SMHI

KLIMATOLOGI Nr 4, 2011

Uppdatering av den vetenskapliga grunden för klimatarbetet

En översyn av naturvetenskapliga aspekter

Markku Rummukainen, Daniel J. A. Johansson, Christian Azar, Joakim Langner, Ralf Döscher, Henrik Smith

ISSN: 1654-2258 © SMHI

KLIMATOLOGI Nr 4, 2011

Uppdatering av den vetenskapliga grunden för klimatarbetet

En översyn av naturvetenskapliga aspekter

Markku Rummukainen, Daniel J. A. Johansson, Christian Azar, Joakim Langner, Ralf Döscher, Henrik Smith

Sammanfattning

Det naturvetenskapliga kunskapsläget om klimatförändringarna förbättrats ständigt genom forskningen om klimatsystemet, klimatpåverkan, klimatets variationer och förändringar samt klimateffekter.

Kunskapsläget är väletablerat när det gäller den grundläggande fysiken bakom växthuseffekten, liksom att genomsnittstemperaturen vid jordytan stigit de senaste femtio åren. Det är också mycket sannolikt att det mesta av den observerade uppvärmningen beror på mänsklig klimatpåverkan.

Samtidigt finns det betydande osäkerheter när det gäller konsekvenserna av klimatförändringarna samt hur mycket utsläppen behöver minska för att man ska nå ett givet klimatmål. Värdet på *klimatkänsligheten* är den viktigaste faktorn för beräkningar av hur mycket växthusgaser vi kan släppa ut, givet ett visst temperaturmål.

Forskningen visar att det behövs stora och snabba utsläppsminskningar för att uppnå tvågradersmålet. För att nå ett lägre temperaturmål, till exempel ett 1,5-gradersmål, är de nödvändiga utsläppsminskningarna än mer omfattande.

- För att nå tvågradersmålet med en sannolikhet runt 70 % krävs uppskattningsvis att de globala växthusgasutsläppen minskar i storleksordningen 50–60 % från år 2000 till 2050, och minskar med nära 100 % till 2100.
- För att nå ett 1,5-gradersmål med en sannolikhet runt 70 % krävs globala nollutsläpp redan runt år 2050.
- För att nå ett 1,5-gradersmål med en sannolikhet runt 50 % krävs uppskattningsvis att de globala växthusgasutsläppen minskar i storleksordningen 80 % från år 2000 till 2050, och med nära 100 % till 2100.

Det är framför allt de kumulativa utsläppen av koldioxid och andra långlivade växthusgaser som räknas när det gäller hur stora klimatförändringarna blir bortom 2100. Ju senare de globala utsläppen kulminerar, och ju högre nivå de då är på, desto större blir utmaningen för att åstadkomma en tillräckligt snabb påföljande utsläppsminskningstakt. Reducerade utsläpp av kortlivade klimatpåverkande ämnen är viktigt främst i ett kortare perspektiv.

Det finns olika modeller för hur de globala utsläppsminskningarna kan fördelas mellan olika regioner och länder. Dessa baseras inte på naturvetenskapliga principer utan är beroende av politiska och andra ställningstaganden. För en del länder skiljer sig resultaten mycket beroende på valet av fördelningsmodell. För de flesta industriländer är slutsatsen dock generellt sett densamma: jämfört med idag behöver deras utsläpp minska mycket kraftigt.

- För att nå tvågradersmålet med i storleksordningen 70 % sannolikhet krävs, *givet en globalt lika per capita fördelning av utsläppen från och med 2050,* att utsläppen i Sverige minskar med cirka 70 % från år 2005 till 2050. Den motsvarande siffran för EU är cirka 80 %.
- För att nå ett 1,5-gradersmål med i storleksordningen 70 % sannolikhet krävs, *givet en globalt lika per capita fördelning av utsläppen från och med 2050*, att utsläppen minskar från år 2005 till år 2050 med runt 100 % i Sverige och i EU, och i andra länder.
- För att nå ett 1,5-gradersmål med i storleksordningen 50 % sannolikhet krävs, *givet en globalt lika per capita fördelning av utsläppen från och med 2050*, att utsläppen i Sverige och EU minskar med drygt 90 % från år 2005 till 2050.

Nettoutsläpp av koldioxid från avskogning och utrikes luft- och sjöfart ingår inte i dessa uppskattningar.

Generellt blir riskerna för allvarliga klimateffekter mindre ju mer ambitiöst temperaturmål som väljs, men riskerna försvinner inte med tvågradersmålet, och inte ens med ett 1,5-gradersmål.

Jämfört med IPCC:s AR4 från 2007, har nya forskningsresultat publicerats om klimateffekter. I denna rapport har vi fokuserat på havsnivåhöjningen, havsförsurningen, den biologiska mångfalden samt klimateffekter i Arktis. Jämfört med genomgången av kunskapsläget i AR4 visar nya resultat att den framtida havsnivåhöjningen kan bli större, havsförsurningens effekter på marina ekosystem omfattande och även om en del arter kan vara anpassningsbara, kan världens ekosystem påverkas av skillnader i olika arters sårbarhet för klimatförändringarna. I Arktis sker snabba förändringar.

Sammantaget ter sig riskerna för allvarliga klimateffekter större jämfört med AR4.

Denna rapport utgår från naturvetenskaplig klimatforskning sedan 2007. Rapporten förordar inte något specifikt temperaturmål, någon specifik utsläppsbana eller specifika policybeslut. Dessa är föremål för politiska avgöranden.

Innehållsförteckning

1 INTRODUKTION 1

2 VARFÖR TVÅGRADERSMÅLET? 3

3 GRUNDLÄGGANDE NATURVETENSKAPLIGA FAKTORER 5

3.1 Klimatkänslighet 5

3.2 Kolcykeln 7

3.3 Andra långlivade växthusgaser än koldioxid 8

3.4 Kortlivade klimatpåverkande ämnen 8

4 UTSLÄPPSBANOR FÖR ATT NÅ TVÅGRADERSMÅLET 12

4.1 Introduktion 12

4.2 AR4 och senare internationella analyser av globala utsläppsbanor 14

4.3 Sammanfattning av kunskapsläget om utsläppsbanor förenliga med tvågradersmålet 16

4.4 En scenarioanalys av globala och nationella utsläppsbanor med en svensk modell, MiMiC 17

4.5 Uppskattning av globala utsläppsbanor enligt MiMiC 18

4.6 Uppskattning av nationella utsläppsmål enligt MiMiC 20

4.7 Betydelsen av utsläpp relaterade till markanvändning och skogsbruk 21

5 UTSLÄPPSBANOR FÖR ATT NÅ ETT 1,5-GRADERSMÅL 23

5.1 Uppskattning av globala utsläppsbanor enligt MiMiC 23

5.2 Uppskattning av nationella utsläppsbanor enligt MiMiC 24

6 TVÅGRADERSMÅLET RESPEKTIVE ETT 1,5-GRADERSMÅL 26

7 BECCS – BIOMASSA MED KOLINFÅNGNING 28

8 KLIMATEFFEKTER 30

8.1 Havsförsurningen 31

8.2 Havsnivån 32

8.3 Biologisk mångfald 34

8.4 Vad innebär tvågradersmålet för Arktis? 35

9 PÅVERKAR NY KUNSKAP TIDIGARE SLUTSATSER? 37

10 SLUTSATSER 38

REFERENSER 39

Bilaga I: The MiMiC model 46

Bilaga II: “Contraction & convergence” 48

1 Introduktion

Det vetenskapliga kunskapsläget om klimatförändringar är grundläggande för klimatpolitiken och för samhällets klimatarbete, vars övergripande mål är att undvika farlig mänsklig påverkan på klimatsystemet. Idag är uppfattningen om pågående klimatförändringar som följd av mänsklig påverkan väletablerad. Samtidigt finns det betydande osäkerheter, och det går inte att entydigt fastställa konsekvenserna av mänsklig klimatpåverkan. Utöver relevanta naturvetenskapliga osäkerheter tillkommer osäkerheten om den framtida samhällsutvecklingen, vilken driver vår fortsatta klimatpåverkan. Förutsättningarna för klimatarbetet inkluderar således både robusta kunskaper och osäkerheter.

Dagens naturvetenskapliga kunskapsläge bygger på klimatforskningen som hela tiden utvecklas, om klimatsystemet och dess processer, klimatpåverkan, klimatets variationer och förändringar samt klimateffekter. Forskningen om den mänskliga klimatpåverkan har uppstått i denna process och drivits på av tilltagande förståelse av klimatsystemets känslighet för olika påverkan samt observerade förändringar av såväl klimatet som klimatpåverkan. Forskningsresultat finns allmänt tillgängliga i den vetenskapliga litteraturen, men också i olika kunskapssammanställningar. De mest omfattande kunskapssammanställningarna om klimatforskningen görs i FN:s mellanstatliga klimatpanels regi och finns från 1990, 1995, 2001, samt senast från 2007 (IPCC 2007a, 2007b, 2007c). Sammanställningen från 2007 betecknas i löptexten nedan med ”AR4”. IPCC:s nästa stora kunskapssammanställning planeras till 2013–2014.

Sedan AR4 har en del nya sammanställningar av kunskapsläget tagits fram, om än betydligt mindre omfattande än IPCC:s sammanställningar. Sedan 2007 finns till exempel det Vetenskapliga rådets rapport (MVB-SOU 2007), Rummukainen och Källén (2009), Copenhagen Diagnosis (2009), Netherlands Environmental Assessment Agency (2009), Rummukainen m fl (2010), samt AMAP (2011). Genomgående har dessa bekräftat de huvudsakliga slutsatserna om både de robusta kunskaper och relevanta osäkerheter som lades fram i AR4, men det är också uppenbart att även nya rön har tillkommit kunskapsläget.

Denna rapport är en genomsyn av kunskapsläget för klimatarbetet, ur ett naturvetenskapligt perspektiv. Rapporten bygger på IPCC:s kunskapssammanställningar, senaste publicerade forskningsresultat och genomsyner av expertgrupper som samlat vetenskapligt material.

Rapporten sammanfattar resultatet av det uppdraget som regeringen gav till SMHI i maj 2011 (M2011/2166/Kl), om uppdaterat underlag till klimatarbetet på följande punkter:

- hur ny kunskap och nya forskningsresultat påverkar slutsatserna i tidigare sammanställningar om klimatförändringar och klimateffekter
- vetenskapliga förutsättningar för det så kallade tvågradersmålet
- vetenskapliga förutsättningar för ett 1,5-gradersmål

Utöver dessa övergripande syften, uppdrogs SMHI att särskilt beakta ny kunskap om kortlivade klimatpåverkande ämnen. Dessa ämnen har uppmärksammats på vissa policyarenor.

De frågeställningar som ingår i uppdraget är i högsta grad relevanta för samhällets klimatarbete inklusive de internationella klimatförhandlingarna. Tvågradersmålet är idag en utgångspunkt i de internationella klimatförhandlingarna. Dessutom har man kommit överens om en framtida översyn av detta mål och i synnerhet om ett lägre temperaturmål borde väljas i stället. Dessa beslut är grundläggande internationellt, inom EU och i Sverige, de fastslår den övergripande ambitionsnivån för utsläppsminskningar och specificerar utgångspunkterna för en färdplan i klimatarbetet framöver.

Rapporten innehåller en kort inledning om tvågradersmålet, en diskussion om klimatkänsligheten och kolcykeln som i detta sammanhang är grundläggande naturvetenskapliga faktorer, en redovisning av utsläppsbanor för att nå tvågradersmålet och för ett 1,5-gradersmål, vilket baseras framför allt på sammanställningar av UNEP (2010) och EGScience (2010). Även

några enskilda utsläppsbanor som har tagits fram med den så kallade MiMiC modellen vid Chalmers presenteras. Eftersom tiden för uppdraget uppgick till tre månader, har vissa avgränsningar varit nödvändiga. I synnerhet används endast en fördelningsmodell för att visa hur några globala utsläppsbanor skulle kunna brytas ner till regionala och nationella utsläppsbanor. Genomgången av klimateffekter avgränsas i sin tur till havsförsurningen, havsnivån och biologisk mångfald. Därtill diskuteras Arktis i korta ordalag.

Av författarna utanför SMHI har Daniel Johansson och Christian Azar (Institutionen för energi och miljö, avdelningen för fysisk resursteori, Chalmers) bidragit till avsnitten om utsläppsbanor. Henrik Smith (Centrum för miljö och klimatforskning, Lunds universitet) har bidragit till diskussionen om klimateffekter på biologisk mångfald.

Rapporten har tagits fram efter samråd med Naturvårdsverket och Energimyndigheten. Rapporten förordar inte något specifikt temperaturmål, utsläppsbana, eller andra policybeslut.

2 Varför tvågradersmålet?

Tvågradersmålet innebär att den globala uppvärmningen ska begränsas till under två grader jämfört med den förindustriella perioden[1]. Detta mål ingick i den så kallade Copenhagen Accord som skrevs i samband med FN:s klimatkonventions 15:e partsmöte (COP15) i december 2009. Målet antogs av klimatkonventionen ett år senare vid det 16:e partsmötet (COP16) i december 2010 (UNFCCC 2010). Tvågradersmålet är därmed en grundsats i klimatarbetet. En översyn av målet kommer att göras 2013–2015, vilket kan leda till en skärpning av detta temperaturmål. För närvarande har Klimatkonventionens olika parter olika syn på hur man ska arbeta vidare med vägen till tvågradersmålet. Vid COP16 beslutades det också att man ska arbeta fram ett globalt utsläppsmål för 2050 och en tidtabell för de globala utsläppens kulminering, inom den så kallade ”Shared Vision” diskussionen.

EU antog tvågradersmålet redan 1996 (European Council 1996), och har hållit fast vid det i senare uttalanden (European Council 2005, 2011). I Sverige har tvågradersmålet funnits med i klimatpolitiken ungefär lika länge som det funnits i den EU-gemensamma politiken. Men den nationella inriktningen har inledningsvis varit att översätta målet till en stabiliseringsnivå för halten växthusgaser i atmosfären. Våren 2002 fattade riksdagen beslut om ett klimatmål med mål både på kort och på lång sikt[2]. Enligt det långsiktiga målet skulle Sverige verka internationellt för en stabilisering av halten växthusgaser i atmosfären och utsläppen per person och år skulle konvergera till 2050. De koncentrations- och utsläppsnivåer som då sattes upp som mål var max 550 ppm[3] koldioxidekvivalenter i atmosfären respektive 4,5 ton växthusgaser/person och år. Baserat på underlag från Vetenskapliga rådet, beslutade riksdagen 2009 om att införa ett temperaturmål och skärpa koncentrationsmålet under det svenska klimatmålet till 400 ppm koldioxidekvivalenter[4].

Det ligger nära till hands att koppla tvågradersmålet till Klimatkonventionens ”Article 2” (UNFCCC 1992) som handlar om konventionens grundläggande målsättning om att förebygga farlig mänsklig påverkan på klimatsystemet:

> *The ultimate objective of this Convention and any related legal instruments that the Conference of the Parties may adopt is to achieve, in accordance with the relevant provisions of the Convention, stabilisation of greenhouse gas concentrations in the atmosphere at a level that would prevent dangerous anthropogenic interference with the climate system. Such a level should be achieved within a timeframe sufficient to allow ecosystems to adapt naturally to climate change, to ensure that food production is not threatened and to enable economic development to proceed in a sustainable manner.*

Denna målsättning handlar givetvis om värderingar eftersom det inte finns något självklart mått på det som är farligt. De uttalade förbehållen om ekosystem, livsmedelsproduktion och den ekonomiska utvecklingen kan ändå på olika sätt studeras i ljuset av alternativa temperaturmål. Kunskapsläget understryker att även om tvågradersmålet inte ger garantier för att klimateffekter undviks, blir effekterna alltmer överhängande med stigande global medeltemperatur (IPCC 2007b, Smith m fl 2009, Gosling m fl 2011). Enbart vetenskapliga resonemang fastställer alltså inte tvågradersmålet. En beskrivning av Randall (2010) av utvecklingen av tvågradersmålet belyser detta och hur tvågradersmålet inledningsvis underbyggdes med mer eller mindre kvalitativa resonemang.

---

[1] Tvågradersmålet anges även med att den globala medeltemperaturhöjningen inte ska överstiga två grader jämfört med den förindustriella perioden. Det finns en viss skillnad mellan formuleringarna, men andemeningen är densamma.

[2] Prop. 2001/02:55

[3] I denna rapport används ppm (miljondelar) synonymt med ppmv (miljondelar per volym).

[4] Prop. 2008/09:162

IPCC (2007a) konstaterade att den globala uppvärmningen under hundraårsperioden 1906–2005 uppgick till cirka 0,74 grader. Trenden har fortsatt sedan dess och WMO (2011) rapporterar att den senaste tioårsperioden (2001–2010) var den varmaste under de senaste cirka 150 åren i modern tid (här avses perioden under vilket reguljära instrumentella temperaturmätningar med global omfattning har gjorts). Jämfört med den föregående tioårsperioden (1991–2000), var 2001–2010 cirka 0,2 grader varmare (se Rummukainen m fl 2010 för en nyligen gjord genomgång av ny litteratur om bland annat klimattrender, klimatpåverkan och återkopplingsmekanismer).

Klimatsystemet svarar på utsläppen med en fördröjning, vilket innebär att den fulla effekten av redan utsläppta växthusgaser hittills inte visat sig (IPCC 2007a, Solomon m fl 2009). Det finns alltså en viss redan intecknad fortsatt uppvärmning (så kallad ”committed warming”). Fortsatta utsläpp likt dagens nivåer spär därtill på uppvärmningen ytterligare med några tiondels grader per varje ny årtionde. Den globala uppvärmningen uppgår effektivt alltså redan idag till väl över en grad och avståndet till två grader krymper snabbt.

Den pågående uppvärmningen och de globala utsläppens ökningstakt (Friendlingstein m fl 2010) understryker tvågradersmålets utmaningar. Möjligheterna till att klara målet beror dock på tekniska, ekonomiska, politiska och andra samhälleliga förutsättningar och på hur man lyckas förena en önskad global och regional samhällsutveckling med den omvandling som krävs av global och regional tillförsel av primärenergi och effektivisering av användningen av energi inom olika samhällssektorer.

Det är lätt att problematisera tvågradersmålet. Som den utgångspunkt för klimatarbetet som detta mål är genom att det antagits genom politiska beslut, är det ändå angeläget att arbeta vidare utifrån detta, oavsett om det längre fram skulle ersättas med andra mål. Detta förutsätter kunskaper om bland annat vilka globala, regionala och nationella utsläppsbanor[5] som är förenliga med tvågradersmålet. Som diskuteras vidare i nästa avsnitt, handlar detta i grund och botten om klimatkänslighet, kolcykelns känslighet för klimatförändringar och kumulativa koldioxidutsläpp. När det gäller utsläppen är det i klimatarbetet likaså viktigt att kunna karakterisera utsläppsbanor i termer av kulminering[6] av de globala utsläppen, hur snabbt dessa sedan minskas och vilka för utsläppsnivåer som förutsätts för olika tidsperspektiv, till exempel år 2020 och 2050.

Vetenskapligt underlag till bedömningar av möjligheterna till att klara ett givet temperaturmål eller annat kvantifierat klimatmål handlar om sannolikhetsbaserade analyser. En viss utsläppsbana garanterar inte ett givet temperaturmål. Det finns en viss sannolikhet för att förändringarna blir större, men också för att resultatet överträffar målet på ett positivt sätt. Detta beror på osäkerheter inom den grundläggande naturvetenskapen om främst klimatkänsligheten, men också om havets värmeupptag[7] och kolcykeln. Således beror möjligheterna att uppnå ett givet temperaturmål även på grundläggande naturvetenskapliga faktorer.

[5] En utsläppsbana än en representation av årliga utsläppsnivåer över en viss tidsperiod.

[6] När (vilket år) de årliga globala utsläppen når sitt maximum samt hur stora de är i sina kulmen.

[7] Energimängden ökar i det globala havet, vilket bromsar temperaturökningen i luften.

3 Grundläggande naturvetenskapliga faktorer

Det finns vissa grundläggande naturvetenskapliga faktorer som behöver belysas i samband med bedömning av klimatförändringar och därmed av vilka utsläppsbanor som kan vara förenliga med tvågradersmålet eller andra temperaturmål (IPCC 2007a, Wigley m fl 2009). Dessa faktorer handlar om sambanden mellan dels den globala uppvärmningen, atmosfärshalter av växthusgaser och partiklar, dels mellan dessa halter och utsläppen. Dessa samband berör den så kallade klimatkänsligheten (avsnitt 3.1) respektive den globala kolcykeln (avsnitt 3.2). Kunskaper om dessa samband är avgörande för bedömningar av vilken sannolikhet för måluppfyllelse specifika utsläppsbanor föranleder.

Det Vetenskapliga rådet (MVB-SOU 2007) presenterade dessa samband mellan mänskliga aktiviteter, utsläpp av växthusgaser, klimatförändringarna och deras effekter på ekosystem och samhälle, samt olika typer av klimatmål enligt följande illustration:

Det konstaterades vidare (MVB-SOU 2007) att

> *Temperaturmål sätts utifrån vilka effekter på ekosystemen och samhälle som olika stora klimatförändringar, uttryckta i termer av global medeltemperaturökning, kan förutses ge. Vad som är acceptabelt är en värderingsfråga och kan inte avgöras på vetenskaplig grund...*
>
> *Koncentrationsmål sätts utifrån vetenskapligt konstaterade samband mellan ökad koncentration av växthusgaser och temperaturökning. Både temperaturmål och koncentrationsmål är globala, eftersom de påverkas av världens samlade utsläpp av växthusgaser.*
>
> *Ett globalt utsläppsmål kan sedan härledas från koncentrationsmålet genom vetenskapligt uppskattade samband om vilka utsläppsnivåer (globalt) som är förenliga med olika koncentrationer av växthusgaser i atmosfären. Utsläppsmål kan anges som en utsläppsmängd, antingen totalt eller per capita, som inte får överskridas vid ett visst årtal. Det kan också räknas om till hur mycket utsläppen behöver minska över en viss tidsperiod. Utsläppsmål är den typ av mål som är enklast att omsätta till strategier och åtgärder.*
>
> *Regionala och nationella utsläppsmål kan inte bestämmas vetenskapligt, men de kan beräknas med utgångspunkt i globala utsläppsmål och en politiskt bestämd fördelning mellan olika regioner och länder. De kan också till största delen baseras på politiska bedömningar av vad som är politiskt nödvändigt eller möjligt.*

I denna rapport tas temperaturmålet som utgångspunkt, medan koncentrationsmål diskuteras enbart kort. Fokus ligger på utsläpps*banor* som kan vara förenliga med specifika temperaturmål.

3.1 Klimatkänslighet

Klimatkänslighet[8] anger hur mycket klimatet förändras vid en given ändring av mängden växthusgaser i atmosfären. Ju högre klimatkänslighet, desto mer värms jorden upp. Forskningen om klimatkänslighet bedrivs genom analyser av observerat klimat under den instrumentellt observerade perioden, studier av tidigare klimatvariationer samt klimatmodellering. IPCC (2007a) anger att klimatkänsligheten troligen ligger mellan 2 och 4,5 grader[9]. Medianen ligger

[8] Klimatkänslighet definieras som den långsiktiga globala medeltemperaturökningen som orsakas av en fördubbling av atmosfärens koldioxidhalt. Effekter av olika återkopplingar vid stigande temperatur, till exempel förändringar i molnigheten och mängden vattenånga i atmosfären, ingår.

[9] Sannolikheten att klimatkänsligheten är lägre eller högre än detta intervall anges som högst 33 %. Intervallet är dock inte symmetriskt utan den uppskattade sannolikhetsfördelningen är skev mot högre

på 3 grader. Den bästa (median)bedömningen ligger på 3 grader. Senare redovisade forskningsresultat föranleder inte någon justering av detta intervall (Rummukainen m fl 2010, s. 51-58).

Osäkerheten om klimatets känslighet gör att en given ändring i atmosfärens halt av växthusgaser inte kan associeras med ett specifikt uppvärmningsscenario. En ökande global temperatur och en rad andra förändringar i klimatet är ändå en robust konsekvens vid ökande växthusgashalter. Med utgångspunkt från osäkerheten i klimatkänsligheten kan man också räkna till exempel på sannolikheten av att en specifik förändring i atmosfären ger en större eller mindre uppvärmning än två grader. I tabell 3.1.1 redovisas resultat för den långsiktiga globala uppvärmningen som motsvarar olika bestående atmosfärshalter av växthusgaser.

Tabell 3.1.1. Varaktig global medeltemperaturförändring jämfört med förindustriellt klimat, vid olika stabiliseringshalter av växthusgaser i atmosfären baserat på IPCC (2007a, tabell 10.8). Osäkerhetsintervallerna återspeglar osäkerheter i klimatkänsligheten.

Koldioxidekvivalenter (ppm)	Troligast (”best estimate” enligt IPCC 2007a) långsiktig global temperaturförändring (°C)	Osäkerhetsintervall (°C)
350	1,0	0,6–1,4
450	2,1	1,4–3,1
550	2,9	1,9–4,4
650	3,6	2,4–5,5
750	4,3	2,8–6,4
1000	5,5	3,7–8,3

Tvågradersmålet kan således vara möjligt att nå även vid en stabiliseringsnivå på 550 ppm CO_2ekv, förutsatt att klimatkänsligheten är låg. Sannolikheten för att nå målet ökar med lägre stabiliseringsnivåer. Tabell 3.1.1. redovisar sambandet mellan bestående förhöjda atmosfärsmängder av koldioxidekvivalenter och varaktiga temperaturförändringar ”jämviktstemperatur”). De sistnämnda fullbordas med en viss fördröjning efter att växthusgashalterna slutar att öka. Fördröjningen beror på värmelagringen i världshaven, vilket orsakar en viss tröghet i klimatsystemets respons på utsläppen. Det tar tid att nå jämviktstemperaturen för en viss jämviktshalt av växthusgashalter. På grund av denna tröghet skulle man kunna – över en begränsad tid – ha en högre koncentration av växthusgaser i atmosfären än vad som varaktigt behövs för att nå tvågradersmålet. Vi återkommer till denna aspekt senare i texten.

Koldioxidekvivalenter är en ofta använd indikator för sammanräknad påverkan på strålningsbalansen (”radiative forcing”) som följer av mänsklig klimatpåverkan. Utöver atmosfärshalterna av koldioxid, räknar man ofta om de antropogena atmosfärshalterna av andra långlivade växthusgaser till motsvarande koldioxidekvivalenter. Koldioxidekvivalenter är den mängd som skulle orsaka samma ”radiative forcing” som en annan välblandad växthusgas eller blandning av välblandade växthusgaser. Den koldioxidekvivalenta koncentrationen är därför högre än koncentrationen av enbart koldioxid. Om man även inkluderar den avkylande påverkan av aerosoler i den koldioxidekvivalenta nivån, minskar denna skillnad.

Den koldioxidekvivalenta halten i atmosfären ska inte blandas ihop med de koldioxidekvivalenta utsläppen, vilket är helt annat koncept (se avsnitt 3.3).

---

värden, dvs. klimatkänsligheten skulle även kunna vara betydligt högre än 4,5°C. Sannolikheten att klimatkänsligheten vore lägre än 1,5 grader bedöms som mindre än 10 % (IPCC 2007a, s. 798-799).

3.2 Kolcykeln

I hittillsvarande klimatmodellering har observationer och framtidsscenarier av atmosfärens växthusgashalter och partiklar varit ingångsdata för simuleringar av den antropogena klimatpåverkan. Detta har förutsatt att scenarier för atmosfärshalter av växthusgaser och partiklar i ett inledande steg först har härletts från specifika utsläppsscenarier, vilka i sin tur har baserats på socioekonomiska scenarier (t ex IPCC 2000). Detta har gjorts med kolcykel-modellering som beskriver kolets kretslopp mellan atmosfären, terrestra system och havet, och hur mycket av utsläppen som stannar i atmosfären respektive tas upp i havet och i terrestra ekosystem. Eftersom de naturliga kolsänkorna och källorna påverkas av klimatet, behöver de simuleras tillsammans med klimatet för att komplexiteten i sambandet mellan utsläppen och atmosfärshalterna ska kunna uppskattas bättre. Efter hand har globala klimatmodeller också börjat kompletteras med kolcykelkomponenter. Beräkningar av utsläppsbanor som är förenliga med temperaturmål förutsätter och begränsas av kunskaperna om kolcykeln och speciellt hur den påverkas av klimatförändringar.

Som redan hänvisats till, hamnar en del av de antropogena utsläppen i havet och i terrestra ekosystem. Översiktligt handlar detta om drygt hälften av de årliga och kumulativa antropogena utsläppen hittills från användning av fossila bränslen och markanvändning. Kolflödena mellan atmosfären, havet och terrestra ekosystem är dock komplicerade och dessutom föränderliga eftersom de påverkas av temperatur, hydrologiska förhållanden och även vindar. Eventuella förändringar i havets och de terrestra ekosystemens förmåga att lagra kol medför osäkerheter i sambandet mellan utsläppsbanor och resulterande atmosfärshalter, och därmed i temperatur-utvecklingen. Generellt sett tyder forskningsresultat på att naturliga kolsänkor mattas av vid stigande global medeltemperatur (se Rummukainen m fl 2010, s. 23-24 och 56-57). Nya rön finns också om kolupptaget i världens skogar. Gosling m fl (2011) och Good m fl (2011) diskuterar olika resultat som bland annat handlar om att gamla skogar kanske fortsätter att ta upp kol i stället för att hamna i en balans, men också att effekterna av högre temperatur och vattenstress kan drabba olika typer av skogar hårdare än enligt tidigare studier.

Resultat från klimat-kolcykelmodeller (Matthews m fl 2009) tyder att kumulativa utsläpp på omkring 3700 miljarder ton koldioxid ($GtCO_2$), vilket är samma som 1000 miljarder ton kol (GtC), motsvarar en global temperaturhöjning på 1,0–2,1°C (5 till 95 % konfidensintervall) med bästa uppskattning på 1,5°C. Detta motsvarar att cirka 4800 $GtCO_2$ kan släppas ut om tvågradersmålet ska vara nåbart med en sannolikhet runt 50 %. De kumulativa antropogena koldioxidutsläppen uppgår hittills till drygt 1850 $GtCO_2$ och ingår i denna mängd. Världen har alltså enligt dessa studier en möjlighet att släppa ut ytterligare knappt 3000 $GtCO_2$ och ändå klara av att begränsa den globala temperaturhöjningen till 2°C med en sannolikhet runt 50 %.

Zickfeld m fl (2009) uppskattar kumulativa koldioxidutsläpp över perioden 2000 till 2500 som är förenliga med tvågradersmålet med en sannolikhet runt knappt 70 %. Enligt deras beräkningar kan de resterande kumulativa utsläppen vara runt 1830 $GtCO_2$, men osäkerhets-intervallet är stort. Om målet ska nås med en sannolikhet runt 50 %, kan de resterande utsläppen vara cirka 2800 $GtCO_2$ (även detta med ett stort osäkerhetsintervall). Zickfeld m fl (2009) beaktar vare sig partiklar eller andra växthusgaser än koldioxid i sin analys.

Resultat från Allen m fl (2009), Meinshausen m fl (2009) och O'Neill m fl (2010) jämför sig relativt väl till Matthews m fl (2009). Dessa "utsläppsutrymmen" kan dock inte utan vidare omsättas till utsläppsbanor eftersom antagandena om andra antropogena utsläpp av växthusgaser (speciellt metan och lustgas) och effekten av antropogena partiklar varierar mellan dem.

Uppskattningar av det kumulativa utsläppsutrymmet påverkas av kunskapsläget om de naturliga kolsänkorna i havet och i terrestra ekosystem. Forskning sedan AR4 tyder på att dessa kan försvagas mer än tidigare uppskattats (Heimann och Reichstein 2008, Piao m fl 2008, Sitch m fl 2008). Till exempel förutsätter bindning av kol i terrestra system tillgång till kväve. Kväve-effekter har generellt varit begränsat representerade i kolcykelmodellering. När kväveeffekten inkluderas mer komplett i simuleringar, ökar kolupptaget i vissa regioner, medan det sammantagna globala kolupptaget minskar (Zaehle m fl 2010, Sokolov m fl 2008). Tidigare resultat från

kolcykelmodeller kan i så fall te sig något för optimistiska beträffande hur stora de kumulativa antropogena växthusgasutsläppen kan få bli. Detta återstår dock att bekräftas med ytterligare studier.

3.3 Andra långlivade växthusgaser än koldioxid

Det är koldioxidutsläppen som utgör den största delen av den mänskliga klimatpåverkan, men även andra antropogena växthusgasutsläpp påverkar klimatet. Metan (CH_4), lustgas (N_2O), svavelhexafluorid (SF_6), perfluorkolväten (PFC), och fluorkolväten (HFC) ingår tillsammans med koldioxid i den så kallade Kyotokorgen av gaser (UNFCCC 1997), som diskuteras i de internationella klimatförhandlingarna. En del andra utsläpp som har klimatpåverkan hanteras inom ramen för Montrealprotokollet som handlar om att skydda ozonskiktet. Det finns även luftföroreningar inklusive partiklar som har klimatpåverkan. Dessa diskuteras vidare i nästa avsnitt.

I jämförelse med koldioxid har andra klimatpåverkande ämnen olika stark klimatpåverkan och de stannar en längre eller en kortare tid i atmosfären än koldioxid. Emellertid räknar man ofta om deras utsläpp till koldioxidekvivalenter i studier av utsläppsbanor, i regel med de så kallade Global Warming Potentials (GWPs, Plattner m fl 2009). GWP värdena är typiskt framräknade för att jämföra den integrerade uppvärmande effekten av olika gaser under en tidshorisont av100 år. Då man i koldioxidekvivalenta utsläppsbanor inte fullt ut fångar de olika gasernas styrka och tidsdynamik så kan två olika utsläppsbanor med identiska koldioxidekvivalenta utsläpp ge olika temperatursvar om andelen gaser i utsläppsbanorna är olika (Daniel m fl 2011).

När antaganden för andra växthusgaser än koldioxid görs, kan de dock vara mycket varierande (t ex Wigley m fl 2009), vilket komplicerar jämförelser av utsläppsbanor och dylikt mellan olika studier. I en del fall inkluderas bara koldioxidutsläppen, medan andra exempelvis bara beaktar gaserna som ingår i Kyotokorgen eller även inkluderar luftföreningar och partiklar. Till exempel, i en del studier har det antagits att uppvärmande effekter (av andra växthusgaser än koldioxid) och avkylande effekter (svavelpartiklar) tar ut varandra (Matthews m fl 2009, Allen m fl 2009). Detta är givetvis en betydande förenkling. Baserat på en genomgång av vetenskaplig litteratur, betonar Montzka m fl (2011) de andra långlivade antropogena växthusgasernas betydelse under de nästkommande årtiondena. Speciellt pekas minskade metanutsläpp ut som en möjlighet att på mellanlång sikt (under de närmaste årtiondena) bromsa den globala uppvärmningen. Denna slutsats stöds också av UNEP och WMO (2011).

3.4 Kortlivade klimatpåverkande ämnen

Kortlivade klimatpåverkande ämnen är av betydelse speciellt i ett kort och mellanlångt tidsperspektiv (se faktaruta på s. 10-11). Särskilt lyfts den uppvärmande effekten av sot (”black carbon”) och troposfäriskt ozon fram. Gasen metan som diskuterades ovan som en långlivad växthusgas diskuteras även i samband med kortlivade klimatpåverkande ämnen eftersom dess halt påverkar troposfäriskt ozon. Metans effekt på ozon finns samtidigt redan med i Kyotokorgen, då denna effekt inkluderas när man beräknar de koldioxidekvivalenta utsläppen av metan.

Påverkan från sotpartiklar finns i synnerhet i delar av tropikerna kopplat till stora utsläpp, i Sydostasien (Ramanathan och Carmichael 2008) men även i Arktis (Shindell och Faluvegi 2009, Flanner m fl 2009, Quinn m fl 2008, Shindell 2007) på grund av både absorption av solstrålning och deponering av sotpartiklar på snö och is med påföljande förändring av albedot. Eftersom de direkta utsläppen av sot i Arktis ännu är relativt små så styrs halterna och nedfallet och därmed den regionala klimatpåverkan av långtransport från lägre latituder. I en modell-studie som inkluderade 17 olika globala atmosfärkemiska modeller redovisar Shindell m fl (2008) beräkningar av bidraget från olika källområden till nedfallet av sot. Enligt beräkningarna dominerar bidragen till Arktis från Europa förutom för Grönland där bidrag från Nordamerika är av lika stor betydelse och bidragen från södra och östra Asien också är betydande. Norra Asien inkluderades inte som ett särskilt källområde i studien men det är sannolikt att bidraget därifrån

är betydande (Quinn m fl 2008). Föroreningar från Asien blir progressivt mer viktiga med höjden i atmosfären och dominerar i den övre delen av troposfären.

UNEP och WMO (2011) har gjort en genomsyn av kunskapsläget om sot och troposfäriskt ozon samt tagit fram scenarier med utsläppsbegränsningar inriktade på framför allt metan och sot. Metan är en växthusgas i sig, men påverkar också väsentligt halten av troposfäriskt ozon, särskilt i bakgrundsluft och den fria troposfären. Man kom bland annat fram till att minskningar av de relevanta utsläppen skulle kunna begränsa den fortsatta globala uppvärmningen med 0,2–0,7 grader under de närmaste decennierna jämfört med referensbanor[10]. Tillsammans med minskade koldioxidutsläpp skulle chanserna kunna öka för att begränsa den globala uppvärmningen till under två grader. Dessutom skulle hastigheten med vilken klimatet förändras bromsas, vilket kan vara betydelsefullt för att minska risken av en rad klimateffekter. Till exempel beräknade Kopp and Mauzerall (2010) (för ett scenario som leder till 500 ppm CO_2ekv vid 2100) att om sotutsläppen hålls konstanta på dagens nivå skulle de koldioxidekvivalenta utsläppen av gaser i Kyotokorgen behöva halveras jämfört med år 2000 1–15 år tidigare än om sotets bidrag till uppvärmningen var helt eliminerat till år 2100. UNEP och WMO:s (2011) utgångspunkt var i mångt och mycket att lyfta fram synergier mellan åtgärder för luftkvalitet och klimat, vilka är särskilt stora i bland annat i Sydostasien som påverkas markant av sot och troposfäriskt ozon. Man anger att betydande vinster när det gäller minskade effekter på människors hälsa och minskat produktionsbortfall för jordbruksgrödor kan uppnås genom att reducera halterna av partiklar och marknära ozon. Reducerade halter av marknära ozon kan även ha en positiv effekt på kolinlagringen i naturlig vegetation (Sitch m fl 2008).

Emellertid påtalas också farhågor med att koppla ihop dessa frågor. Dels skulle det innebära att diskussionerna inom olika FN-konventioner delvis skulle gå in i varandra (speciellt UN-ECE CLRTAP och UNFCCC), dels skulle det kunna leda till mindre omfattande åtgärder mot koldioxidutsläppen trots att de är avgörande för en långsiktig klimatstabilisering. Berntsen m fl (2010) argumenterar dock för att med ”rätt” formulering av klimatmålet och jämförelser mellan lång- och kortlivade klimatpåverkande luftföroreningar kan detta undvikas. (Se även IPCC 2009.)

De olika sammanställningarna är entydiga på punkten om att även om särskilda åtgärder görs för att minska luftföroreningarna för att dämpa temperaturökningen på kort sikt så påverkar det inte vikten av att minska utsläppen av långlivade växthusgaser för att nå tvågradersmålet. De sistnämnda stannar kvar i atmosfären en mycket längre tid. Åtgärder mot kortlivade ämnen kan ändå vara kompletterande.

Osäkerheterna är betydande när det gäller partiklars klimatpåverkan, medan kunskapsläget är bättre för troposfäriskt ozon (IPCC 2007a, s. 204, Isaksen 2009). Den stora osäkerheten för partiklarnas klimatpåverkan bidrar också till osäkerheten i klimatkänsligheten. Kulmala m fl (2011) argumenterar för att osäkerheten i såväl den direkta som den indirekta effekten av partiklar på strålningsbalansen har reducerats väsentligt genom såväl förnyade analyser av observationer och bättre förståelse av mikrofysikaliska förhållanden i moln som har implementerats i klimatmodeller. Kulmala m fl anger uppskattningar av den direkta effekten till $-0,4 \pm 0,2$ W m^{-2} och $-0,7 \pm 0,5$ W m^{-2} för den indirekta effekten. De centrala skattningarna är lägre (mindre negativa) än de som redovisades i IPCC (2007a). Ytterligare modellstudier behövs för att bekräfta att dessa lägre skattningar är robusta.

[10] En referensbana avser ett ”business as usual”-scenario utan klimatpolitik.

FAKTARUTA

Kortlivade klimatpåverkande luftföroreningar

Med så kallade kortlivade klimatpåverkande ämnen avses framför allt troposfäriskt ozon och sot (”black carbon”). Även andra typer av partiklar och några av de industriella HFC-gaserna med kortare uppehållstider i atmosfären kan i vissa sammanhang inkluderas. Ofta inkluderas metan i diskussionen om kortlivade klimatpåverkande ämnen, eftersom dess halt påverkar bildningen av troposfäriskt ozon. Både sot (såsom andra partiklar) och troposfäriskt ozon har korta livstider i atmosfären, från några dagar till någon vecka för partiklar och ozon sommartid, upp till ett par månader för ozon vintertid i högre luftlager i troposfären. Detta är i kontrast med koldioxid och andra långlivade växthusgaser. I andra forsknings- och policysammanhang är den vedertagna benämningen av kortlivade klimatpåverkande ämnen *luftföroreningar*.

Halterna av ozon i troposfären har mer än fördubblats sedan förindustriell tid och mer än så i marknära luftlager i tätbefolkade områden. Troposfäriskt ozon bildas i fotokemiska reaktioner från utsläpp av kväveoxider, kolmonoxid, och flyktiga kolväten samt metan. Mänskliga källor till dessa utsläpp inkluderar förbränning och produktion av fossila bränslen, förbränning av biobränslen, industriprocesser, användning av lösningsmedel samt svedjebruk och förbränning av jordbruksrester. Naturliga källor inkluderar skogs- och gräsbränder samt biogena utsläpp från mark och vegetation. I kraftigt förorenade områden bildas ozon framför allt genom oxidation av flyktiga kolväten i närvaro av kvävoxider medan metan och kolmonoxid spelar en större roll för bildningen i bakgrundsluft och i högre luftlager i troposfären.

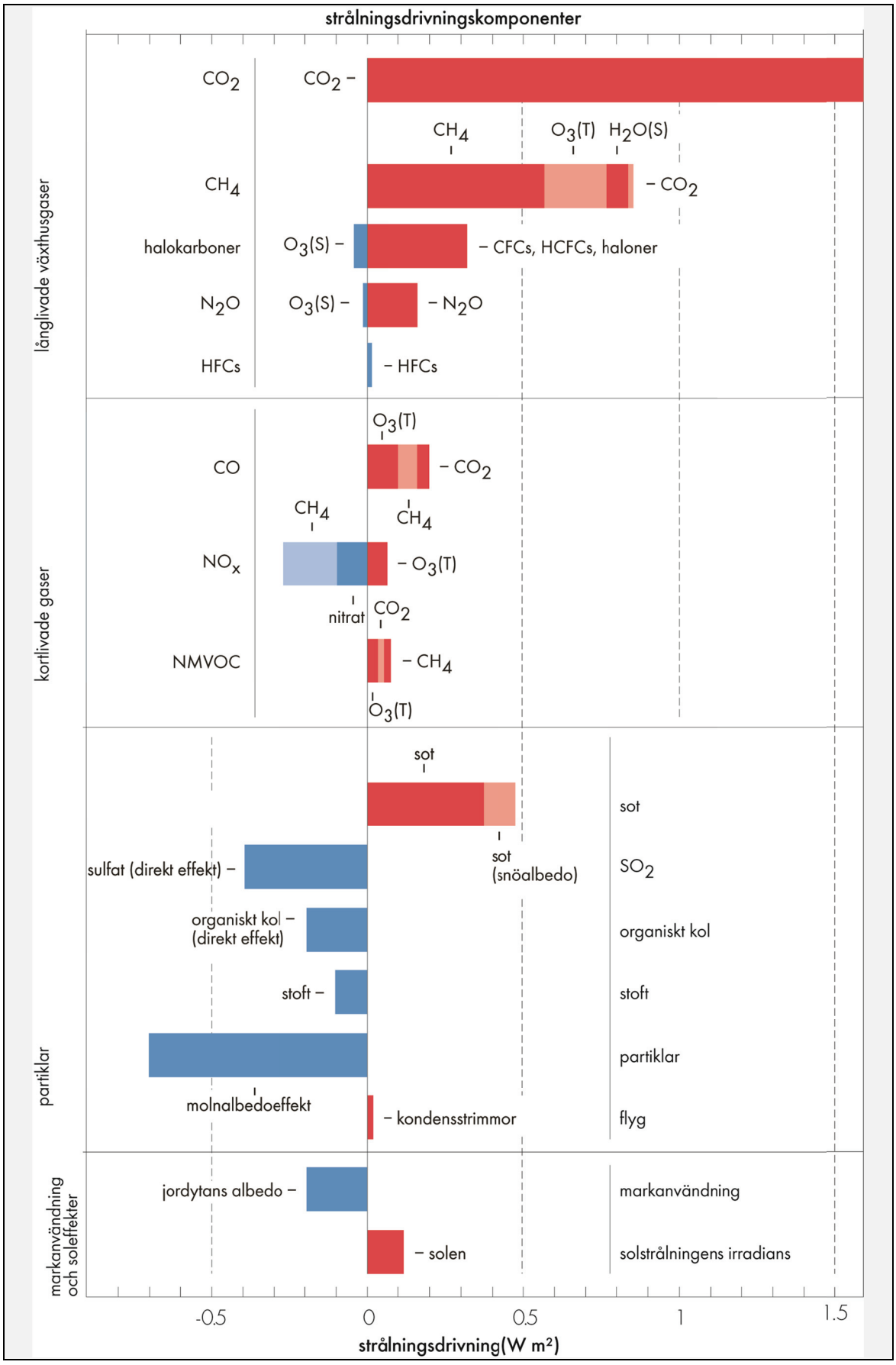
Partiklar från mänskliga utsläpp kan dels släppas ut direkt i partikelform, till exempel som sot, eller bildas genom oxidation av svaveldioxid, kväveoxider, ammoniak från djurhållning och jordbruk samt flyktiga kolväten till sekundärt bildade partiklar bestående av sulfat, nitrat, ammonium och icke flyktiga organiska fraktioner.

På grund av deras korta uppehållstider har fördelningen av partiklar och ozon i den lägre delen av troposfären stark regional karaktär, eftersom de inte hinner transporteras lika långt och blandas lika effektivt i atmosfären som ämnen med längre livstider. I den övre delen av troposfären är ozon mer välblandad och det är också ozonet i den övre delen av troposfären som har starkast positiv effekt på strålningsbalansen. Vid kontinuerliga utsläpp består de kortlivade luftföroreningarnas klimatpåverkan och responsen på reducerade utsläpp är snabb.

När det gäller klimatpåverkan av partiklar är det viktigt att notera att utsläpp av partiklar, beroende på kemisk sammansättning, kan verka både avkylande och uppvärmande. Den avkylande effekten av sulfatpartiklar från fossilförbränning, men även en rad andra partikelburna ämnen från mänskliga utsläpp beror dels på direkt reflektion av inkommande solstrålning och dels på påverkan av molnens albedo och livslängd (så kallade indirekta effekter), medan den uppvärmande effekten av sot beror på att sot har en stark absorption av inkommande solstrålning. Sot som deponeras på snö och is har en ytterligare uppvärmande effekt genom att minska albedot.

Samma utsläppskälla kan bidra med både avkylande och uppvärmande partikelkomponenter och det är inte alltid enkelt att reducera den ena utan att också påverka den andra. Vid kontinuerliga utsläpp består de kortlivade luftföroreningarnas klimatpåverkan. På andra sidan är responsen på reducerade utsläpp snabb.

Figuren nedan (IPCC 2007a, s. 205, figur 2.21) sammanfattar olika klimatpåverkande utsläpps bidrag till påverkan på strålningsbalansen, Radiative Forcing, från 1750 fram till 2005. Troposfäriskt ozon bildas i atmosfären i kemiska reaktioner mellan andra ämnen och dess bidrag återfinns under utsläpp av relevanta upphovsämnena.”T” för ozon betecknar påverkan från förändringar i troposfären. (”S” handlar om påverkan från förändringar i stratosfäriskt ozon, vilket ligger utanför frågan om kortlivade luftföroreningar.) Det sammanlagda bidraget från troposfäriskt ozon uppskattas till 0,35 W m^{-2} vilket gör troposfäriskt ozon till den tredje viktigaste bidragsgivaren till den förstärkta växthuseffekten, efter koldioxid och metan. En uppskattning av sotets bidrag finns i den tredje delen av figuren. Summan av effekten på ljusabsorption och effekten på albedo hos snö och is uppskattas till cirka 0,45 W m^{-2}. Osäkerheterna är betydligt större kring storleken av sotets (och andra partiklars) klimatpåverkan än vad gäller troposfäriskt ozon och inte minst de långlivade växthusgaserna.


strålningsdrivningskomponenter
långlivade växthusgaser
kortlivade gaser
partiklar
markanvändning och soleffekter
CO2
CH4
halokarboner
N2O
HFCs
CO
NOx
NMVOC
sot
SO2
organiskt kol
stoft
partiklar
flyg
markanvändning
solstrålningens irradians
CO2 –
– CO2
CH4
O3(T)
H2O(S)
O3(S) –
– CFCs, HCFCs, haloner
– N2O
– HFCs
– O3(T)
nitrat
– CH4
sot (snöalbedo)
sulfat (direkt effekt) –
organiskt kol – (direkt effekt)
stoft –
molnalbedoeffekt
– kondensstrimmor
jordytans albedo –
– solen
-0.5
0
0.5
1
1.5
strålningsdrivning(W m²)

4 Utsläppsbanor för att nå tvågradersmålet

4.1 Introduktion

De kumulativa utsläppen av koldioxid är avgörande för den antropogena klimatpåverkan och klimatförändringars omfattning på sikt. Även om det finns osäkerheter, både kring klimatkänsligheten och kring kolcykeln, finns det utvecklad metodik för att göra uppskattningar av sannolikheten att en viss utsläppbana begränsar klimatförändringarna till en viss nivå. Dessa uppskattningar är dock svåra att göra. Man kan säga att det råder osäkerhet om osäkerheterna. De sannolikhetsnivåer som anges för att en viss utsläppsbana begränsar klimatförändringarna till en viss nivå bör alltså inte ses som en exakt nivå.

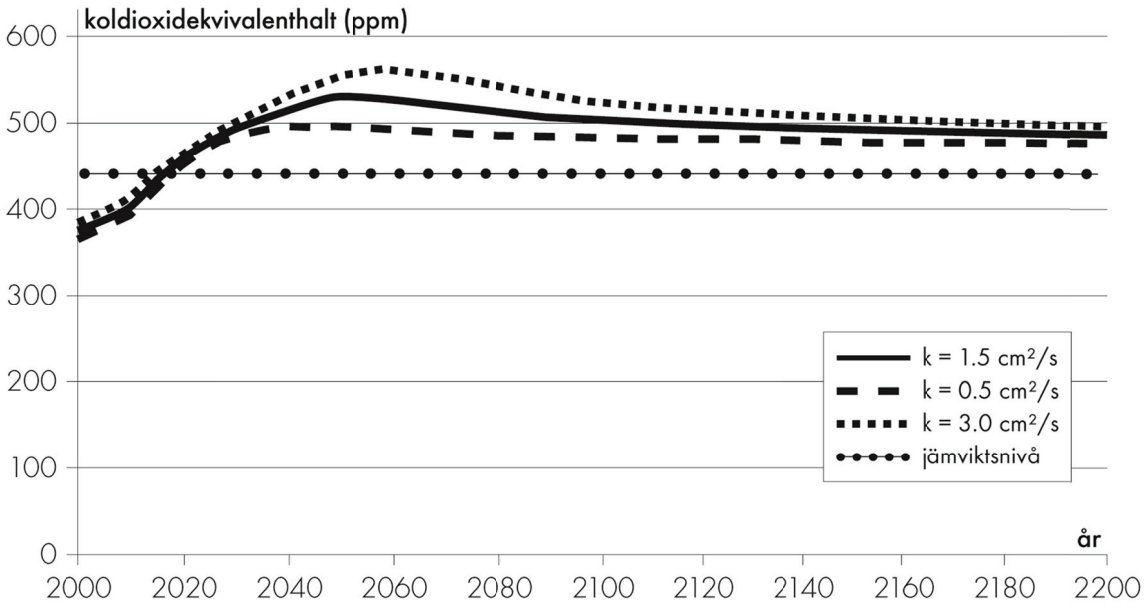
Hur det kumulativa utrymmet för de långlivade växthusgasernas del disponeras under de närmaste årtiondena är inte avgörande för de långsiktiga förändringarna. Hur snabbt klimatförändringarna sker under samma period beror dock även på hur utsläppen av de kortlivade klimatpåverkande luftföroreningarna utvecklas, vilket diskuteras ovan.

Vilka utsläppsbanor som är tänkbara påverkas också av huruvida man med tvågradersmålet avser den långsiktiga globala uppvärmningen inklusive en tillfällig ”överskjutning” av temperaturmålet, eller att temperaturmålet inte ska överskridas ens tillfälligt. Antropogena växthusgaser stannar ju inte för alltid i atmosfären, utan klingar av på sikt. Detta, tillsammans med det faktum att klimatsystemets förändring på grund av utsläppen har en tröghet, gör att ett tillfälligt överskridande av växthusgasernas atmosfärshalter över den nivå som behöver nås på långsikt givet ett visst klimatmål kan ske (den Elzen och van Vuuren 2007, Baker och Roe 2009, Johansson 2011). Denna tröghet beror främst på att det tar lång tid att värma upp haven. Drygt hälften av den totala temperaturresponsen från en given ökning av halten växthusgaser sker inom ett par årtionden, medan den resterande responsen sker betydligt långsammare, under hundratals år (Stouffer 2004, Jarvis och Li 2011) [11]. Johansson (2011) beräknar att möjligheten till överskjutning under detta århundrade motsvarar cirka 40–80 ppm CO_2ekv över den långsiktiga stabiliseringsnivån, för representativa värden för havets värmeupptag, se figur 4.1.1. Både långlivade växthusgaser såsom CO_2 och mer kortlivade gaser kan under denna transienta fas vara över sin långsiktiga stabiliseringsnivå.

Framtagandet av utsläppsbanor påverkas dessutom av ett antal andra antaganden. Till detta tillkommer skillnader i olika studiers bakomliggande metodik (van Vuuren and Riahi 2011), till exempel beträffande utsläpp som handlar om markanvändning och skogsbruk, andra långlivade växthusgaser än koldioxid, samt aerosoler. Det är därmed inte helt enkelt att jämföra resultaten rakt av.

För att kunna jämföra olika resultat om utsläppsbanor, är kunskap om de bakomliggande antagandena viktiga. En del av dessa är relativt dåligt empiriskt underbyggda. Till exempel kan en utsläppsminskningstakt som överstiger cirka tre procent per år i praktiken vara svår att uppnå enligt vissa studier (t ex den Elzen m fl 2007). Takten med vilken utsläppsminskningar kan ske är dock relativt outforskad i den vetenskapliga litteraturen. I integrerade klimat-energi-ekonomi modeller använder man ofta empiriskt underbyggda tumregler för att bestämma i vilken takt expansion av ny teknik kan ske. Var exakt gränsen går beror ju utöver teknikutveckling och tekniskpridning på politiska och ekonomiska förutsättningar.

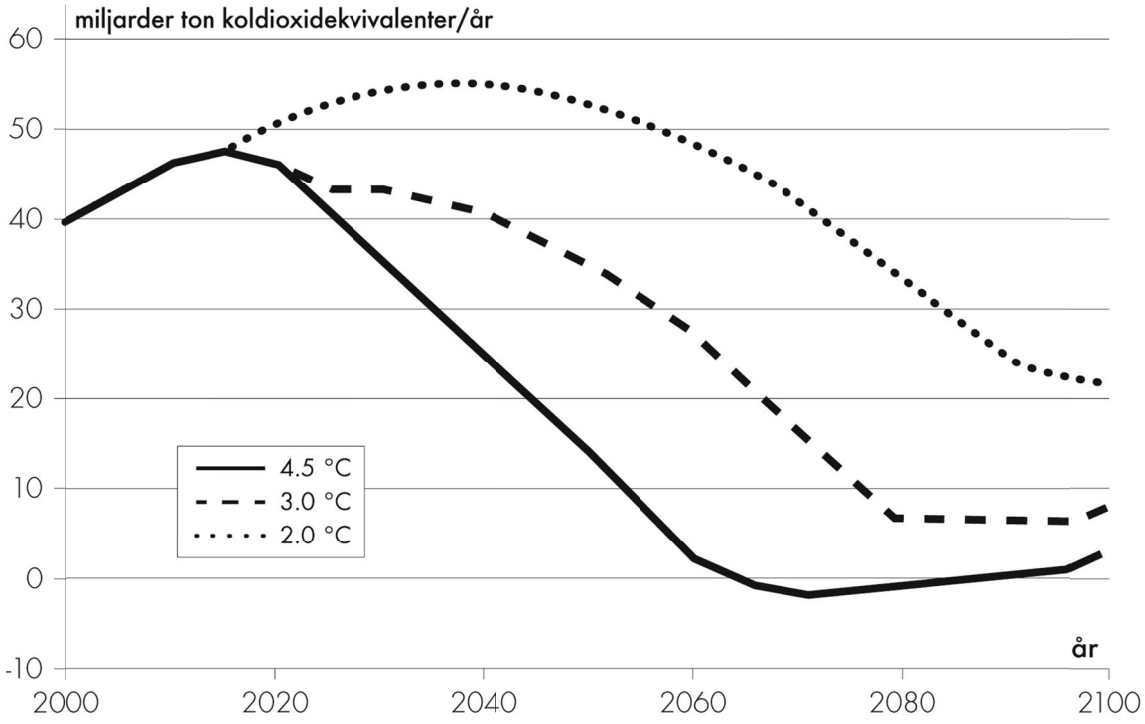
[11] Responstiden är beroende av klimatkänsligheten. Responsen sker långsammare ju högre klimatkänslighet. De indikativa värdena som är angivna i brödtexten är för en klimatkänslighet runt 3 grader.



Figur 4.1.1. Koldioxidekvivalenta koncentrationsbanor förenliga med tvågradersmålet förutsatt en klimatkänslighet på 3ºC och olika antaganden på dynamiken för havets värmelagring. Det sistnämnda uttrycks med hjälp av k – en "effektiv vertikal diffusionskoefficient för "värme". (Figuren baseras på Johansson [2011].)

Resultat om utsläppsbanor kan sammanfattas med hjälp av specifika attribut (se Faktaruta). Emellertid bör man fästa uppmärksamhet vid flera attribut samtidigt eftersom många av dessa attribut inte karakteriserar hela utsläppsbanan och därmed inte heller ger all information om utsläppen (t ex den Elzen m fl 2010, Kallbekken och Rive 2007).

Den avgörande faktorn för en utsläppsbanas möjlighet att klara ett temperaturstabiliseringsmål är klimatkänslighetens värde. Är klimatkänsligheten hög krävs kraftigare och/eller snabbare minskningar av de globala växthusgasutsläppen än om den är låg, se figur 4.1.2.



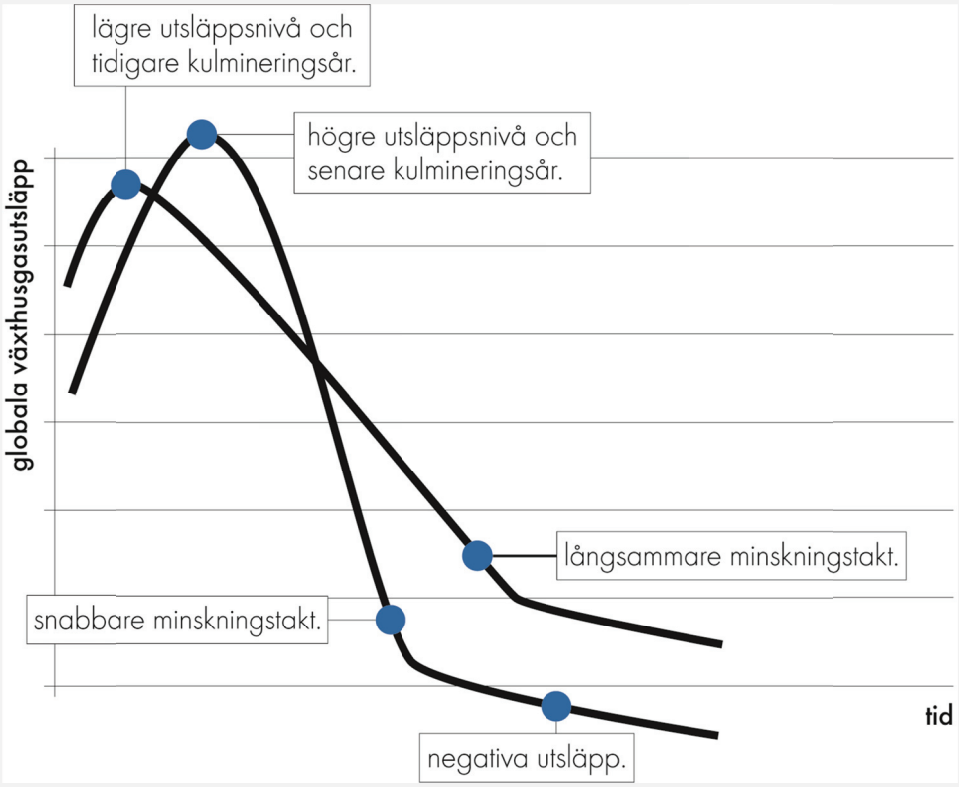
Figur 4.1.2. Globala utsläppsbanor av koldioxidekvivalenter framtagna med MiMiC, som alla är förenliga med ett globalt temperaturmål på två grader, men beroende på vad klimatkänsligheten är. De tre linjerna motsvarar tre antaganden om klimatkänsligheten (2, 3 respektive 4,5 grader).

Som beskrivs ovan har även osäkerheterna om den globala kolcykeln och havets värmeupptag betydelse för hur förenlig en utsläppsbana är med ett visst temperaturmål.

FAKTARUTA

Centrala karakteristika av utsläppsbanor

Utsläppsbanor karakteriseras typiskt med ett antal attribut: ett kulminationsår (”peak year” – året när de globala utsläppen är som störst) och respektive utsläppsnivå (”peak emissions”), utsläppsminskningstakten efter kulmineringsåret samt utsläppsnivåer vid olika målår (t ex 2020, 2050) (se figur). Varje utsläppsbana är dessutom förknippad med sannolikheter för att den är förenlig med olika temperaturmål. Dessa sannolikheter återspeglar i första hand kunskapsläget om klimatkänsligheten.



Inom ramen för ett specifikt globalt mål, beror utsläppsbanornas attribut av varandra (se figuren ovan för en generell skiss). Ett tidigare (senare) kulmineringsår tillsammans med mindre (större) utsläppsminskningstakt därefter kan leda till samma kumulativa utsläpp och samma sannolikhet för uppfyllelsen av det valda temperaturmålet. Generellt gäller att en senareläggning av utsläppsminskningar innebär större risker och mindre flexibilitet, speciellt om förväntningar på ny teknologi och energieffektiviseringspotential inte infrias.

Kulmineringsåret tillsammans med respektive utsläppsnivå, utsläppsnivåer vid andra år, hur snabbt utsläppen behöver minska och med vilken sannolikhet en utsläppsbana är förenlig med globala temperaturmål hänger alltså ihop.

4.2 AR4 och senare internationella analyser av globala utsläppsbanor

Den befintliga litteraturen om utsläppsbanor är förhållandevis omfattande. De många olika exemplen på utsläppsbanor kan grupperas för intervall av atmosfärshalters stabiliseringsnivåer (IPCC 2007c, van Vuuren och Riahi 2011). Jämfört med AR4 finns det idag betydligt fler studier som är relevanta för tvågradersmålet. Sammanfattningsvis kan man konstatera att de huvudsakliga slutsatserna när det gäller utsläppsbanor för att nå olika koncentrationsmål är likartade jämfört med de som presenterades i AR4. En del senare studier ger ett visst stöd för högre utsläppsnivåer de närmast kommande årtiondena förutsatt mer omfattande utsläppsminskningar längre fram (se van Vuuren och Riahi 2011).

Vid framtagandet av **AR4** (IPCC 2007c), fanns få studier av utsläppsbanor som med någorlunda hög sannolikhet är förenliga med tvågradersmålet (tabell 4.2.1). Dessa pekade på betydelsen av tidig kulminering av de globala utsläppen samt att stora utsläppsminskningar behövs för klimatstabilisering vid förhållandevis låga atmosfärshalter och motsvarande temperaturhöjningar. De två scenariokategorier som låg närmast ett tvågradersmål karakteriserades av en kulminering av de globala utsläppen mellan 2000 och 2020 samt globala utsläppsminskningar från 30 till 85 % jämfört med utsläppen år 2000.

Tabell 4.2.1. Karakteristika av stabiliseringsscenarier från AR4 (se IPCC 2007c, tabell 3.5 för mer information), där scenarier i vilka de varaktiga växthusgashalterna blir så pass stora att sannolikheten för att uppnå tvågradersmålet blir mycket låg har exkluderats.

Atmosfärens koldioxidhalt	Atmosfärens halt av koldioxidekvivalenter	Kulmineringsår	Globala utsläpp vid 2050 jämfört med 2000	Antal scenarier
ppm	ppm	År	%	
350–400	445–490	2000–2015	-85 – -50	6
400–440	490–535	2000–2020	-60 – -30	18
440–485	535–590	2010–2030	-30 – +5	21

En av de nyaste översikterna av utsläppsbanor som tagits fram efter AR4 är från van Vuuren and Riahi (2011). (Se även O'Neill m fl [2010] och Den Elzen m fl [2007].) Jämfört med de 45 scenarierna i tabellen ovan, refererar van Vuuren och Riahi till drygt 120 scenarier, varav 27 handlar om de lägsta stabiliseringsscenarierna i AR4 (dvs. stabilisering vid 445–490 koldioxidekvivalenter). I dessa kan tvågradersmålet fortfarande vara nåbart även om de globala utsläppen skulle kulminera först närmare år 2020–2030. Förutsättningen är att utsläppen minskar kraftigt bortom 2050 bland annat med hjälp av väsentliga negativa utsläpp (se avsnitt 4.7). En konsekvens av en sådan strategi är förstås minskade möjligheter att klara tvågradersmålet vid eventuellt nya kunskaper om högre klimatkänslighet eller större risker av klimateffekter. Kostnaderna för klimatarbetet lär också öka (t ex den Elzen m fl 2010, Vaughan m fl 2009).

Vetenskapliga rådet 2007 (MVB-SOU 2007) konstaterade att tvågradersmålet är en rimlig utgångspunkt, men att det inte garanterar att allvarliga effekter undviks. För att *sannolikt* klara av tvågradersmålet konstaterades att koncentrationen av växthusgaser i atmosfären behöver stabiliseras på cirka 400 ppm koldioxidekvivalenter. Detta i sin tur angavs förutsätta att de globala växthusgasutsläppen (koldioxidekvivalenter) behöver minska med cirka 10 procent till år 2020 jämfört med 2004 års nivå, minst halveras till år 2050 jämfört med år 1990 och därefter reduceras till en nivå nära noll närmare år 2100.

EU:s expertgrupp EGScience[12] har gått igenom kunskapsläget kring tvågradersmålet dels 2008, dels 2010.

EU EGScience (2008) sammanfattade information mestadels från AR4, men tog även hänsyn till senare forskningsresultat om klimateffekter i samband med tvågradersmålet. Slutsatserna om utsläppsbanor följde de från AR4 (IPCC 2007c).

EU EGScience (2010) diskuterade om länders utsläppsminskningsutfästelser i samband med "Copenhagen Accord"[13]. utifrån analyser av ett 100-tal olika utsläppsbanor. Dessutom gjordes i

[12] EGScience är en av de expertgrupperna under EU:s rådsarbetsgrupp för klimat. EGScience bereder frågor av vetenskaplig karaktär inför förhandlingar under FN:s klimatkonvention, UNFCCC.

[13] "Copenhagen Accord" antogs inte formellt inom FN:s klimatkonvention, men kan läses t ex på http://www.denmark.dk/NR/rdonlyres/C41B62AB-4688-4ACE-BB7B-F6D2C8AAEC20/0/copenhagen_accord.pdf, or UNDP (2010).

rapporten en översiktlig genomgång av nyvunna kunskaper om klimateffekter. Även om fokus låg på tvågradersmålet, fördes en kort diskussion om ett 1,5-gradersmål. Utsläppsbanor karakteriserades i termer av utsläppens kulmineringsår, utsläppsnivåer vid 2020 och 2050 samt utsläppsminskningstakt. Man konstaterade att för en sannolikhet på minst 66 % att uppnå tvågradersmålet, behöver de globala utsläppen kulminera omkring 2015 om den därpå följande utsläppsminskningstakten inte ska behöva överstiga 3 % per år[14]. År 2020 borde de globala utsläppen ha minskat till omkring 44 (spännvidd: 42–46) $GtCO_2ekv$/år. Vid 2050 behöver de globala utsläppsminskningarna vara 50–70 % jämfört med 1990 givet att man ska nå tvågradersmålet med minst 66 % sannolikhet, för att därefter minska ytterligare.

UNEP:s (2010) genomgång handlade om samma frågeställning som i EU EGScience (2010), det vill säga förhållandet mellan ländernas utsläppsutfästelser knutna till Copenhagen Accord och både tvågradersmålet och ett 1,5-gradersmål. Man kom fram till likartade slutsatser. Detta är inte förvånande eftersom studierna genomfördes ungefär vid samma tidpunkt och använde i princip exakt samma metodik. Slutsatserna var att de globala utsläppen bör kulminera före 2020, ligga på omkring 44 $GtCO_2ekv$/år (i intervallet 39–44 $GtCO_2ekv$/år) vid år 2020 för att därefter minskatill 2050 (40–60 % lägre än år 1990) givet att man ska nå tvågradersmålet med minst 66 % sannolikhet. För en 50–66 % sannolikhet behöver utsläppen vid 2050 ha minskat med cirka 20–50 % jämfört med utsläppen 1990.

Man kom också fram till att de än så länge gjorda utsläppsutfästelserna var mindre omfattande än det som deras analyserade utsläppsbanor som indikerade var nödvändigt för att nå tvågradersmålet med en sannolikhet på över 66 %. Gapets storlek berodde på antaganden om hur effektiva utfästelserna skulle bli, vilket påverkas av framtida överenskommelser om hur utsläpp från markanvändning behandlas samt hur man ska förhålla sig till tidigare utsläppsminskningar.

Dessa olika analyser samlar mycket av det befintliga kunskapsläget om utsläppsbanor och tvågradersmålet. Närmare analyser av regionala och nationella utsläppsbanor behöver givetvis förhålla sig till de globala banorna. Detta illustreras nedan med några enstaka beräkningar av utsläppsbanor, först avseende tvågradersmålet och därefter ett 1,5-gradersmål (kapitel 5). I båda fallen utgås från att det satta temperaturmålet inte ska överskjutas ens tillfälligt.

4.3 Sammanfattning av kunskapsläget om utsläppsbanor förenliga med tvågradersmålet

De i litteraturen studerade utsläppsbanorna har baserats på något varierande antaganden och även rapporterats på olika sätt. I tabell 4.3.1 görs en översiktlig presentation av de ovan genomgångna studierna, med undantag av Van Vuuren och Riahi (2011) samt IPCC (2007c) eftersom de bygger på en annan metodik och inte är översatta till sannolikheter. Det kan dock påpekas att utsläppsbanorna i Van Vuuren och Riahi i stort sett ingår i UNEP (2010).

Det bör betonas att dessa värden eller motsvarande värden i andra framställningar inte bör övertolkas. Till exempel är det i regel den kostnadseffektiva utsläppsbanan som ges av den underliggande modelleringen med ”Integrated Assessment Model”:s. Acceptans för en högre kostnad eller introducering av icke-förutsatt ny teknik eller liknande kan leda till andra specifika siffror. Dessutom, som diskuterats i avsnitt 4.1, är kulmineringsår och utsläppsangivelser vid specifika år beroende av varandra. Samma sannolikhet för måluppfyllelse skulle kunna uppnås med ett annat kulmineringsår än de som citeras i tabellen ovan under förutsättning att de årliga utsläppen för år 2020 och/eller 2050 justerades på motsvarande sätt.

[14] En utsläppsminskningstakt på 3 % förekommer i den befintliga litteraturen som en måttstock till det som fortfarande är gångbart med hänsyn tagen till politiska och sociala faktorer.

Tabell 4.3.1. Sammanfattande karakteristika av över 200 olika utsläppsbanor som är förenliga med tvågradersmålet med minst 66 % (eller 50 %) sannolikhet, samt förutsätter utsläppsminskningstakter på upp till cirka 3 % per år efter de globala utsläppens kulminering.

	Kulmineringsår	Årliga utsläppen vid 2020 (Gton CO_2ekv)	Årliga utsläppen vid 2050 (Gton CO_2ekv)
UNEP (2010) 50–66%	2010–2020	34–48	~18–32
>66%	2010–2020	26–48	~12–22
EU EGScience (2010) >66%	~2015	~44	~11–18

4.4 En scenarioanalys av globala och nationella utsläppsbanor med en svensk modell, MiMiC

Nedan redovisas en sammanhängande scenarioanalys av globala, regionala och nationella utsläppsbanor som kan vara förenliga med tvågradersmålet respektive ett 1,5-gradersmål. Dessa bygger på en enskild analys vid Chalmers gjord med den så kallade MiMiC modellen (Bilaga I). Som basår i de globala analyserna med MiMic används 2000, för att lättare kunna jämföra med andra studier, framför allt EU EGScience (2010) eller UNEP (2010). I de regionala och nationella analyserna används 2005 som basår, eftersom det är det sista året som fullständig utsläppsdata är tillgängliga för alla de studerade regionerna och länderna.

Det huvudsakliga syftet med att inkludera denna enskilda analys i rapporten är att närmare kunna presentera och diskutera samband mellan globala utsläppsbanor och deras möjliga nedbrytning till reduktionsåtaganden på nationell nivå med en ”contraction & convergence” ansats[15]. Analysen av globala utsläppbanor här är inte lika uttömmande som den som gjordes inom ramen för EU EGScience (2010) eller UNEP (2010), se ovan.

För att ta fram utsläppsbanor förenliga med ett visst klimatmål används ofta en integrerad klimatekonomimodell. Här används en modell som kallas MiMiC (Johansson m fl 2006 och Johansson 2011). I modellen beaktas kostnaderna för att minska utsläppen av koldioxid, metan och dikväveoxid (lustgas), gasernas uppehållstider i atmosfären, klimatkänsligheten, de globala temperaturförändringarnas tröghet och även klimatförändringars effekter på kolcykeln. Modellen söker den lägsta globala kostnaden för att klara ett givet klimatmål. Modellen är kalibrerad så att kostnaderna för att minska utsläpp och att klimatresponsen av utsläpp är liknande de man får från mer detaljerade energi-ekonomi-modeller respektive klimatmodeller. I den version av MiMiC som används i den här studien antas vidare att koldioxidinfångning och lagring kommer att bli en tillgänglig teknik. I fall då bioenergi används i anläggningar med koldioxidinfångning kan negativa utsläpp av CO_2 erhållas (Azar m fl 2006). MiMiC är ingen teknikrik modell, utan har fokus på klimatets dynamik. Omställningen av exempelvis energisystemet behandlas därför på ett enkelt vis i jämförelse med teknikdetaljerade IAM:s såsom exempelvis POLES (Kitous m fl 2010) och TIMER (van Vuuren m fl 2011).

Jämfört med den metodik som användes i UNEP (2010) och EU EGScience (2010) gäller att i MiMiC beräknas den globala utsläppsbanan som är förenlig med ett visst klimatmål i helt integrerat angreppsätt där utsläpp och temperaturrespons beräknas samtidigt. I UNEP (2010) och EU EGScience (2010) använder man sig av en stegvis metodik där man analyserar befintliga utsläppsbanor i en enkel klimatmodell (MAGICC 6). Det möjliggör en användning av befintliga utsläppsscenarior från flera olika modeller av olika komplexitetsgrad. Utsläpps-

[15] Contraction & Convergence är en av sju olika modeller för fördelning av globalt utsläppsutrymme som nämndes i MVB-SOU (2007). Fördelningsmodellen förutsätter att samtliga nationer ska ha samma utsläpp per capita vid en viss tidpunkt (i den här analysen: år 2050). Det totala utsläppsutrymmet minskar över tiden.

banorna som analyserats är i regel ursprungligen framräknande för att nå andra klimatmål, till exempel ett koncentrationsmål för år 2100.

Jämfört med de utsläppsbanor som beräknades i MVB-SOU (2007) skiljer sig MiMiC genom att (i) klimatets tröghet och klimatförändringarnas påverkan på kolcykeln har tagits hänsyn till på ett mer adekvat sätt, (ii) hänsyn tas till partiklars påverkan på den globala medeltemperaturen, och (iii) en kostnadsminimerande metod används för att modellera fram utsläppsreduktioner av CO_2, CH_4 och N_2O.

En effekt av denna skillnad i metodik mellan de andra studierna (MVB-SOU 2007, UNEP 2010, EU EGScience 2010) och MiMiC är att den sistnämnda ger att något högre utsläppsnivåer kan vara förenliga med ett visst klimatmål givet en viss sannolikhet.

4.5 Uppskattning av globala utsläppsbanor enligt MiMiC

Analysen med MiMiC görs för ett antagande på klimatkänsligheten som ger en ungefärlig sannolikhet på 70 % (dvs. förenlig med gruppen >66 %) att tvågradersmålet ska nås[16].

Denna beräkning ger utsläpp på 46 Gton CO_2ekv 2020 och cirka 22 Gton CO_2ekv år 2050, vilket i grova drag ligger i linje med UNEP (2010), se figur 4.5.1. MiMiC-resultaten och UNEP:s siffror ger tillsammans att

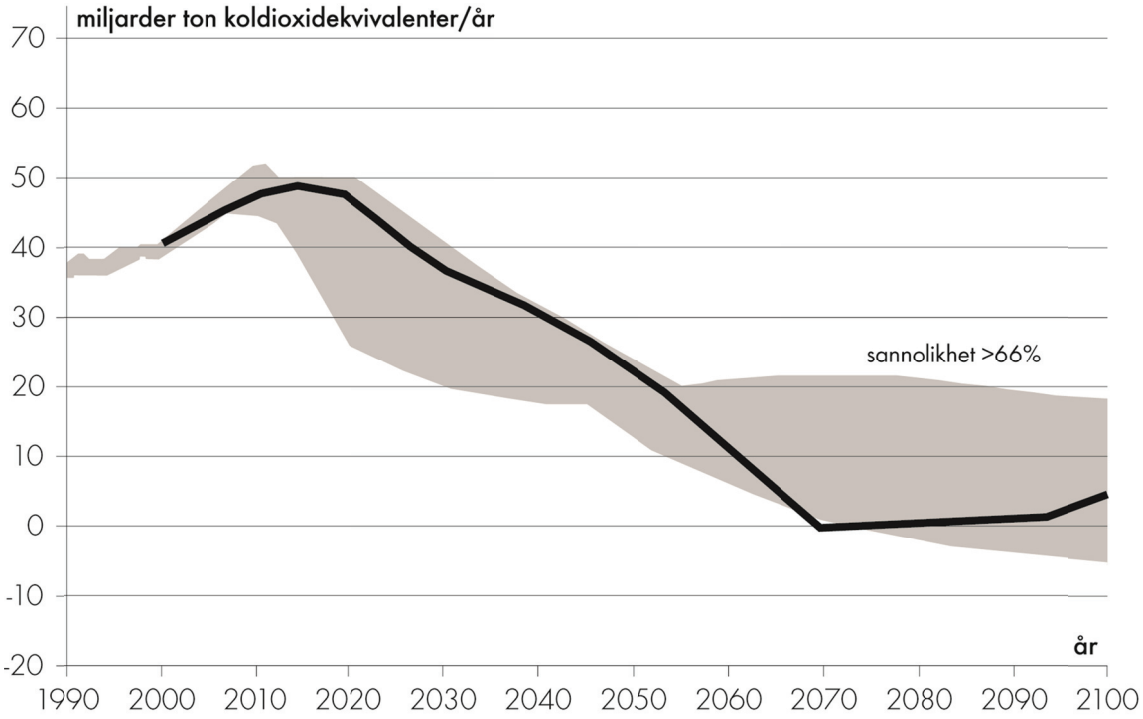
- för att nå tvågradersmålet med en sannolikhet runt 70 % krävs uppskattningsvis att de globala växthusgasutsläppen minskar i storleksordningen 50–60 % från år 2000 till 2050, och minskar med nära 100 % till 2100

Ska sannolikheten beräknas mer noggrant, måste utöver klimatkänsligheten sannolikhets-fördelningar beaktas för bland annat partiklars strålningspåverkan samt den matematiska beskrivningen av kolcykeln och havets värmeupptag.

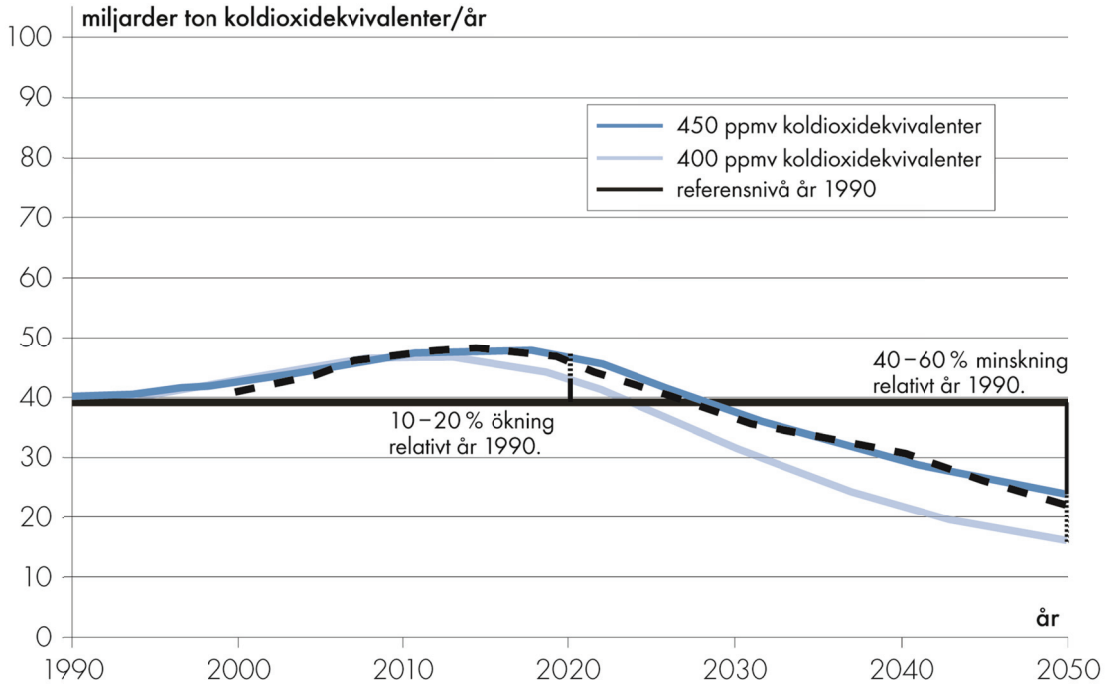
I figur 4.5.2 jämförs resultaten från MiMiC (en körning med cirka 70 % sannolikhet för att nå tvågradersmålet) med MVB SOU (2007). MiMiC kurvan är närmast identiskt med den kurva som leder till en koncentration på 450 ppm koldioxidekvivalenter, som sägs innebära en cirka 50 % sannolikhet för att nå tvågradersmålet. Även om utsläppsbanorna är väldigt lika, är sannolikheterna för att nå tvågradersmålet något olika. Detta beror på åtminstone tre aspekter. En av dessa är att trögheten i världshaven (alltså tiden det tar att värma upp haven) beaktas mer fullständigt i MiMiC-studien, vilket gör att man kan ha en något högre atmosfärshalt av koldioxidekvivalenter temporärt än man initialt skulle behöva sikta in sig på för att nå den koncentration som långsiktigt är förenlig med en viss långsiktig jämviktstemperatur (se figur 4.1.1). Den andra faktorn är att den negativa strålningsdrivningen från partiklar är något högre i MiMiC-körningen, vilket gör att något högre koncentrationer av växthusgaser kan tillåtas. Den tredje skillnaden är att sannolikhetsfördelningarna för klimatkänsligheten är något olika.

[16] Baseras på en beräkning där klimatkänslgheten är satt till 3,9ºC. Översättning till sannolikhetnivå har gjorts genom användning av sannolikhetsfördelningar som presenteras i O'Neill m fl (2010).

Man kan i grova drag utgå från att om sannolikheten är X % att klimatkänsligheten ligger under Y grader, har man en cirka X % chans att nå tvågradersmålet med en utsläppsbana mot detta mål framtagen med en klimatkänslighet på Y. Det är på så vis sannolikheten att en utsläppsbana är förenlig med ett visst temperaturmål uppskattas i MiMiC.



Figur 4.5.1. En jämförelse mellan en utsläppsbana genererade i MiMiC (svart linje) som med cirka 70 % sannolikhet klarar tvågradersmålet och de i UNEP (2010) analyserade utsläppsbanorna från IAM:s som med >66 % sannolikhet klarar tvågradersmålet.



Figur 4.5.2. Jämförelse mellan en utsläppsbana genererad i MiMiC (streckad linje) och de i MVB-SOU (2007) analyserade utsläppsbanorna. Notera att banorna visas endast fram till år 2050.

4.6 Uppskattning av nationella utsläppsmål enligt MiMiC

En global utsläppsbana sammanfattar alla länders nationella utsläppsbanor. Nedan beskrivs hur nationella utsläppsbanor (dvs. nationella reduktionsåtaganden) utifrån en *per capita* konvergens) skulle kunna se ut inom ramen för den globala utsläppsbanan framtagen med MiMiC som redovisats ovan.

Utöver globala utsläppsbanor presenterades i rapporten från det Vetenskapliga rådet för klimatfrågor (MVB-SOU 2007) relaterade utsläppsbanor för dels EU och dels Sverige, med tvågradersmålet som en utgångspunkt. För att *sannolikt*[17] (baserat på en framtida stabilisering av de långlivade växthusgasernas halter på 400 ppm koldioxidekvivalenter) klara tvågradersmålet konstaterades i rapporten att EU:s och Sveriges utsläpp av växthusgaser, jämfört med 1990 års nivå, bör minska med 30–40 respektive 20–25 % till år 2020 och med 75–90 respektive 70–80 % till år 2050. Om en högre utsläppsbana med en långsiktig stabilisering på 450 ppm CO_2-ekvivalenter istället används konstaterades det att EU:s och Sveriges utsläpp av växthusgaser, jämfört med 1990 års nivå, bör minska med 20–30 respektive 5–15 % till år 2020 och med 65–90 respektive 60–80 % till år 2050.

I EU-kommissionens arbete "A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050" (EC 2011) presenteras utsläppsbanor inom EU som är förenliga med en global utsläppsbana som har en rapporterad sannolikhet runt 60 % att klara tvågradersmålet. I modelleringen som låg till grund för den rapporten fann man att en minskning av EUs inhemska utsläpp med 27 % till år 2020 och 78 % till år 2050 jämfört 1990 års nivå var i linje med en kostnadseffektiv global utsläppsbana där utsläppen halveras till 2050 jämfört med 1990 års nivå.

Det är oundvikligt att olika länders utsläppsbanor ser mycket olika ut en bra bit framöver. Detta beror på respektive lands utvecklingsnivå, inkomstnivå, befolkningsutveckling och energisystem. Det existerar en rad metoder för att fördela de globala utsläppen mellan olika länder (t ex Gupta m fl 2007, MVB-SOU 2007). En av dessa är "contraction & convergence" (se Bilaga II), som handlar om att de globala utsläppen minskar ("contract") och att de på sikt fördelas efter en "lika utsläpp per person"-princip ("convergence"). Denna metod var en av de som användes i framräkningen av utsläppsmål för Sverige och EU i MVB-SOU (2007). Beräkningarna nedan avser att ge ett exempel och en indikation på möjliga nationella utsläppsmål förenliga med en global utsläppsbana. Valet av fördelningsmetod kan leda till olika utsläppsbanor/reduktionskrav för en del länder (se även t ex Hof m fl 2010), men för Sveriges del ter sig resultaten över lag robusta[18] enligt MVB-SOU (2007). Eventuella antaganden om handel med utsläppsrätter skulle ha ett visst genomslag i nationella utsläppsbanor även om den globala totalen inte påverkas. Men med ett med tiden krympande utsläppsutrymme globalt begränsas ländernas möjligheter att genom utsläppsrättshandel öka det egna utsläppsutrymmet. I den europeiska kommissionens modellering (EC 2011) av en kostnadseffektiv halvering av de globala utsläppen till 2050 jämfört med 1990 minskar exempelvis EU:s inhemska utsläpp kraftigt och hamnar knappt över den globala utsläppsnivån *per capita* år 2050.

I beräkningarna nedan ingår dock inte handel med utsläppsrätter, utan beräkningen ska ses som en allokering av utsläppsrätter givet en metod enligt "contraction & convergence" snarare än faktiska utsläpp. Utsläpp av koldioxid från avskogning och utrikes luft- och sjöfart inkluderas i den globala utsläppsbanan, men inte i de nationella målen. Dessa sektoriella utsläpp antas alltså i analysen hanteras separat, i linje med antaganden i MVB-SOU (2007).

---

[17] Med *sannolikt* menas att utsläppsbanan innebär över 66 % chans för att nå tvågradersmålet.

[18] Fördelningsmetoder som innebär att rikare länder generellt sett får ta en större del av det globala ansvaret för utsläppsminskningar (t ex sådana som är baserade på landets ekonomiska nivå räknat i BNP/capita) påverkar dock även de reduktionskrav som kan falla på länder som Sverige i större utsträckning än vad exempelvis *per capita* -konvergens gör (jfr. exempelvis MVB-SOU (2007, s. 79) Detsamma kan gälla till exempel för fördelningsmetoder som bygger på acckumulerade historiska utsläpp.).

Vidare antas att utsläppen per person börjar konvergera 2013 och att det har fullbordats till 2050. Utsläppen fram till 2012 framskrivs utifrån dagens nivåer. Redovisningen görs för Afrika söder om Sahara (utan Sydafrika), EU-27, Indien, Kina, Latinamerika, Sverige och USA samt världen som helhet. Som befolkningsscenario används IIASAs B2 scenario (IIASA 2009), vilket föreskriver att den globala populationen ökar till 9,5 miljarder år 2050 och 10,4 miljarder år 2100.

Resultaten i tabell 4.6 motsvarar den globala utsläppsbanan med cirka 70 % sannolikhet att klara målet. De länder som har låga medelutsläpp per person idag, såsom Indien och länder i Afrika söder om Sahara, kan fortsätta att öka sina nationella utsläpp flera årtionden till, men de behöver vända nedåt innan 2050. Däremot gäller hårda krav för utsläppsminskningar i länder som idag har relativt höga utsläpp. Utsläppen i Sverige behöver minska med ungefär 20 % till år 2020 och med drygt 70 % till år 2050 jämfört med utsläppen år 2005. Motsvarande siffror för EU innebär en minskning med drygt 20 % till år 2020 och cirka 80 % till år 2050. I stort ligger dessa nivåer i linje med de som presenterades för Sverige och EU i MVB-SOU (2007) och för EU i EC (2011). Eventuella skillnader kan bero på faktorer som den globala utsläppsbanan, det använda befolkningsscenariet och om en ”contraction & convergence” har använts eller ej. I MVB-SOU (2007) och i EC (2011) konstaterades att politiska övervägningar kan leda till större åtaganden.

Tabell 4.6. Relativa förändringar i årligt utsläppsutrymme för ett antal olika regioner/nationer jämfört med 2005 års nivå och inom parentes för Annex-1[19] nationer jämfört med 1990 års nivå (i så fall får man att den relativa utsläppsminskningen är några procentenheter större i EU och Sverige). Nettoutsläpp av CO_2 från avskogning och andra markanvändningsförändringar och skogsbruk samt utrikes luft- och sjöfart ingår inte i siffrorna. Utsläppsnivåerna baseras på en global utsläppsbana som har en sannolikhet på cirka 70 % att klara tvågradersmålet.

	Utsläppsmål relativa år 2005 (relativa till 1990)			
Region	**2020**	**2030**	**2040**	**2050**
USA	-22 % (-11 %)	-54 % (-48 %)	-74 % (-70 %)	-89 % (-87 %)
EU	-21 % (-26 %)	-50 % (-53 %)	-66 % (-68 %)	-80 % (-81 %)
Sverige	-18 % (-21 %)	-42 % (-45 %)	-57 % (-59 %)	-71 % (-72 %)
Kina	+34 %	-7 %	-31 %	-55 %
Indien	+81 %	+93 %	+104 %	+81 %
Latinamerika	+20 %	-6 %	-20 %	-40 %
Afrika Söder om Sahara exkl. Sydafrika	+75 %	+99 %	+124 %	+113 %

4.7 Betydelsen av utsläpp relaterade till markanvändning och skogsbruk

En betydande del av de antropogena utsläppen härstammar från olika typer av markanvändning och dess förändringar i världen (så kallad ”Land Use and Land Use Change”, LULUC). Även skogsbruk är relevant i sammanhanget (vilket vidgar begreppet till ”Land Use, Land Use Change and Forestry”, LULUCF). Skogsbruket kan ge både upptag och utsläpp av koldioxid.

Hur utsläpp relaterade till LULUCF har tagits hänsyn till i olika utsläppsbanestudier varierar (t ex IPCC 2007c, s. 200-203, 207-213). Hur dessa utsläpp hanteras i verkligheten har betydelse.

[19] Annex-1-länderna utgörs av de klassiska i-länderna medan icke-annex-1-länderna utgörs av de ”klassiska” utvecklingsländerna i Asien, Latinamerika och Afrika. Annex 1 är en del av Kyotoprotokollet.

IPCC (2007c) sammanfattade att åtgärder inom markanvändning och skogsbruk mellan 2000 och 2100 skulle kunna leda till kumulativa kostnadseffektiva utsläppsminskningar på 345–1260 $GtCO_2ekv$. Åtgärder för att minska avskogning omfattades inte i dessa uppskattningar och osäkerheter angavs vara betydande. När det gäller markanvändningen i syfte att minska de globala växthusgasutsläppen, finns risker med konflikter med hållbar utveckling och bevarande av ekosystem (se även IPCC 2011).

Åtgärder inom LUC (Land Use Change) och skogsbruk kan underlätta globala utsläppsminskningar i allmänhet (IPCC 2007c). Senare har till exempel den Elzen och Höhne (2010) gjort en känslighetsanalys av hur i-ländernas och u-ländernas utsläppsmål skulle påverkas av en halvering av utsläppen relaterade till markanvändning och skogsbruk jämfört med referensbanor. Beroende på om i-länderna (ifall de finansierar de åtgärder som behövs för minskade LULUCF-utsläpp i u-länderna) eller u-länderna skulle få räkna in effekten på sina utsläppsåtgärdsåtaganden, kan utsläppsnivåerna vid 2020 tillåtas vara cirka 10 % högre.

Antagandena om hanteringen av LULUCF-relaterade utsläpp varierar i de utsläppsbanestudier som analyseras i UNEP (2010) och EU EGScience (2010) . I vissa studier används relativt detaljerade modeller för dessa utsläpp medan i andra antas dessa utsläpp följa en föreskriven utsläppsbana som inte påverkas av modelleringen, dvs. dessa utsläpp är exogent bestämda.

I beräkningarna med MiMiC (avsnitt 4.5–4.7 ovan samt i 5.1–5.2 nedan) ingår exogent bestämda LULUCF-relaterade utsläpp. För dessa används IIASA:s B2 scenario (IIASA 2009). I detta scenario beaktas de globalt aggregerade antropogena nettoutsläppen från skog och mark. Dessa är cirka en miljard ton kol år 2010 och minskar gradvis under århundradet. År 2050 är de cirka 430 miljoner ton kol. År 2100 binds 630 miljoner ton kol in i mark och skog (dvs. utsläppen är negativa).

Även om studierna tyder på att de energi-relaterade koldioxidutsläppen är det klart viktigaste för att åstadkomma tillräckliga utsläppsminskningar i linje med tvågradersmålet, spelar storleken av minskningar av andra växthusgasutsläpp samt LULUCF-relaterade utsläpp en väsentlig roll.

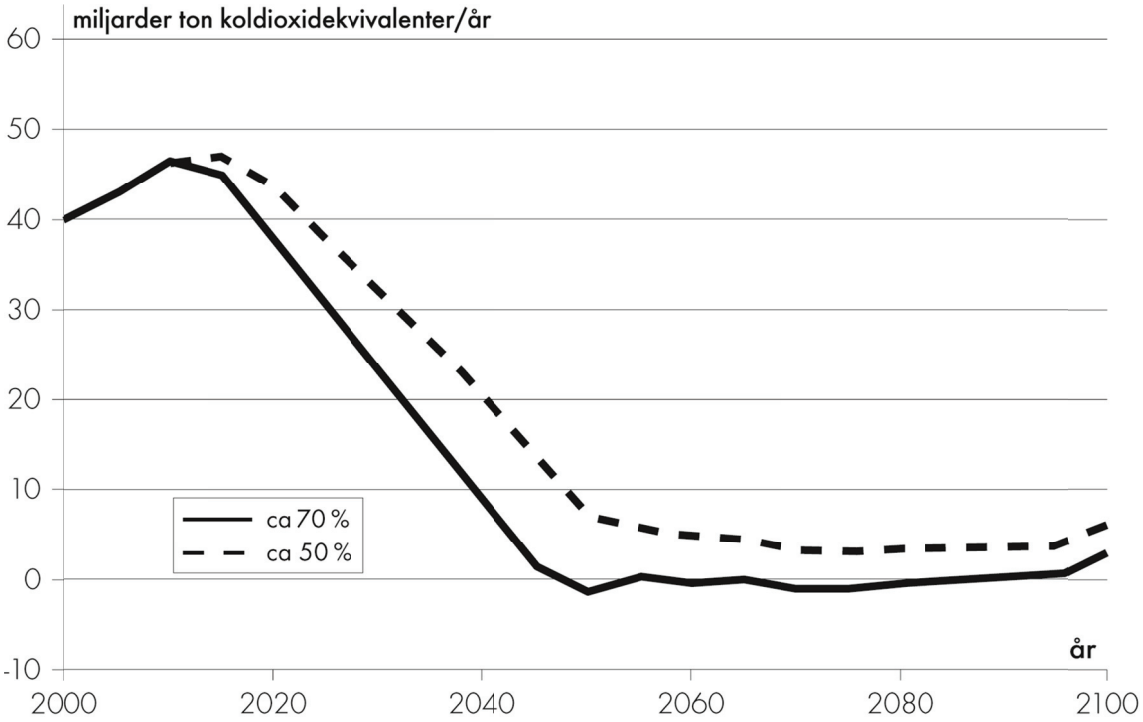
5 Utsläppsbanor för att nå ett 1,5-gradersmål

I avsnitt 2 nämndes att i det pågående internationella klimatarbetet förutses en översyn av tvågradersmålet. Detta handlar i mångt och mycket om ett eventuellt lägre temperaturmål om 1,5 grader (t ex AOSIS 2009). I princip kan förstås en utsläppsbana som är förenlig med tvågradersmålet också vara förenlig med ett 1,5-gradersmål, dock med en lägre sannolikhet.

5.1 Uppskattning av globala utsläppsbanor enligt MiMiC

Om en motsvarande sannolikhet efterfrågas, kräver ett 1,5-gradersmål snabbare och större utsläppsminskningar än tvågradersmålet. Ranger m fl (2010) analyserade dessa aspekter och kom fram till att det kan vara mycket svårt att åstadkomma ett 1,5-gradersmål utan att den globala medeltemperaturen under ett antal årtionden blir högre (så kallad ”överskjutning”). De scenarier som i deras analys med minst 50 % sannolikhet över tiden ledde till att ett 1,5-gradersmål uppnås karakteriserades av att de globala utsläppen kulminerade senast år 2015, minskade något till 2020, för att därefter falla mellan 3 och 6 % per år. Mot slutet av århundradet var utsläppen nära noll, vilket förutsatte antaganden om negativa utsläpp.

Nedan diskuteras ett exempel av två möjliga utsläppsbanor för ett 1,5-gradersmål (figur 5.1). En är baserad på att ge en cirka 50 % sannolikhet att klara ett sådant temperaturmål och en annan på cirka 70 % ambition. Den bakomliggande metodiken är densamma som i avsnitt 4.5.



Figur 5.1. Globala utsläpp av koldioxidekvivalenter som är förenliga med ett globalt temperaturmål på 1,5ºC. De två linjerna motsvarar två olika indikativa sannolikhetsnivåer med vilka de globala utsläppsbanorna är förenliga med temperaturmålet.

MiMiC-resultaten antyder att de globala utsläppen

- behöver minska med cirka 100 % till år 2050, för en sannolikhet på cirka 70 % att nå ett 1,5-gradersmål
- behöver minska med över 80 % från 2000 till 2050, för en sannolikhet på cirka 50 % att nå ett 1,5-gradersmål

Dessa utsläppsbanor förutsätter att utsläppen omgående börjar minska och är nere på drygt 40 Gton CO_2ekv år 2020 (om en sannolikhet på cirka 50 % används) och knappt 40 Gton CO_2ekv år 2020 (om en sannolikhet på cirka 70 % används), det vill säga på samma globala nivå som runt år 2000. Detta står i stark kontrast till den nuvarande globala utsläppstrenden

(Friedlingstein m fl 2010), och skiljer sig också avsevärt från befintliga utsläppsminskningslöften (”pledges”) som olika länder hittills har gjort utfästelser om (UNEP [2010], EU EGScience [2010]).

I UNEP (2010) presenterades endast ett fåtal utsläppsbanor som handlade om ett 1,5-gradersmål. Utsläppsbanorna från MiMiC ligger i linje med dem.

5.2 Uppskattning av nationella utsläppsbanor enligt MiMiC

Nedan beskrivs hur nationella utsläppsbanor skulle kunna se ut som är förenliga med att klara ett 1,5-gradersmål med en sannolikhet på cirka 50 % respektive cirka 70 %. På samma sätt som i avsnitt 4.7 baseras denna beräkning på en ”contraction & convergence” ansats. Motsvarande globala utsläpp återfinns i figur 5.1.

Såsom för tvågradersmålet som redovisas ovan inkluderas inte heller här handel med utsläppsrätter. Om utsläppshandel inkluderades i modellen skulle det inledningsvis kunna ha visst genomslag i involverade länders utsläppsbanor, även om den globala totalen inte påverkades. Men med ett krympande utsläppsutrymme globalt begränsas ländernas möjligheter att via åtgärder i andra länder öka det egna utsläppsutrymmet.

Utsläpp av koldioxid från avskogning och utrikes luft- och sjöfart inkluderas i den globala utsläppsbanan, men inte i de nationella målen. I stället antas de ligga i en post som måste hanteras separat.

I fallet då ett 1,5-gradersmål ska nås med en sannolikhet på cirka 50 %, visar det sig att utsläppen globalt behöver minska till knappt ett ton CO_2-ekvivalenter per person och år till år 2050. För länder som idag har stora *per capita* utsläpp betyder det givetvis stora absoluta minskningar. Även i utvecklingsländer förutses minskade utsläpp per person, men på grund av förhållandevis låga nivåer idag är utsläppsminskningarna mätta per person mycket mindre i absoluta termer, men kan ändå vara stora jämfört med referensbanor. I ett låginkomstland som Indien behöver utsläppen av växthusgaser per person med ungefärliga mått minskas med 75 % fram till 2050 jämfört med idag. Utsläppen per person i EU behöver minskas med en faktor 20 och i Sverige med en faktor 14.

Motsvarande nationella utsläppsnivåer redovisas i tabell 5.2.1. Det visar sig att EU behöver minska utsläppen till 2020 med drygt 25 % under 2005 års nivå och Sverige med knappt 25 % under samma period och samma referensår. Redan år 2030 behöver utsläppen ha minskats med cirka 50 % i Sverige och över 50 % i EU och till år 2050 med cirka 95 %. Valet av basår påverkar givetvis storleken på de relativa minskningarna i och mellan olika länder, vilket också ges ett exempel av i tabellen.

På lång sikt (här avses efter år 2040) gäller att utsläppen i alla nationer/regioner beaktade i studien behöver understiga nivåerna de har idag. På kortare sikt kan dock utsläppen öka något i de fattigare nationerna/regionerna och på kort sikt även i länder med snabb ekonomisk utveckling.

Tabell 5.2.1. Relativa förändringar i årligt utsläppsutrymme för ett antal olika regioner/nationer jämfört med 2005 års nivå och inom parentes för Annex-1[20] nationer jämfört med 1990 års nivå (i så fall får man att den relativa utsläppsminskningen är några procentenheter större i EU och Sverige). Nettoutsläpp av koldioxid från avskogning och utrikes luft- och sjöfart ingår inte i siffrorna. Utsläppsnivåerna baseras på en global utsläppsbana som har en sannolikhet på cirka 50 % att klara ett 1,5-gradersmål.

	Utsläppsmål relativa år 2005 (1990)			
Region	**2020**	**2030**	**2040**	**2050**
USA	-27 % (-16 %)	-60 % (-54 %)	-83 % (-81 %)	-97 % (-97 %)
EU	-26 % (-31 %)	-56 % (-59 %)	-78 % (-80 %)	-95 % (-95 %)
Sverige	-23 % (-26 %)	-50 % (-52%)	-72 % (-74%)	-93 % (-93 %)
Kina	+26 %	-19 %	-55 %	-89 %
Indien	+70 %	+68 %	+31 %	-55 %
Latinamerika	+12 %	-18 %	-44 %	-85 %
Afrika söder om Sahara, exkl. Sydafrika	+64 %	+73 %	+44 %	-47 %

För en utsläppsbana som klarar ett 1,5-gradersmål med en sannolikhet på cirka 70 % får man i ”contraction & convergence” -beräkningen mindre nationella ökningar och större nationella utsläppsminskningar, vilket kan förväntas (se tabell 5.2.2).

Tabell 5.2.2. Relativa förändringar i årligt utsläppsutrymme för ett antal olika regioner/nationer jämfört med 2005 års nivå och inom parentes för Annex-1 nationer jämfört med 1990 års nivå (i så fall får man att den relativa utsläppsminskningen är några procentenheter större i EU och Sverige). Nettoutsläpp av koldioxid från avskogning och utrikes luft- och sjöfart ingår inte i siffrorna. Utsläppsnivåerna baseras på en global utsläppsbana som har en sannolikhet på cirka 70 % att klara ett 1,5-gradersmål.

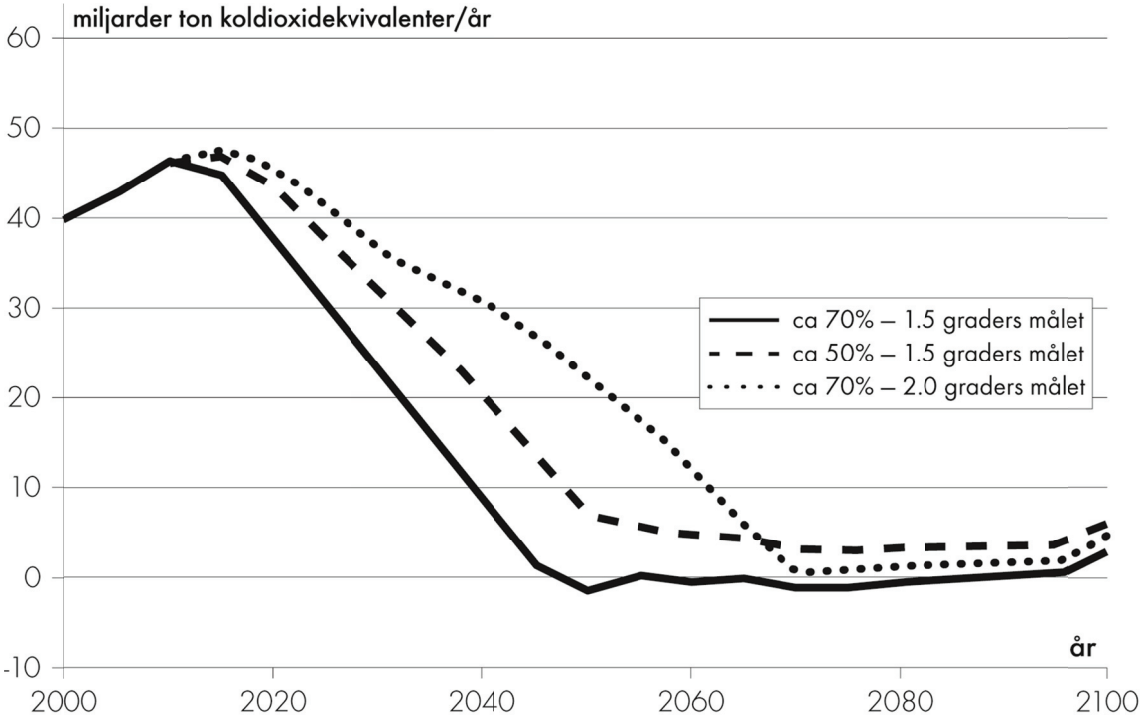
	Utsläppsmål relativa år 2005 (1990)			
Region	**2020**	**2030**	**2040**	**2050**
USA	-37 % (-27 %)	-72 % (-68 %)	-94 % (-93 %)	-100 %
EU	-36 % (-40 %)	-69 % (-71 %)	-92 % (-92 %)	-100 %
Sverige	-33 % (-36 %)	-65 % (-66 %)	-90 % (-90 %)	-100 %
Kina	+9 %	-43 %	-84 %	-100 %
Indien	+47 %	+18 %	-52 %	-100 %
Latinamerika	-3 %	-42 %	-81 %	-100 %
Afrika söder om Sahara, exkl. Sydafrika	+42 %	+22 %	-47 %	-100 %

[20] Annex-1-länderna utgörs av de klassiska i-länderna emedan icke-annex-1-länderna utgörs av de ”klassiska” utvecklingsländerna i Asien, Latinamerika och Afrika. Annex 1 är en del av Kyotoprotokollet.

6 Tvågradersmålet respektive ett 1,5-gradersmål

I det här avsnittet jämförs vilka krav på utsläppsminskningar som en skärpning av tvågradersmålet till ett 1,5-gradersmål innebär. Utgångspunkter är beräkningarna gjorda med MiMiC-modellen och baseras i grova drag på att utsläppsbanan för tvågradersmålet ger en sannolikhet på cirka 70 % att klara målet. För utsläppsbanor förenliga med ett 1,5-gradersmål använder vi oss både av utsläppsbanan som ger en cirka 50 % sannolikhet och den med en sannolikhet på cirka 70 % att nå temperaturmålet. Resultaten visas i figur 6.1

Det framgår att de kumulativa utsläppen ska vara mindre och att det därmed behövs större och snabbare utsläppsminskningar för att klara ett 1,5-gradersmål än tvågradersmålet. Vid ett 1,5-gradersmål respektive tvågradersmålet kan de globala utsläppen vara cirka 38 respektive 46 miljarder ton CO_2-ekvivalenter år 2020, och 0 respektive 22 miljarder ton år 2050, för en sannolikhet på cirka 70 % att temperaturmålet ska nås. Om man skulle acceptera en lägre sannolikhet för ett 1,5-gradersmål (cirka 50 %) är de globala utsläppsminskningar 43 miljarder ton CO_2-ekvivalenter år 2020 och 7 miljarder ton CO_2-ekvivalenter år 2050, det vill säga fortfarande betydligt lägre än de för att klara tvågradersmålet med en sannolikhet på cirka 70 %.



Figur 6.1. Koldioxidekvivalentutsläpp (inkluderar CO_2, CH_4 and N_2O) som är förenliga (sannolikhet till måluppfyllelse på cirka 70 % eller cirka 50 %) med ett globalt temperaturmål på 1,5ºC respektive 2ºC. Se löptexten för övriga antaganden.

Det framgår av tabellerna 4.6 och 5.2.2 hur de globala och olika länders utsläpp skulle kunna se ut enligt ”contraction & convergence”, i samband med tvågradersmålet respektive ett 1,5-gradersmål för en sannolikhet på omkring 70 % att nå respektive temperaturmål.

I tabell 6.1 sammanfattas globala kumulativa utsläpp för tidsperioden 2010–2099 för några olika fall. Kumulativa utsläpp är ett sätt att sammanfatta utsläppsbanor (se avsnitt 3.2), även om utsläppsbanornas form givetvis är av vikt.

Tabell 6.1. Kumulativa globala utsläppsbudgetar för banor som är förenliga – med olika sannolikheter till måluppfyllelse – med tvågradersmålet respektive ett 1,5-gradersmål. Som referens kan anges att de historiska utsläppen av CO_2 uppgår till cirka 1850 Gton CO_2, medan om man räknar in även CH_4 och N_2O uppgår utsläppen till cirka 2650 miljarder ton CO_2-ekvivalenter.

Region	Kumulativ utsläppsbudget i Gton CO_2-ekvivalenter 2010–2099		
	Tvågradersmålet, sannolikhet cirka 70 %	**1,5-gradersmål, sannolikhet cirka 70 %**	**1,5-gradersmål, sannolikhet cirka 50 %**
Världen – CO_2, CH_4 och N_2O	1750	900	1420
Världen – endast CO_2	950	250	700

7 BECCS – biomassa med kolinfångning

Om de globala utsläppen kulminerar sent och speciellt om de kumulativa utsläppen ska bli förhållandevis låga, visar många beräkningar att det behövs ”negativa utsläpp” om tvågradersmålet (och än mer så vid ett 1,5-gradersmål) ska kunna nås. Biomassa med koldioxidinfångning (BECCS) innebär att man fångar in koldioxid vid förbränning av biobränslen (Azar m fl 2010, Edenhofer m fl 2010, van Vuuren m fl 2009, Calvin 2009, van Vuuren m fl 2007). Det finns dock risker förknippade med att förlita sig på att negativa utsläpp i stor skala skulle bli en realitet, då det idag inte finns en enda demonstrationsanläggning. Betydelsen av CCS och BECCS begränsas dock av omfattningen av lagringskapacitet som säkert kan lagra koldioxiden utan läckage i tiotusentals år.

Ibland betraktas BECCS som en metod av så kallad geoengineering (se faktarutan nedan), vilket i klimatsammanhanget betyder ungefär ingenjörskonst för att motverka klimatförändringar. Geoengineering är i sig inte ett helt nytt begrepp, men den har först ganska nyligen börjat diskuteras i samband med klimatförändringar (t ex Crutzen 2006, The Royal Society 2009). Emellertid finns det mycken osäkerhet om hur stora de eftersträvade effekterna skulle bli och också om risken för negativa sidoeffekter. Därtill skulle det ställas stora krav på internationellt ramverk för genomförande, finansiering och kompensation för sidoeffekter.

FAKTARUTA

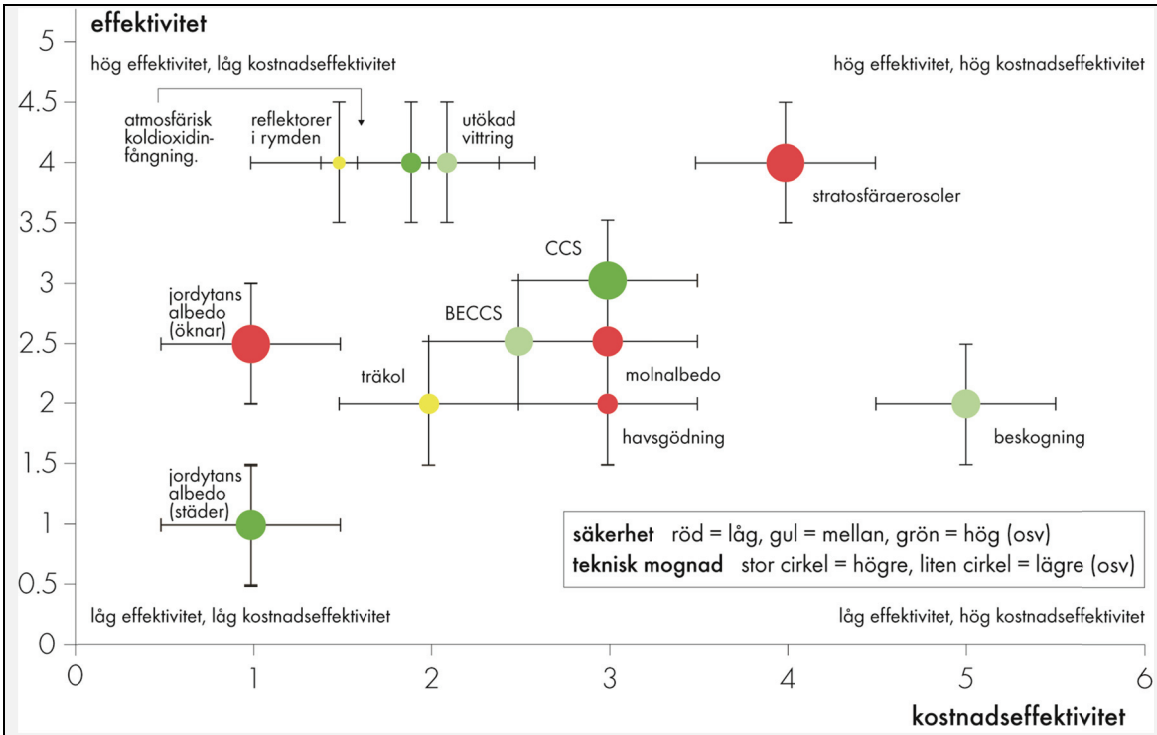
”Geoengineering”

”Geoengineering” avser mänsklig manipulation av jordsystemet. I klimatfrågesammanhanget handlar det om att motverka klimatförändringar. Det finns en del litteratur om detta, vilken omfattar olika alternativ. En del av dessa alternativ är i praktiken inte genomförbara. En del kan vara genomförbara, men det går i förekommande fall inte att överblicka hur stora de önskade effekterna blir och än mindre hur avgörande risken är för oönskade sidoeffekter. Geoengineering diskuteras kortfattat nedan, dock utan att förordas som ett alternativ till utsläppsminskningar.

Föreslagna geoengineeringsalternativ återfinns i två huvudkategorier (se figur). Det ena handlar om att skärma jordytan från inkommande solstrålning för att på så sätt delvis kompensera för den förstärkta växthuseffektens uppvärmningseffekt, till exempel med konstgjorda moln eller med tillförsel av svaveldioxid eller svavelväte till stratosfären. Det skulle leda till bildande av sulfatpartiklar och en viss omgående avkylningseffekt vid jordytan. Enligt vissa beräkningar skulle en årlig införsel till stratosfären av ett par miljoner ton svavel, vilket är en bråkdel av dagens antropogena svavelutsläpp, kunna maskera den globala uppvärmningen med en grad. Uppskattningarna är dock tämligen osäkra. Emellertid skulle sulfatpartiklarna kontinuerligt ”läcka” ner till troposfären och tvättas ur atmosfären med regn. En sådan klimatmanipulation skulle därmed förutsätta ett mycket långsiktigt åtagande för samhället. Därtill skulle sådana effekter av koldioxidutsläppen som försurningen av haven inte lindras, och det finns risker för oönskade effekter.

Den andra kategorin handlar om att på något sätt avlägsna växthusgaser från atmosfären. Till exempel genom att havets förmåga att lagra koldioxid stimuleras. Havets biologiska upptag varierar mellan olika havsområden och begränsas av tillgången på kväve, fosfor eller järn. Tillförseln av dessa ämnen på aktuella havsområden skulle således kunna öka kolupptaget. Kunskapsläget tyder dock på att någon väsentlig effekt knappast skulle kunna åstadkommas.

Även metoder som att ”suga ut” koldioxid från atmosfären, att spä på naturliga kemiska vittringsprocesser som konsumerar atmosfäriskt koldioxid i reaktioner med bergarter (t ex genom att blanda kiselrika mineraler i jordbruksmarken), pumpa vatten från djupa havsnivåer upp till ytan, träkol och parasoller i rymden omnämns i litteraturen.



Översiktlig kategorisering av geoengineeringsmetoder med avseende på uppskattning av effektivitet och kostnadseffektivitet ("affordability"). Symbolernas storlek indikerar metodernas utvecklingsgrad (ju större symbol, desto närmare är man möjligheter till användning). Färgerna anger uppskattningar av risker som är förknippade med metoderna (riskerna ökar från grönt till rött). Figuren är inte kvantitativ utan en skiss och bör inte användas som beslutsunderlag, enligt The Royal Society (2009).

8 Klimateffekter

Frågan om klimatförändringar och klimatåtgärder handlar i grund och botten om de effekter och konsekvenser som effekterna föranleder[21]. Dessa uppstår successivt när klimatet förändras. Ju större klimatförändringarna blir desto mer omfattande blir de negativa konsekvenserna för till exempel livsmedelproduktion och biologisk mångfald i världen (IPCC 2007b). Översikten av kunskapsläget i AR4 (IPCC 2007a, 2007b) bekräftade också att även om risken för en rad klimateffekter är mindre vid tvågradersmålet än vid större klimatförändringar, kan tvågradersmålet knappast garantera att väsentlig klimatpåverkan undviks. Olika temperaturmål innebär givetvis olika stora risker för klimateffekter. Detsamma gäller i viss mån mål som uppnås utan överskjutningar, dvs. tillfälligt högre uppvärmning än målnivån. Att riskerna ökar med ökande temperatur är en generell slutsats.

Några av de mest väsentliga globala klimateffekterna som har en utpräglad naturvetenskaplig karaktär handlar om havsförsurningen, havsnivån och biologisk mångfald. Dessa diskuteras nedan. Frågan om så kallade tröskeleffekter (”tipping points”) är också naturvetenskaplig till sin karaktär. Dessa effekter hänvisar till möjligheten att klimatförändringarnas effekter på system som havsströmmar, inlandsisar, regnskogar, osv. leder till förhållandevis snabba och kanske irreversibla förändringar i jordsystemet (se Rummukainen m fl 2010, s. 65-67). Sannolikheten för tröskeleffekter vid olika stora globala temperaturhöjningar är inte väl känd. Det är inte på något sätt omöjligt att trösklar nås även inom ramen av tvågradersmålet. Sannolikheten för tröskeleffekter ökar dock alltmer med ökande uppvärmning och en snar klimatstabilisering kan rimligen begränsa den.

Givetvis är klimateffekter på livsmedelsproduktion, ekonomisk utveckling (som ju också nämns i FN:s klimatkonventions artikel 2) samt till exempel vattenresurser av avgörande betydelse. Dessa effekter och deras konsekvenser har dessutom ofta en starkt regional karaktär. En diskussion om dessa skulle dock föranleda en diskussion om resiliens och klimatanpassningsåtgärder, vilket ligger utanför denna rapport.

Tabell 8.1. ger en generell översikt av hur kunskapsläget om klimateffekter har fortsatt att utvecklas sedan AR4 (efter EU EGScience [2010], tabell 6.1).

Slutsatser i kunskapsutvecklingen sedan AR4 bekräftar att klimateffekter uppstår redan vid en mindre omfattande global uppvärmning än två grader, men också att riskerna för klimateffekter stiger markant vid större global uppvärmning (t ex Smith m fl 2009, EU EGScience 2010, Gosling m fl 2011).

Det är värt att i detta sammanhang påpeka att ett temperaturmål för den globala medeltemperaturen inte ger en fullgod bild av regionala förändringar, effekter eller konsekvenser. Den globala uppvärmningen leder till olika stora regionala förändringar (t ex IPCC 2007a, May 2011). Till exempel är det ett generellt resultat att temperaturen ökar mer över land än globalt över hav. Mänskliga verksamheter som jordbruk, vattenresurser och terrestra ekosystem kommer alltså att få uppleva en högre temperaturökning än vad den globala medeltemperaturen ökar. Skillnader mellan regionala förändringar och globala genomsnitt är även mer uppenbara i klimataspekter som nederbörd. Även havsnivån bedöms öka olika mycket i olika regioner. Dessutom kan förändringar i olika typer av extremer bli annorlunda än förändringar i motsvarande globala och också regionala medelvärden. Till exempel noterade Clark m fl (2010) att värmeböljor (här: extrem dygnsmedeltemperatur) vid en tvågraders globala uppvärmning kan intensifieras med 2–6 grader beroende på region.

[21] Häri menas med ”effekt” en förändring i någon verksamhet, näring, ekosystem eller dylikt som orsakas av klimatförändringar. ”Konsekvens” är följden av effekten i förhållande till hållbar utveckling inklusive livsmedelsförsörjning, ekonomisk utveckling och biologisk mångfald, men också ekosystemtjänster och dylikt.

Tabell 8.1. Klimateffekter enligt AR4 och senare studier. För referenser till underliggande studier hänvisas till EU EGScience (2010). Not: Information i AR4 som handlar om högre globala temperaturhöjningar än omkring två grader inkluderas inte i tabellen. I många fall ökar klimateffekterna successivt med temperaturhöjningen både fram till de angivna värdena och bortom dem. Temperaturhöjningsangivelserna är ungefärliga och relativa den förindustriella perioden (IPCC 2007b).

Klimateffekt	AR4	Enligt studier sedan AR4
Kuster	>2-3°C: miljontals fler människor kan drabbas av översvämningar	Överensstämmelse med AR4 om att Sydostasien kommer att drabbas värst. Likartade uppskattningar av hur många som kan drabbas globalt.
Ekosystem och biologisk mångfald	2°C: risken för utdöende ökar för 20-30 % av (djur- och växt) arter >2,5°C: den landbaserade biosfären blir en netto kolkälla	Ökande kunskapsunderlag som stödjer slutsatsen om att risken för utdöende ökar för 20–30% av världens djur- och växtarter vid en global temperaturhöjning som överstiger 2–3°C. Bland annat finns det mer kunskap om Amazonasregionen, skogen och havsförsurningens betydelse.
Vattenresurser	1–1,5°C: 0,4–1,7 miljarder fler människor utsätts för ökad vattenbrist (”water stress”)	Överenstämmelse med de huvudsakliga slutsatserna i AR4.
Livsmedel	>1,5°C: negativa effekter på låga latituder och för vissa grödor. Positiva effekter i en del andra regioner	Mer kunskap om koldioxidens fertiliseringseffekt på grödor, med antydningar av att de associerade positiva effekterna är mindre än tidigare uppskattats. Studierna betonar också de negativa effekterna av högre temperatur, marknära ozon samt skadeinsekter och ogräs.
Hälsa	>1°C: ökad belastning till följd av undernäring och diarrésjukdomar >3°C: betydande belastning på hälsovården	Mer kunskaper om möjliga positiva och negativa effekter av mildare vintrar och varmare somrar i olika regioner. Bekräftelse av resultat i AR4 om smittbärares spridning. Betydelsen av icke-klimatberoende faktorer betonas för denguefeber och malaria.

8.1 Havsförsurningen

Havsförsurningen är en direkt följd av ökande koldioxidutsläpp till atmosfären. En del av dessa utsläpp upplöses i havet, vilket leder till minskade pH-värden och därmed en försurande effekt (jfr figur 8.1). Jämfört med de förindustriella pH-värdena i havet (cirka 8,2) observeras det idag ett pH-värde på 8,1. Eftersom pH-värdena följer en logaritmisk skala, är denna förändring i relativa termer 30 %. Under 2000-talet, om utsläppen inte betydligt minskar från referensbanor, kan havets pH-värde sjunka ytterligare mot 7,8 (baseras på SRES A2 utsläpp; Feely m fl 2009), vilket skulle motsvara en relativ försurning av världshavet med 150 %.

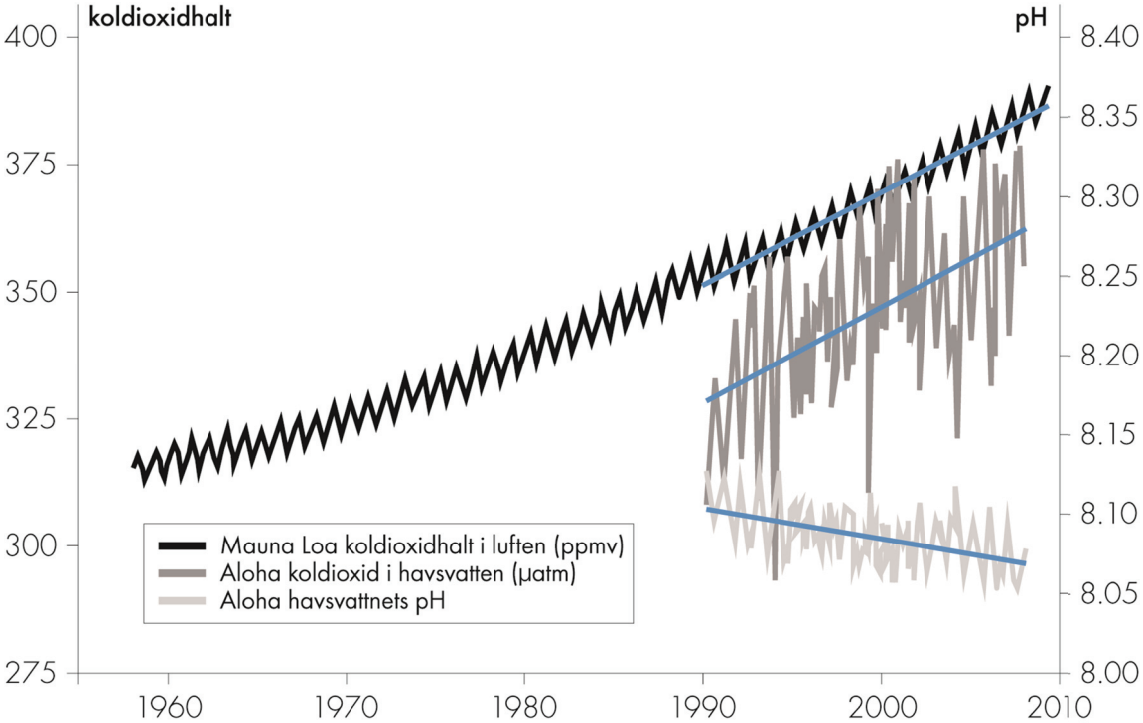
Feely m fl hänvisar också till resultat enligt vilka delar av Ishavet redan vid 2020 kan bli ogästvänligt för vissa organismer (Steinacher m fl 2009), vilket skulle sprida sig till hela Ishavsområdet vid 2050. I de sydliga haven runt Antarktis skulle samma utveckling ske, men

med några årtiondens fördröjning. Även i ett mycket långt historiskt och förhistoriskt perspektiv är dessa förändringar unika. Enligt Pelejero m fl (2010) kan det vara så länge som 20 miljoner år sedan som havets pH-nivå i ythavet var lika låg som idag, och de möjliga nivåerna under 2000-talet kan vara unika i ett 40-miljonersårsperspektiv.

Rummukainen m fl (2010, s. 23-24) förde en kort diskussion om havsförsurningen. Det konstaterades att även om den fysikaliska effekten har varit känd sedan länge, har forskningen om havsförsurningens effekter på kolcykeln och speciellt ekosystem fått fart först under de senaste åren. Detta återspeglas i framväxten av den vetenskapliga litteraturen om havs-försurningens effekter (se t ex Doney m fl 2009, ACE CRC 2011).

Havsförsurningens effekter på marina arter och ekosystem kommer att ske samtidigt som dessa påverkas av bland annat högre temperatur och ökande syrebrist (Hoffmann och Schellnhuber 2009). De sammanlagda effekterna är mycket dåligt kända, men en minskning av den marina biologiska mångfalden ter sig som mycket tänkbar och därmed även konsekvenser för havs-relaterad livsmedelproduktion och förändringar i havets funktion som naturlig kolsänka (se diskussionen i Gosling m fl 2011).

För att återkoppla till debatten om geoengineering, kan man påpeka att havsförsurningen inte skulle bli avhjälpt av sådana geoengineeringsmetoder som handlar om att skärma av jordytan från solstrålning. Däremot skulle en minskande atmosfärshalt av koldioxid minska havsförsurningen, eftersom koldioxidens halt i atmosfären och i havet har en gemensam balans.



Figur 8.1 Förändringar av koldioxidhalten i luften (ppmv) och ythavet (µatm) samt av ythavets pH vid Hawaii (övre del av figur 1 i Feely m fl 2009)[22].

8.2 Havsnivån

Vid en global uppvärmning höjs den globala havsnivån dels på grund av havsvattnets värme-utvidgning (”termisk expansion”), dels på grund av att landbaserad is i form av olika typer av glaciärer smälter av. Osäkerheter om den globala havsnivåhöjningen är framför allt förenade till hur den landbaserade isen och speciellt Grönlands och Antarktis landisar påverkas av den

[22] Tillgänglig på http://tos.org/oceanography/issues/issue_archive/issue_pdfs/22_4/22-4_feely.pdf

globala uppvärmningen. Rummukainen m fl (2010, s. 18-22) sammanfattade studier som utgivits efter AR4 och noterade att dessa generellt antydde snabbare förluster av landisar och en snabbare/större global havsnivåhöjning fram till 2100 än vad resultat som underbyggde AR4 uppvisade. Rummukainen m fl påpekade också dels att de nya data som presenterats i studierna, och som antyder ökad avsmältning, täcker en kort period och att trendens robusthet återstår att bekräftas, dels att nya projektioner av den globala havsnivåns framtida höjning baseras på empirisk eller semiempirisk metodik utifrån observationer hittills, vilket brukar ge större framtida förändringar än vad dagens globala klimatmodeller ger. Det är en debatterad fråga i vilken mån sådana empiriska relationer ger en bra representation också i framtiden när klimatet hamnar allt längre utanför det som beskrivs i tidigare observationer. Good m fl (2011, s. 283-285) hänvisar till olika studier om mekanismer som kan ligga bakom de senaste årens ökad avsmältning i Grönland. Till exempel kan en del av dessa processer bero på effekten av varmare havsvatten på glaciärer nära stranden. När glaciärerna minskar och drar sig tillbaka, upphör mekanismen att verka (t ex Sole m fl 2008). Mekanismerna som handlar om isens dynamik ter sig tämligen komplexa (t ex Sundal m fl 2011, Schoof 2010). Resultat från empirisk och semi-empirisk modellering kan således eventuellt ge tydligare indikatorer av den övre gränsen av möjliga havsnivåhöjningar än beskriva hela spännvidden (jfr t ex IPCC 2010, s. 2).

I AR4 (IPCC 2007a) sammanfattades att den globala havsytenivån – för en rad klimatscenarier som allmänt översteg två graders uppvärmning – skulle kunna stiga med mellan 0,18 och 0,59 meter mellan 1990 och 2095. För en global temperaturhöjning på cirka två grader var intervallet 0,18–0,38 meter. Utöver effekten av havets volymexpansion på grund av uppvärmningen ingick även bidrag från avsmältning av landbaserade isar. Däremot noterade man att det inte fanns tillräckliga underlag för att bedöma huruvida landisavsmältningen skulle accelerera mera framöver.

Utöver specifika senare studier som till exempel de som omnämndes i Rummukainen m fl (2010) har en omfattande kunskapssammanställning utgetts av AMAP (2011) om bland annat klimateffekter på Grönlandsisarna. I skrivande stund är AMAP:s kompletta rapport inte tillgänglig i sin slutgiltiga version. Information om framtidsprojektioner i den tillgängliga provisoriska underlagsrapporten (sektion 11.2)[23] anger som intervall 0,79–2,01 meter för den globala havsnivåhöjningen fram till år 2100. Värmeutvidgningen som ingår lär följa det som angavs i AR4. Man diskuterar även ingående osäkerheter och författarna bedömer 0,9–1,6 meter som ett mer trovärdigt intervall. Studier som citeras i fråga om dessa uppskattningar är Radić och Hock (2011), Grinstedt m fl (2010), Allison m fl. (2009), Pfeffer m fl. (2008) samt Rahmstorf (2009). Jämfört med AR4 handlar AMAP (2011) således främst om nya uppskattningar av landisars bidrag till den fortsatta havsnivåhöjning, snarare än om mer omfattande nya genomlysningar av den sammanlagda globala havsnivåhöjningen.

Bedömningar av havsnivåhöjningar framöver, i vilka man haft forskningsresultat som underlag, har under de senaste åren även gjorts i olika länder (t ex Vellinga m fl 2009, Lowe m fl 2009). Dessa har ofta fokus på respektive område. Slutsatserna är ofta snarlika och hänvisar generellt till större ökningar än det som angavs med siffror i AR4.

Andra studier ger resultat som bekräftar att landisarna bidrar till havsnivåhöjningen, om än i betydligt mindre omfattning. Graversen m fl (2010) uppskattar ett betydligt mindre bidrag från grönlandsisarna till havsnivåhöjningen under 2000-talet än AMAP (2011). Zwally och Giovinetto (2011) jämförde olika studier av isbalansen på Antarktis under de senaste 20 åren, och kommer fram till ett smalare intervall av isförluster än det som konstaterades i AR4 och mindre isförluster än de som senare publicerats av till exempel Veligocna (2009) och Chen m fl (2009).

[23] På http://www.amap.no/swipa/ finns (senast läst 2011-08-15) en ”SWIPA Background Science: Compilation of provisional drafts” för nedladdning.

Sammanfattningsvis kvarstår betydande osäkerheter om hur stor den globala havsnivåhöjningen blir till år 2100, och osäkerheterna är förstås stora också på längre sikt. Senare resultat om de landbaserade isarna visar ändå att de kommer att ge ett bidrag som gör de högre värdena i intervallet 0,18–0,59 meter i AR4 mer tänkbara än de lägre värdena. Detta uttryckts även av Gosling m fl:s (2011) genomsyn av nyare forskningslitteratur.

8.3 Biologisk mångfald

Direkta effekter av klimatförändringar kan leda till förändringar av både landbaserade och marina ekosystemens struktur och funktion, förhållanden mellan olika arter och deras utbredning samt ökad risk för utrotning (Maclean och Wilson 2011). Konsekvenserna torde huvudsakligen leda till en minskad biologisk mångfald, även om osäkerheterna är stora både när det gäller hur klimatet påverkar mångfalden och vilka åtgärder som behöver vidtas för att bevara mångfalden trots ett förändrat klimat (Pereira m fl 2010).

I AR4 (IPCC 2007b, se även Rosenzweig m fl 2008) sammanfattades kunskapsläget om dels observerade förändringar i landbaserade och marina ekosystem sedan 1970. Dessa observationer återgavs från hela världen. Den absoluta merparten av data fanns dock för Europa, medan enbart ett fåtal motsvarande långa tidserier fanns från andra världsregioner. Man fokuserade på data som omfattade serier på minst 20 år. Nästan 29 000 olika mätserier om biologiska system visade på signifikanta förändringar. Cirka 90 % av dessa fall var förenliga med uppvärmning.

Studier har sedan dess fortsatt att belysa att det finns en stor variation mellan arters förmåga att flytta med klimatet. Chen m fl (2011) presenterade en metaanalys av hur sammanlagt 764 olika arter i tempererade områden och tropiska bergstrakter har reagerat på uppvärmningen hittills. De hittade generellt snabba förflyttningar, men också en stor variation mellan arter. Även mobila organismer som fåglar kan ha förändringar i utbredningen som är långsammare än klimatets förändring (Devictor m fl 2008). I tempererade områden kan tidigare vårar leda till en tidigareläggning av arters säsongsberoende beteende. Diamond m fl (2011) visade detta för fjärilars respons på observerad uppvärmning i Storbritannien. I områden med tydlig vinter kan det motsatta gälla. I stället för en längre vegetationsperiod blir den kortare (t ex Yu m fl 2010, Morin m fl 2009), när växtligheten inte får sin vintervila.

Klimatkänsliga marina arter och ekosystem är givetvis många. Koraller uppskattas vara en av känsligaste delarna i marina ekosystem. Gosling m fl (2011) diskuterar studier som bekräftar att koraller påverkas framför allt av högre temperatur, men även havsförsurningen, och effekterna kan ske ojämnt. Yamano m fl (2011) rapporterade om en observerad snabb spridning mot norr av korallarter i närheten av Japan, i samband med ökande havsytetemperatur.

Utöver arters basala förmåga att flytta – eller inte – kan deras spridning i spåren av klimatbetingelsernas förändringar begränsas av topografiska faktorer och markanvändning (t ex Forero-Medina m fl 2010). Detta kan till exempel gälla endemiska arter som lever högt i bergstrakter. Men fragmentering av naturliga habitat orsakad av mänsklig aktivitet kan också leda till att arters förmåga att reagera på klimatförändringen genom att ändra utbredningsområde begränsas. Kombinationen av klimatförändring och förlust av naturliga habitat för organismer gör att specialiserade arter kan påverkas mer än generalister (Clavel m fl 2011). Till exempel har finska studier visat att vanliga fjärilar kan anpassa sin utbredning till ett förändrat klimat, medan hotade fjärilsarter som lever i mer fragmenterade miljöer inte kan detta (Pöyry m fl 2009). Å andra sidan kan klimatförändringar leda till ökad spridning av invasiva arter (Walther m fl 2009). Möjligheten att förutsäga förändringen i utbredning av enskilda arter, t.ex. i relation till deras grad av specialisering, är dock fortfarande låg (Angert m fl 2011).

Klimatförändringar kan påverka arter både negativt och positivt. Utöver påverkan på individuella arter kan detta leda till effekter på ekosystemsnivån och vidare på arter som inte direkt påverkas av klimatförändringar (jfr Isbell m fl 2011). Detta kan leda till förändringar i ekosystemens funktion (t ex Traill m fl 2010) och vidare ändra deras resiliens för klimat- och andra miljöförändringar. Doak och Morris (2010) visade att växter på tundran kunde kompensera för effekter av högre temperatur vilket stabiliserade utbredningen. De rapporterade

dock också att en sådan kompensation kan vara övergående, och ge upphov till en plötslig förändring längre fram.

I IPCC (2007b) konstaterades även att en större global medeltemperaturhöjning än 2-3 grader jämfört med den förindustriella perioden associerades med en sannolikt ökad risk för utrotning av omkring 20–30 % (av de studerade) växt- och djurarterna. Även detta har bekräftats ytterligare (se t ex Warren m fl 2010, samt diskussionen i Gosling m fl 2011).

Hur olika arter och därmed ekosystem påverkas beror givetvis hur anpassningsbara de är. Mycket av kunskapsläget bygger på observationer av olika arters och ekosystems respons på den globala uppvärmningen under de senaste årtiondena. Möjligheten till att modellera framtidsprojektioner begränsas av osäkerheten om mekanistiska samband mellan klimatet och dels fenologi, dels arters spridning. Också osäkerheten kring hur interaktioner mellan arter påverkas om till exempel vissa arters utbredning visar på större förändring än andra, leder till svårigheter när det gäller förutsägelser (Schweiger m fl 2008).

8.4 Vad innebär tvågradersmålet för Arktis?

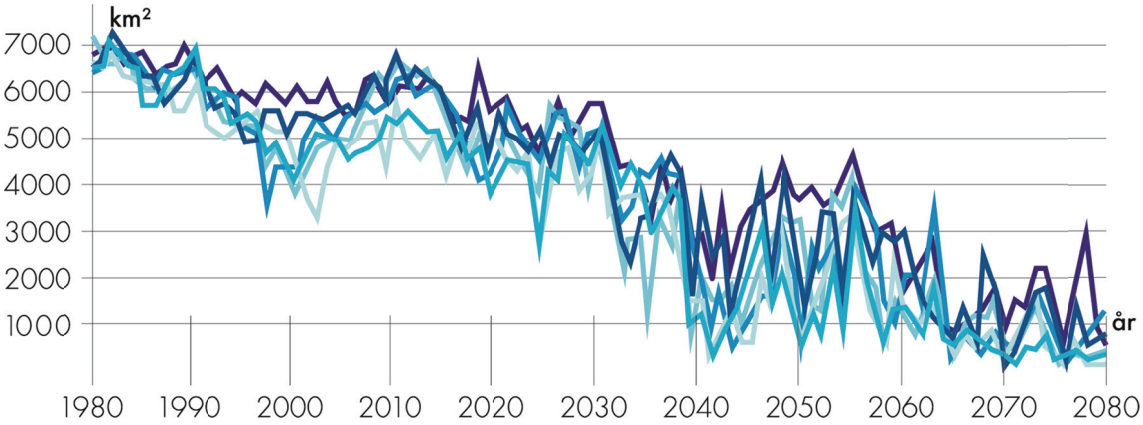
Som redan nämnts, kommer klimateffekter att variera mellan regionerna på grund av regionala skillnader i klimatförändringarna. Dessutöver kommer konsekvenserna av dessa effekter att variera mellan regionerna på grund av olika geografiska, ekologiska, ekonomiska och andra samhälleliga förhållanden. Detta är givetvis en viktig del i bedömningar om hur tillräckligt eller inte tvågradersmålet är. Det finns inte några vedertagna vetenskapliga mått för att göra sådana samhälleliga bedömningar. Däremot finns det kunskaper om klimateffekter vid olika stora temperaturhöjningar.

I jämförelse mellan olika världsregioner visar klimatprojektioner en speciellt stor uppvärmning i Arktis både över land och över Ishavet. Denna region diskuteras närmare nedan, i enlighet med denna rapports syfte.

Många för Arktis speciellt viktiga klimatprocesser och återkopplingar är komplexa och starkt icke-linjära, vilket medför osäkerheter i uppskattningar av regionala klimatförändringar. Att temperaturförändringar kommer att bli större i Arktis än i andra regioner och på jorden är i stort dock väletablerat. En viktig orsak till detta är en så kallad förstärkningsmekanism (”feedback”) som handlar om is och snö. Snö- och istäcken påverkas av uppvärmning, vilket i sin tur påverkar energibalansen på land och till havs. Resultatet kallas allmänt ”Arctic amplification” (t ex Serreze m fl 2009). En sådan regional förstärkning syns även i klimatobservationer, men bidrag från de olika processerna återstår att kvantifieras ytterligare. Ökade värmetransporter till Arktis, på grund av en mer syd-nordlig luftcirkulation till Arktis (t ex Overland och Wang 2010) är en annan faktor som bidrar till ”Arctic amplification”.

Den årslägsta istäckta havsytan inträffar på sensommaren. Sedan 1970-talet har en nedåtgående trend observerats och under senare år har isutbredningen minskat ner till hälften av tidigare värden (Stroeve m fl 2008). September 2007 är det år då isutbredningen hittills varit den minsta under den observerade perioden. Mycket låga värden har konstaterats också under åren därefter. I skrivande stund är 2011 årets minimum inte nått, men ett värde nära nivån år 2007 är trolig. Skillnader mellan enstaka år uppstår bland annat på grund av variationer i väderförhållanden, men de förklarar inte den observerade trenden. Arktis havsis har också blivit tunnare och utgörs i minskande grad av is som består från ett år till ett annat år. Dessa långsiktiga trender förväntas fortsätta med tillkommande variationer från år till år. Händelserna år 2007 ledde till vissa diskussioner om huruvida avsmältningen av Arktis havsis skulle närma sig en tröskel (”tipping point”) vars överskridande skulle innebära ett snabbt skifte till havsisfria sommarförhållanden. Senare studier tyder inte på detta (t ex Tietsche m fl 2010), utan projektioner av havsisytans fortsatta minskning associeras till storleken på temperaturökningen. Uppgifterna i IPCC AR4 (IPCC 2007a) tyder på att en global medeltemperaturhöjning med två grader skulle leda till en 10–60% minskning av Arktis havsistäcke under sommaren (juli, augusti och september). En minskningstakt med mer än 10 % per årtionde har redan uppnåtts i verkligheten. (Stroeve m fl

2008). Nya regionala klimatstudier (Koenigk m fl 2011), understryker att enstaka år uppvisar betydligt större minskningar än vad gäller den långsiktiga trenden (se figur 8.4).



Figur 8.4. Havsisutbredning i 1000 km² för september enligt sex olika regionala klimatscenarier. (Källa: SMHI/Rossby Centre.)

Speciellt under senare år visar studier på en större minskning av grönlandsisarna än tidigare (AMAP 2011). Detta beror främst på ökade flythastigheter inom glaciärerna, som sannolikt kan relateras till ökade havstemperaturer där isen lägger sig över havet. Jämfört med AR4 tyder kan grönlandsisarna enligt AMAP (2011) påverka den globala havsnivåhöjningen med 10–40 cm till år 2100 (AMAP 2011). Det lägre värdet förhåller sig förhållandevis bra till diskussionen i AR4, medan det övre värdet handlar om en betydligt större höjning av havsnivån. (Se även avsnittet 8.2.)

Pågående och framtida snöförändringar har väsentliga inverkningar på permafrost, vegetation och ekologin på Arktis. Observationer visar att uppvärmning av permafrost har fortsatt under de senaste 10 åren i de flesta områden i Arktis (AMAP 2011). Smältning av permafrost kan också leda till ökade växthusgasutsläpp från Arktiska system inklusive havet. Lokalt har stora utsläpp av växthusgasen dikväveoxid (lustgas) hittats. Det är hittills oklart hur representativa dessa observationer är för den framtida utvecklingen.

9 Påverkar ny kunskap tidigare slutsatser?

Jämfört med kunskapsläget några år bakåt i tiden, är det idag klart att de globala utsläppen håller på att öka mer än det som tidigare föreställts (Friedlingstein m fl 2010). En konsekvens av detta är att det rimligen har blivit svårare att åstadkomma en tidig kulmen för de globala utsläppen. Tidigare framtagna utsläppsscenarier har i sin tur minskat i aktualitet.

Kunskapsläget om klimatkänsligheten som redovisades i AR4 (IPCC 2007a) står sig väl även idag. Ny forskning om hur naturliga kolsänkor och kolkällor påverkas av klimatförändringar tyder på att nettoupptaget av koldioxid i terrestra system kan bli mindre än tidigare uppskattats.

Framtida uppdateringar av kunskapsläget om klimatkänsligheten (t ex Schwartz m fl 2010) och kolcykeln kan leda till behov av att justera dagens bild av hur stora de kumulativa antropogena utsläppen kan få bli om ett visst temperaturmål ska kunna nås. Nya naturvetenskapliga kunskaper om riskerna med geoengineering samt utvecklingen av ny teknik för att åstadkomma negativa utsläpp kan påverka bedömningarna av vilka utsläppsbanor som är förenliga med antagna temperaturmål.

Ny information kan dock tillgodogöras enbart om det finns beredskap till att omvärdera och justera antagna klimatmål (t ex Schmidt m fl 2011). Ju längre utsläppsminskningar senareläggs, desto mindre blir flexibiliteten för kursjusteringar längre fram, eftersom det finns begränsningar hur snabbt utsläpp kan minskas.

10 Slutsatser

Denna genomgång belyser kunskapsläget för klimatarbetet ur ett naturvetenskapligt perspektiv, utifrån det uppdraget som regeringen gav till SMHI i slutet av maj 2011 (M2011/2166/Kl). Fokus ligger på; (i) hur ny kunskap och nya forskningsresultat påverkar slutsatserna i tidigare sammanställningar om klimatförändringar och klimateffekter, (ii) vetenskapliga förutsättningar för det så kallade tvågradersmålet, och (iii) vetenskapliga förutsättningar för ett 1,5-gradersmål.

De huvudsakliga slutsatserna är följande:

- kunskapsläget om klimatkänsligheten som redovisades i AR4 (IPCC 2007a) står sig väl även idag. Ny forskning om hur naturliga kolsänkor och kolkällor påverkas av klimatförändringar tyder dock på att nettoupptaget av koldioxid i terrestra system kan bli mindre än tidigare uppskattats
- jämfört med när AR4 publicerades finns det idag betydligt fler studier och underlag om utsläppsbanor som framförallt avser tvågradersmålet
- åtgärder för att minska utsläpp av kortlivade klimatpåverkande luftföroreningar såsom troposfäriskt ozon och sot kan ge väsentliga bidrag till att begränsa den globala uppvärmningen på kort sikt, men de förhindrar inte den långsiktiga uppvärmningen
- ju senare de globala utsläppen kulminerar, desto mindre blir sannolikheten för att tvågradersmålet uppnås. För att kunna uppnå tvågradersmålet med förhållandevis hög sannolikhet (i storleksordningen 70 %) behöver de globala växthusgasutsläppen nå sin kulmen under de närmaste 5–10 åren och vid år 2050 ha minskat med cirka 50–60 % jämfört med år 2000
- det finns olika modeller för hur de globala utsläppsminskningar kan fördelas mellan olika regioner och länder. Dessa baseras inte på naturvetenskapliga principer utan är beroende av politiska och andra ställningstaganden
- beräkningar baserade på att länders *per capita* utsläpp konvergerar år 2050 och att tvågradersmålet ska nås med en sannolikhet i storleksordningen 70 % ger att de svenska utsläppen behöver minska med cirka 20 % till år 2020 och 70 % till 2050 jämfört med år 2005. Motsvarande siffror för EU är cirka 25 % respektive cirka 80 %. Nettoutsläpp av koldioxid från avskogning och utrikes luft- och sjöfart ingår inte i dessa siffror
- ett lägre temperaturmål, till exempel 1,5 grader, förutsätter betydligt mer omfattande utsläppsminskningar och kan vara onåbart utan ett tillfälligt överskridande
- ska ett 1,5-gradersmål uppnås utan överskjutning och med en sannolikhet på cirka 50 % behöver de globala utsläppen vända nedåt inom de närmsta åren. Vid år 2050 behöver de globala utsläppen ha minskat med cirka 80 % jämfört med 2000. En sannolikhet på cirka 70 % förutsätter att de globala utsläppen hamnar runt noll år 2050
- beräkningar baserade på att länders *per capita* utsläpp konvergerar år 2050 och att ett 1,5-gradersmål ska nås med en sannolikhet på cirka 50 % ger att de svenska utsläppen behöver minska med cirka 25 % till år 2020 och drygt 90 % till 2050 jämfört med 2005 års utsläpp. Motsvarande siffrorna för EU är cirka 30 % respektive drygt 90 %. Nettoutsläpp av koldioxid från avskogning och utrikes luft- och sjöfart ingår inte i dessa siffror
- det råder osäkerhet kring vilka klimateffekter som uppstår vid olika temperaturmål, men det är väletablerat att klimateffekter i vissa regioner, bland annat i Arktis, kan bli stora även om tvågradersmålet uppnås. En begränsad global uppvärmning minskar riskerna med klimateffekter, men även om tvågradersmålet uppnås, stiger havsnivån, havsförsurningen ökar och det kan bli olika betydande effekter på den biologiska mångfalden

Referenser

ACE CRC 2100. *Report Card. Southern Ocean Acidification.* ISBN: 978-1-921197-12-3.

Allen, M. R. m fl 2009. Warming caused by cumulative carbon emissions towards the trillionth tonne. *Nature* 458, 1163-1166.

Allison, I. m fl 2009. Ice sheet mass balance and sea level. *Antarctic Science* 21, 413-426.

AMAP 2011. *Snow, water, ice and permafrost in the Arctic.* SWIPA 2011 Executive Summary, 15 pp. [Bakgrundsinformation finns på http://www.amap.no/swipa/ , senast besökt 2011-08-15.]

Angert, A. L. m fl 2011. Do species' traits predict recent shifts at expanding range edges? *Ecology Letters* 14, 677-689.

AOSIS 2009. *Alliance of Small Island States (AOSIS) declaration on climate change 2009.* New York, Alliance of Small Island States. [http://aosis.info/documents/AOSIS%20Summit%20Declaration%20Sept%2021%20FINAL.pdf]

Azar, C. m fl 2006. Carbon capture and storage from fossil fuels and biomass – Costs and potential role in stabilizing the atmosphere. *Clim. Change* 74, 47-79.

Azar, C. m fl 2010. On the Attainability of Low CO_2 Concentration Targets. *Clim. Change 100,* 195-202.

Baker, M. B. och Roe, G. H. 2009. The shape of things to come: why is climate change so predictable? *J. Climate* 22:17, 4574-4589.

Berntsen, T., Tanaka, K. och Fuglestvedt, J. S. 2010. Does black carbon abatement hamper CO2 abatement*? Clim. Change* 103, 627-633.

CAIT 2011. *Climate Analysis Indicators Tool,* World Resources Institute (WRI). See cait.wri.org [senast besökt 2011-05-15].

Calvin, K., m fl. 2009. 2.6: Limiting climate change to 450 ppm CO2 equivalent in the 21st century. *Energy Economics 31(Supplement 2):* S107.

Chen, I.-C. m fl 2011. Rapid range shifts of species associated withhigh levels of climate warming. *Nature* 333, 1024-1026.

Chen, J. L. m fl 2009. Accelerated Antarctic ice loss from satellite gravity measurements. *Nature Geoscience* 2, 859-862

Clark, R. T., Murphy, J. M. och Brown, S. J. 2010. Do global warming targets limit heatwave risk? *Geophys. Res. Lett.* 37, L17703.

Clavel, J., Julliard, R. och Devictor, V. 2011. Worldwide decline of specialist species: toward a global functional homogenization? *Frontiers in Ecology and the Environment* 9, 222-228.

Crutzen, P. J. 2006. Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: a contribution to resolve a policy dilemma? *Clim. Change* 77, 211-220.

Daniel, J. S. m fl 2011. Limitations of single-basket trading: lessons from the Montreal Protocol for climate policy. *Clim. Change* (Online 28 juni 2011. Doi: 10.1007/s10584-011-0136-3)

Den Elzen, M. G. J., van Vuuren, D. P. och van Vliet, J. 2010. Postponing emissions reductions from 2020 to 230 increases climate risks and long-term costs, *Clim. Change* 99:1-2,313-320.

den Elzen, M. G. J. och van Vuuren, D. P. 2007. Peaking profiles for achieving long-term temperature targets with more likelihood at lower costs. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 104:46, 17931-17936.

den Elzen, M. m fl 2007. Multi-gas emission envelopes to meet greenhouse gas concentration targets: Costs versus certainty of limiting temperature increase. *Global Environmental Change* 17, 260-280.

Den Elzen, M. och Höhne, N. 2010. Sharing the reduction effort to limit global warming to 2°C. *Climate Policy* 10, 247-260.

Den Elzen, M. m fl 2010. Evaluation of the Copenhagen Accord: Chances and risks for the 2C climate goal. Biltoven, Netherlands, Netherlands Environmental Assessment Agency. *Publication 500114018,* 70 s.

Devictor, V. m fl 2010. Birds are tracking climate warming, but not fast enough. *Proc. Roy. Soc. B* 275, 2743-2748.

Diamond, S. E. m fl 2011. Species' traits predict phenological responses to climate change in butterflies. *Ecology* 92:5, 1005-1012.

Doak, D. F. och Morris, W. F. 2010. Demographic compensation and tipping points in climate-induced range shifts. *Nature* 467, 959-962.

Doney, S. C. m fl 2009. Ocean acidification: The other CO_2 problem. *Annu. Rev. Marine Sci.* 1, 169-192.

EC 2011. Commission Staff Working Document Impact Assessment *"A roadmap to a competitive low carbon economy in 2050"* SEC (2011)288 final.

Edenhofer, O. 2010. The Economics of Low Stabilization: Model Comparison of Mitigation Strategies and Costs. *The Energy Journal* 31 (Special Issue), 11-48.

EEA 2010. Annual European Union greenhouse gas inventory 1990–2008 and inventory report 2010, Submission to the UNFCCC Secretariat, *EEA Technical report No 6/2010,* European Environment Agency, Copenhagen, Denmark.

Ehhalt, D., Prather M., m fl 2001. *Atmospheric chemistry and greenhouse gases.* In: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I tothe Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer,P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881 s.

EIA-DOE 2010. International Energy Outlook 2010 (IEO2010), *Report #:DOE/EIA-0484(2010),* Energy Information Agency, US Department of Energy, Washington DC, USA.

EU EGScience 2008. *The 2° Target Information reference document.* Background on Impacts, Emission Pathways, Mitigation Options and costs, 55 s.

EU EGScience 2010. *Scientific perspectives after Copenhagen.* Information reference document (Fee, E. m fl [red]), 27 s.

European Council 1996. *Communication on Community strategy on climate change.* Council conclusions, 25-26 June 1996.

European Council 2005. *Presidency Conclusions (7619/1/05),* 23 March 2005, Brussels.

European Council 2011. *Presidency conclusions (11964/11),* 22 June 2011, Brussels.

Feely, R. A., Doney, S. C. och Cooley, S. R. 2009. Ocean acidification: present conditions and future changes in a high-CO_2 world. *Oceanography* 22:4, 36-47.

Flanner, M. G. m fl 2009. Springtime warming and reduced snow cover from carbonaceous particles. *Atm. Chem. Phys.* 9, 2481-2497.

Forero-Medina, G., Joppa, L. och Pimm, S. L. 2010. Constrainst to species' elevational range shifts as climate changes. *Cons. Biol.* 25:1, 163-171.

Friedlingstein, P. m fl 2006. Climate-carbon cycle feedback analysis: Results from the C4MIP model intercomparison. *J. Climate* 19, 3337-3353.

Friedlingstein, P. m fl 2010. Update on CO_2 emissions. *Nature Geoscience* 3, 811-812.

Good, P. m fl 2011. A review of recent developments in climate change science. Part I: Understanding of future change in the large-scale climate system. *Prog. Phys. Geogr.* 35:3, 281-196.

Gosling, S. N. m fl 2011. A review of recent developments in climate change science. Part II: The global-scale impacts of climate change. *Prog. Phys. Geogr.* 35:4, 443-464.

Graversen, R. G. m fl 2010. Greenland's contribution to global sea-level rise by the end of the 21st Century. *Clim. Dyn.* (Online 7 okt 2010. Doi:10.1007/s00382-010-0918-8)

Grinsted, A., Moore, J. C. och Jevrejeva, S. 2010. Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100 AD. *Clim. Dyn.* 34, 461-472. [I det provisoriska AMAP (2011) underlaget refererades till en on-line version av denna artikel, med "Grinsted, A., Moore, J. C. och Jevrejeva, S. 2009."]

Gupta, S. D. A. m fl 2007. *Policies, Instruments and Co-operative Arrangements.* In Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Heimann, M. och Reichstein, M. 2008. Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks. *Nature* 451, 289-292.

Hof, A. F., den Elzen, M. G. J. och van Vuuren, D. P. 2010. Including adaptation costs and climate change damages in evaluating post-2012 burden-sharing regimes. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change* 15, 19-40.

Hoffert, M. I., Callegari, A. J. och Hsieh, C. T. 1980. The Role of Deep Sea Heat Storage in the Secular Response to Climatic Forcing. *J. Geophys.Res.* 85:C11, 6667-6679.

Hoffman, M. och Schellnhuber, H.-J. 2009. Oceanic acidification affects marine carbon pump and trigges extended marine oxygen holes. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 106, 3017-3022.

IEA 2010. *CO_2 Emissions from Fuel Combustion – Highlights,* International Energy Agency, OECD/IEA, Paris, France.

IIASA 2009. *International Institute for Applied System Analysis (IIASA) GGI Scenario Database Version 2.0,* Tillgänlig på: http://www.iiasa.ac.at/Research/GGI/DB/

IPCC 2000. *Emission Scenarios* [N. Nakicenovic and R. Swart (eds.)]. Cambridge University Press, UK, 570 s.

IPCC 2007a. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis.* Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., m fl (eds)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 s.

IPCC 2007b. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability.* Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Parry, M. L. m fl (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976 s.

IPCC 2007c. *Climate Change 2007: Mitigation.* Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Metz, B. m fl (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC 2009. *Meeting Report of the Expert Meeting on the Science of Alternative Metrics* [Plattner, G.-K., T.F. Stocker, P. Midgley and M. Tignor (eds.)]. IPCC Working Group I Technical Support Unit, University of Bern, Bern, Switzerland, 75 s.

IPCC 2010. *Workshop Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Workshop on Sea Level Rise and Ice Sheet Instabilities* [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. Allen, och P.M. Midgley (eds.)]. IPCC Working Group I Technical Support Unit, University of Bern, Bern, Switzerland, 227 s.

IPCC 2011. IPCC *Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation.* Summary for Policymakers [Edenhofer, O. m fl (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 25 s.

Isaksen, I. S. A. m fl 2009. Atmospheric composition change: Climate-Chemistry interactions. *Atm. Environ.*43, 5138-5192.

Isbell, F. m fl, 2011. High plant diversity is needed to maintain ecosystem services. *Nature* (Online 10 augusti 2011. Doi:10.1038/nature10282)

Jarvis, A. och Li, S. 2010. The contribution of timescales to the temperature response of climate models, *Clim. Dyn.* 36, 523-531.

Johansson D. J. A., Persson U. M. och Azar, C. 2006. The cost of using Global Warming Potentials: Analysing the trade-off between CO_2, CH_4, and N_2O. *Clim. Change* 77, 291-309.

Johansson, D. J. A. 2011. Temperature stabilization, ocean heat uptake and radiative forcing overshoot profiles. *Clim. Change* 108, 107-134.

Joos, F. m fl 1996. An efficient and accurate representation of complex oceanic and biospheric models of anthropogenic carbon uptake. *Tellus* B 48:3, 397-417.

Joos, F., m fl 2001. Global warming feedbacks on terrestrial carbon uptake under the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) emission scenarios. *Global Biogeochemical Cycles* 15:4, 891-907.

Kallbekken, S. och Rive, N. 2007. Why delaying emission reductions is a gamble. *Clim. Change* 82, 27-45.

Kitous, A. m fl 2010. Transformation Patterns of the Worldwide Energy System – Scenarios for the century with the POLES Model. *The Energy Journal* 31 (Special Issue 1), 49-82.

Koenigk, T., Döscher, R. och Nikulin, G. 2011. Arctic future scenario experiments with a coupled regional climate model. *Tellus* A 63, 69-86.

Kopp, R. E. och Mauzerall, D. L. 2010. Assessing the climatic benefits of black carbon mitigation. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 107:26, 11703-11708.

Kulmala, M. m fl 2011. General overview: European Integrated project on Aerosol Cloud Climate and Air Quality interactions (EUCAARI) – integrating aerosol research from nano to global scales. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 11, 17941-18160.

Lowe, J. A. m fl 2009. *UK Climate Projections science report: Marine and coastal projections.* Met Office Hadley Centre, Exeter, UK. Tillgänglig på http://ukclimateprojections.defra.gov.uk. ISBN 978-1-906360-03-0

Maclean, I. M. D. och Wilson, R. J. 2011. Recent ecological responses to climate change support predictions of high extinction risk. *Proc. Natl. Acad. Sci.* (Online: 11 juli 2011. Doi:10.1073/pnas.1017352108)

Matthews, H. D. m fl 2009. The proportionality of global warming to cumulative carbon emissions. *Nature* 459, 829-832.

May, W. 2011. Assessing the strength of regional changes in near-surface climate associated with a global warming of 2°C. *Clim. Change* (Online: 24 maj 2011. Doi:10.1007/s10584-011-0076-y)

Meinshausen, M. m fl 2009. Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2°C. *Nature* 458, 1158-1162.

Meinshausen, M., Raper, S. C. B., and Wigley, T. M. L. (2011) Emulating coupled atmosphere-ocean and carbon cycle models with a simpler model, MAGICC6 – Part 1: Model description and calibration. *Atmos. Chem. Phys.* 11, 1417-1456.

Montzka, S. A., Dlugokencky, E. J. och Butler, J. H. 2011. Non-CO_2 greenhouse gases and climate change. *Nature* 476, 43-50.

Morin, X. m fl. 2008. Leaf phenology in 22 North American tree species during the 21st century. *Global Change Biology* 15:4, 961-975.

MVB-SOU 2007. Vetenskapligt underlag för klimatpolitiken, Rapport från det Vetenskapliga rådet för klimatfrågor. *Miljövårdsberedningens rapport 2007:03.*

Netherlands Environmental Assessment Agency 2009. News in Climate Science and Exploring Boundaries. A Policy Brief on developments since the IPCC AR4 report in 2007. *PBL publication number 500114013,* 32 s.

O'Neill, B. C. m fl 2010. Mitigation implications of mid-century targets that preserve long-term climate policy options. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 107:3, 1011-1016.

Overland, J. E. och Wang, M 2010. Large-scale atmospheric circulation changes associated with the recent loss of Arctic sea ice. *Tellus* 62A, 1-9.

Pelejero, C., Calvo, E. och Hoegh-Guldberg, O. 2010. Paleo-perspectives on ocean acidification. *Trends in Ecology and Evolution* 25, 332-344.

Pereira, H. M. m fl 2010. Scenarios for Global Biodiversity in the 21st Century. *Science* 330, 1496-1501.

Pfeffer, W. T. m fl 2008. Kinematic Constraints on Glacier Contributions to 21st-Century Sea-Level Rise. *Science* 321, 1340-1343.

Piao, S. m fl 2008. Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming. *Nature* 451, 49-52.

Plattner, G.-K., m fl 2009. *IPCC Expert Meeting on the Science of Alternative Metrics,* Meeting Report, dowvloadable via http://www.ipcc.ch/pdf/supporting-material/expert-meeting-metrics-oslo.pdf.

Pöyry, J. m fl 2009. Species traits explain recent range shifts of Finnish butterflies. *Global Change Biology* 15:3, 732-743.

Quinn, P. K. m fl 2008. Short-lived pollutants in the Arctic: their climate impact and possible mitigation strategies. *Atmos. Chem. Phys.* 8, 1723-1735.

Radić, V. och Hock, R. 2011. Regionally differentiated contribution of mountain glaciers and ice caps to future sea-level rise. *Nature Geoscience* 4, 91-94.

Rahmstorf, S. 2007. A semiempirical approach to projecting future sea-level rise. *Science* 315, 368-370.

Ramanathan, V. och Carmichael, G. 2008. Global and regional climate changes due to black carbon. *Nature Geoscience* 1, 221-227.

Ramaswamy V. m fl 2001. *Radiative forcing of climate change.* In: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T.,Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881 s.

Randalls, S. 2010. History of the 2°C climate target. *WIREs Climate Change* 1, 598-605.

Ranger, N. m fl 2010. *Mitigating climate change through reductions in greenhouse gas emissions: is it possible to limit global warming to no more than 1.5°C?* Policy Brief August 2010. Grantham Institute on Climate Change and the Environment, Centre for Climate Change Economics and Policy and MetOffice, 17 s.

Raper S. C. B., Gregory, J. M. och Osborn, T. J. 2001. Use of an upwelling-diffusion energy balance climate model to simulate and diagnose A/OGCM results. *Clim. Dyn.* 17, 601-613.

Riahi, K., Grubler, A. och Nakicenovic, N. 2006. Scenarios of Long-term Socio-economic and Environmental Development under Climate Stabilization. *Technological Forecasting and Social Change* 74:7, 887-935.

Rosenzweig, C. m fl 2008. Attributing physical and biological impacts to anthropogenic climate change. *Nature* 453, 353-357.

Rummukainen, M. m fl 2010. Physical climate science since IPCC AR4. A brief update on new findings between 2007 and April 2010. *TemaNord 2010:549,* Nordic Council of Ministers, Copenhagen, Denmark, 88 s.

Rummukainen, M. och Källén, E. 2009. *Ny klimatvetenskap 2006-2009.* Kommissionen för hållbar utveckling, Regeringskansliet, 66 s. (Also translated into English: ”New Climate Science 2006-2009, Commission on Sustainable Development, Swedish Government Offices.)

Schmidt, M. G. W. m fl 2011. Climate targets under uncertainty: challenges and remedies. *Clim. Change* 104, 783-791.

Schoof, C. 2010. Ice-sheet acceleration driven by melt supply variability. Nature 468, 803-806.

Schwartz, S. E. m fl 2010. Why hasn’t Earth warmed as much as expected? *J. Climate* 23, 2453-2464.

Schweiger, O. m fl 2010. Climate change can cause spatial mismatch of trophically interacting species. *Ecology* 89, 3472-3479.

Serreze, M. C. m fl 2009. The emergence of surface-based Arctic amplification. *The Cryosphere* 3, 11-19.

Shindell, D. 2007. Local and remote contributions to Arctic warming. *Geophys. Res. Lett.* 34, L14704.

Shindell, D. och Faluvegi, G. 2009. Climate response to regional radiative forcing during the twentieth century. *Nature Geoscience* 2, 294-300.

Shindell, D. T. m fl 2008. A multi-model assessment of pollution transport to the Arctic. *Atmos. Chem. Phys.* 8, 5353-5372.

Shine, K. P. m fl 2005. Alternatives to the Global Warming Potential for Comparing Climate Impacts of Emissions of Greenhouse Gases. *Clim. Change* 68:3, 281-302.

Sitch, S. m fl 2008. Evaluation of the terrestrial carbon cycle, future plant geography and climate-carbon cycle feedbacks using five Dynamic Global Vegetation Models (DGVMs). *Global Change Biology* 14, 2015-2039.

Smith, J. B. m fl 2009. Assessing dangerous climate change through an update of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) "reasons for concern". *Proc. Natl. Acad. Sci* 106:4133-4137.

Sokolov, A. P. m fl 2008. Consequences of considering carbon-nitrogen interactions on the feedbacks between climate and the terrestrial carbon cycle. *J. Climate* 21, 3776-3796.

Sole, A. m fl 2008. Testing hypotheses of the cause of peripheral thinning of the Greenland Ice Sheet: is land-terminating ice thinning at anomalously high rates? *The Cryosphere* 2, 205-218.

Solomon, S. m fl 2009. Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 106:6, 1704-1709.

Steinacher, M. m fl 2009. Imminent ocean acidification in the Arctic projected with the NCAR global coupled carbon cycle-climate model. *Biogeosciences* 6, 515-533.

Stouffer, R. J. 2004. Time Scales of Climate Response. *J. Climate* 17, 209-217.

Stroeve, J. m fl 2008. Arctic sea ice extent plummets in 2007. *Eos, Trans. Amer. Geophys. Union* 89:2, 13-14.

Sundal, A. V. m fl 2011. Melt-induced speed-up of Greenland ice sheet offset by efficient subglacial drainage. *Nature* 469, 521-524.

Tanaka, K.. 2008. *Inverse Estimation for the Simple Earth System Model ACC2 and its Applications,* Ph.D. thesis, International Max Planck Research School on Earth System Modelling, Hamburg, Germany. Downloadable at http://www.sub.uni-hamburg.de/opus/volltexte/2008/3654/.

The Copenhagen Diagnosis 2009. *Updating the world on the Latest Climate Science.* Allison m fl. The University of New South Wales Climate Change Research Centre (CCRC), Sydney, Australia, 60 s.

The Royal Society 2009. Geoengineering the climate: science, governance and uncertainty. *RS Policy document 10/09.* RS1636, 82 s.

Tietsche, S. m fl. 2011. Recovery mechanisms of Arctic summer sea ice. *Geophys. Res. Lett.* 38, L02707.

Traill, L. W. m fl. 2010. Mechanisms driving change: altered species interactions and ecosystem function through global warming. *Journal of Animal Ecology* 79:5, 937-947.

UNDP 2010. The outcomes of Copenhagen. The Negotiations & The Accord. *UNDP Environment & Energy Group Climate Policy Series,* February 2010, 28 s.

UNEP 2010. *The Emissions Gap Report: Are the Copenhagen Pledges Sufficient to Limit Global Warming to 2ºC or 1.5ºC? –* A preliminary assessment, United Nation Environmental Programme, Nairobi, Kenya, 52 s.

UNEP och WMO 2011. *Integrated assessment of black carbon and tropospheric ozone. Summary for Decision Makers.* UNEP/GC/26/INF/20. 38 s.

UNFCCC 1992. *United Nations Framework Convention on Climate Change.*

UNFCCC 1997. *Kyoto protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change.*

UNFCCC 2010. Decision 1/CP.16, The Cancun Agreements: Outcome of the work of the Ad Hoc Working Group on Long-term Cooperative Action under the Convention. *FCCC/CP/2010/7/Add.1* [http://unfccc.int/resource/docs/2010/cop16/eng/07a01.pdf#page=2]

US EPA 2011. Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2009, *EPA 430-R-11-005,* U.S. Environmental Protection Agency, Washington DC, USA.

van Vuuren, D. m fl 2007. Stabilizing greenhouse gas concentrations at low levels: an assessment of reduction strategies and costs. *Clim. Change* 81:2, 119-159.

Van Vuuren, D. P. och Riahi, K. 2011. The relationship between short-term emissions and long-term concentration targets. *Clim. Change* 104, 793-801.

van Vuuren, D. P., Hof, A. F. och den Elzen, M. G. J. 2009. Meeting the 2 degree target. From climate objective to emission reduction measures, *Report no.500114012,* Netherlands Environmental Assessment Agency (PBL), Bilthoven, The Netherlands, 98 s.

van Vuuren, D. P., m fl 2011. RCP2.6: exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2°C. *Clim. Change* (Online 5 august 2011. Doi:10.1007/s10584-011-0152-3)

Vaughan, N. E., Lenton, T. M. och Shepherd, J. G. 2009. Climate change mitigation: trade-offs between delay and strength of action required. *Clim. Change* 96, 29-43.

Velicogna, I. 2009. Increasing rates of ice mass loss from the Greenland and Antarctic ice sheets revealed by GRACE. *Geopys. Res. Lett.* 36, L19503.

Vellinga. P. m fl 2009. Exploring high-end climate change scenarios for flood protection of the Netherlands. *KNMI wetenschappelijk rapport WR 2009-05.*

Warren, R. m fl. 2010. Increasing impacts of climate change upon ecosystems with increasing global mean temperature rise. *Clim. Change* 106, 141-177.

Walther, G.-R. m fl 2009. Alien species in a warmer world: risks and opportunities. *Trends in Ecology & Evolution* 24:12, 686-693.

Wigley, T. M. L. m fl 2009. Uncertainties in climate stabilization. *Clim. Change* 97, 85-121.

WMO 2011. WMO statement on the status of the global climate in 2010. *WMO-No. 1074,* 16 s.

Yamano, H., Sugihara, K. och Nomura, K. 2011. Rapid poleward range expansion of tropical reef corals in response to rising sea surface temperatures. *Geophys. Res. Lett.* 38:L04601.

Yu, H., Luedeling, E. och Xu, J. 2010. Winter and spring warming result in delayed spring phenology on the Tibetan Plateau. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 107:51, 22151-22156.

Zaehle, S. m fl 2010. Terrestrial nitrogen feedbacks may accelerate future climate change. *Geophys. Res. Lett*. 37, L01401.

Zickfeld, K. m fl 2009. Setting cumulative emissions targets to reduce the risk of dangerous climate change. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 106:38, 16129-16134.

Zwally, H. J. och Giovinetto, M. B. 2011. Overview and assessment of Antarctic ice-sheet mass balance estimates: 1992-2009. *Surv. Geophys*. (Online 13 maj 2011. Doi:10.1007/s10712-011-9123-5)

Bilaga I: The MiMiC model

The MiMiC model (Multigas Mitigation Climate model; Johansson et al. 2006) is an integrated climate-economy model that emulates the global response of more detailed climate models as well as energy-economy models. Emissions of carbon dioxide (CO_2), methane (CH_4) and nitrous oxide (N_2O) are determined endogenously so that the net present value abatement cost of stabilizing the global average surface temperature at an exogenously set level (e.g., 1.5ºC or 2ºC) above the pre-industrial level is minimized.

The model can be run for centuries with annual or longer time steps and calibrated for the historical period.

Scenario and economic module

Baseline emissions for the well-mixed greenhouse gases CO_2, CH_4, and N_2O for the period 2015-2100 are taken from the IIASA B2 scenario, which is an updated version of the SRES B2 (Riahi et al. 2006, IIASA 2009), and is characterized by medium population growth and medium per capita economic growth. After 2100 the baseline emissions are assumed to remain constant and eventually decline. However, this constraint will never be binding in the MiMic-based stabilization scenarios here; the cumulative carbon emissions are considerably less than 5000 Gton C. CO_2 emissions from land use change follow the IIASA B2 baseline scenario.

The economic module estimates the costs of reducing emissions of greenhouse gases through the use of so called marginal abatement cost functions (see Johansson et al. 2006 for details). Abatement of emissions is only allowed from the year 2015 and onwards.

Constraints on how fast emissions can fall over a given period of time are also implemented in the model so that the emissions do not fall at a higher rate than what have been observed in several energy-economy models, i.e. the emissions do not fall at higher rate than about 3 % of the emission level in year 2000, in line with EU EGScience (2010) and UNEP (2010). However, in the case when the climate sensitivity is 4.5ºC and with the 1.5ºC target for the global average surface temperature above the pre-industrial level the constraints have been relaxed so that the optimization model can find a solution

The future radiative forcing for fluorinated gases, stratospheric O_3, tropospheric O_3 and surface albedo is assumed to follow the RCP3PD scenario (van Vuuren et al. 2011). The direct and indirect global average radiative forcing of anthropogenic aerosols follows the path presented in RCP3PD. However, the forcing levels in each year are scaled up or down with a constant the value which is set so that the squared difference between the modeled global average surface temperature and the historical measured global average surface temperature is minimized.

Since MiMiC is a cost-minimizing model, future costs have to be made comparable with costs occurring now. Discounting is used for this and the discount rate is set to 5 % per year. This rate is typically used in the integrated assessment models that were assessed in UNEP (2010), EU EGScience (2010), IPCC (2007c) and van Vuuren and Riahi (2011). The value for the discount rate is not of critical importance in this study since the emissions pathway is constraint by the rate of changed constraint for the emissions (about 3 %/year) and the temperature stabilization target. Had the discount rate been somewhat lower (higher) emissions would have been reduced slightly more (less) early on and slightly less (more) at the end of the century.

Gas cycles

For the ocean uptake of CO_2, a non-linear response function from Joos et al. (1996) is used. We adopt the use of the response function estimated for the Princeton 3-D carbon cycle model. This approach is an efficient representation of the carbon cycle that takes into account the change in the CO_2 buffer factor of the ocean surface layer when the partial pressure of CO_2 is altered.

For the terrestrial sink a non-linear response function from Tanaka (2008) is used. The carbon fertilization factor β is set to 0.55, and the carbon fertilization is assumed to depend logarithmically on atmospheric CO_2 concentration.

Temperature feedbacks on the carbon cycle are taken into account in MiMic. When the global average surface temperature increases, the uptake of CO_2 in oceans will drop and the rate of respiration of organic carbon in the ecosphere will increase, both having the affect that larger fraction of the anthropogenically emitted CO_2 will stay in the atmosphere. For the temperature effect on carbon chemistry in oceans we use the same approach as Joos et al (2001). For the temperature effect on carbon in ecosystem we adopt a Q10 approach with parameters based on Tanaka (2008).

The response of this representation of the carbon cycle has been assessed. It gives responses in line with those obtained from more complex carbon cycle models (Friedlingstein et al. 2006).

CH_4 and N_2O concentrations are modeled using the global mean mass-balance equations in Ehhalt et al. (2001), taking into account the feedback effect CH4 has on its own atmospheric lifetime.

Radiative forcing

The equations for radiative forcing are the expressions given in IPCC's Third Assessment Report (Ramaswamy et al. 2001). We include the indirect forcing effect of methane on tropospheric ozone and the concentration of stratospheric water vapour.

Energy balance model and global average surface temperature

A global average Energy Balance Model (EBM) is used to estimate the temperature response of changes in radiative forcing. The EBM that is used in the optimization is a three-box model which consists of a mixed ocean-atmosphere layer, an intermediate ocean layer and a bottom ocean layer. This three-box EBM model is calibrated to emulate a linear Upwelling Diffusion EBM (UDEBM) with polar overturning. The main assumptions for the UDEBM is the climate sensitivity, which is either 2.3 or 4.5ºC, a heat diffusivity of 2 $cm^2\ s^{-1}$, upwelling rate of 4 m/year and a ratio of polar water warming to average ocean warming of 0.2. The assumptions are in line with standard assumptions for UDEBMs, see Raper et al. (2001), Meinshausen et al. (2011), Baker and Roe (2009), Hoffert et al. (1980), and Shine et al. (2005). The response of our UDEBM has been assessed, and it gives a response close to that obtained by MAGICC for similar levels for the heat diffusivity and the climate sensitivity. This is an indication that our model works well in the sense that it reproduces results from more advanced climate models. MAGICC is calibrated to emulate three-dimensional AOGCMs (Meinshausen et al. 2011).

Bilaga II: “Contraction & convergence”

In the “contraction & convergence” calculation, anthropogenic CH_4, N_2O and CO_2 emissions do now include those from land use change and international bunkers fuels. How land use change emissions and emissions from international bunkers will be treated in future international climate treaties is an open issue. The fluorinated gases included in the Kyoto Protocol are not included either. The reason for this is that these gases are not explicitly represented in MiMiC. The effect of this exclusion is not decisive for the results as these gases only make up less than 2 % of the global greenhouse gas emissions (in 2005; CAIT 2011). Population estimates and scenarios are based on the IIASA B2 scenario (IIASA 2009).

The CAIT-WRI emissions database is the main source of emissions data here. Emissions of CH_4 and N_2O are for 2005, while emissions of CO_2 are for 2007 (these are the last years for emissions data was available at the time of construction of the model; CAIT 2011). Since the contraction & convergence calculation here is based on the convergence starting in 2013, emission data is constructed for the intermediate years from the last year of data in CAIT. This scenario is based on latest reporting to the UNFCCC for EU, Sweden and USA (EEA 2010; US EPA 2011). Beyond the last reporting year the emissions, they were assumed to remain constant throughout to 2013 for these Annex-1 countries/regions. For China, India, Latin America, Sub-Saharan Africa (without South Africa), other Annex-1 countries and other non-Annex-1countries the CO_2 emissions from fossil fuel use were estimated from actual emissions growth rates between 2007 and 2008 from IEA (2010) and estimated growth rates from the International Energy Outlook’s reference scenario (EIA-DOE 2010). The CH_4 and N_2O emissions were assumed to remain constant at their 2005 level until 2013.

SMHIs publiceringar

SMHI ger ut sju rapportserier. Tre av dessa, R-serierna är avsedda för internationell publik och skrivs därför oftast på engelska. I de övriga serierna används det svenska språket.

Seriernas namn	**Publiceras sedan**
RMK (Report Meteorology and Climatology)	1974
RH (Report Hydrology)	1990
RO (Report Oceanography)	1986
METEOROLOGI	1985
HYDROLOGI	1985
OCEANOGRAFI	1985
KLIMATOLOGI	2009

I serien KLIMATOLOGI har tidigare utgivits:

1 Lotta Andersson, Julie Wilk, Phil Graham, Michele Warburton, (University KwaZulu Natal) (2009)
Local Assessment of Vulnerability to Climate Change Impacts on Water Resources in the Upper Thukela River Basin, South Africa – Recommendations for Adaptation

2 Gunn Persson, Markku Rummukainen (2010)
Klimatförändringarnas effekter på svenskt miljömålsarbete

3 Jonas Olsson, Joel Dahné, Jonas German, Bo Westergren, Mathias von Scherling, Lena Kjellson, Fredrik Ohls, Alf Olsson (2010)
En studie av framtida flödesbelastning på Stockholms huvudavloppssystem

Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut
601 76 NORRKÖPING
Tel 011-495 80 00 Fax 011-495 80 01

ISSN 1654-2258 © SMHI