ecosystems and society has been undertaken under the International Geosphere Biosphere Programme (IGBP) and the World Climate Research Programme (WCRP), the EU's

framework programme for research and other international knowledge-based organisations and programmes.

What we implement today is the research of yesterday. The research undertaken today is focused on what is needed for implementation of the Kyoto Protocol and what is needed after 2012.

1 Uppdraget

Riksdagen beslutade i mars 2003 om propositionen 2001/02:55 *Sveriges klimatstrategi*. I propositionen anges att de svenska utsläppen av växthusgaser, som ett medelvärde för perioden 2008–2012, skall vara minst fyra procent lägre än utsläppen 1990. Klimatstrategin är utformad så att det svenska klimatarbetet och utvecklingen mot det nationella målet successivt skall följas upp. Särskilda kontrollstationer har lagts in år 2004 och 2008, då klimatarbetet skall utvärderas. Om utsläppsprognosen då visar sig vara mindre gynnsam kan nya åtgärder föreslås och/eller målen omprövas.

Naturvårdsverket har gemensamt med Energimyndigheten fått i uppdrag att ta fram ett underlag inför kontrollstationen år 2004. Uppdraget skall redovisas den 30 juni 2004. Redovisningen, som sker i fyra underlagsrapporter och en syntesrapport, skall innefatta:

- en ny samlad prognos för utsläpp av växthusgaser,
- utvärderingar och konsekvensanalyser av styrmedel och åtgärder,
- en bedömning av konsekvenserna av att integrera de flexibla mekanismerna i delmålet för perioden 2008-2012.
- en kartläggning av nya kunskaper om klimatproblemet.

Den här rapporten redovisar en uppdaterad översiktlig bild av ny kunskap kring klimatproblemet. De fyra deluppdragen redovisas var för sig.

1.1 Avgränsning av uppdraget

Avgränsningen av uppdraget att redovisa ny kunskap om klimatproblemet är inte självklar. Den här rapporten syftar till att ge en översiktlig uppdatering av kunskapen om klimatsystemet och förändringar som iakttagits. Med klimatmodellens hjälp redovisas vilka förändringar som kan komma att ske och vilka effekter de medför för ekosystem och samhälle, med fokus på Sverige. Kunskapsläget inom pågående forskning till stöd för åtgärder och anpassningsbehov redovisas. En kort översikt orienterar om viktiga forskningsområden. Det är den typ av redovisning som efterfrågas i rapporteringen till FN:s klimatkonvention.¹

Det är heller inte helt enkelt att avgränsa vad som är ny kunskap. Forskning och utveckling bidrar kontinuerligt till att förändra eller förstärka den kunskapsbas som redan finns. Oftast är det små justeringar som förbättrar en modell, förstärker kunskaperna om effekter eller trender, mycket mer sällan kommer nya revolutionerande resultat fram. Syntesarbete behövs för att fullgott kunna nyttiggöra resultaten. Den senaste kunskapen om klimatförändringen finns sammanställd i den

¹ United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (www.unfccc.int).

tredje utvärderingsrapporten, *Climate Change 2001*, från FN:s klimatpanel Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). För kunskapsläget i Sverige svarar främst resultaten från det avslutade forskningsprogrammet SWECLIM.² Kunskapssammanställningar finns också i den av Naturvårdsverket utgivna boken "En varmare värld"³ och i Naturvårdsverkets OH-paket om klimatförändringen. Nyligen utgav International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP) dessutom en syntesbok "Global Change and the Earth System".

Till kommande källor till ny kunskap hör IPCC:s fjärde utvärderingsrapport, beräknad till 2007, men innan dess kommer specialrapporter om klimatet och ozonproblemet samt avskiljning och lagring av koldioxid. Det internationella projektet Arctic Climate Impact Assessment (ACIA) förbereder också en syntesrapport om klimatfrågan och Arktis. Mycket av forskningen som sammanställs i IPCC om klimatsystemet, effekter på ekosystem och samhälle har bedrivits inom International Geosphere Biosphere Programme, (IGBP), och World Climate Research Programme (WCRP), EU:s ramprogram för forskning och andra internationella kunskapsorganisationer och program. Kunskap ur ett mer allmänt perspektiv kommer från EU:s handlingsprogram, och liknande nationella handlingsprogram.

Ett praktiskt problem vid en redovisning som denna är hur nya och specifika, men än så länge enskilda, forskningsresultat som publicerats i vetenskapliga tidskrifter bör behandlas. Dessa kan bli föremål för kritisk granskning av nästa IPCC-kommunikation, och är därför i nuläget svåra att representativt sätta i sammanhang.

Det är heller inte självklart om kunskapen om anpassning till ett förändrat klimat och åtgärder för att minska utsläppen skall inkludera ej utvärderade försök och demonstrationer. Eftersom sådant arbete inte kommit så långt redovisas även ej utvärderade aktiviteter som olika sektorer och branscher själva tagit initiativ till.

² Forskningsprogrammet Swedish Regional Climate Modelling Programme, 1996-2003.

2 Bakgrund till klimatproblemet

Under 1900-talet fyrdubblades världens befolkning och mänsklighetens användning av primärenergi ökade sexton gånger. En förutsättning för denna snabba ökning av energianvändningen har varit exploateringen av de fossila bränslereserverna med ökade koldioxidutsläpp som följd (Figur 1). I takt med att allt fler människor nyttjar alltmer energi från framförallt fossila bränslen har utsläppen av växthusgaser blivit så omfattande att även om utsläppen skulle bibehållas på nuvarande nivå kommer koldioxidhalten i både luft och hav att fortsätta stiga. Trögheten i klimatsystemet gör att växthuseffekten förstärks länge efter det att insatser för utsläppsminskningar har påbörjats. Det kommer därför att behövas omfattande utsläppsminskningar för att stabilisera halterna i atmosfären, och klimatets förändring, på en nivå som är förenlig med Klimatkonventionen.

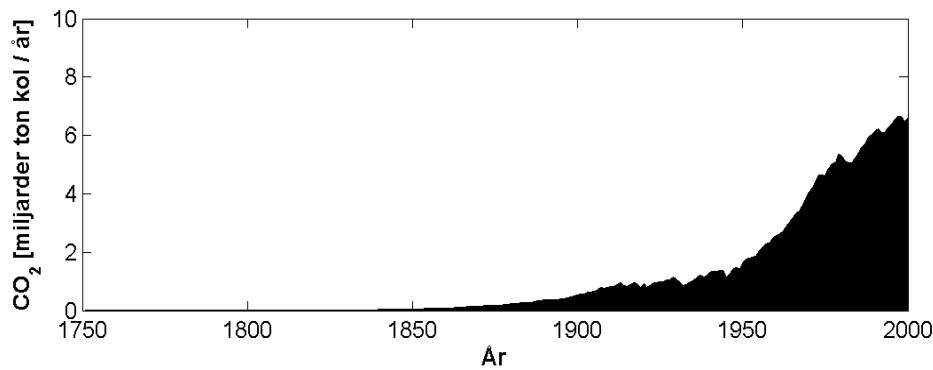
Målet med FN:s klimatkonvention (UNFCCC)⁴ är att stabilisera koncentrationen av växthusgaser i atmosfären på nivåer som säkerställer att farlig mänsklig påverkan på klimatsystemet undviks. En sådan stabilisering av atmosfärens halt av växthusgaser kräver att nettoutsläppen av koldioxid minskar kraftigt jämfört med dagens nivå. Genom Kyotoprotokollet⁵ förbinder sig de industrialiserade länder som skriver under protokollet att fram till den första åtagandeperioden 2008-2012 minska sina gemensamma utsläpp med fem procent jämfört med referensåret 1990.

Förstärkningen av växthuseffekten beror i första hand på att luftens halt av koldioxid blir allt högre (Figur 2). Det är särskilt förbränningen av fossilt kol och olja som bidragit till den snabbt ökande halten koldioxid i atmosfären. Förbränningen medför också utsläpp av andra gaser som metan och dikväveoxid. Långsiktigt är koldioxiden den viktigaste gasen att åtgärda, men för att snabbare (20-40 års sikt) få ner ökningstakten kan metanutsläppen vara strategiskt viktiga att fokusera på. Koldioxid frigörs också vid den omfattande avskogningen i världen. Dessutom förloras genom avskogning den sänka för koldioxid som en växande skog utgör. I boreala/tempererade skogar på nordliga breddgrader frigörs också metan och dikväveoxid om marken tidigare varit dikad eller är starkt humushaltig.⁶ Andra

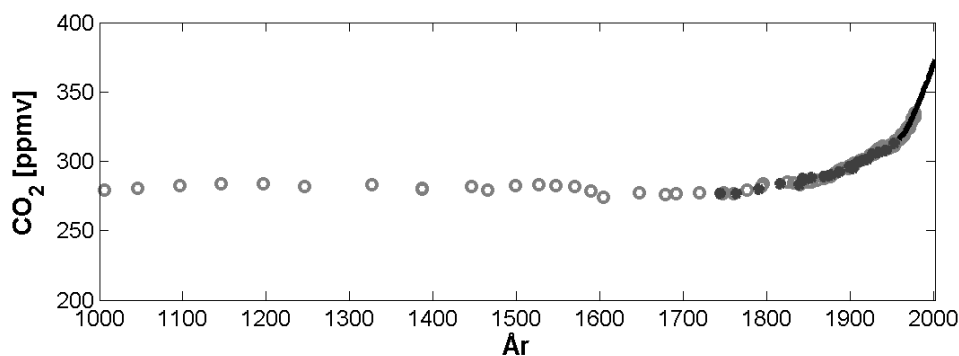
⁴ www.unfccc.int

⁵ Protokoll under UNFCCC. Se www.unfccc.int.

⁶ Forskning pågår inom Mistras program LUSTRA (Land Use Strategies for Reducing Net Greenhouse Gas Emissions), och EU-programmet CARBOEUROPE.



Figur 1 CO₂-utsläpp 1751-2000 från användningen av olja, kol och naturgas. Ett mindre bidrag från cementproduktion ingår.⁷



Figur 2 Atmosfärens koldioxidhalt 1000-2002 uttryckt i parts per million (ppm). Regelbundna atmosfärsmätningar (svart linje) startades mot slutet av 1950-talet. Innan dess analyserades i inlandsisar inkapslad luft (gråa symboler.) Atmosfärens koldioxidhalt följer utsläppens utveckling (se Figur 1), minus upptaget i havet och i terrestra system. Detta upptag uppgår till ca hälften av de årliga utsläppen men bedöms som något osäkert i framtiden. Den nutida koldioxidhalten är enastående jämfört med halterna under de drygt 400 000 åren som studerats med hjälp av inlandsisen på Antarktis.⁸

stora källor till metanemissioner är risodlingar och avfallstippar. Förutom koldioxid, metan och dikväveoxid släpps också andra växthusgaser ut som överhuvudtaget inte finns naturligt. Till dem hör vissa fluorhaltiga gaser, s.k. industri-gaser. Dessa gaser är mycket starkare växthusgaser än koldioxid, men förekommer i mindre men ändå väsentliga mängder.

Även andra luftföroreningar, främst partiklar, påverkar klimatsystemet genom att partiklar fungerar som kondensationskärnor och bidrar till molnbildning. Dessa partiklar (aerosoler) bildas såväl vid naturliga processer (t.ex. vulkanutbrott) som av mänsklig aktivitet (t.ex. kol- och vedeldning). Några reflekterar solstrålning, vilket kyler jorden medan andra absorberar solstrålning, vilket värmer luften och

⁷ Marland m.fl. (2003)

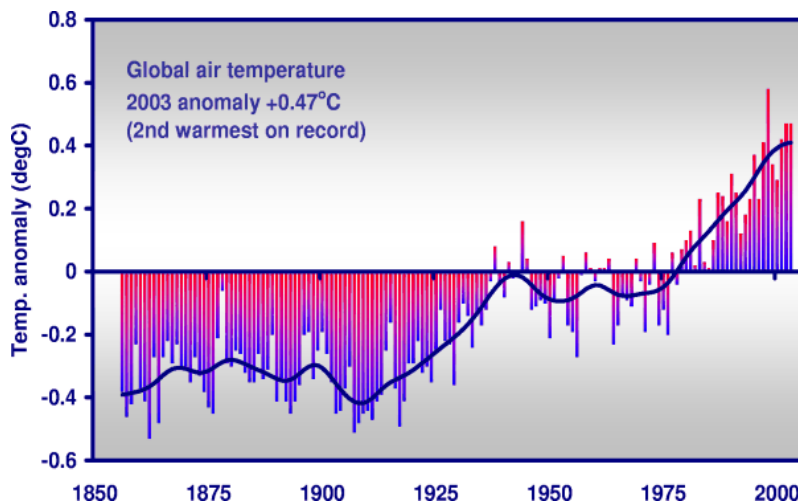
⁸ Atmosfärens koldioxidhalt från: Neftel m.fl. (1994); Etheridge m.fl. (1998); Keeling m.fl. (2003)

bidrar till den globala uppvärmningen. I många utvecklingsländer som t.ex. Indien och Kina är sådana luftföroreningar ett eget stort problem, men problemet är inte heller försumbart i världens storstäder över lag inklusive Sverige.⁹

⁹ EU:s CAFE-program (Clean Air for Europe). Från Sverige deltar Karolinska Institutet och Stockholms läns landsting. (<http://europa.eu.int/comm/environment/air/cape/>)

3 Klimatet i framtiden – ett globalt perspektiv

IPCC konstaterar i den tredje utvärderingsrapporten att jordens klimat på global skala har förändrats sedan förindustriell tid¹⁰ och att ett kontinuerligt ökande mätunderlag ger en tydlig bild av en varmare jord. Den globala uppvärmningen under de senaste 50 åren beror enligt IPCC till en väsentlig del på utsläppen av växthusgaser¹¹ som leder till en förstärkt växthuseffekt. Globala sammanställningar av temperaturmätningar visar att mellan år 1860 och år 2000 har jordens medeltemperatur i genomsnitt ökat med $0,6 \pm 0,2^\circ\text{C}$ (Figur 3) om osäkerheterna tar hänsyn till bl.a. var och hur mätningarna gjorts. I Europa har medeltemperaturen ökat med ca $0,8^\circ\text{C}$ under samma tid. Den senaste tioårsperioden har varit den varmaste som hittills registrerats och det varmaste året hittills sedan 1861 är 1998. Nyligen har analyser visat att som nummer två i ordningen var år 2002 och 2003, som var lika varma.¹²



Figur 3 Globala medeltemperaturens utveckling för perioden 1860-2003 angiven som årliga avvikelser från medeltemperaturen för 30-årsperioden 1961-1990.¹³

Klimatet varierar i viss mån av helt naturliga skäl. En del av det hittills inträffade ryms inom naturlig variabilitet. Globala klimatsimuleringsmodeller har använts av olika forskargrupper för att studera möjliga orsaker till uppvärmningen. Naturliga fakto-

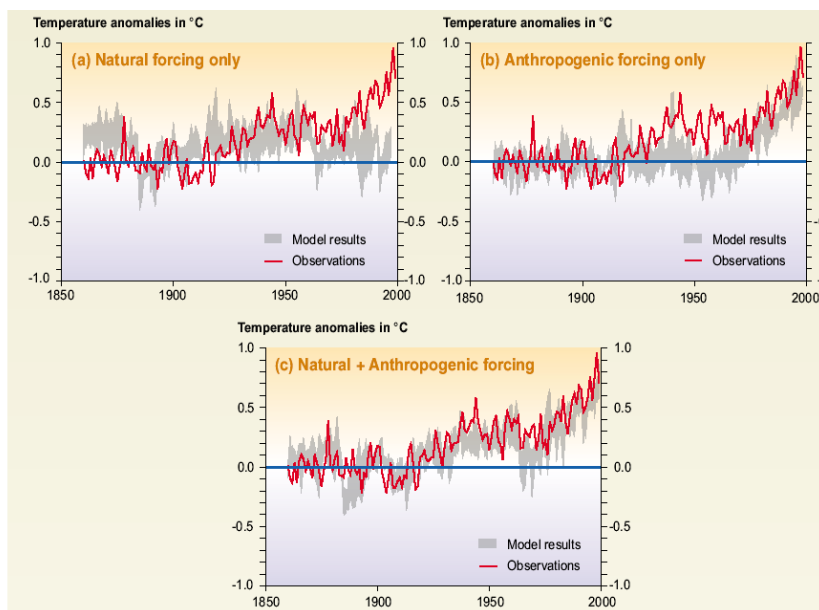
¹⁰ ”An increasing body of observations gives a collective picture of a warming world and other changes in the climate system.” (IPCC 2001a, sid. 2).

¹¹ ”There is new and stronger evidence that most of the warming observed over the last 50 years is attributable to human activities” (IPCC 2001a, sid. 10). I den föregående stora IPCC-utvärderingen från 1995 landade bedömningen på ”The balance of evidence suggest a discernible human influence on global climate”. Konstaterandet nu är en betydlig skärpning och baseras på nya mätdata, bättre modeller och vidareutvecklade analystekniker.

¹² National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) (www.noaa.gov); Climate Research Unit (CRU), University of East Anglia, UK.

¹³ CRU (2004)

rer; solvariationer, vulkanutbrott och klimatsystemets interna svängningar spelar en viss roll men den tydliga uppvärmningen de senaste årtiondena går bara att förklara då utsläppen också beaktas (Figur 4).



Figur 4 Fram till ca mitten av 1900-talet varierade medeltemperaturen på den globala skalan inte mer än det som går att förklara med naturliga faktorer (se text). Den konstaterade uppvärmningen de senaste 30-50 åren däremot kan förklaras bara med hänsyn tagen till utsläppen.¹⁴

En fortsatt mänsklig påverkan på atmosfärens sammansättning kan enligt IPCC förväntas under 2000-talet. Till den tredje utvärderingen togs m ett omfattande scenariounderlag fram för hur världen kan utvecklas, i termer av befolkning, teknologi, jämställdhet osv. Dessa SRES-scenarier¹⁵ (se kapitel 5.1) mynnade ut i scenarier för framtida utsläpp. Eftersom hänsyn måste tas till upptag i havet och terrestra system, omsattes utsläppsscenarioer med kolcykelmodellering till effekt på atmosfärens sammansättning. Med global klimatmodellering beräknades därefter hur klimatet påverkas.

Dessa uppskattningar av en genomsnittlig global uppvärmning från år 1990 till år 2100 varierar mellan 1,4 och 5,8°C. Havsyttans nivå ökar då med mellan 0,09 och 0,88 m. Globalt ökar nederbörden, dock så att vissa områden skulle drabbas av mer torka. Spridningen av resultat beror på att flera olika scenarier för tänkbara framtida utsläpp studerats samt inverkan av kvarvarande osäkerhet om klimatets känslighet. Den förstnämnda faktorn har med samhällets fortsatta utveckling att göra. Den andra faktorn beror på klimatsystemets komplexitet. Osäkerheten kom-

¹⁴ IPCC (2001a, sid. 11); IPCC (2001b)

¹⁵ IPCC (2000a)

mer att minskas framöver med fortsatt kunskapsuppbyggnad men den kommer inte att helt försvinna.

Osäkerhet i detta sammanhang innebär inte att det inte finns kunskap. Det vore lämpligare att använda ordet sannolikhet, eller ordet risk som är förknippat med konsekvenserna. Inte ens en global uppvärmning på 1,4°C skulle gå omärkt förbi. Osäkerheten om hur mycket människan påverkar klimatet är en osäkerhetsfaktor i sig. Det är osannolikt att det inom en snar framtid kommer nya kunskaper som kan ge en säker grund för att kunna besluta om på vilken koncentration växthusgaserna måste stabiliseras för att undvika en ”farlig” påverkan på klimatsystemet. Det kortsiktiga reduktionsmålet måste därför kunna anpassas i takt med att ny kunskap om påverkan på klimatsystemet tillkommer. Därför skriver IPCC¹⁶ att ”valet av reduktionsbana måste balansera den ekonomiska risken med ambitiösa mål nu med den ekonomiska risken med att vänta med åtgärder”. Policyutmaningen är således att ta ställning till hur osäkerheten skall hanteras och hur *försiktighetsprincipen* kan tillämpas. Ett förslag för att hantera osäkerheten om det långsiktiga målet är en så kallad *garderingsstrategi*, en strategi som balanserar risken att agera för långsamt med att reducera utsläppen med risken att agera för snabbt¹⁷. Det kortsiktiga målet skall därför göra det möjligt att fortfarande nå riktigt låga stabiliseringsnivåer till en rimlig kostnad (se också kapitel 5.2).

Det är troligt att klimatet under 2000-talet kan komma att ändras både snabbt och mycket såväl globalt som regionalt om inga ambitiösa åtgärder genomförs för att minska utsläppen av växthusgaser. Dessa förändringar kan bli både snabbare och större än de förändringar som orsakats naturligt sedan den senaste istiden. Det är svårt att på ett bra sätt framräkna alla de eventuella följderna i perspektivet av snabba och stora förändringar. Paleoklimatologiska studier av forna klimatförhållanden målar upp en tydlig bild av att klimatsystemet ofta genomgått abrupta förändringar. Detta innebär att klimatsystemet är känsligt för påverkan och att förändringarna kan komma språngvis. Det kan också vara så att det är första gången som klimatsystemet ser ut som det gör nu. Dagens halter av växthusgaser i atmosfären är enastående i samband med att stora inlandsisar existerar på Antarktis och Grönland. Ozonskiktets förtunning, luftföroreningar, och omfattande landskapsförändringar är ytterligare faktorer som kan skilja läget idag från tidigare perioder. Ett slående exempel av svårigheten att förutse konsekvenserna av nya faktorer är ozonskiktets förtunning vars allvar slog världen med häpnad. De industriella gaserna som låg bakom problemet var för det mesta klorbaserade. Hade det handlat om brom, skulle följderna ha blivit mycket större, i och med att brom bryter ner ozon effektivare än klor.

Det är inte minst den ökande förståelsen för hela klimatsystemet som banar väg för att bättre ta hänsyn till överraskningar. Kunskaper saknas om s.k. ”switch and chokepoints”, d.v.s. trösklar i systemet vars överträdelse karakteriseras av en ändring i förhållandet mellan påverkan och förändring. I stället för fortsatta gradvisa

¹⁶ IPCC (1996)

¹⁷ Ha-Duong m.fl. (1997)

förändringar i proportion till den fortsatta ändringen i påverkan kanske systemet ändras plötsligt på oönskade sätt. Exempel på sådana utvecklingar skulle kunna vara kollaps av den västantarktiska inlandsisen, kollaps av den naturliga kolcykeln till havs och på land, frigörelse av metan inkapslad i permafrost och havsbottnar och omdirigering av havsströmmarna. Idag saknas kunskap att uppskatta hur stora dessa risker är, bortsett från att de är tänkbara samt att riskerna bedöms öka ju mer klimatet påverkas. Konsekvenserna skulle vara globala.

Under senare år har dock beskrivningen av de oceanografiska processerna i klimatmodellerna förbättrats vilket bl.a. lett till att naturliga storskaliga cirkulationsmönster nu kan simuleras bättre. Flera globala klimatmodeller antyder att den omsättning av atlantiska havsvattenmassor som sker p.g.a. skillnader i densitet och temperatur (den s.k. termohalina cirkulationen, THC) avtar som en effekt av den globala uppvärmningen. Därmed avtar de relaterade havsströmmarna (t.ex. Golfströmmen) och den värmetransport de medför till Nordatlanten. I beräkningarna för 2000-talet som utgår från IPCC:s scenarier, framstår ett regionalt minimum i uppvärmningen på Nordatlanten, samtidigt som de omgivande landmassorna värms upp. Ingen av beräkningarna med kopplade globala klimatmodeller och IPCC:s scenarier leder till en avstängning av THC under 2000-talet. Detta innebär dock inte att risken kan avfärdas utan bör omvärderas i takt med att modellerna utvecklas och nya mätdata tas fram. Hittills har en del studier gjorts som tyder på att med tillräckligt stor, snabb och/eller långvarig global uppvärmning kan tröskeln till avstängningen överskridas, vilket betyder att värmetransporten stängs av.

3.1 Globala utsläppsscenarier

3.1.1 Trend till 2100

IPCC publicerade år 2000 en rapport om scenarier för framtida globala utsläpp av växthusgaser¹⁸. Scenarierna kan betraktas som referensscenarier i den meningen att de beskriver en utveckling utan direkta åtgärder för att minska utsläppen och förhindra en klimatförändring. Scenarierna är indelade i fyra olika scenariefamiljer, A1, A2, B1 och B2, där varje familj har liknande antaganden om demografisk, social, ekonomisk, teknisk och miljömässig utveckling under de kommande 100 åren. Scenarierna representerar ett brett spann av möjliga utvecklingsvägar under de kommande 100 åren (Figur 5). Inget scenario pekas ut som mer troligt än något annat.

- **A1-familjen** beskriver en framtida värld med snabb ekonomisk tillväxt, låg befolkningsökning fram till 2050 och därefter en befolkningsminskning och snabb introduktion av ny effektiv teknik. Huvudtemat är utjämning mellan regioner, kapacitetsuppbyggnad och utökad socialt och kulturellt utbyte med en betydande utjämning i inkomst per capita. A1-familjen indelas i tre olika undergrupper som beskriver olika tekniska utvecklingsvä-

¹⁸ IPCC (2000a)

gar för energisystemet; fossilbränsleintensiva (A1FI), icke-fossilbaserade (A1T) och ett balanserat (A1B) mellan dessa mer extrema scenarier.

- **A2**-familjen beskriver en heterogen värld. Det underliggande temat är bevarande av lokal identitet. Befolkningsutvecklingstrender konvergerar långsamt mellan olika regioner vilket resulterar i en kontinuerligt växande befolkning. Den ekonomiska utvecklingen är framför allt regional och ökningen av per capita inkomst och teknologisk förändring är mer fragmenterad och långsammare än i övriga familjer.
- **B1**-familjen beskriver en konvergerande värld med samma befolkningsutvecklingsmönster som A1 men med en snabbare förändring i den ekonomiska strukturen mot en service och informationsekonomi. Tyngdpunkten ligger på globala lösningar för hållbar utveckling med ökad rättvisa.
- **B2**-familjen beskriver en värld i vilken tyngden ligger på lokala lösningar för ekonomisk, social och miljömässigt hållbar utveckling. Det är en värld med kontinuerligt växande befolkning med en takt som är långsammare än i A2, den ekonomiska utvecklingen är på en medelnivå och mindre snabba teknikförändringar än i A1 och B1.

Scenario	Population	Economy	Environment	Equity	Technology	Globalization
A1FI						
A1B						
A1T						
B1						
A2						
B2						

Figur 5 Indikatorer avseende den globala socio-ekonomiska utvecklingen i flera SRES scenarier. Kvalitativ skiss.¹⁹

Ju längre fram i tiden som skattningarna av den globala och regionala utvecklingen och de drivkrafter som finns bakom utsläppen avser, desto svårare blir det. Utvecklingen de närmaste åren och kanske de närmaste decennierna begränsas av samhällets redan pågående utveckling. Exempelvis ger A1B och B2 samma stor-

¹⁹ IPCC (2001c, sid. 24)

leksordning av utsläpp vid år 2100 men vägen dit är olika och därmed resulterar de i olika ackumulerade utsläpp och följaktligen olika koncentrationer av växthusgaser i atmosfären. Av sammanlagt sex scenarier visar två på utsläpp som ligger under 1990 års nivå medan övriga ger en ökning mellan en fördubbling och en fyrdubbling av utsläppen till 2100.

3.2 Effekter på ekosystem och samhälle

Temperaturvariationer under 1900-talet har redan hunnit påverka många fysikaliska och biologiska processer genom t.ex. minskande glaciärer och permafrost och förlängd växtsäsong. De förutspådda klimatförändringarna kommer att innebära både positiva och negativa effekter. Ju större klimatförändringen blir, desto mer dominerar de negativa effekterna. Samhällets sårbarhet inför en klimatförändring avgörs främst av dess omfattning och med vilken hastighet förändringen inträffar. I stort sett hela samhället med dess olika sektorer och näringar kan påverkas, såsom jordbruk, skogsbruk, fiskerinäringen, vattenresurser, samhällsbyggande, ekosystem på land och i vatten liksom människors hälsa.

3.3 Anpassningsbehov till ett förändrat klimat

IPCC menar att det redan är för sent för att helt undvika effekter av en klimatförändring, t.ex. översvämningar i lågt liggande kustområden. Anpassning till ett varmare klimat med nya förutsättningar för en rad sektorer är därför en nödvändig strategi och bör komplettera åtgärder för att begränsa en klimatförändring. Nederländerna har tidigt påbörjat diskussioner om vilka anpassningsåtgärder som kommer att behövas för att minska effekterna av en stigande havsyta. För vissa regioner kan det bli nödvändigt att byta grödor eller trädslag för att säkra livsmedelproduktionen och skogsbruket. I smältande permafrostområden i Kanada och Ryssland behövs insatser för att minska effekter av kollapsande vägar, byggnader, pipelines etc. Mycket tyder på att det är de minst utvecklade länderna som kommer att drabbas hårdast av en klimatförändring. Dessa länder har också sämst kapacitet att anpassa sig till ett förändrat klimat eftersom de har begränsade ekonomiska resurser, låg tekniknivå, bristfällig tillgång till information och kunskap, bristande infrastruktur, instabila och svaga institutioner samt ojämlig fördelning av makt och resurser.

3.4 Åtgärdsbehov för att minska utsläppen

En stabilisering av koncentrationen av växthusgaser i atmosfären kommer att kräva utsläppsbegränsningar i alla regioner. Minskade utsläpp kräver nya metoder för att utvinna energi, nya bränslen för transporter och ny förbränningsteknik i motorer. Dessutom krävs satsningar på effektiviserad energianvändning.

Betydande tekniska framsteg har gjorts på senare tid och det snabbare än väntat. Exempel är utveckling av vindturbiner, hybridbilar, bränslecellsteknologi och

teknik för underjordisk lagring av koldioxid.²⁰ Utveckling av styrmedel är en viktig del i åtgärdsstrategierna för implementeringsfasen.

²⁰ IPCC (2001c, sid. 5)

4 Klimatet i framtiden – ett svenskt perspektiv

I Sverige kan konstateras att både temperatur och nederbörd ökat under de senaste decennierna. Eftersom naturliga mellanårssvängningar brukar vara mer omfattande på begränsade områden, jämfört med den globala skalan, är det fortsatt omöjligt att veta hur mycket av de hittills upplevda regionala förändringarna som beror på den globala uppvärmningen. De senaste 10-15-årens uppmätta regionala klimatdata visar dock samma tendenser som kommer fram i beräknade framtids-scenarier för 2000-talet.²¹

Globala klimatsimuleringar ligger till grund för de regionala klimatscenarier för det nordiska området och Sverige som togs fram av SWECLIM-programmet.²² En viktig fördel med regionala beräkningar är att en betydligt högre upplösning kan tillämpas i beräkningarna och att regionala särdrag, såsom Östersjön, älvsystem, insjösystem och fjällkedjan kan beskrivas mer realistiskt. De regionala särdragen påverkar klimatet och kan ge upphov till lokalt viktiga återkopplingar till en stor-skalig klimatutveckling på den globala skalan. Upplösningen påverkar även representationen av processer som väderfronter, konvektion, nederbörd samt extremer av olika slag i modelleringar. SWECLIMs regionala modelleringar gjordes med det avancerade regionala modellsystemet som utvecklades i programmet. De regionala scenarierna gjordes med randvärden från globala klimatsimuleringar från Hadley Centre i England och från Max-Planck-Institutet för meteorologi i Tyskland. De globala simuleringarna i sin tur hade gjorts baserat på utsläppsscenarioerna SRES²³ A2 och B2 fram till år 2100. I det ena av dessa fortsätter utsläppen att öka rätt kraftigt under 2000-talet, medan i det andra utvecklas världen på ett sätt som bromsar ökningstakten något.²⁴ Dessa scenarier är de som mest använts i klimatmodellering internationellt de senaste åren. Sammanlagt studerades fyra olika fall med regionala scenarier. Tillgången till globala simuleringar har styrt valet av fallen som studerats med den regionala modelleringen.

De regionala scenarierna avser förändringar från perioden 1961-1990 fram till 2071-2100. Höjningen av jordens medeltemperatur varierar i de globala modelleringarna som regionaliserats mellan 2,4°C (lägre utsläpp, båda globalmodellerna) och 3,4°C (större utsläpp, båda globalmodellerna). Valet av utsläppscenario är

²¹ SMHI (2003a)

²² SMHI (2003b)

²³ IPCC:s Special Report on Emissions Scenarios (IPCC, 2001a). Se också avsnitt 5.1

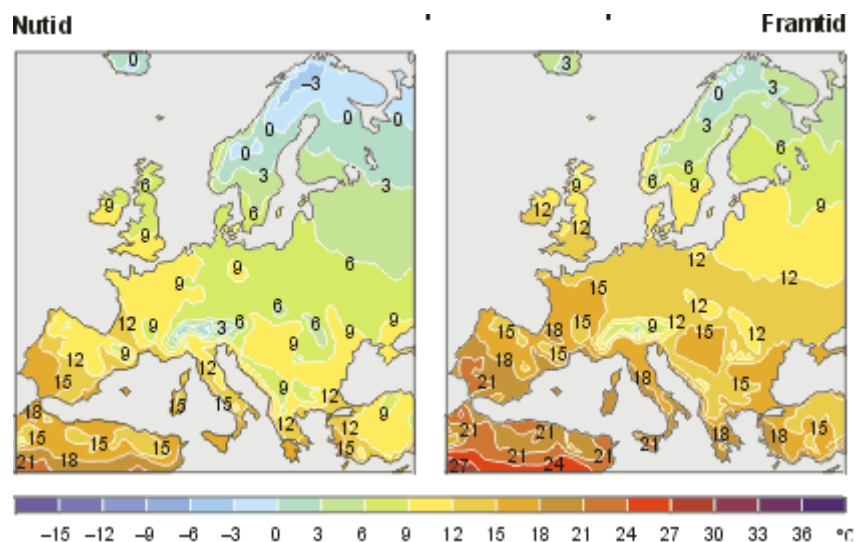
²⁴ Uttryckt i ekvivalenta mängder koldioxid blir den globala ökningen i det ena fallet 130 % (B2) och i det andra 220 % (A2). Uttryckt i ppm av *ekvivalent koldioxid*, motsvarar de regionala scenarierna en förändring från ca 440 ppm (den nutida halten) till 822 respektive 1143 ppm. Eftersom den ekvivalenta koldioxidhalten inkluderar effekten av andra gaser såsom metan m.m., är den alltid högre än halten av ”ren” koldioxid. I scenarierna ökar atmosfärens *koldioxidhalt* till ca 600 respektive ca 850 ppm, att jämföra med den nutida halten av koldioxid i atmosfären på drygt 370 ppm.

avgörande för hur stora förändringarna blir i modellerna. Valet av globalmodell som den regionala modelleringen utgår från leder också till en del regionala skillnader, trots att den globala utvecklingen är snarlik.

Enligt IPCC:s senaste utvärdering, som omfattar flera utsläppsscenarioer och utgår från flera globala klimatmodeller, kan den globala uppvärmningen bli 1,4-5,8°C från 1990 till 2100.²⁵ De regionala scenarierna som beskrivs ovan motsvarar en global uppvärmning på ca 2,4 alternativt på ca 3,4°C. Satt i relation till det mer omfattande globala scenariounderlaget från IPCC framträder dessa regionaliseringar inte som extrema scenarier på en tidsskala om 100 år. De är istället jämförbara med mittenregionen av de olika utsläppsscenarioer och klimatmodellers uppskattningar av klimatets känslighet som betraktas i den internationella klimatforskningen och IPCC:s arbete. Båda scenarierna överskrider dock de långsiktiga stabiliseringsmål som formulerats i Sverige och inom EU (se Figur 7).

4.1 Effekter i Sverige av en klimatförändring

I SWECLIM:s scenarier från 2002²⁶ ökar årsmedeltemperaturen i Sverige något mer än på jorden i genomsnitt (Figur 6). Dels är det närheten till Arktis som inverkar, dels den storskaliga kontrasten mellan land och hav.²⁷ Med utgångspunkt i den tyska globalmodellen blir uppvärmningen i Norden något större jämfört med den brittiska globalmodellen. Oavsett val av globalmodell ger scenarier med större utsläpp även regionalt större förändringar jämfört med scenarier med en långsammare utsläppsökning.



Figur 6 Årsmedeltemperaturens förändring i Europa på 100 års sikt.

²⁵ IPCC (2001a)

²⁶ SMHI (2003c).

²⁷ I globala klimatberäkningar för 2000-talet sker uppvärmningen snabbare över land än över hav och speciellt stora temperaturhöjningar beräknas över Arktis där havsisen minskar

De beräknade regionala förändringarna i nederbörd och avdunstning visar betydande variationer inom regionen och mellan årstiderna. Ökningarna i både nederbörd (P) och nettot av nederbörd och avdunstning (P-E) är som störst under vintern. Över stora områden beräknas nederbörden då öka med 30-60 %. Den högre temperaturen gör att snötäcket ändå blir mindre omfattande och kortvarigare, trots nederbördsökningar inom stora områden. Under sommaren beräknas nederbörden minska med 20-40 % i Danmark, Sydsverige och Sydnorge. Minskningen av nettot av nederbörd och avdunstning (P-E) är i dessa södra regioner större än minskningen i själva nederbörden eftersom avdunstningen ökar med värmen.

Uppvärmningen gör att vegetationsperioden skulle förlängas med 1-2 månader i Sverige, vilket innebär att vegetationens återkopplingar kan påverka klimatutvecklingen i tillägg till effekter på kolsänkor, ekosystem och produktion av virke och grödor.

Vattenföringsförändringarna följer i stort förändringarna i skillnaden mellan nederbörd och avdunstning (P-E) vilket innebär ökad vattenföring i norr och minskad vattenföring i söder. Den i dag karakteristiska vårfloden blir mer oregelbunden och mindre kraftig i genomsnitt. Översvämningsriskerna beräknas minska under våren men öka under andra årstider. Vattenföringsförändringen medför en ökad tillrinning av färskvatten till Östersjön i norr, där Bottenviken blir än mer utsötad än idag. Tillrinningen blir mindre i söder, där den även kan minska.

Vindstyrka och vindfrekvens skiljer sig åt längs den norska atlantkusten i de olika modelleringarna. Detsamma gäller förändringar i marknära vindar, från obefintliga till kraftiga. I de fall beräkningarna antyder en ökning är det speciellt på vintern de inträffar.

De framtida klimatförändringarna enligt scenarierna är inte små i ett svenskt perspektiv, även om de jämfört med andra regioner kan te sig som måttliga. Redan i Centraleuropa stiger årsmedeltemperaturen i SWECLIM:s scenarier med upp till 6°C under 2000-talet. I en av simuleringarna ökar sommartemperaturen (juni-augusti) med upp till 10°C i Centraleuropa mot slutet av seklet. Den årliga nederbörden beräknas minska med ca 30 % och under sommarmånaderna med 50-60 %. Förändringar av denna storlek medför naturligtvis stora problem inom många områden. Variationen mellan de olika simuleringarna från SWECLIM är större över Centraleuropa än över norra Europa. Att speciellt vintrarna påverkas i Norden och somrarna på kontinenten är dock ett gemensamt drag för SWECLIM:s beräkningar och beräkningar från motsvarande internationella forskargrupper.

4.1.1 Extrema värden och medelvärden

Såväl globala som regionala modeller har hittills använts mest till att studera tidsmedelvärden för temperatur och nederbörd. De mest katastrofala effekterna av ett förändrat klimat förknippas dock med extrema vädersituationer, som skyfall, långvarig torka och stormar. I och med att modelleringar blir fler, längre och mer

detaljerade, har det den senaste tiden startats fler studier av förändringar i variabilitet och extremer. Resultaten pekar på att det är mycket troligt att det i framtiden på sina håll blir mer torra, intensivare nederbörd, fler tillfällen med riklig långvarig nederbörd och fler stormar. SWECLIM:s preliminära analyser för Europa talar om en intensifiering av sommarnederbörden även där nederbörden beräknas minska i medeltal. Ökningen i vinternederbörden i Norden orsakas huvudsakligen av fler nederbördsdagar.

Statistiken från SMHI visar inte i nuläget på några tydliga trender för extrema väderhändelser i Sverige, trots ett antal minnesvärda händelser de senaste åren. Detta utesluter inte påverkan. Dels kan förändringarna hittills vara så små att de inte kan särskiljas från de naturligt förekommande vädersvängningarna. Dels är extremer sällsynta och det krävs många observationer innan en bestående förändring av extremer går att fastställa. I ljuset av beräkningarna bör dock vissa extremer förväntas förvärras ju mer klimatet påverkas.

4.2 Behov av regional anpassning

Sårbarhet och risker i Sverige har varit föremål för enstaka analyser²⁸, men hittills har inte något sammanhållet program utvärderat behov, möjligheter och kostnader av anpassningsåtgärder.²⁹

4.2.1 Behov av anpassning av bebyggelse och samhällets övriga infrastruktur – pågående aktiviteter

Tekniska system är anpassade med avseende på rådande lokala/regionala förhållanden. Genom Sveriges läge, med påverkan av vindar och vädersystem från Atlanten, kommer nederbörden troligen att öka vid en global uppvärmning. De allvarligaste problemen hör samman just med ökad nederbörd. Ökad nederbörd ökar risken för översvämningar och därmed förknippade problem som ras, skred, utlakning av föroreningar osv. En rad samhällsfunktioner är dimensionerade efter extremvärden från tidigare perioder med annan nederbördsregim. Det kan gälla belastning på byggnader av vind och tung blötsnö, dricksvattenförsörjning, elkraftförsörjning, dammsäkerhet och säkerhet mot översvämningar, dimensionering av dagvatten och avloppsledningar för att nämna några exempel. Det är därför viktigt att inte fästa vikten enbart vid medelvärden vid analysen av olika klimatscenarier utan dessutom väga in att även extremvärden förändras. Detta ställer åter stora krav på upplösning och precision i de beräkningsmodeller som ligger till grund för klimatscenarierna och konsekvensanalyser.

Tekniska system med kort livslängd hinner bytas ut och anpassas efterhand. För de mer långsiktiga investeringar som också kräver stora ekonomiska insatser blir

²⁸ Miljödepartementet (2001); Naturvårdsverket (1998).

²⁹ I FORMAS rapport *Klimatforskning* 2003 finns förslag på forskningsbehov. FORMAS har 2004 en utlysning där vissa av dessa forskningsbehov finns upptagna, dock som enskilda projekt. I Sveriges tredje nationalrapport om klimatförändringar, NC3, (Miljödepartementet, 2001) och i rapporten Effekter av ett förändrat klimat från Naturvårdsverket (Naturvårdsverket, 1998).

problembilden en annan. Problemen har påtalats i olika sammanhang³⁰ och under senare år har det inom några sektorer påbörjats diskussioner med syfte att se över sårbarheten för en klimatförändring och vilket anpassningsbehov till ett förändrat klimat som finns. Hittills är det främst risken för översvänningsolyckor som uppmärksammas. Att problemen uppmärksammas har dock än så länge inte lett till några konkreta åtgärder, med undantag för t.ex. Kristianstad, som anpassar staden för att klara de höga vattennivåer som kan orsakas av kommande höga flöden.

Mer forskning om kombinerade risker (bl.a. i samband med översvämningar) i samhället skulle behövas. Elförsörjningsproblemet som uppstår i samband med översvämningar är ett exempel. Med en sådan angreppsvinkel blir framtidsprognoser säkrare, men de klimatscenarier som tas fram kommer alltid att kräva att osäkerheter/sannolikheter hanteras. En riskhanteringsmetodik kommer att krävas eftersom ingen kan säga något *säkert* om utvecklingen.

4.2.2 Anpassningsbehov till följd av förändringar av ekosystem – pågående aktiviteter

Sverige sträcker sig över flera breddgrader från subboreal zon i söder till boreal och arktisk-alpin vegetationszon i norr, vilket innebär en stor variation av arter och biotoper. En temperaturhöjning kommer därför att förskjuta naturliga vegetationszoner och kan även leda till utslagning av vissa arter, främst i fjällen. Förbuskning av fjällhedar är ett troligt scenario.

Jordbrukssektorn har inte någon uttalad strategi. Grödor har kort omloppstid och kan därför anpassas när det blir aktuellt.

SLU forskar om behov av anpassning inom *skogssektorn*. Man genomför bl.a. fältexperiment om potentiella effekter på skogsproduktionen av ett förändrat klimat. Forskningen är inriktad på bl.a. skogsskötsel för att minska effekten av stormskador³¹, minskad avgång av växthusgaser³², ökad produktion i ett varmare klimat osv.

I England har förståelsen för en klimatförändring och dess effekter på samhällets infrastruktur och därmed behov av anpassning och åtgärder från sektorer och branscher ökat genom tillskapandet av ett program för att skapa uppmärksamhet om klimatfrågan.³³ Systematiskt har sektorer varit föremål för noggrann analys i ljuset av en regional klimatmodell.³⁴ Vissa försök har gjorts i Sverige³⁵ men det skulle behövas ett bredare grepp som också sätter kostnader för anpassningsåtgär-

³⁰ Naturvårdsverket (1998); Miljödepartementet (2001, kap. 5); SWECLIM-Programmet och Klimatkampanjen.

³¹ SUFOR, Uthålligt skogsbruk i södra Sverige. Mistraprogram 1996-2004

³² LUSTRA (Land Use Strategies for Reducing Net Greenhouse Gas Emissions). Mistra-program 1999-2006

³³ UK Climate Impacts Programme, UKCIP (se: <http://www.ukcip.org.uk>).

³⁴ Hulme m.fl. (2002)

³⁵ Naturvårdsverket (1998).

der i samband med kostnader för åtgärder för att minska utsläppen. Kostnader som undviks om åtgärder för att minska utsläppen genomförs borde studeras samtidigt.

5 Möjligheter till stabilisering

För att genomföra de åtgärder som krävs för att undvika en ökad koncentration av växthusgaser i atmosfären som skulle ge allvarliga konsekvenser behövs förutom ny teknik också styrmedel för att den önskade inriktningen skall följas. Viktigt är också att skapa acceptans, men också att ha kunskap om hur stor acceptansen är samt vilka hinder och möjligheter för genomförande som finns.

Scenarioutveckling av effekter och olika åtgärders inverkan på klimatet är en viktig del i forskningen kring stabilisering av klimatförändringen och verktygen för detta är bl.a. energimodellering, ekonomisk modellering och klimatmodellering.

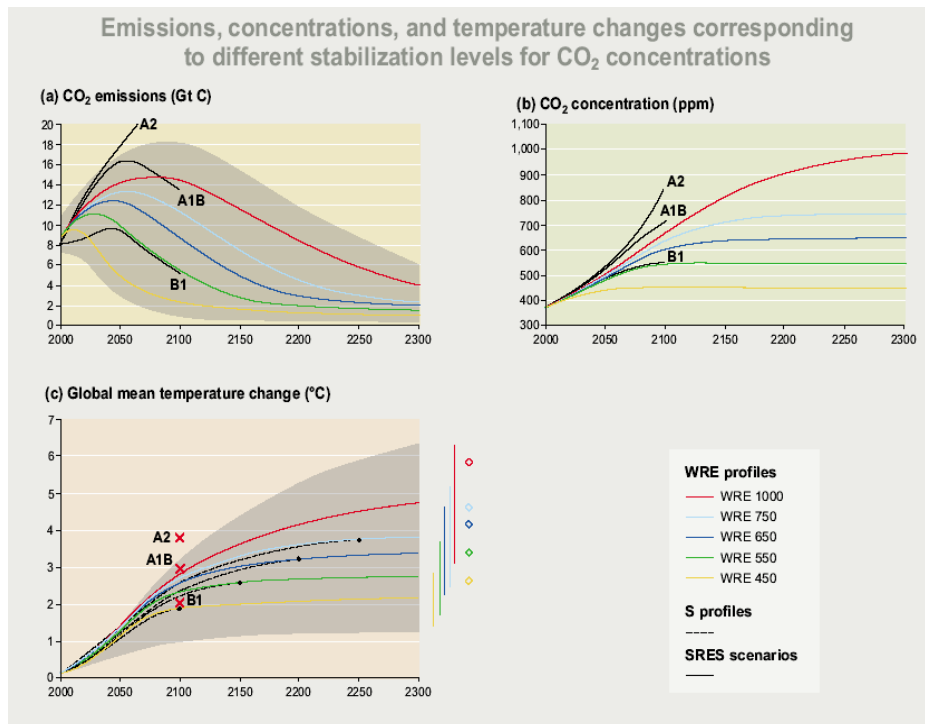
5.1 Stabiliseringsscenarier

Vid IPCC:s tredje utvärdering fanns endast några få stabiliseringsstudier omsatta till klimatscenarier med hjälp av avancerade globala klimatmodeller. Dessa beskrevs som ”illustrativa exempel”. IPCC hade för sina tidigare utvärderingar använt sig av stabiliseringsscenarier enligt WRE³⁶, S³⁷ i tillägg till de transienta scenarierna IS92. Till den tredje utvärderingen tillkom SRES-scenarierna.³⁸ De olika stabiliseringsnivåerna som finns med i S och WRE har främst använts för att analysera global medeltemperaturhöjning med förenklad klimatmodellering (Figur 7 och Figur 9).

³⁶ Wigley m.fl. (1996)

³⁷ IPCC (1994)

³⁸ IPCC (2000a)



Figur 7 Stabiliseringsfall, från 450 till 1000 ppm, studerade med enkla modeller (IPCC, 2001c). Grå områden tydliggör att fastställandet av stabiliseringsnivån lämnar kvar en osäkerhet om såväl hur stora eller små utsläpp som kan tillåtas (a) samt hur stor den globala uppvärmningen blir (c). Tidpunkten när stabiliseringen av atmosfärshalten sker i de olika fallen anges med en svart symbol i (c).

Det framstår tydligt att klimatförändringarna tilltar med ökande koldioxidhalt vid en stabilisering. Även efter att en stabilisering inträffar fortsätter klimatet att ändras i flera hundra år, dock med en förändringstakt som avtar med tiden. Förenklad klimatmodellering kan emellertid inte ligga till grund för konsekvensanalyser. Nya scenarier behövs således för man skall kunna avgöra vilka effekter i miljö och samhälle som olika stabiliseringsnivåer medför och därmed vilka anpassningsåtgärder som kommer krävas. Dessa scenarier kan dessutom ge en större insikt i vad som är farlig antropogen påverkan på klimatet.

Hur mycket nytt om klimatförändringar vid stabiliseringsscenarioer som kommer att göras fram till IPCC:s kommande fjärde utvärderingsrapport är oklart. IPCC planerar inte att ta fram helt nya utsläppsscenarioer. Vissa justeringar av befintliga SRES-scenarioer har diskuterats. Eftersom SRES omfattar flera olika, tänkbara, framtida utvecklingar, är det dock avgörande att modelleringar koordineras internationellt så att de omfattar dels olika utsläppsscenarioer och dels flera modelleringar av enstaka utsläppsscenarioer (jfr. osäkerheten om klimatets känslighet). I det löpande IPCC-arbetet har det nämnts att IPCC avser att rekommendera att klimatmodelleringscentra åtar sig att ta fram stabiliseringsscenarioer. I stället för att arbeta genom hela kedjan från världsutveckling, utsläpp och kolcykelmodellering, föreslås att klimatmodelleringar gjorda för 2000-talet utifrån SRES-scenarioerna förlängs framåt från de atmosfärshalter som nåtts vid år 2100. Således kan stabili-

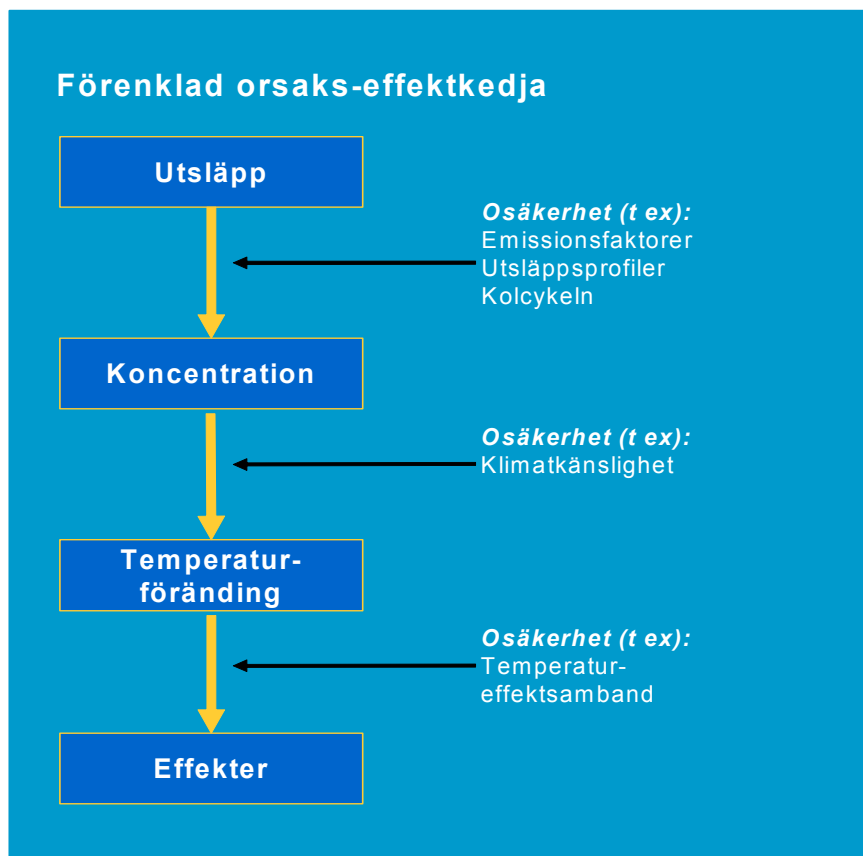
seringsnivåer från ca 500 ppm till runt 1000 ppm koldioxid studeras. I S och WRE beskrevs inte hur de övriga växthusgaserna utvecklas över tiden.

SRES-scenarierna kan betraktas som referensscenarier i den meningen att de skall beskriva en utveckling utan införsel av nya åtgärder specifikt för att minska utsläppen och förhindra en klimatförändring. Utöver SRES har det inom ramen för IPCC:s arbete även utvecklats stabiliseringsscenarier (Post-SRES³⁹) som använts för att analysera behov av att reducera utsläppen av växthusgaser, men inte för att studera klimatförändringar. Dessa stabiliseringsscenarier är baserade på SRES och stabiliseringsnivåerna ligger mellan 450 och 750 ppm. Harmonisering med SRES-scenarierna skedde genom koordinerade värden för BNP, befolkningstillväxt och total energiefterfrågan.

5.2 Långsiktiga mål

Enligt Klimatkonventionen skall koncentrationen av växthusgaser i atmosfären stabiliseras på en nivå där farlig antropogen påverkan på klimatsystemet undviks. Klimatkonventionen definierar emellertid inte vad som utgör farlig påverkan på klimatsystemet. Det är omöjligt att definiera den precisa innebörden av ”farlig”, i termer av en stabiliseringsnivå eftersom (i) det lämnar kvar en osäkerhet om hur mycket klimatet förändras och vilka konsekvenserna blir och (ii) beslutet om att en viss nivå av risk är acceptabel eller farlig är en värdebedömning. Vad en säker långsiktig stabiliseringsnivå innebär för koncentrationen av växthusgaser i atmosfären är därför slutligen en politisk fråga, eftersom det är den politiska viljan som avgör vad som är farligt. Politiska beslut måste dock bygga på vetenskapligt underlag där man tar hänsyn till osäkerheterna (Figur 8).

³⁹ IPCC (2001c)



Figur 8 I IPCC-arbetet hanteras stora osäkerheter, speciellt när man kommer till påverkan på ekosystem och samhälle eftersom indata till denna analys passerat många osäkra steg. Osäkra utsläppsscenarioer används och kombineras med osäkerheter i kolcykelmodeller, vilka kombineras med osäkerheter i klimatmodellerna vilka slutligen kombineras med osäkerheter i analysen av påverkan på ekosystem och samhälle.⁴⁰

Osäkerheterna är än idag omfattande vilket gör att IPCC i sin tredje utvärderingsrapport rekommenderar beslutsfattare att i sina kortsiktiga strategier tillämpa en garderingsstrategi, d.v.s. att mål på kort och medellång sikt skall göra det möjligt att fortfarande nå riktigt låga stabiliseringsnivåer till en rimlig kostnad.⁴¹ Det finns länder som antagit långsiktiga mål, men av olika typ. Vissa har valt att definiera en acceptabel *temperaturförändring* som tolkats till *farliga klimateffekter*. Andra har valt att definiera en acceptabel stabiliseringsnivå.

⁴⁰ Se till exempel Schneider (2001) för en längre analys.

⁴¹ IPCC (2001c, sid. 67)

Den svenska riksdagen har antagit som långsiktigt klimatmål att de sex växthusgaserna som inkluderas i Kyoto Protokollat skall stabiliseras på en halt lägre än 550 ppm CO₂-ekvivalenter (Prop. 2001/02:55). År 2050 bör de svenska utsläppen vara lägre än 4,5 ton koldioxidekvivalenter per år och invånare för att därefter minska ytterligare. Eftersom dagens per capita-utsläpp av växthusgaser är cirka 7,9 ton CO₂-ekv /år innebär det nu existerande målet att utsläppen måste minska med minst 40-45% till år 2050.

De ovan nämnda osäkerheterna medför problem med att sätta upp långsiktiga per capita-mål som det svenska för de olika växthusgaserna som aggregat. I beräkningarna av det svenska stabiliseringsmålet uppskattades att en stabilisering vid 550 ppm CO₂-ekvivalenter var liktydigt med en stabilisering vid 500 ppm CO₂. Enligt IPCC:s tredje utvärderingsrapport är dock en stabilisering vid 550 ppm CO₂-ekvivalenter mer sannolikt förenligt med en stabilisering om 450 ppm CO₂. Bland 28 av IPCC:s post-SRES-scenarier som skattar vilka koldioxidutsläpp som måste nås för att koldioxidkoncentrationen skall stabiliseras på 450 ppm ligger den nedre kvartilen på 2,14 och den övre kvartilen på 3,15 ton CO₂/capita år 2050, givet att de globala per capita-utsläppen utjämnas till 2050 (vilket antogs i den svenska delmålsberäkningen).⁴²

Värdena kan jämföras med 2001 års svenska koldioxidutsläpp om 6,8 ton CO₂/capita,år.⁴³ Ett rimligt förenklat antagande är att utsläppen av andra växthusgaser 2050 är 1 ton CO₂ekv/capita,år.⁴⁴ Med detta antagande behöver de svenska per capita-utsläppen av växthusgaser minska med 48-60 % fram till 2050 jämfört med dagens nivå, d.v.s. troligtvis mer än vad som uppskattades i den svenska delmålsberäkningen.

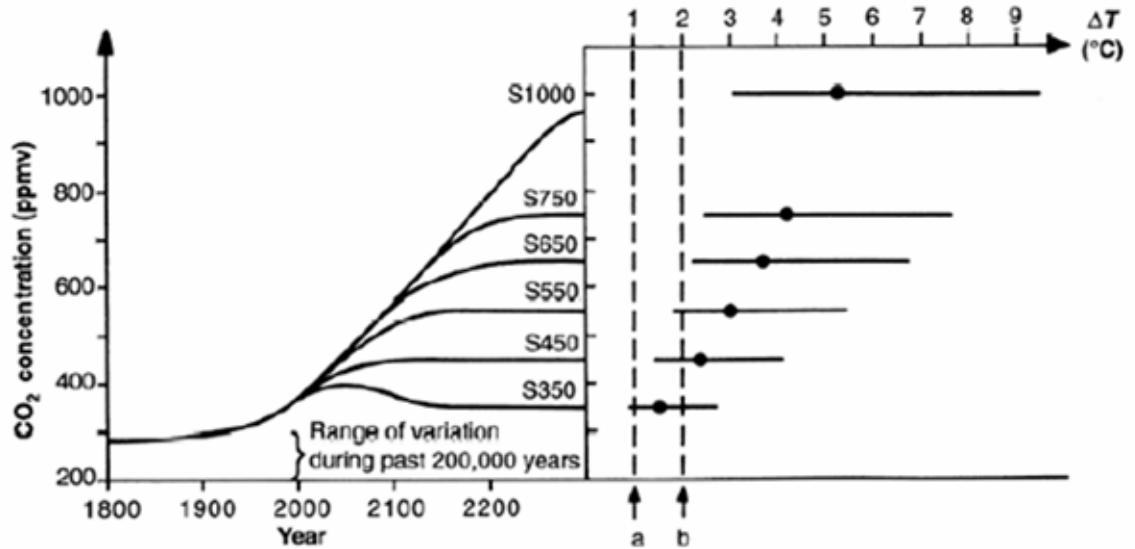
Rådet inom EU har också fastslagit ett mål. Istället för att definiera ett stabiliseringsmål fastslogs en övre gräns för hur mycket jordens medeltemperatur får öka. Denna gräns sattes till 2°C och tolkades vara ekvivalent med ett stabiliseringsmål om 550 ppm CO₂ - ett mål som också är antaget av Rådet. Att definiera ett temperaturmål innebär att osäkerheten i analysen av vilka utsläppsreduktioner som krävs blir betydligt större än vid ett stabiliseringsmål eftersom man måste hantera klimatkänsligheten utöver osäkerheter i emissionsfaktorer m.m. (Figur 8). I Figur 9 framgår att EU:s 550 ppm-mål inte nödvändigtvis är förenligt med målet att temperaturen får öka med högst 2°C. Vid tolkning av EU:s 2°C-mål till ett koncentrationmål bör en hög klimatkänslighet antas om man skall vara på den säkra sidan. Detta resulterar i att koncentrationen av koldioxid i atmosfären bör stabiliseras

⁴² Mer aktuella skattningar som till exempel Eickhout m.fl. (2003) hamnar på ännu lägre per capita-utsläpp 2050 för att klara 450 ppm, nämligen ca 1,8 ton/capita, år 2050. I samma rapport är utsläppen av övriga växthusgaser 2050 1 ton CO₂ekv/capita, år.

⁴³ Beräknat inklusive utsläpp från internationell sjöfart och luftfart. Eftersom per capita-kalkylerna baserar sig på verkliga globala utsläpp är det nödvändigt att på något sätt koppla dessa emissioner till något land. För annex I-länderna som helhet är utsläppen i storleksordningen 12 ton/capita, år.

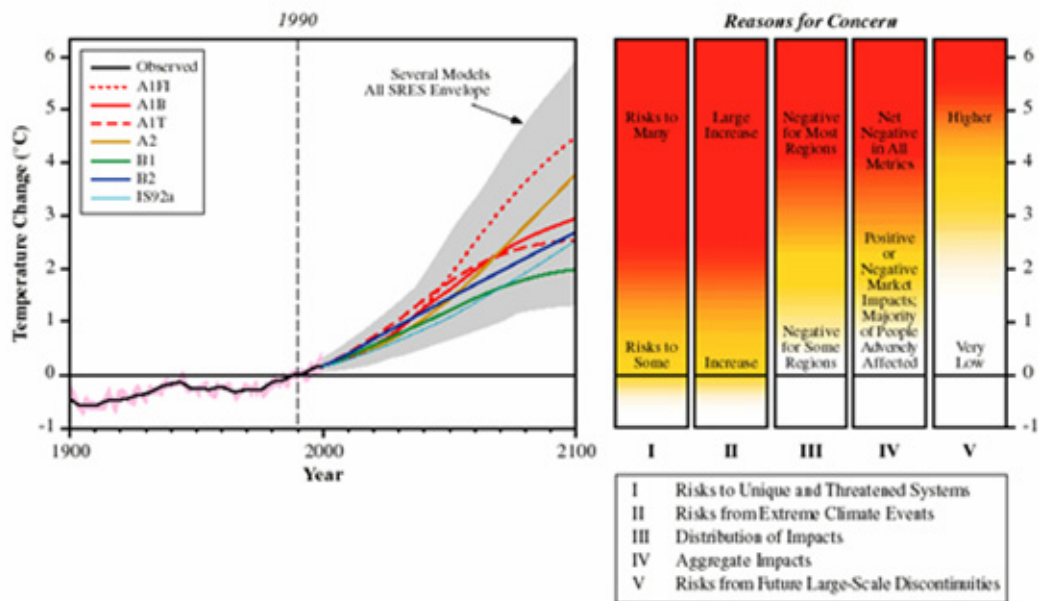
⁴⁴ Eickhout m.fl. (2003)

under 450 ppm. Om klimatkänsligheten är stor kan dagens koldioxidkoncentration vara för hög för att 2°C-målet skall kunna nås.



Figur 9 Till vänster: Stabiliseringsscenarier för CO₂. Till höger: Motsvarande jämviktsförändringar av den globala medeltemperaturen efter förindustriell tid. Streckade vertikala linjen benämnd (a) motsvarar den uppskattade variationen av globala medeltemperaturen de senaste 1000 åren och (b) motsvarar EU:s långsiktiga temperaturmål.⁴⁵

⁴⁵Azar och Rodhe (1997)



Figur 10 Risken för allvarliga konsekvenser ökar med omfattningen av klimatförändringen. Till vänster redovisas observerade temperaturökningar relativt till 1990 och spannet av projicerade temperaturökningar efter 1990 (från SRES). Till höger visas fem riskområden till 2100. Vitt: liten positiv eller negativ påverkan. Gult: negativ påverkan för vissa system eller låg risk. Rött: negativ påverkan eller omfattande risker. Analysen tar hänsyn till omfattningen av men inte hastigheten i förändringen.⁴⁶

Följderna av exempelvis $+2^{\circ}\text{C}$ är än så länge som bäst kvalitativt utvärderade. De negativa följderna bedöms dock öka med stigande temperaturhöjning (Figur 10). Frågan kvarstår om vad en temperaturhöjning på maximalt 2°C sannolikt skulle innebära då konsekvenser ännu inte är utredda. Vissa ansatser har gjorts på senare tid (t.ex. German Advisory Council on Global Change⁴⁷), som dock bör ses som preliminära och ofullständiga. Inom IPCC pågår diskussioner om denna fråga.

5.3 Kortsiktiga reduktionsbehov för långsiktiga mål

En viktig fråga är vilka reduktioner som behövs på kort sikt för att nå olika stabiliseringsnivåer på sikt. Det finns många olika vägar för utsläppsminskningar som leder till samma stabiliseringsnivå. Ju längre åtgärder skjuts upp desto snabbare måste utsläppen minska när åtgärder väl sätts in. I realiteten är dessutom valet av stabiliseringsnivå inte givet eftersom stabiliseringsnivån är en tolkning av farlig mänsklig påverkan på klimatsystemet. Som redan nämnts innehåller övergången

⁴⁶ IPCC (2001e, sid. 5)

⁴⁷ WBGU (2003)

mellan effekter, stabiliseringsscenarier och tillåtna utsläpp stora osäkerheter och IPCC rekommenderar därför att en garderingsstrategi tillämpas.⁴⁸

IPCC⁴⁹ har beräknat den procentuella reduktionen jämfört med 1990 års nivå som behövs till 2010, 2020 och 2030 i de olika stabiliseringsscenarierna (Tabell 1).

En viktig sak att ha i minnet är att det i två tredjedelar av scenarierna antas att åtgärder genomförs i utvecklingsländerna så att de avviker från sina referensbanor redan år 2020.

Tabell 1 Utsläppsnivåer mätt i procent av 1990 års nivå som beräknats för Annex 1-länder i post-SRES scenarier som når 450, 550 respektive 650 ppm CO₂ (de angivna värdena är mellan 25- och 75-percentilen, d.v.s. extremvärden finns inte med i tabellen). De olika haltnivåerna nås 2150. Inga restriktioner³ avseende maximal hastighet för temperaturhöjning är införda.

	2010	2020	2030
450 ppm CO ₂	81-94	66-87	48-89
550 ppm CO ₂	89-105	83-108	82-108
650, 750 ppm CO ₂	94-109	101-117	104-121

Värdena i Tabell 1 antyder att det för att nå 450 ppm CO₂ krävs reduktioner av utsläppen för Annex 1-länder år 2010 som överskrider deras åtaganden under Kyotoprotokollets första åtagandeperiod. Detta antyder också att en stabilisering vid 550 ppm CO₂ skulle kunna vara inom räckhåll utan att Annex 1-länderna behöver begränsa utsläppen till 2020 så mycket mer än deras åtaganden i Kyotoprotokollet. I och med USA:s avhopp förändras dock bilden. Utsläppen i USA, som motsvarar ca 25 % av världens samlade utsläpp av växthusgaser, låg år 2000 ca 12 % över utsläppsnivån år 1990 medan deras åtagande enligt Kyotoprotokollet är 7 % under 1990 års nivå under perioden 2008-2012. Detta innebär att övriga Annex I-länder kommer att behöva reducera sina utsläpp ytterligare om inte utvecklingsländerna antar några kvantitativa åtaganden. Man skall också komma ihåg att i detta förutsätts att u-länderna avviker från sina referensbanor. Görs inte det krävs ytterligare reduktioner i Annex I-länderna. Det är värt att också notera att det även finns scenarier som pekar på att en reduktion kan behövas till år 2010 även för att nå 550 ppm.⁵⁰

För att nå det svenska långsiktiga stabiliseringsmålet krävs stora reduktioner globalt till år 2050 samt att utsläppen därefter fortsätter att minska. För att nå ett mål på en koldioxidstabilisering på 550 ppm krävs inte lika kraftiga minskningar. Utöver Sverige har Tyskland och Storbritannien antagit formella ambitionsnivåer för medellång sikt. Tyska regeringen har beslutat sig för ett åtagande på 40 % under utsläppen 1990 till år 2020 om EU som grupp antar ett åtagande på 30 % under 1990 års utsläpp. Storbritannien har antagit en strategi där man skall verka för

⁴⁸ IPCC (2001c, sid. 67)

⁴⁹ IPCC (2001c)

⁵⁰ IPCC (2001c)

att de industrialiserade länderna utsläpp av växthusgaser reduceras med 60 % fram till 2050 samt att Storbritannien skall verka för att reducera sina koldioxidutsläpp med 60 % under samma period. Dessa reduktionsnivåer är sannolikt förenliga med en stabilisering på 550 ppm koldioxid. Även Frankrike diskuterar ambitionsnivåer för 2050, nämligen att man skall verka för att de globala utsläppen av växthusgaserna är halverade och att de industrialiserade länderna reduceras med en faktor fyra eller fem. Dessa ambitionsnivåer är förenliga med en 450 ppm stabilisering men ännu inte formellt antagna.

5.4 Ekonomiska konsekvenser

IPCC har visat att kostnaderna för att minska utsläppen av koldioxid så att koncentrationen i atmosfären kan stabiliseras på 550 ppm är måttliga. Kostnaderna vid en stabilisering på 450 ppm blir däremot större jämfört med 550 ppm, i huvudsak beroende på förtida avveckling av gjorda investeringar.

Kostnaderna för att implementera internationella krav på utsläppsminskningar varierar kraftigt mellan olika regioner beroende på hur de så kallade Kyotomekanismerna utnyttjas och deras samspel med de åtgärder som vidtas inom respektive land. Nyligen har Institutet för tillväxtpolitiska studier (ITPS) analyserat effekterna på Sveriges BNP av handel med utsläppsrätter.⁵¹ Det är värt att notera att dessa utgår från kostnads-nyttaspekter.⁵²

De ekonomiska kostnaderna för att nå en låg stabiliseringsnivå för koldioxid anses ofta höga. För att till exempel nå ett 450 ppm-mål skulle kostnaden för världen bli mellan 4 och 14 biljoner dollar.⁵³ Många andra studier visar på liknande siffror.⁵⁴ Dessa uppskattningar tar emellertid som regel inte hänsyn till minskade kostnader för klimateffekter och anpassning. Ur detta perspektiv är kostnaden stor och kan ge intryck av att hota den globala välfärden. Men ur ett annat perspektiv kan problemet te sig mindre avskräckande. De flesta modeller som används för att beräkna fram kostnaderna att stabilisera koncentrationen av växthusgaser i atmosfären på olika nivåer antar att världens BNP under de närmaste 100 åren kommer att växa med omkring en faktor 10. En kostnad för att stabilisera koldioxidkoncentrationen i atmosfären på 450 ppm skulle innebära att BNP skulle vara 10 gånger större ungefär två år senare, dvs. år 2102 istället för 2100.⁵⁵ En slutsats som kan dras av detta är att kostnaden i sig är hanterbar för världen. Problemet är snarare hur kostnaderna skall fördelas mellan länder, mellan olika företag, mellan olika sektorer och mellan generationer.

⁵¹ Bohm (2004)

⁵² I detta sammanhang torde en ansats baserad på kostnadseffektivitet bättre ha speglat viljan till att få fram förändringar i samhället.

⁵³ Manne och Richels (1997)

⁵⁴ IPCC (2001c, kapitel 8)

⁵⁵ Azar och Schnieder (2002)

Ett flertal studier har visat att stabiliseringsnivån är avgörande för om det är kostnadseffektivt att agera tidigt eller att vänta.⁵⁶ För att stabilisera koncentrationen av koldioxid i atmosfären på 450 ppm är det med stor sannolikhet kostnadseffektivt att agera tidigt. För en 550 ppm-stabilisering tyder mycket också på att tidigt agerande är att föredra, medan det för högre stabiliseringsnivåer sannolikt är mer kostnadseffektivt att vänta.

⁵⁶ Azar (1998); Richels och Edmonds (1995); Gritsevskiy och Nakićenović (2000)

6 Strategisk forskning och systematisk observation

Rubriken till detta kapitel är hämtad från förhandlingsagendan Research and systematic observation inom Klimatkonventionen. Klimatproblemet är komplext och det kommer därför att behövas nya forskningsdiscipliner⁵⁷ där forskningsbaserad kunskap om den politiska processen vid genomförandet av åtgärdsarbetet för att möta en klimatförändring studeras. Studierna bör beakta perspektiv som lösningar och möjligheter, frivilliga åtaganden, övervakning, nya teknologier och effektivisering.

Åtgärder för att komma till rätta med klimatproblemet kräver således mång- och tvärvetenskapliga forskningsinsatser som involverar forskare från såväl naturvetenskap, teknik och samhällsvetenskap. Det kan här bli nödvändigt att skapa nya konstellationer mellan dessa discipliner för att bättre fokusera på klimatpolitik, styrmedel och genomförande av åtgärder. Synteser, syntesforskning (utvärderingsrapporter) och systemanalytisk forskning syftar till att ta fram beslutsstrategier och olika styrmedel.

Behovet av kunskap och kompetens för att hantera olika beslutssituationer styr vilka forskningsområden som bör få riktade satsningar. Eftersom behovet är dynamiskt och utvecklas över tiden, kommer även bilden av vilka forskningsområden som bedöms som strategiska att förändras och utvecklas. Den forskning som bedrivs idag eller är under utformning kommer troligen inte till användning förrän om cirka tio år, vilket i praktiken innebär att resultaten från den forskning som bedrivits under senaste tio åren, eller mer, håller på att implementeras idag.

I det gemensamma europeiska arbetet med forskningsfrågor under Klimatkonventionen har ett antal forskningsfält utpekats inför IPCC:s fjärde utvärderingsrapport. Det gäller utveckling av harmoniserade emissionsscenarier för stabilisering där alla växthusgaser inkluderas, hur SRES skall utvecklas för att bli stabiliserings-scenarier, att analysera målet 2°C i förhållande till stabiliseringsnivåer av växthusgaskoncentrationer i atmosfären, kostnader för åtgärder, kostnader för skador och kostnader för anpassning. De kostnadsantaganden som används idag behöver uppdateras.

I rapporten Klimatforskning⁵⁸ till regeringen påpekades behovet av en samlad klimatpolitiskt motiverad forskning, som i ett första skede borde fokusera på analys av klimatrelaterade frågeställningar och problem som är unika för Sverige och Norden men som också bidrar till att lösa globala problem. Nedan görs några nedslag på strategiska forskningsbehov med utgångspunkt från IPCC:s rapportindel-

⁵⁷ Miljövårdsberedningen (2003)

⁵⁸ Formas (2003). www.formas.se

ning och rapporteringskraven i Klimatkonventionen. Det finns ett stort behov av nya satsningar i större program för att kunna bidra i internationella sammanhang. Formas gjorde våren 2004 en utlysning i enlighet med de ambitioner som fördes fram under diskussionerna 2001-2003 och som fördes fram till regeringen, men det är fortfarande inte ett sammanhållet program utan enskilda projekt. Särskilt den grupp som representerade de policyinriktade finansiärerna var ense om att det vore önskvärt med en organisation med uppgift att arbeta utifrån ett internationellt perspektiv, främst IPCC och Klimatkonventionen, parallellt med nationella intressen. Idag finns ingen sådan organisation i Sverige som kan ägna sig koncentrerat åt detta.

6.1 Klimatsystemet och klimatprocesser

Klimatets känslighet är ett centralt område där kunskapen behöver förbättras. Av särskilt intresse för Norden är hur Nordatlantiska Oscillationen och Arktiska Oscillationen påverkar regionen. Denna forskning inkluderar paleoklimatologiska aspekter. Variationer i biosfären med återkoppling till klimatsystemet är också ett område där kunskapen är otillräcklig. Varje år omsätts det naturligt stora mängder koldioxid genom växternas upptag och genom utbyte mellan hav och atmosfär. Det saknas viktig kunskap om storlek och hastighet på dessa utbytesprocesser. Kunskapen om kolets kretslopp i våtmarker och ytvatten har också fortfarande stora brister. Det är av största betydelse att förstå de naturliga förloppen och att förstå hur människan genom att förändra betingelserna både i atmosfären och i de terrestra och akvatiska systemen påverkar klimatet. Ett nordiskt kompetenscentrum⁵⁹ skall bidra till ökad kunskap om dessa processer.

6.2 Klimatmodellering

Klimatmodellering är ett grundläggande verktyg för en rad åtgärdsanalyser och i forskningen kring stabiliseringsscenarioer. Klimatmodelleringen håller på att utvecklas till att omfatta mer av det kopplade jordsystemet. Sådana modeller utvecklas som "Earth System"-modeller. I dessa knyts den fysikaliska simuleringen av atmosfären, havet och landytorna än mer interaktivt ihop med simuleringen av atmosfärskemin, vegetationen och biogeokemin. Således blir uppskattningarna i kol-, kväve- och svavelcyklerna samt återkopplingar mellan dessa och klimatet bättre beskrivna. Utvecklingen bidrar även till mer studier om indirekta partikeleffekter, sot osv. Inom Europa utvecklas Earth System-modellering nationellt i Storbritannien (exv. HadGEM) och i Tyskland (COSMOS) samt i vissa EU-projekt (PRISM) där även det svenska Rossby Centre⁶⁰ deltar. Även Japan har bra resurser för liknande arbete.

Nackdelen av än mer omfattande simuleringar av jordsystemet är att modellerna blir mer beräkningstunga. Även med fortsatta förbättringar i datorresurser innebär

⁵⁹ Centret ingår i EU:s Centers of Excellence och är placerat i Lund.

⁶⁰ Rossby Centre vid SMHI är svenskt nod för klimatmodellering. Centret har temporär finansiering t.o.m. 2005.

det att detaljeringsgraden i globalmodellering förbättras relativt långsamt. Därmed kommer regionala modeller fortsatt att användas. Inom Europa planeras de närmaste åren regional modellering med något högre upplösning (20 km, att jämföras med 40-50 km idag), för fler fall och längre perioder än hittills. Detta leder till mer omfattande analyser av sannolikheter och kommer att ge ytterligare information om variabilitet och extremer. Fortsatt koordinering av arbetet i de olika nationella centra för regional modellering kommer att leda till förbättrade möjligheter för information, regionala konsekvensstudier samt beslutsarbete inom klimatförhandlingar och åtgärdsarbete. I viss mån kommer även de regionala modellerna att utökas med fler delar av klimatsystemet, t.ex. vegetation.

Vidareutvecklingen av klimatmodellering förutsätter internationellt samarbete men även nationella resurser i form av kompetens och kraftfulla datorer. Nätverk som binder ihop mätprogram och modellering är ytterst väsentliga.

Tillsammans med utvecklingen av global modellering kommer regionala studier att fortsätta vara i fokus de närmaste åren. Nationella avnämare och beslutsfattare efterfrågar detaljer som ännu inte kan tas fram med globala modeller. Arktis är ett specialfall eftersom intresset delas av flera stater. Modelleringar som hittills genomförts tyder på att förändringarna där kan bli särskilt stora, samtidigt som spännvidden mellan olika modeller är större än på många andra håll i världen. Anpassningsmöjligheterna för de lokala ekosystemen är begränsade i och med att det inte finns någonstans för arter att förflytta sig till vid en uppvärmning, men ännu allvarigare är att efterverkningarna av förändringar i Arktis kan bli globala om de storskaliga cirkulationssystemen i atmosfären och i havet, som har kontakt med Arktis, påverkas.

6.3 Forskning om effekter och anpassning till förändrat klimat

Kunskap om effekter på ekosystem och samhällets infrastruktur till följd av ett förändrat klimat ligger till grund för forskning om åtgärder och anpassning.⁶¹ Forskningen bör inriktas på vetenskapligt utvärderade riskscenarier som t.ex. effekter på hydrologiska cykeln gällande vattenförsörjning, översvämning, dammsäkerhet, erosion, släntstabilitet, spridning av föroreningar etc., påverkan på biologisk mångfald som förändring av biotoper och förändrade konkurrensförhållanden mellan arter, växthusgasbalanser i organogena jordar och smältande permafrost.

Forskningen om anpassning, som syftar till utformning av naturvårdsstrategier, bruksmetoder i jord- och skogsbruk, anpassning av samhället till höga vattenflöden samt social och ekonomisk anpassning, behöver stärkas och samordnas.

⁶¹ Formas utlyste under våren 2004 forskningsstöd till effektforskning.

6.4 Åtgärds- och implementeringsforskning

Åtgärdsforskning spänner över teknik, naturvetenskap och samhällsvetenskap. Implementeringsforskningen belyser hinder, som t.ex. institutionella, tekniska och finansiella, med målet att kunna utforma rätt åtgärdsstrategier. Under denna rubrik återfinns styrmedelsforskning till stöd för genomförande av svensk klimatpolitik⁶², forskning till stöd för förhandlingsarbetet⁶³ och forskning om klimat och samhälle.⁶⁴

Den nationella strategin för att minska utsläppen av växthusgaser fokuserar på att minska utsläppen från energi-, avfalls- och transportsektorerna. Inom alla tre sektorer finns mål och policyer, och även om arbetet kommit olika långt, behöver effekterna av dem utvärderas.

För implementering av de åtgärder som beslutats såväl nationellt som internationellt behövs bland annat riskanalyser, kunskap om styrmedel och om olika åtgärders konsekvenser. Med stöd från forskningen kan en uppfattning skapas om hur stor påverkan blir på ekosystem och samhällets infrastruktur och ekonomi vid olika åtgärdsscenarioer, dvs. stabiliseringsscenarioer som bygger på de samlade effekterna av internationella och nationella strategier och åtgärdsprogram. Sådan forskning saknas idag, och behöver tillkomma.

Ett övergripande mål för svensk energiforskning⁶⁵ och energiteknikstöd är att satsningarna skall minska kostnaderna för att utnyttja de förnybara energislagen så att dessa blir ekonomiskt bärkraftiga alternativ till kärnkraft och fossila bränslen. Prioriterade forskningsområden är Förnybara energikällor för elproduktion - Vattenkraft- miljöeffekter, åtgärder och kostnader i nu reglerade vatten; Vindkraftprogrammet, ny teknik för storskaligt utnyttjande av vindkraft och havsbaserad vindkraft inklusive 25 % demonstration; Solceller; Bränslebaserad el- och värmeproduktion - Biobränslebaserad kraftvärme; Biobränsleförsörjning och hantering av aska. Inom Industrin finansieras framförallt processintegration. Inom området Transporter prioriteras nya processer för etanolproduktion baserad på cellulosa-haltiga råvaror, andra alternativa drivmedel. Inom Byggnader fokuseras på utvecklingsarbete för energieffektivisering i bebyggelse.⁶⁶

Inom transportsektorn finns ett stort behov av ny kunskap. Mistra utlyser under 2004 en förstudie om "A sustainable transport system – is it possible". Utifrån ett

⁶² Naturvårdsverkets samhällsvetenskapliga program "Ways of Achieving the Swedish Objective of Limited Influence on Climate" - Communication, Organisation, Policy Instruments, Efficiency (COPE) och Energimyndighetens program "Internationell klimatpolitik".

⁶³ Energimyndighetens program "Internationell klimatpolitik" och Mistras nyligen startade program "Handel med utsläppsrätter".

⁶⁴ Mistras program "Climate, Science and Policy beyond 2012".

⁶⁵ I regeringens proposition 1996/1997:84 om en uthållig energiförsörjning anvisades totalt ca 5 miljarder kronor för en sjuårsperiod, *Energimyndighetens program för forskning, utveckling och demonstration*. Av energiforskningsanslaget förfogar Energimyndigheten ca 80 %, resterande förfogas av VINNOVA, FORMAS och Vetenskapsrådet.

⁶⁶ Se Energimyndighetens rapport *Forskning och utveckling inom energiområdet* (Energimyndigheten, 2003) för en fördjupad redogörelse.

klimatperspektiv skall programmet ta fram kunskap om hur kopplingar mellan koldioxidutsläpp och rörlighet kan brytas utan att vissa grupper drabbas hårdare än andra, samtidigt som en ekonomisk tillväxt tillåts.

Avfallsforskning bedrivs i mycket blygsam omfattning sedan Avfallsrådet (AFR) avslutades 1997/98. Naturvårdsverket har nu fått i uppdrag att ta fram förslag på ett nytt forskningsprogram om avfall och kretslopp, med start 2005. Syftet är att utveckla kunskapsbasen och strategin för giftfria och resurssnåla kretslopp. Området bidrar även helt eller delvis till utvecklingen av klimat-, produkt-, kemikalie-, närings- och avfallspolitiken och därigenom i slutändan till de olika nationella och internationella strategierna för hållbar utveckling.

Kunskap om den *terrestra kolsänkan* har stärkts väsentligt genom IPCC:s arbete inom *Land use, land-use change and forestry*.⁶⁷ Skog och jordbruksmark och andra landbaserade ekosystem utgör en betydande potential för lagring av koldioxid. Forskning pågår om markanvändning och skogsskötsel.⁶⁸ Variationer i ståndortsförhållanden, storskaliga miljöförändringar, kvävedeposition och en mängd andra variabler påverkar mängden kol som binds i biomassa och mark och hur länge kolet stannar kvar i marken, s.k. permanens. Till exempel ökar markens kolhalt genom inblandning av mer gran i skogsbestånden.

Sammanställningar av den svenska kolbudgeten⁶⁹ som utgör underlag till den svenska rapporteringen till Klimatkonventionen visar att osäkerheterna minskar om fjärranalys används som referens till statistisk provtagning, vilken är den metod som Sverige använder vid rapportering till Klimatkonventionen. Osäkerheterna i användningen av fjärranalys är dock fortfarande stora varför forskningen behöver styras in på att validera metoden.

Det mesta rörande kolsänkor färdigförhandlades vid COP 7 i Marrakesh 2001. För skogsbruk identifierades fem kolpooler; biomassa, ovan och under jord, förna, död ved samt kol i marken för rapportering av kolsänkor. Klimatkonventionens arbetsgrupp för vetenskap och teknik (SBSTA) lade ut tre uppdrag till IPCC, vilka redovisades vid COP 9 i Milano 2003. Det första uppdraget rapporterades i IPCC-rapporten om god praktisk vägledning för inventeringsarbetet (GPG-LULUCF)⁷⁰, som utifrån ett vetenskapligt synsätt behandlar sektorn markanvändning och skogsbruk. Rapporten avslutas med genomgång av olika övergripande frågor som rör osäkerheter, metodval, kvalitetssäkring respektive -kontroll, användning av tidsserier samt utvärdering. Vid COP 9 beslöts att den årliga inventeringen av växthusgaser till Klimatkonventionen skall rapporteras enligt IPCC:s god praktisk vägledning för inventeringsarbetet från och med år 2005 och framåt med undantag av de delar som hör till Kyotoprotokollet, vilket kan ske först sedan parterna vid COP 10 fattat beslut om hur dessa delar skall rapporteras. Med utgångspunkt i

⁶⁷ IPCC (2000b)

⁶⁸ MISTRA programmet LUSTRA (Land Use Strategies for Reducing Net Greenhouse Gas Emissions). www-lustra.slu.se

⁶⁹ Miljödepartementet (2001)

⁷⁰ IPCC (2003)

detta har Naturvårdsverket tagit fram riktlinjer⁷¹ för hur det svenska arbetet skall anpassas efter dessa krav.

Det andra uppdraget till IPCC gällde att ta fram definitioner för direkt mänsklig påverkan som leder till dels försämrat tillstånd i skog, dels sämre tillstånd hos andra vegetationstyper än skog. Syftet var att kunna utveckla metodik för inventering och rapportering av emissioner även från dessa aktiviteter. Svårigheterna ligger i att metodmässigt komma till rätta med att rapportera växthusgasförändringar för en brett definierad aktivitet som skogsbruk, i vilken samtidigt kan ingå kollagring till följd av skogstillväxt samt emissioner till följd av avverkningar som överskrider tillväxten och/eller överbetning och erosion av vegetationstäcket. Det gäller att finna metoder som kompenserar för parternas ofullständiga eller obalanserade redovisning av emissioner och lagring av växthusgaser i förhållande till parternas åtagande att minska utsläppen. Sverige har deltagit i ett forsknings- och utvecklingsprojekt med fokus på utvecklingsländer. Hur frågan skall hanteras är ännu under diskussion.

Det tredje uppdraget, som innebar att skilja ut indirekta effekter av mänsklig påverkan från direkta effekter vid normalt skogsbruk, kunde inte genomföras. En grupp välmeriterade vetenskapsmän särskilt utvalda av IPCC, kom efter en genomgång av de möjligheter som står till buds, fram till att det för närvarande saknas vetenskapligt baserat material för att kunna utveckla och gå vidare med frågan inom ramen för uppgiften från Klimatkonventionen. Inför nästa förhandlingsperiod behöver ny kunskap tas fram om inventering av markanvändning samt kvävenedfall och ökad koldioxidhalt, som gödslar, och ojämn åldersfördelning av brukad skog, som ger extra lagring av kol. Här är ett viktigt forskningsfält som behöver ta fram ny kunskap inför nästa förhandlingsperiod. Sverige har viss forskning inom området och har bra förutsättningar för att kunna bidra till ökad kunskap.

6.4.1 Långsiktig teknisk beredskap

I-ländernas åtaganden enligt Kyotoprotokollet, att fram till den första åtagandeperioden 2008-2012 minska sina utsläpp med fem procent jämfört med referensåret 1990, kan endast få endast en marginell påverkan på atmosfärens koncentration av växthusgaser på längre sikt.⁷² Hur stora utsläppsminskningar som blir nödvändiga för att stabilisera koldioxidnivån i atmosfären vid en viss nivå beror till en stor del på den framtida utvecklingen av världens energiefterfrågan.

IPCC har definierat ett stort antal utvecklingsscenarier i vilka det globala behovet av primärenergi år 2050 varierar mellan 20 och 50 MW.⁷³ Baserat på dessa scenarier har IPCC analyserat den globala energitillförseln med hjälp av flera olika globala energisystemmodeller. Om förutsättningarna för en stabilisering vid 550 ppm betraktas, så kan det konstateras att de krav som ställs på energisystemet,

⁷¹ Klimatrapporteringsuppdraget

⁷² Wigley (1998); Hasselmann m.fl. (2003)

⁷³ IPCC (2000a)

för att en stabilisering av koldioxidhalten vid denna nivå ska kunna uppnås, påverkas kraftigt av vilket utvecklingsscenario som ligger till grund för analysen.⁷⁴ För scenarier med en måttlig ökning av energiefterfrågan gäller enligt IPCC att stabiliseringsmålet 550 ppm kan uppnås utan teknik som kräver några stora teknologiska genombrott.⁷⁵ Notera dock att enligt IPCC finns det ingen teknik som ensam kan bidra till att atmosfärens koldioxidhalt stabiliseras. Bidrag skulle krävas från en mångfald av åtgärds-kategorier, såsom ökad användning av förnybar energi, övergång till fossila bränslen med lägre kolinnehåll (t.ex. från kol till naturgas), förbättrad verkningsgrad vid energitillförsel-, -distribution- och -användning samt ökad inbindning av kol i sankor, t ex skogar, jordar och hav.

För de scenarier där energiefterfrågan antas stiga som mest gäller å andra sidan att mycket stora mängder energi måste tillföras samhället med mycket små koldioxidutsläpp.⁷⁶ Detta skulle kunna ske genom introduktion av teknik som idag befinner sig på forsknings- och utvecklingsstadiet, t.ex. förbränning av fossila bränslen kombinerat med koldioxidavskiljning och -lagring samt effektiv direkt konvertering av solljus till el och bränslen. Analyser av vilka krav som i sådant fall ställs på teknikutvecklingen antyder att det skulle förutsätta omfattande forsknings-, utvecklings- och demonstrationsinsatser.⁷⁷

En robust klimatpolicy bör ta hänsyn till den stora osäkerheten i prognoser avseende framtida behov av energitillförsel med liten klimatpåverkan. En viktig fråga är om Kyotoprotokollet ger tillräckliga incitament till teknikutveckling för att långsiktiga behov av klimatanpassad energiteknik skall kunna säkerställas. Mot denna bakgrund förs en diskussion om behovet av åtgärder och styrmedel som stimulerar teknikutveckling. Styrmedel som skatter eller utsläppshandel bidrar till att öka användningen av den teknik som idag och på kort sikt sparar utsläpp mest kostnadseffektivt. Teknik som hör till denna kategori har uppskattats ha potential att inom två årtionden minska utsläppen med upp till hälften jämfört med ett business as usual-scenario.⁷⁸ Det är dock viktigt att ta hänsyn till att det på längre sikt kan bli nödvändigt med mycket stora tekniska förändringar för att koldioxidhalten i atmosfären skall kunna stabiliseras på en säker nivå och att det behövs en teknologisk beredskap för detta. Ny teknik kräver flera decennier från ett tidigt forskningsstadium tills den blir mogen för marknadsintroduktion vilket motiverar att teknikinriktade policyer och styrmedel införs som komplement till protokoll baserade på utsläppsmål och marknadsbaserade mekanismer.⁷⁹

En balanserad respons på klimatproblemet kan därför inkludera en initial fokus på tekniker som är bevisat genomförbara. Samtidigt bör forskning inriktad mot nya energikällor och system för energiomvandling intensifieras för att det skall finnas beredskap att hantera klimatproblemet vid en förhållandevis kraftig framtida ök-

⁷⁴ Hoffert m.fl. (2002)

⁷⁵ IPCC (2001c, sid 8)

⁷⁶ Hoffert m.fl. (2002)

⁷⁷ Hoffert m.fl. (2002); Hasselman m.fl. (2003); Sanden och Azar (2004)

⁷⁸ IPCC (2001c, sid 7)

⁷⁹ O'neill m.fl. (2003); Hasselman m.fl. (2003); Sandén och Azar (2004)

ning av energiefterfrågan. Riktade styrmedel, såsom riktade multilateralt samordnade forsknings-, utvecklings- och demonstrationsåtgärder, gemensamma teknikstandarder, stimulans av nischmarknader etc. kan ge viktiga bidrag till en utveckling som är nödvändig i ett mer långsiktigt och strategiskt perspektiv.

En viktig fråga som återstår är att utreda är lämpliga former för forsknings- och utvecklingssamarbeten som kan utvecklas som komplement till Kyotoprotokollet.

6.4.2 Vätgasbaserade energisystem

Historiskt sett har det funnits en trend som inneburit en övergång till bränslen med lägre kolhalt. Denna övergång från kol via olja till naturgas har medfört att utsläppen av koldioxid per producerad energinytta har minskat. En fortsättning på den inslagna vägen skulle kunna utgöras av en övergång till vätgas som energibärare. Vätgas är ett flexibelt bränsle som kan användas inom hela energisektorn; som drivmedel, för uppvärmningsändamål och för elproduktion. Vätgas har den stora fördelen att det kan användas som bränsle i bränsleceller, som kan producera elström med mycket hög verkningsgrad. Förbränning av vätgas sker helt utan att koldioxid eller andra miljöskadliga ämnen bildas, men bränslet finns till skillnad från fossila bränslen inte tillgängligt i geologiska reservoarer. Teknik för lagring, transport och förbränning av vätgas har redan nått långt i utvecklingen. Men även om tekniska lösningar är på väg för väsentliga delar av ett framtida vätgasbaserat energisystem så återstår den stora frågan om varifrån all vätgas skall komma.

Vätgas kan framställas ur fossila bränslen med hjälp av konventionell kemisk processteknik. Vid sådan framställning frigörs dock koldioxid och dessutom uppstår förluster, vilket medför att produktion av en viss energinytta via vätgas framställd ur fossila bränslen i många fall kan ge sammanlagt större koldioxidutsläpp än vid direktanvändning av det fossila bränslet. För att vätgas producerad med fossila bränslen som råvara skall kunna bli ett klimatvänligt bränsle krävs därför att frigjord koldioxid inte släpps ut till atmosfären, utan att den skiljs av och lagras under mycket lång tid.

Vätgas kan också framställas genom elektrolys av vatten. Vätgas kan därför även framställas genom att förnybara energikällor utnyttjas. Om den el som åtgår för elektrolysen är framställd utan koldioxidutsläpp, t ex med hjälp av solceller, blir det sammantagna resultatet ett klimatvänligt bränsle. Ytterligare ett sätt att producera klimatvänlig vätgas är att utveckla teknik som efterliknar delar av den naturliga fotosyntesen för att producera vätgas med hjälp av solljus och vatten.

6.4.2.1 Spjälkning av vatten genom elektrolys

Den vanligaste metoden att sönderdela vatten i vätgas och syrgas är via elektrolys, som är en elkrävande process. Om vätgas kan produceras på ett kostnadseffektivt sätt med hjälp av solenergi och vatten kan energifrågan vara löst för all framtid. Det stora inflödet av solenergi till jorden – ca 10 000 gånger större än den energimängd som mänskligheten idag använder i form av fossila bränslen – innebär att solcellsteknik i kombination med elektrolysprocesser erbjuder en stor potential att framställa koldioxidneutral vätgas. Kostnaden för sådana system måste dock re-

duceras kraftigt jämfört med prestanda för dagens teknik. Olika typer av solceller (kiselbaserade solceller, tunnfilmssolceller och s.k. våta solceller) är under snabb utveckling. Verkningsgraden för att ta ut solenergin i form av elektricitet kan komma att bli ca 15-20 % men omvandlingen från el till vätgas via elektrolys är förknippad med så stora förluster att närmare hälften av solcellselen försvinner i form av värme.

6.4.2.2 *Artificiell fotosyntes*

Målet med artificiell fotosyntes är att på konstgjord väg efterlikna delar av den naturliga fotosyntesen, men utan att gå omvägen över att skapa en hel växt. Med artificiell fotosyntes skall energin istället utnyttjas direkt för att producera vätgas med hjälp av solljus och vatten via fotokemi. Potentialen att framställa vätgas utan miljöfarliga utsläpp gör att det finns starka samhälleliga motiv för att satsa på denna teknik. En verkningsgrad på 15 % för omvandling av solljus till vätgas kan anses vara tekniskt realistisk.

Artificiell fotosyntes befinner sig på grundforskningsnivå och i nuläget krävs en långsiktig finansiell satsning på grundforskning. Svensk biovetenskaplig grundforskning med energiinriktning mot fotosyntes, speciellt strukturstudier av de fotosyntetiska ljusupptagningsystemen, har lagt grunden för utveckling av biomimetiska system, exempelvis för artificiell fotosyntes. Inom laserspektroskopin har svenska forskare lyckats mäta och analysera energiöverföringsmekanismer i det antennkomplex som står för ljusinfångning i växter och bakteriers fotosyntessystem. Resultaten har väckt stor uppmärksamhet inom den viktiga fotosyntesforskningen. De svenska satsningarna på forskning kring artificiell fotosyntes inom Konsortiet för artificiell fotosyntes⁸⁰ ger Sverige en möjlighet att i framtiden bli världsledande på en teknik som kan få stor betydelse för den framtida energiförsörjningen.

6.4.3 **Avskiljning och lagring av koldioxid**

Där storskalig förbränning eller annan omvandling av kolhaltiga bränslen sker finns en möjlighet att skilja av bildad koldioxid från övriga utsläppsgaser för att sedan lagra koldioxiden under mycket lång tid. Med sådan teknik kan fossilbränslebaserad el-, värme- och vätgasproduktion ske med liten klimatpåverkan. Avskiljning och lagring av koldioxid är en teknik som befinner sig på forsknings- och demonstrationstadiet, även om vissa delar av processen finns i kommersiell användning redan idag. IPCC förutspår att storskalig koldioxidavskiljning och -lagring kan bli aktuell efter år 2020.⁸¹ Avskiljning och lagring av koldioxid fick relativt begränsat utrymme i IPCC:s tredje utvärderingsrapport, eftersom den samlade vetenskapligt publicerade informationen bedömdes vara begränsad. IPCC har sedan den tredje utvärderingsrapporten inlett arbetet med en s.k. Special Report om avskiljning och lagring av koldioxid (SRCCS), som beräknas vara färdig under första hälften av 2005.⁸²

⁸⁰ <http://www.biokem.lu.se/AFS-WWW/index.htm>

⁸¹ IPCC (2001c, sid. 40)

⁸² Se: <http://www.ipcc.ch/activity/sprep.htm>

Intresset för koldioxidavskiljning motiveras bl.a. av att teknikens potential att bidra till minskade utsläpp av koldioxid bedöms som mycket stor.⁸³ I ett samhälle med koldioxidbegränsningar kan avskiljningsteknik dessutom förlänga livslängden för energianläggningar och annan befintlig infrastruktur som är anpassad till fossila bränslen. Analyser som genomförts med stöd från globala energisystemmodeller tyder på att koldioxidavskiljningsteknik kan minska kostnaden för att uppnå en stabilisering av koldioxidhalten i atmosfären. Resultaten pekar vidare på att den ekonomiska betydelsen av koldioxidavskiljning tilltar ju lägre stabiliseringshalt som skall uppnås.⁸⁴ Tekniken kan därför ha potential att bana vägen för ambitiösare klimatmål. Det finns dessutom möjliga synergieffekter mellan teknik för avskiljning och lagring av koldioxid och vätgasbaserade energisystem. Sådana synergieffekter skulle kunna innebära att utveckling av koldioxidavskiljning också bidrar till utvecklingen av teknik för vätgasproduktion och –användning. Å andra sidan konkurrerar koldioxidavskiljning med andra, mer uthålliga, tekniker som har låga utsläpp, såsom sol- och vindenergi, vilket skulle kunna försena utvecklingen av dessa.

Det finns redan idag vissa kommersiella tillämpningar där koldioxid pumpas ner djupt under marken. I Nordamerika injicerar oljebolag koldioxid i oljekällor för att lättare kunna utvinna mer olja.⁸⁵ Den större delen av koldioxiden som pumpats ner i oljekällorna stannar sedan kvar. I de flesta fallen utvinns koldioxiden i dessa tillämpningar från naturliga reservoarer, men koldioxid som avskiljts i industriella processer används också. Verksamheten kan ske på kommersiell basis eftersom förtjänsten av ökad oljeutvinning överstiger de extra kostnader som uppstår. Den fysiska potentialen att lagra koldioxid på detta sätt är emellertid begränsad jämfört med andra lagringsalternativ.

Koldioxid kan avskiljas från biobränslen med i princip samma teknik som är aktuell för energianläggningar som använder kol till bränsle. Genom avskiljning och lagring av koldioxid från biobränslen är det möjligt att åstadkomma energisystem med negativa koldioxidutsläpp eftersom uthålligt producerade biobränslen i sig i princip är koldioxidneutrala. Avskiljning och lagring av koldioxid från uthålligt producerade biobränslen skulle därför bidra till en nettominskning av koldioxidhalten i atmosfären.⁸⁶ Sverige har idag relativt få stora punktutsläpp där koldioxid från fossila bränslen skulle kunna avskiljas. Svenska massa- och pappersbruk släpper däremot varje år ut stora mängder koldioxid från biobränslen från storskaliga anläggningar. I Sverige finns en teknisk potential att avskilja drygt 15 miljoner ton CO₂ per år i massabruk. Forskningsresultat antyder dessutom att sådan teknik kostnadsmässigt skulle kunna konkurrera väl jämfört med andra alternativ som till exempel ersättning av bensin och diesel med biodrivmedel.⁸⁷ Men tydliga

⁸³ Dooley och Wise (2003); Riahi m.fl. (2003)

⁸⁴ Edmonds m.fl. (2000)

⁸⁵ IPCC (2002)

⁸⁶ Obersteiner m.fl. (2001)

⁸⁷ Möllersten m.fl. (2003)

styrmedel skulle krävas för att ge incitament till utveckling av den teknik som krävs om detta alternativ ska kunna realiserars.

6.4.3.1 *Forsknings- och utvecklingsaktiviteter*

Koldioxidavskiljning kan ske genom att utsläppsgaser eller s.k. syntesgas "renas" från koldioxid med ett absorptionsmedium. Även andra koncept som exempelvis bygger på membranteknik eller förbränning i ren syrgas kan bli aktuella, men dessa alternativ har längre kvar till teknisk mognad. Den avskilda koldioxiden komprimeras och transporteras sedan via pipeline eller tankar för att lagras antingen i underjordiska geologiska formationer eller i haven. Det är viktigt att inse att ett energisystem som förses med avskiljning av koldioxid alltid belastas med extra investeringar och energiförbrukning. Detta innebär att för en given energitjänst försämras verkningsgraden samtidigt som kostnaden ökar. Forskningsinsatser behövs därför för att uppnå nya integrerade processutformningar, förbättring av de existerande teknikerna och utveckling av nya tekniker. På så vis kan verkningsgrad och ekonomiska prestanda förbättras.

Bland de geologiska formationer som kan bli aktuella för lagring av stora mängder koldioxid finns oljekällor, uttömda gas- och oljekällor samt akvifärer. Den sammanlagda potentialen att lagra koldioxid i geologiska formationer är mycket osäker. En sammanställning av uppskattningar som gjorts visar på potentialer mellan 900 till 5100 miljarder ton koldioxid. Baserat på de globala koldioxidutsläppen från fossila bränslen 1998 motsvarar detta ungefär de ackumulerade utsläppen under 40 till 230 år. Mycket av den forskning och utveckling som pågår handlar om vad som händer när koldioxid lagras. För närvarande pågår ett storskaligt projekt utanför Norge. På Sleipnerfältet i Nordsjön lagras en miljon ton koldioxid per år i en akvifär cirka en kilometer under havsytan. Under kommande år planerar flera länder att genomföra demonstrationsprojekt med inriktning mot geologisk lagring av koldioxid.⁸⁸ I Sverige görs inga försök, men lämpliga förvaringsutrymmen har identifierats, bland annat i akvifärer i Öresund och i Östersjön öster om Gotland.

Ytterligare ett alternativ är att lagra koldioxiden på stora djup i havet. Lagring i geologiska formationer förefaller emellertid vara att föredra eftersom störningar av ekosystem kan undvikas och lagringens livslängd blir avsevärt längre än vid deponering i haven. Avancerade koncept för att hindra koldioxid från att nå atmosfären bygger på kemisk omvandling av koldioxid till stabila och ofarliga slutprodukter, t ex karbonater. Bundet i magnesiumkarbonat skulle t.ex. hela världens utsläpp av kol från fossila bränslen 1990 kunna lagras i en kub med sidorna ca. 2500 m. Denna form av lagring fordrar dock mycket forskning och utveckling innan en realistisk bedömning kan göras av dess kapacitet och ekonomiska förutsättningar.

⁸⁸ IEA (2004)

6.5 Systematisk observation

Viktiga beståndsdelar till kunskaperna om klimatet och dess känslighet kommer från klimatobservationer, analys av dessa samt studier av förhistoriska klimat och klimatmodellering av framtida påverkan. Det finns ett stort antal observationsnät såväl nationellt som globalt. SMHI har ansvar för meteorologiska observationer, vilket är fokus i denna rapportering. Det är dock viktigt att komma ihåg att effekter av en klimatförändring påverkar ekosystem, mark, vatten och olika funktioner i samhället som också kommer att behöva övervakas.

6.5.1 Global Climate Observing System

GCOS har varit en väsentlig bas för många av IPCC:s slutsatser. Arbetet bakom slutsatser blir mer och mer komplext liksom hela arbetet kring klimat- och miljöfrågor. Detta i sin tur ställer ökade krav på observationssystemen.

GCOS har en mycket viktig uppgift enligt klimatkonventionen att stimulera uppbyggandet av speciella databaser av observationer, dels att skapa kvalitetssäkrade uppsättningar för långa tidsserier och som viktiga hörnpelare och referenser i klimatövervakningen, dels att generera mycket omfattande datauppsättningar för analyser med hög upplösning för förståelsen och detaljerna i hela klimatsystemet. GCOS har tre delar, en meteorologisk/atmosfärisk del, en som gäller det terrestra observationssystemet (GTOS) och en som gäller det marina (GOOS).

Det meteorologiska observationssystemet är det som har den bästa globala omfattningen. En dominerande komponent är här WMOs World Weather Watch (WWW) som förutom markobservationer, radiosonderingar, fartygsobservationer, bojar samt automatiska mätningar från reguljära flygningar, också omfattar det operationella meteorologiska satellitsystemet. USA, Japan och Europa delar här ett stort ansvar och Europas ansvar blir successivt större. Europa har i förhandlingar med USA gett löfte om ett övertagande av delar av USA:s tidigare påtagna uppgift med avseende på sk operationella polära meteorologiska satelliter. NOAA (USA) och EUMETSAT (Europa) undertecknade för två år sedan Initial Joint Polar Satellite System Agreement.

ESA/EUMETSAT har sedan 1978 stått för en geostationär satellit (METEOSAT) i den globala övervakningen från rymden. Under en period i början av 90-talet har EUMETSAT också lånat ut en satellit till USA för att täcka upp en tillfällig tids- och rumslucka i den amerikanska täckningen. Det senaste året och några år framåt ger en av EUMETSATs satelliter också täckning av Indiska Oceanen. Från 2004 ersätts det mer än 20-åriga programmet av ett mer utvecklat (Meteosat Second Generation, MSG). Satellitmätningar dominerar numera helt när det gäller data-mängder och idag ingår även ett flertal forskningssatelliter i WWW.

När det gäller den meteorologiska delen av GCOS är vidare t ex GCOS Upper-Air Network (GUAN) med 150 radiosonderingar samt GCOS Surface Network (GSN) med cirka 1000 markstationer definierade som referenssystem med speciellt hög kvalitet och långsiktig uthållighet.

För att komplettera WWW finns ytterligare ett nätverk, Global Atmosphere Watch (GAW) för att täcka in viktig information om atmosfärens kemiska sammansättning av gaser och aerosoler.

De terrestra och de marina näten är under uppbyggnad men här finns inte motsvarande utvecklade modeller för dataassimilation och för de globala och regionala realtidskrav som inom meteorologin med dagliga väderprognoser som kravställare.

6.5.2 Globala atmosfäriska återanalyser

Vid det Europeiska centret för medellånga väderprognoser (ECMWF) har vid två tillfällen s.k. återanalyser gjorts. Sedan 1958, det internationella geofysiska året (IGY), finns systematiska väderobservationer från ytan och från atmosfären tillgängliga från stora delar av jorden. ECMWF är en europeisk mellanstatlig organisation för globala numeriska väderprognoser på tidsskalan 4 dygn till 6 månader samt därtill hörande forskning och utveckling. Det dataassimilationssystem som utvecklats för operativa prognoser lämpar sig också för analys av tidigare år med hjälp av observationsdatabaser. Den snabba utvecklingen av metoder för datorbaserade atmosfärsanalyser och prognoser, liksom utvecklingen av datorkapaciteten, gjorde det möjligt att genomföra ERA-40 med en betydligt mer avancerad metodik, och längre tillbaka i tiden, jämfört med den föregående återanalysen.

ERA-40 har resulterat i en omfattande databas som är tillgänglig för forskningsändamål⁸⁹, inte minst inom den atmosfäriska klimatforskningen. Till skillnad från andra analyser av klimatet under de senaste decennierna, som ofta baseras på en eller några få datakällor, utgör ERA-40 en konsistent syntes av de olika mätdata som insamlats under åren. Eftersom ett oförändrat analysystem använts beror eventuella variationer år från år i ERA-40 på data- eller klimatvariationer.⁹⁰ Kvaliteten och kvantiteten på de ingående observationerna varierar tyvärr under åren. Sålunda fanns det inte några satellitbaserade observationer före 1972, och fortfarande är många äldre observationer svår- eller otillgängliga för den vetenskapliga världen av kommersiella eller politiska skäl. Om hänsyn tas till observationsproblemen, utgör ERA-40 ändå det hittills bästa underlaget för studier av atmosfären på års- och dekadskalan under de senaste 45 åren.

ERA40 visar på en av de viktigaste tillämpningarna av de data-set som skapas. ERA40-analyserna skall användas för att validera modeller och prognoser inkl. generella cirkulationsmodeller men även modeller för klimatpåverkan, t.ex. modeller som beskriver växtligheten i relation till meteorologiska och hydrologiska parametrar. ERA kommer att vara en viktig kunskapskälla för en lång rad tillämpningar och för vidareutveckling av observationssystem. ERA40 skall också för-

⁸⁹ <http://www.ecmwf.int/research/era>

⁹⁰ Metoder i de operationella analyserna förbättras hela tiden, vilket förstås är önskvärt men samtidigt införs diskontinuiteter i de operationella analyserna.

stärka den roll Europa kan spela inom de globala organisationer som står bakom GCOS och GOOS.

6.5.3 GEO (<http://earthobservations.org/>)

USA tog initiativet till en Earth Observation Summit (EOS) den 31 juli 2003. Till denna inbjöds ministrar från en rad länder och EU, speciellt DG Research, såg till att hålla samman europeiska ambitioner med avseende på nya observationsstrategier. I bakgrunden av EUs och även ESAs syn på detta fanns mål som formats med avseende på GMES (Global Monitoring for Environment and Security). En ambition hos dessa organ är att ta ett globalt initiativ med ett innehåll av bl.a. klimatövervakning. Earth Observation Summit resulterade i bildandet av Group on Earth Observations (GEO) som i sin tur består av ett antal arbetsgrupper som arbetar fram nya riktlinjer för en utvidgning av globala observationer och för en ökad global koordinering. Uppdraget för GEO är bredare än klimatövervakning. Viktiga i detta arbete är WMO, ECMWF, EUMETSAT och NOAA eftersom dessa idag sitter inne med viktiga operativa erfarenheter. Sverige deltar i GEO-arbetet och försöker hävda det som förstärker såväl europeiska som svenska prioriteringar.

Det finns således ett stort antal observationer som mer eller mindre kompletterar varandra. Det är nu viktigt att bättre samordning görs mellan dessa samt att forskningen bidrar till att utvärdera hur systemen bäst kan nyttjas i klimatsammanhang.

7 Synergier ger snabbare måluppfyllelse

Gemensam utvärdering av flera miljömål och/eller nationella mål som hanteras inom andra konventioner kan skapa bättre förståelse och acceptans hos allmänheten i åtgärdsarbetet⁹¹ och därför leda till snabbare måluppfyllelse. De 15 svenska miljö kvalitetsmålen⁹² skall leda vägen för en strävan att åstadkomma en ekologiskt hållbar samhällsutveckling. Miljömålet "Begränsad klimatpåverkan" syftar till att minska utsläppen av växthusgaser (CO₂, CH₄, N₂O), "Bara naturlig försurning" skall minska utsläppen av svavel- och oxiderande kväveföreningar (SO_x och NO_x), "Ingen övergödning" skall minska utsläppen av främst fosfor och kväveföreningar. Många miljömål har en nära koppling till varandra såväl på orsaksidan som när det kommer till åtgärder. Som exempel kan nämnas att kväveföreningar omvandlas till växthusgasen dikväveoxid i olika markprocesser. För åtgärdsarbetet kan återkopplingen vara såväl positiv som negativ. Det är därför viktigt att forskningen fokuserar på att analysera problem utifrån ett helhetsperspektiv innan en åtgärd beslutas, såväl avseende fysikaliska processer som socioekonomiska konsekvenser.

Luftföroreningars påverkan på ekosystemen är kända sedan länge genom försurningsforskningen. Alla luftföroreningar bidrar inte direkt till växthuseffekten, men de flesta har ändå relevans till klimatproblemet antingen genom att de förstärker växthuseffekten eller försvagar densamma. Framtida hälsoproblem till följd av en klimatförändring har redovisats i IPCC:s rapporter, men det är också påvisat i ett antal studier att ett stort antal ämnen från utsläppen från förbränning har negativ hälsoeffekt för människor som utsätts för dem, framför allt på lokal nivå. Exempel på sådana hälsoeffekter är lungfunktionsnedsättningar och överkänslighetsreaktioner eller allergiska besvär till följd av förhöjda halter partiklar⁹³, cancer, strokes, hjärt- och kärlsjukdomar är andra sjukdomstillstånd som tillskrivs luftföroreningar⁹⁴ och hos vissa känsliga grupper har akuta dödsfall observerats efter exponering av partiklar.⁹⁵ Allt detta leder i sin tur till ökade sjukhusinläggningar, medicinförbrukning, sjukskrivningar och läkarkonsultationer.⁹⁶ Dessa effekter leder till stora kostnader för samhället.

Forskningen bör fokusera på att ge en sammantagen bild av hur målen för de olika konventionerna och protokollen kan nås utan att motverka varandra samt vilka fördelaktiga synergier som kan dras nytta av. Bättre beskrivning av målkonflikter och synergier kan leda till bättre och mer samhällsekonomiskt avvägda beslut för åtgärder och anpassning, men också för att samordna och dra nytta av redan utformade strategier och förhandlade åtgärder internationellt. Viss forskning pågår,

⁹¹ IPCC (2001b); Swart m.fl. (2002)

⁹² 1997/98:145. Förslaget antogs av riksdagen den 28 april 1999.

⁹³ SIKÄ (2002)

⁹⁴ Staxler m.fl. (2001)

⁹⁵ ITM (2003)

⁹⁶ Staxler m.fl. (2001)

t.ex. inom EU:s CAFE-program. I Naturvårdsverkets strategiarbete för framtida forskningssatsningar tas dessa perspektiv upp som viktiga forskningsbehov.

8 Kommunikation för bättre acceptans

Flera pågående forskningsprogram hos Mistra, Naturvårdsverket och Energimyndigheten syftar till att ta fram mer kunskap om hur överföringsprocessen från forskarna och forskningsresultaten når fram till användarna. Identifiering av hinder, som behöver studeras närmare för att kunna förbättra överföringen, är en utgångspunkt i forskarnas studier.

En viktig kunskap som framkommit är att information inte i sig räcker för att nå ut med ett budskap, utan det krävs också kommunikation med goda möten där forskare aktivt deltar och möter avnämare.⁹⁷ Vid sådana mötesarenor kan ofta onödiga hinder i form av missuppfattningar rättas till. Universitetens informationsroll har stärkts, även om det finns mycket kvar att göra innan arbetet nått sina rätta former.⁹⁸

Finansiärer har också ett kommunikationsansvar och formerna varierar från möten, demonstrationer, paneldebatter och skriftliga rapporter. Viktiga nationella arenor för kunskapsöverföring där även forskningsperspektiv finns med är idag SMHI:s årliga Miljöforum och Energimyndighetens Energiting. Naturvårdsverket kommer att ha ett Klimatforum hösten 2004 i samband med öppnandet av Naturhistoriska Riksmuseets klimatutställning. Klimatforum kommer troligen att återkomma årligen. För att ytterligare stärka forskningskommunikationen mellan finansiärer, forskare och avnämare bör bildandet av ett klimatforskningsinstitut eller annan centrumbildning övervägas.

Internationellt pågår liknande aktiviteter och bland dessa återfinns de återkommande konferenserna Bridging the gap. Europeiska Miljöinstitutet (EEA), DG Forskning, DG Miljö och ett värdland, senast Sverige 2001 och 2004 Irland, ordnar cirka var tredje år dessa konferenser, som fokuserar på hur forskning kommuniceras till beslutsfattare. Frågor om energi, transporter, handel, grönt jordbruk, biologisk mångfald, hälsa och hållbar utveckling, och i år även specifikt klimat, har varit föremål för gemensam diskussion. Vid den senaste konferensen konstaterades att det finns mycket kunskap som kan ligga till grund för goda och väl underbyggda beslut, och att det snarare existerar ett gap mellan åtagande och genomförande än mellan forskning och politik. I klartext betyder det att kunskapen för att lösa ett problem finns men det finns andra hinder på den politiska agendan.

En arena där klimatforskning kommuniceras direkt till politiker och beslutsfattare är Klimatkonventionens årliga partsmöten (COP)⁹⁹ och de två gånger per år åter-

⁹⁷ Se t.ex. Lars Lundgrens antologier Att veta och att göra och Vägar till kunskap.

⁹⁸ Universitetens tredje uppgift har funnits länge, men uppgiften har betonats under senare år.

⁹⁹ Conference of the Parties.

kommande förberedelserna inför COP genom SBSTA.¹⁰⁰ Vid dessa möten inbjuds forskare som deltagit i IPCC att presentera några av de resultat som kan ha särskilt intresse för förhandlingsagendan vid just den tidpunkten.

¹⁰⁰ Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice.

9 Referenser

Azar C. The timing of CO₂ emissions reductions: the debate revisited, *International Journal Environment and Pollution* 1998;10:508-521.

Azar C., Rodhe H. Targets for Stabilization of Atmospheric CO₂. *Science* 1997;276:1818-1819.

Azar C., Schneider S.H. Are the economic costs of stabilizing the atmosphere prohibitive? *Ecological Economics* 2002;42:73-80.

Bohm P. Den svenska klimatpolitikens kostnader och betydelse. Rapport nr. A2004:003. Institutet för tillväxtpolitiska studier, 2004. (se: www.itps.se)

CRU (Climatic Research Unit), University of East Anglia, UK.
<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/info/warming/> (24 maj 2004).

Den Elzen M., 2003. Exploring post-Kyoto regimes for differentiation of commitments to achieve the EU climate target. Presentation vid Workshop om Post-Kyoto Climate Policy Options, Naturvårdsverket, 30 oktober 2003.

Dooley, J.J., Wise, M.A., 2003. Potential leakage from geologic sequestration formations: Allowable levels, economic considerations, and the implications for sequestration R&D. I: J. Gale, Y. Kaya (red.). *Greenhouse Gas Control Technologies: Dokumentation från Sixth International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, Kyoto, Japan*, Elsevier Science, Oxford, 2003.

Edmonds J.A., Freund P., Dooley J.J., 2001 The role of carbon management technologies in addressing atmospheric stabilization of greenhouse gases. I: D.J. Williams, R.A. Durie, P. McMullan, C.A.J. Paulson, A.Y. Smith (red.), *Dokumentation från Fifth International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, Cairns, Australien*. Collingwood: CSIRO Publishing, 2001.

Eickhout B., den Elzen M.G.J., van Vuuren D.P. Multi-gas emission profiles for stabilising greenhouse gas concentrations – Emission implications of limiting global temperature increase to 2 degrees Celsius. Rapport nr. 728001026/2003, Rivm, Nederländerna, 2003.

Energimyndigheten. Forskning och utveckling inom energiområdet. Rapport nr. ER 5:2003. Eskilstuna, 2003.

Etheridge D.M., Steele L.P., Langenfelds R.L., Francey R.J., Barnola J.M., Morgan V.I., 1998. Historical CO₂ records from the Law Dome DE08, DE08-2, and DSS ice cores. In *Trends: A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A.* (se: <http://cdiac.esd.ornl.gov/>).

FN:s klimatkonvention UNFCCC, 1992. www.unfccc.int.

Formas. Klimatforskning – Fördjupningsstudie 2003. Rapport nr. 15.4/2002-0412. 2003.

Gritsevskiy A., Nakićenović N. Modeling uncertainty of induced technological change, *Energy Policy* 2000;28:907-921.

Ha-Duong M., Grubb M. J., Hourcade J. C. Influence of socioeconomic inertia and uncertainty on optimal CO₂-emission abatement. *Nature* 1997;390:270-274.

Hasselmann K., Latif M., Hooss G., Azar C., Edenhofer O., Jaeger C.C., Hohannessen O.M., Kemfert C., Welp M., Wokaun A. The challenge of long-term climate change. *Science* 2003;302:1923-1925.

Hoffert M.I., Caldeira K., Benford G., Criswell D.R., Green C., Herzog H., Jain A.K., Kheshgi H.S., Lackner K.S., Lewis J.S., Lightfoot H.D., Manheimer W., Mankins J.C., Mauel M.E., Perkins L.J., Schlesinger M.E., Volk T., Wigley T.M.L. Advanced technology paths to global climate stability: Energy for a greenhouse planet. *Science* 2002;298:981-987.

IEA (International Energy Agency). Carbon dioxide capture and storage issues – accounting and baselines under the United Nations framework convention on climate change (UNFCCC). IEA information paper, Paris, 2004.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Radiative forcing of Climate Change and an evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios. Cambridge University Press. Cambridge, 1994.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Climate Change 1995: Economic and Social Dimensions of Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Special Report on Emission Scenarios. Cambridge: Cambridge University Press, 2000(a).

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Land Use, Land-Use Change and Forestry. Cambridge: Cambridge University Press, 2000(b).

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Climate Change 2001: The Scientific Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2001(a).

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Climate Change 2001: Synthesis Report. Cambridge University Press. Cambridge, 2001(b).

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Climate Change 2001: Mitigation. Cambridge: Cambridge University Press, 2001(c).

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Climate Change 2001: Impacts, Adaptation & Vulnerability. IPCC, Geneva, 2001(e).

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2002. Dokumentation från Workshop on CO₂ capture and storage, Regina, Canada.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). IPCC Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. Kanagawa, Japan. Institute for Global Environmental Strategies, 2003. (<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf.htm>).

ITM (Institutet för tillämpad miljöforskning), 2003. Biobränsle-Hälsa-Miljö. Preliminär slutrapport. <http://www.itm.su.se/bhm/>

Keeling, C.D., Whorf T.P. Atmospheric CO₂ records from sites in the SIO air sampling network. In Trends: A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., 2003. (se: <http://cdiac.esd.ornl.gov/>)

Manne A.S., Richels R.G. Environmental modeling and assessment 1997;2:251-265.

Marland G., Boden T.A., Andres R. J.. Global, Regional, and National CO₂ Emissions. In Trends: A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., 2003. (Se <http://cdiac.esd.ornl.gov/>)

Miljödepartementet, 2001. Sveriges tredje Nationalrapport om klimatförändringar – I enlighet med Förenta Nationernas ramkonvention om klimatförändringar. Miljödepartementet, Departementsserien (DS), DS 2001:71.

Miljövårdsberedningen, 2003. Efter Johannesburg- utmaningar för forskarsamhället. Dokumentation från konferensen den 5 december 2002 i Rosenbad, Stockholm. Rapport nr. 2003:1.

Möllersten K., Yan J., Westermark M. Potential and cost-effectiveness of CO₂ reductions through energy measures in Swedish pulp and paper mills. Energy 2003;28(7):691-710.

Naturvårdsverket. Underlagsrapport Frisk luft. Rapport nr 5318. Stockholm, 2003.

Naturvårdsverket. Effekter av ett förändrat klimat. Rapport nr 4458. Stockholm, 1998.

Neftel A., Friedli H., Moor E., Löttscher H., Oeschger H., Siegenthaler U., Stauffer B. Historical CO₂ record from the Siple Station ice core. In Trends: A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., 1994.

Obersteiner M, Azar Ch, Kauppi P, Möllersten K, Moreira J, Nilsson S, Read P, Riahi K, Schlamadinger B, Yamagata Y, Yan J, van Ypersele J-P. Managing climate risk. Science 2001;294(5543):786-787.

O'Neill B, Grübler A, Nakicenovic N, Obersteiner M, Riahi K, Schrattenholzer L, Toth FL. Planning for future energy resources. Science 2003;300:581.

Proposition 1996/97:84. En uthållig energiförsörjning.

Proposition 2001/02:55. Sveriges Klimatstrategi.

Riahi K., Rubin E.S., Schrattenholzer L., 2003. Prospects for carbon capture and sequestration technologies assuming their technological learning. I: J. Gale, Y. Kaya (red.). Greenhouse Gas Control Technologies: Dokumentation från Sixth International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, Kyoto, Japan, Elsevier Science, Oxford, 2003.

Richels R., Edmonds J. The economics of stabilizing atmospheric CO₂ concentrations, Energy Policy 1995;23:373-378.

Sandén BA, Azar Ch. Near-term technology policies for long-term climate targets. Energy Policy 2004 (*under tryckning*).

Schneider S.H. What is "dangerous" climate change? Nature 2001; 411:17-19.

SIKA. Översyn av samhällsekonomiska metoder och kalkylvärden på transport-området - ASEK. SIKA Rapport 2002:4.

Stauffer B., 1994. Historical CO₂ record from the Siple Station ice core. In Trends: A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A. (se: <http://cdiac.esd.ornl.gov/>)

SMHI (Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut). Reports of Meteorology and Climatology 102, 2003(a).

SMHI (Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut). The Swedish regional climate modeling program 1996-2003. Final Report. SMHI Reports of Meteorology and Climatology No. 104, 2003(b).

SMHI (Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut). Reports of Meteorology and Climatology 101, 2003(c).

Staxler L., Järup L., Bellander T. Hälsoeffekter av luftföroreningar. Rapport 2001:2. Stockholms läns landsting, Miljömedicinska enheten, 2001.

Swart R., Mitchell J., Morita T., Raper S. Stabilisation scenarios for climate impact assessment. Global Environmental Change 2002;12:155-165.

Hulme M., Turnpenny J., Jenkins G., 2002. Climate change scenarios for the United Kingdom - The UKCIP02 briefing report. Tyndall Centre for Climate Change Research, School of Environmental Sciences, University of East Anglia, Norwich, 2002.

WBGU (German Advisory Council on Global Change). Climate protection strategies for the 21st century: Kyoto and beyond. Berlin: Springer Verlag, 2003.

Wigley T.M.L., Richels R., Edmonds J.A. Economic and environmental choices in the stabilization of atmospheric CO₂ concentrations. Nature 1996;379:240-243.

Wigley T.M.L. The Kyoto Protocol: CO₂, CH₄ and climate implications. *Geophysical Research Letters* 1998;25(13):2285-2288.

