



**En  
varmare  
värld**

**Växthuseffekten och  
klimatets förändringar**

**Tredje upplagan**



**En varmare värld**



**monitor 23**

# **En varmare värld**

**Växthuseffekten och klimatets förändringar**

**Tredje upplagan**

*Text:* Claes Bernes

NATURVÅRDSVERKET

*Omslag:* Från rymden framträder jordens atmosfär som en smal, blå rand mot den uppgående solen. Utan denna tunna hinna skulle jordytan vara mer än trettio grader kallare än den är i dag. Men nu håller atmosfären på att förändras. Människans utsläpp av koldioxid och andra föroreningar förstärker växthuseffekten och påverkar klimatet. Världen blir allt varmare.

*Omslagsdesign:* Claes Bernes. Foto: Everett Collection / IBL.

Tidigare utgåvor i denna serie:

- Monitor 1980.** En presentation av PMK – Programmet för övervakning av miljö kvalitet
- Monitor 1981.** Försurning av mark och vatten
- Monitor 1982.** Tungmetaller och organiska miljögifter i svensk natur
- Monitor 1983.** Näring i överflöd – eutrofiering i svenska vatten
- Monitor 1984.** Långväga transport av luftföroreningar
- Monitor 1985.** PMK: På vakt i naturen
- Monitor 1986.** Sura och försurade vatten
- Monitor 1987.** Tungmetaller – förekomst och omsättning i naturen
- Monitor 1988.** Östersjön och Västerhavet – livsmiljöer i förändring
- Monitor 1989.** Klimatet och naturmiljön
- Monitor 1990.** Svensk miljöövervakning
- Monitor 12.** Försurning och kalkning av svenska vatten
- Monitor 13.** Nordens miljö – tillstånd, utveckling och hot
- Monitor 14.** Biologisk mångfald i Sverige. En landstudie
- Monitor 15.** Arktisk miljö i Norden – orörd, exploaterad, förorenad?
- Monitor 16.** Organiska miljögifter. Ett svenskt perspektiv på ett internationellt problem
- Monitor 17.** Läker tiden alla sår? Om spåren efter människans miljöpåverkan
- Monitor 18.** En varmare värld. Växthuseffekten och klimatets förändringar
- Monitor 19.** Förändringar under ytan. Sveriges havsmiljö granskad på djupet
- Monitor 20.** En ännu varmare värld. Växthuseffekten och klimatets förändringar
- Monitor 21.** Bruk och missbruk av naturens resurser. En svensk miljöhistoria
- Monitor 22.** Biologisk mångfald i Sverige

**Monitor 1985, 1988–1990** samt **12–19** och **21–22** har också utkommit på engelska.

*Text, grafik och  
formgivning:*

Claes Bernes

*Typsnitt:*

Adobe Garamond Pro 10,5/14

*Papper:*

115 g G-Print

*Tryck:*

Arkitektkopia, Stockholm, 2016

*Upplaga:*

2 000

*Beställningar:*

Arkitektkopia AB

Telefon: 08-505 933 40

Telefax: 08-505 933 99

E-post: natur@cm.se

ISBN 978-91-620-1300-4

ISSN 1100-231X

# Förord

KLIMATFRÅGANS ALLVAR och behovet av snabbt agerande har aldrig varit tydligare. Samtidigt har mängder av ny kunskap tagits fram om klimatsystemet och människans klimatpåverkan. I Paris enades världen hösten 2015 efter år av svåra förhandlingar om ett avtal som omfattar 197 parter och som strävar mot att begränsa den globala uppvärmningen till 1,5 grader Celsius. Bara knappt ett år senare hade tillräckligt många parter ratificerat Parisavtalet för att det skulle kunna träda i kraft. Diskussioner både om tekniska aspekter på genomförandet och om en ökad ambitionsnivå för begränsningar av klimatpåverkande utsläpp fortskrider så som avtalet stipulerar. Sist men inte minst har klimatfrågan fått ett genomslag som aldrig förr bland massmedier, beslutsfattare och gemene man.

Våren 2003 gav Naturvårdsverket första gången ut boken *En varmare värld*. Fyra år senare, hösten 2007, gjordes en uppdatering kallad *En ännu varmare värld*. I båda upplagorna presenterades i populärvetenskaplig form en översikt över vår kunskap om växthuseffekten, om hittillsvarande och framtida klimatförändringar samt om dessa förändringars konsekvenser för naturmiljön och människans levnadsförhållanden. Under de år som gått sedan dess har mycket hunnit hända på klimatområdet. Temperatur, nederbörd, stormar och isavsmältning har nått nya rekordnivåer världen över, och rader av dramatiska väderfenomen och väderrelaterade naturkatastrofer har ägt rum såväl i Sverige som utomlands.

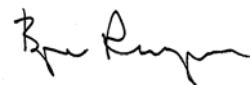
Naturvårdsverket ger därför nu ut en reviderad, uppdaterad och utökad version av boken *En varmare värld*. En viktig aspekt som lyfts fram är att åtgärder för att framgångsrikt hantera klimatfrågan redan idag finns att tillgå, och att klimatsmarta lösningar alltmer framstår

som de självklara valen. Omarbetningen av text och bildmaterial är grundlig, men för att knyta an till tidigare utgåvor har den nya boken fått titeln *En varmare värld – Tredje upplagan*.

Liksom sina föregångare är *En varmare värld* användbar som lärobok på grundläggande högskolenivå och som bredvidläsningsbok inom naturvetenskaplig gymnasieutbildning. Ett riktmärke för utformningen av text och bild har varit att intresserade elever i gymnasieskolan ska kunna tillgodogöra sig innehållet utan större svårighet. Samtidigt bör boken fungera som kunskapskälla och referens för alla som har miljövard, klimatarbete, energiförsörjning eller samhällsplanering som yrke.

En stor del av det nya materialet i boken är hämtat från FN:s klimatpanel IPCC, som 2013–2014 för femte gången publicerat en omfattande sammanställning av aktuell klimatforskning. Därtill återges en rad nya uppgifter om specifikt svenska eller europeiska förhållanden, baserade på forskning kring effekter av klimatförändringar i våra trakter. Boken presenterar också ett stort antal beräkningar av hur Sveriges och Europas klimat skulle kunna förändras under återstoden av innevarande sekel. Dessa beräkningar har genomförts vid Rosby Centre vid SMHI i Norrköping.

*En varmare värld – Tredje upplagan* har sammanställts av Claes Bernes, Stockholm Environment Institute. Innehållet har granskats av forskare och experter vid Naturvårdsverket och Lunds universitet. Ett varmt tack riktas till samtliga medverkande!



Björn Risinger, generaldirektör  
Naturvårdsverket

# Innehåll och sammanfattning

## I

s. 10–13

### Inledning

Sommaren 2014 bidrog rekordhöga temperaturer till att en skogsbrand i Västmanland blev den mest omfattande som inträffat i Sverige i modern tid. Liksom ovanligt svåra stormar eller översvämningar uppfattas värmer rekord numera ofta som tecken på att klimatet har blivit annorlunda. Men en enskild väderhändelse, hur dramatisk den än är, duger aldrig som bevis för att klimatet skulle ha förändrats. Klimatet är en beskrivning av vädrets genomsnittliga egenskaper under en längre tid.



Branden (s. 13).

## 2

s. 14–25

### Vad kan förändra klimatet?

Utan tvekan *kan* klimatet förändras märkbart, och det av flera orsaker. Till dem hör naturliga företeelser såsom vulkanutbrott, skiftningar i solens ljusstyrka, variationer i jordaxelns riktning och jordbanans form, förändringar av jordytans egenskaper samt interna svängningar i klimatsystemet. Det står också i mänsklig makt att påverka klimatet. En del föroreningsutsläpp fyller luften med partiklar som fångar upp eller reflekterar solljus. Och vissa gasformiga föroreningar har förmågan att absorbera värmestrålning och därigenom förstärka atmosfärens växthuseffekt.



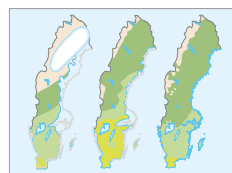
Växthuseffekten (s. 23).

## 3

s. 26–35

### Klimatförändringar i förindustriell tid

Kontinenternas vandringar över jordytan har i det förgångna förorsakat långsamma men genomgripande klimatförändringar. De senaste tre årmiljonerna har mestadels präglats av kyla och nedisningar, men jorden har under den tiden genomgått upprepade och snabba växlingar mellan ett genuint istidsklimat och betydligt mildare förhållanden. Under de drygt tiotusen år som förflutit efter den senaste istiden har klimatet dock varit relativt stabilt.



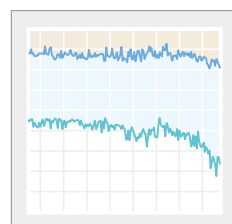
Inlandsis ersätts av skog i Sverige (s. 32).

## 4

s. 36–49

### Klimatförändringar i modern tid

Sedan 1900-talets början har medeltemperaturen på jorden allt tydligare tenderat att avvika från tidigare seklers tämligen stabila nivå. Den har sedan dess stigit med närmare en grad, men inte i jämn takt – den största ökningen har ägt rum efter 1975. Uppvärmningen har reducerat förekomsterna av is och snö och bidragit till en viss höjning av havsnivån. Sedan mitten av förra seklet har också nederbörden tilltagit på många håll, inte minst i Nordeuropa, men i åtskilliga mer nederbördsfattiga trakter har det i stället blivit ännu torrare än förr.



Krympande havsis i Arktis (s. 45).



## Varför förändras klimatet nu?

5

s. 50–63

Den temperaturhöjning som ägde rum i 1900-talets början kan åtminstone delvis ha varit naturlig. Huvudorsaken till den snabba uppvärmningen efter 1975 kan däremot knappast vara något annat än människans numera mycket stora utsläpp av växthusgaser, främst koldioxid men även metan och dikväveoxid. Atmosfären innehåller av dessa gaser har tilltagit markant under senare decennier. Numera innehåller luften även ett antal artificiella klor-, brom- och/eller fluorhaltiga ämnen med mycket kraftig växthusverkan. Uppvärmningen kunde ha blivit ännu större om den inte hade motverkats av föroreningsutsläpp som ökat luftens partikelinnehåll.



Partikelslöjor i Asien (s. 59).

## Källor och sänkor för växthusgaser

6

s. 64–83

Att luftens koldioxidhalt stiger beror främst på utsläpp vid förbränning av fossila bränslen: kol, olja och fossilgas (naturgas). De rika länderna står alltjämt för de största utsläppen per capita, men senare års ökning av utsläppen har främst ägt rum i utvecklingsländerna.

Även avskogning har medverkat till att höja koldioxidhalten. Många av de kvarvarande skogarna är å andra sidan på väg att tätna, vilket innebär att de för tillfället tar upp mer koldioxid från atmosfären än vad de lämnar ifrån sig. Också havet tar hand om mycket av den utsläppta koldioxiden, men resten blir kvar i luften i årtusenden. Utsläppen av andra växthusgaser härrör från många olika källor; förutom industri- och förbränningsprocesser även jordbruk, avfallsupplag m.m.



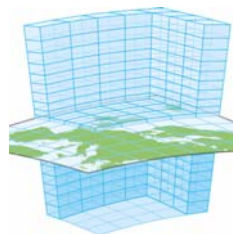
Utvinning av oljesand i Kanada (s. 65).

## Klimatscenarioer och klimatmodeller

7

s. 84–93

Människans framtida utsläpp av växthusgaser går knappast att förutsäga med nämnvärd tillförlitlighet. I stället arbetar klimatforskarna med scenarioer för olika *tänkbara* samhälls- och utsläppförändringar. Dessa används som utgångspunkt för modellberäkningar av klimatets fortsatta förändringar. Resultaten av beräkningarna kan skifta en del eftersom klimatsystemet är så komplext, men modellerna har efterhand förbättrats. I flera grundläggande avseenden stämmer olika modellberäkningar nu väl överens med varandra och med klimatets hittillsvarande utveckling.



Del av klimatmodell (s. 90).

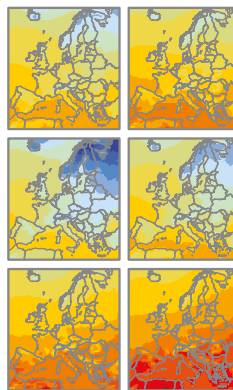
## Klimatet under återstoden av seklet

8

s. 94–113

Eftersom flertalet växthusgaser är mycket långlivade kan växthuseffekten fortsätta att förstärkas under hela tjugohundratalet även om utsläppen skulle börja minska. Enligt genomsnittresultaten av beräkningar med olika scenarioer kommer jordens medeltemperatur mot seklets slut att vara 1,6–4,3 grader högre än den var i slutet av 1800-talet. I Sverige lär uppvärmningen bli något större än det globala genomsnittet, i synnerhet vintertid. Om hundra år skulle det kunna vara lika varmt i Sydsverige som det nu är i Frankrike.

Vinternederbörden väntas öka påtagligt i hela Europa utom Medelhavsområdet. I de nordiska länderna kan nederbörden öka även sommardag, men i övriga Europa väntas minskade regnmängder under den årstiden. Sydeuropa riskerar svår hetta och torra på sommaren. Havet kommer att fortsätta stiga, av allt att döma i accelererande takt.



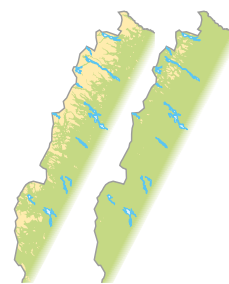
Temperatur i Europa nu och i slutet av seklet (s. 101).

## Klimatförändringarna och naturmiljön

9

s. 114–129

Många växt- och djurarter kan få det svårt att hinna anpassa eller förflytta sig i takt med kommande klimatförändringar, och en del av dem riskerar därför att slås ut. Ekosystemen kommer gradvis att förändras, en del av dem kanske till oigenkännlighet. Till de hotade ekosystemen hör Skandinavien kalfjällsområden – som kan krympa mycket kraftigt genom att skogen expanderar mot allt högre höjd över havet – samt Östersjön, vars salthalt kan sjunka om nederbörden ökar i Nordeuropa. Världen över påverkas havslevande organismer också av att koldioxidutsläppen försurar havsvattnet.



Svenska kalfjäll nu och i en varmare framtid (s. 123).

## Klimatförändringarna och samhället

10

s. 130–151

De närmaste decenniernas klimatförändringar kan medföra att jordbruksproduktionen stiger i tempererade områden men minskar i tropikerna. I Sverige och andra nordliga trakter gynnas även skogsodlingen, men på längre sikt kan både jord- och skogsbruk missgynnas inom allt större delar av världen. Stora förändringar är också att vänta för fiske och turismnäring. Energiåtgången för bostadsuppvärmning minskar, men det motverkas av ett ökat behov av luftkonditionering – extrem värme har på senare år krävt många tusen dödsoffer enbart i Europa. Faran för översvämningar ökar längs många vattendrag och kuster. Sammantaget kan klimatförändringarna få både positiva och negativa följder i Sverige, men med största sannolikhet blir de övervägande till nackdel för världsbefolkningen i stort, vilket lär få negativa återverkningar även i vårt land.



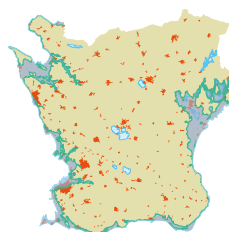
Vintersport med förhinder (s. 139).

## Bortom år 2100

11

s. 152–161

Mycket talar för att uppvärmningen fortsätter också bortom år 2100. Tillgångarna på fossila bränslen är så stora att vi på längre sikt skulle kunna åstadkomma en betydligt kraftigare klimatpåverkan än den som förutses under innevarande sekel. Riskerna ökar i så fall för oväntade och dramatiska störningar i klimatsystemet. Havsnivåns höjning kommer att fortgå i årtusenden även om utsläppen skulle börja minska relativt snart. Sett i den tidsskalan skulle havet kunna stiga med flera tiotal meter. Också temperaturen på jorden lär förbli förhöjd i tusentals år, oavsett när människans klimatpåverkan upphör.



Skåne under tio meter vatten (s. 158).

## Vad kan vi göra?

12

s. 162–177

Just på grund av att människans klimatpåverkan får så långvariga effekter är det angeläget att vi reducerar den snabbt. Detta kan i praktiken inte åstadkommas på annat sätt än genom minskad användning av fossila bränslen. Delvis kan vi få denna minskning till stånd med hjälp av ny teknik, men i längden krävs också förändringar av enskilda människors livsstil. Sådana kan vara svåra att uppnå, men ekonomiska styrmedel kan vara en effektiv hjälp. Internationella förhandlingar om utsläppsbegränsningar bedrivs sedan 1992 inom ramen för FN:s klimatkonvention.

Vi kan inte undvika en fortsatt förändring av klimatet, men vi kan fortfarande påverka förändringens storlek – vi har de kunskaper och redskap som behövs. I viss mån kan vi också anpassa oss till ett nytt klimat.



Solcellsanläggning i Spanien (s. 166).

## Övrigt innehåll

Litteratur 178

Register 183

## Faktarutor

Växthus fungerar på annat sätt än atmosfären 23

Vad gör en gas till växthusgas? 25

En paus i uppvärmningen? 37

Felkällor i klimatstatistiken 40

Extrema väderhändelser sedan år 2000 46

FN:s klimatpanel IPCC 51

Kunskapen om växthuseffekten och människans klimatpåverkan – en kort historik 56

Styrs temperaturen av koldioxidhalten – eller tvärtom? 63

Torvtäkt och torvförbränning 70

Planetär ingenjörskonst 82

Tre slutsatser om klimatmodeller 92

Stormen Gudrun – Sveriges svåraste naturkatastrof 136

Extrem sommarheta i Europa – en företeelse som inte längre är unik 149

Klimatförändringar som orsak till konflikter och migration 150

Maten och klimatet 168

## Förkortningar

AOGCM	atmosphere–ocean general circulation model (kopplad klimatmodell)
BNP	bruttonationalprodukt
CCS	carbon capture and storage
CFC	klorfluorkarboner
ENSO	El Niño–Southern Oscillation
ESM	earth system model (jordsystemmodell)
FC	fluorkarboner
GCM	global climate model (global klimatmodell)
GWP	global warming potential
HCFC	klorfluorkolväten
HFC	fluorkolväten
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (FN:s klimatpanel)
NAO	Nordatlantiska oscillationen
PFC	se FC
ppb	parts per billion (miljarddelar av totala luftvolymen)
ppm	parts per million (miljondelar av totala luftvolymen)
RCM	regional climate model (regional klimatmodell)
RCP	representative concentration pathway
SMHI	Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut
UNEP	United Nations Environmental Programme (FN:s miljöprogram)
WMO	World Meteorological Organization (Världsmeteorologiska organisationen)



Säter

Hedemora

Avesta

Norberg

Fagersta

Skinnskatteberg

Surahammar

0 5  
km

# I Inledning

I SLUTET AV JULI 2014 rådde värmebölja i Sverige. På många håll nådde dagstemperaturen över 30 grader. Dessutom var det torrt, och i Västmanland bedömdes risken för skogsbrand som extremt stor. Den 31 juli började det brinna på ett hygge väster om Sala. Det var en gnista från en skogsmaskin som hade antänt det fnösktorra riset på marken. Maskinföraren försökte släcka, men snart brann ett område på 30 gånger 30 meter. Då kallade han på hjälp, men hygget låg avsides, och det dröjde mer än en timme innan räddningspersonal var på plats. Det blåste kraftigt, och branden hade under tiden snabbt spridit sig. Några brandbilar tvingades backa eftersom de möttes av en vägg av eld.

När den här satellitbilden togs, mitt på dagen den 4 augusti 2014, hade skogsbranden i Västmanland pågått i fyra dygn. Det brunna området (markerat med en gul linje) var då mer än en halvmil brett.

Just den här dagen blev vädret rekordvarmt och extremt torrt.

Branden började sprida sig explosionsartat, och bara några timmar efter att bilden togs hade den fördubblats i omfattning (se den röda begränsningslinjen).

– Underlag från Myndigheten för samhällsskydd och beredskap 2014.

I Sverige är skogsbränder i vår tid betydligt mindre vanliga och mindre omfattande än i områden med ett torrare och varmare klimat. Under torra somrar förr i tiden brann skogen ofta även i vårt land utan att någon kunde göra mycket åt saken. Dagens effektiva brandbekämpning brukar emellertid kunna begränsa de brunna arealerna i Sverige till på sin höjd några tiotal kvadratkilometer per år, vilket bara motsvarar någon hundradels procent av landets totala skogsareal. Men branden i Västmanland visade sig bli något helt annat än det vi hade hunnit vänja oss vid.

Inom två timmar efter larmet brann ett kilometerlångt område, och röklukten gick redan att känna i Sala två mil därifrån. Mot kvällen var ett trettio-tal brandmän i arbete, och en helikopter inledde vattenbombning. Under de följande dygnen kompletterades räddningsstyrkan efterhand med fler brandmän, militär, personal från polisen och andra myndigheter, hemvärn, lantbrukare och andra frivilliga samt en mängd materiel, däribland ytterligare ett dussintal helikoptrar. Upprepade försök gjordes att ringa in branden med hjälp av brandgator, vattenbegjut-

ning och skyddsavbränning, men de förmådde inte hindra elden från att ta sig runt eller över begränsningslinjerna. Efter tre dygn hade brandområdet vuxit till 27 kvadratkilometer, och brandröken hade spridit sig över stora delar av Mellansverige. Räddningsledningen begärde nu förstärkning med vattenbombplan från utlandet.

På eftermiddagen den 4 augusti förvärrades situationen dramatiskt. Temperaturen steg till uppåt 35 grader, vilket bidrog till att luftfuktigheten sjönk till extremt låga nivåer. Samtidigt började det blåsa igen, och branden fick därigenom ett explosionsartat förlopp. Upphettad luft steg mot höjden med sådan kraft att vindarna nere vid marken lokalt närmade sig stormstyrka – branden hade börjat skapa sitt eget väder.

Det blåste så hårt att träd vräktes omkull och brinnande flagor flög flera kilometer. Branden tog sig på så sätt tvärs över sjöar som ditills hade hindrat dess spridning. Tidvis avancerade brandfronten upp till 80 meter per minut. Flera skogsarbetare blev omringade av elden och måste undsättas med helikopter. Två personer i en timmerbil blev fast bland lågorna – en av dem kunde räddas med svåra brännskador, medan den andre senare påträffades död.

Ingenting kunde under de här omständigheterna hejda branden. Inom loppet av några timmar spred den sig över 140 kvadratkilometer och blev därmed den största som ägt rum i Sverige i modern tid.

Själva brandområdet var nästan obebott, men ett tusental personer i närliggande samhällen tvingades under eftermiddagen eller kvällen lämna sina hem. Nästan tvåtusen nötkreatur och får evakuerades från gårdarna i grannskapet. Räddningsledningen började också förbereda evakuering av Norbergs 4 500 invånare. Elden hade under dagen ryckt mer än en mil närmare samhället.





JENS LESTRADE / TT NYHETSBYRÅN

I den hetta och blåst som rådde den 4 augusti 2014 fanns det ingenting som förmådde hindra Västmanlandsbrandens framfart.

Mot natten upphörde branden i stort sett att expandera, men brandfronten hade hunnit bli 60 kilometer lång och var fortfarande inte säkrad. Det tog ytterligare en vecka innan branden helt var bringad under kontroll. Under den tiden medverkade fyra franska och italienska vattenbombplan i släckningsarbetet. Sammanlagt flög de många hundra vändor, varje gång med sex ton vatten som de skopat upp från en sjö i närheten och släppte ned över brandområdet. På marken var flera hundra personer engagerade i brandbekämpningen.

Ändå var det framför allt en övergång till svalare och fuktigare väder som hejdade brandens expansion och till sist gjorde det möjligt att släcka den.

## En värmebölja gör ingen klimatförändring

Den hetta och torra som underlättade eldens snabba spridning under de första branddygnen måste betecknas som exceptionell – flera orter i omgivningen noterade högre temperaturer än vad som någonsin tidigare registrerats där.

Värmerekord är något vi kan förvänta oss vid en global uppvärmning. Innebär det att Västmanlandsbrandens sällsynt stora omfattning och dramatiska utveckling bör ses som ett resultat av att människan har förändrat klimatet?

Inte nödvändigtvis. Om somrarna blir varmare är det visserligen rimligt att vänta sig intensivare värmeböljor och ökad brandrisk. Därför är det inte osannolikt att temperaturen i Västmanland vid månadsskiftet juli/augusti

2014 blev extra hög till följd av människans påverkan på klimatet, och att branden av just den anledningen fick större utbredning än den annars skulle ha fått. Ändå är det omöjligt att få visshet om sådana samband i ett enskilt fall som detta.

Också stormar och intensiva regn som orsakar översvämningar tolkas numera ofta som bekräftelser av att något har hänt med jordens klimat. En del händelser av sådana slag har utan tvekan blivit vanligare än förr, i varje fall på vissa håll i världen. Men ingen enskild vädersituation – om än aldrig så extrem – duger som underlag för slutsatsen att klimatet har förändrats, vare sig med eller utan människans medverkan.

Det här beror på att väder och klimat inte är samma sak. Vädet utgörs av temperatur, lufttryck, molnighet och andra egenskaper hos atmosfären i ett givet ögonblick. Väderförhållandena kan skifta från timme till timme och rentav från minut till minut. Klimatet å sin sida kan ses som en sammanfattning av hur vädet brukar vara beskaffat i ett visst område. En beskrivning av klimatet innefattar genomsnitt för temperatur och andra väderdata, men den anger också hur mycket dessa data i medeltal varierar under loppet av en dag, ett år eller ännu längre tid. Även statistik över extrema och ovanliga vädersituationer ingår i en komplett redogörelse för klimatet på en given plats.

Därför måste vi samla väderdata i åtskilliga år, kanske flera decennier, för att få en så god uppfattning om genomsnittsvädet och vädervariationerna att vi kan avgöra om de har börjat avvika från vad som förekommit tidigare. Först om så visar sig vara fallet kan vi sluta oss till att klimatet faktiskt håller på att förändras.

Att klimatet *kan* förändras är ställt utom allt tvivel. Vi vet också att det numera inte bara står i naturens utan också i vår egen makt att åstadkomma sådana förändringar. I den här boken ska vi se närmare på vad som kan påverka klimatet, vad som faktiskt har hänt i det avseendet hittills, hur människan skulle kunna förändra klimatet i framtiden, och vilka följder detta kan få för naturmiljön och samhället.

Vi ska också titta på de verktyg vi kan ta till för att minska vår klimatpåverkan. Åtskilliga av dem har redan tagits i bruk, men vi har mycket kvar att göra.

Den 6 augusti hade branden slutat sprida sig, men den var fortfarande inte under kontroll, och släckningsarbetet fortsatte.

Skog och andra tillgångar värda närmare en miljard kronor gick upp i rök när det brann i Västmanland.





## 2 Vad kan förändra klimatet?

VILL VI FÖRSTÅ vad som händer med klimatet kan vi aldrig nöja oss med att studera vad som äger rum uppe i luften. Atmosfärens och vädrets egenskaper är också beroende av egenskaperna hos sjöar och hav, snö- och istäcken, mark och vegetation – som i sin tur påverkas av hur atmosfären är beskaffad. Hela detta system, *klimatsystemet*, är sammanknutet av oräkneliga inbördes inflytanden.

### Klimatsystemet är aldrig i jämvikt

Den motor som driver jordens klimatsystem är förstas solen. Genom att olika delar av planeten värms olika mycket av solljuset skapas stora temperaturskillnader från plats till plats. Klimatsystemet strävar ständigt efter att utjämna dessa skillnader genom att förflytta uppvärmd luft och uppvärmt havsvatten till svalare trakter. På så sätt uppkommer vindar, havsströmmar, högtryck och lågtryck, som i sin tur påverkar fördelningen av moln, nederbörd och andra väderfenomen.

Tillförseln av solenergi till en viss plats på jordytan förändras hela tiden på grund av jordens rotation kring sin axel och kretsloppet kring solen. Temperaturen på marken och i de lägre luftlagren reagerar inom loppet av timmar eller dygn på hur instrålningen av solljus varierar, men andra delar av klimatsystemet – inte minst djuphavet – kan behöva decennier eller sekler för att anpassa sig till yttre förändringar av det slaget.

Jordens klimat är inte bara beroende av vad som händer i luften utan också av samspelet mellan atmosfär och hav, is, snö, mark och växtlighet.

Klimatsystemet är alltså komplext, det utsetts för varierande påverkan, och det reagerar på denna påverkan i vitt skilda tidsskalor. Ett system med sådana egenskaper befinner sig aldrig i perfekt jämvikt, och dess förändringar kan aldrig förutsägas med fullständig säkerhet.

### Oregelbundna skiftningar i vädret trots regelbunden yttre påverkan

Årstidsväxlingarna och andra huvuddrag hos klimatet brukar förbli likartade genom åren, men detaljerna i klimatsystemet – i all synnerhet vädrets lokala och kortsiktiga förändringar – kännetecknas av såväl kaos som regelbundenhet. Solen, upphovet till alla väderförändringar, vandrar nästan exakt samma vägar över himlen år efter år, men ändå upprepar sig vädret aldrig på precis samma sätt från ett år till nästa.

Med andra ord uppvisar klimatsystemet oregelbundna och svårförutsägbara *interna* variationer även när all yttre påverkan förblir regelbunden. Medeltemperatur, årsnederbörd och alla andra klimatfaktorer skiftar till synes slumpmässigt från år till år. Ett ovanligt varmt år kan följas av ett som är ovanligt kallt – eller av ett som är ännu varmare. Ändå går det i vissa fall att spåra mönster i dessa skiftningar. Här och var framträder storskaliga och fleråriga oscillationer (svängningar) i väderläget som återkommer på ett likartat sätt gång på gång – de tycks vara ”inbyggda” i jordens klimatsystem.

En av dessa naturliga svängningar kallas för *nordatlantiska oscillationen (NAO)*. Den yttrar sig som återkommande ökningar och minskningar av lufttrycksskillnaden mellan Atlantens centrala och nordliga delar. Kring Island är lufttrycket vanligen förhållandevis lågt, i synnerhet på vintern, medan det brukar vara högt kring Azorererna. Vissa vintrar är denna tryckskillnad ovanligt markant, och den driver då fram en

## Nordatlantiska oscillationen (NAO)

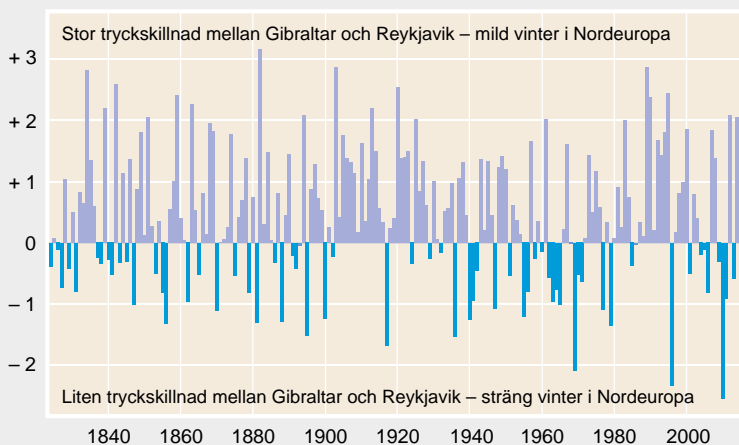
Stor tryckskillnad mellan centrala och norra Atlanten



Liten tryckskillnad mellan centrala och norra Atlanten



### NAO-index vintertid



Jordens klimatsystem genomgår ständiga skiftningar, även utan att vara påverkade av yttre störningar. Exempelvis förändras lufttrycks- och vindmönstren över Nordatlanten från ena året till det andra. Denna s.k. nordatlantiska oscil-

lation har en avgörande betydelse för Nordeuropas vinterklimat – den medför att vissa vintrar blir milda medan andra blir betydligt strängare.

– Data från Climate Research Unit, University of East Anglia.

kraftig västlig luftström från Atlanten in över Sverige och andra delar av norra Europa. Sådana vintrar blir milda och nederbördsrika hos oss. Andra år är lufttrycksskillnaden mellan centrala och norra Atlanten inte alls lika stor vintertid, och då påverkas Sverige i stället ofta av kall och torr luft från öster eller nordost.

En annan oscillation – den största och mest framträdande av dem alla – har blivit känd under beteckningen *ENSO* (El Niño–Southern Oscillation). Tydligast visar den sig som halvregelbundna förändringar av lufttryck, vindar, strömmar, vattentemperatur och nederbörd i de tropiska delarna av Stilla havet, även om den får återverkningar också i andra delar av världen. När svängningen når som längst åt ena hållet kan havsvattnet utanför Sydamerikas västkust vara flera grader varmare än normalt. Den situationen, kallad *El Niño*, medför exempelvis ökad nederbörd i Peru och Ecuador, samtidigt som Indonesien får mindre nederbörd än vanligt. I svängningens andra ändläge – *La Niña* – är förhållandena de omvända. I genomsnitt återkommer El Niño ungefär vart fjärde år.

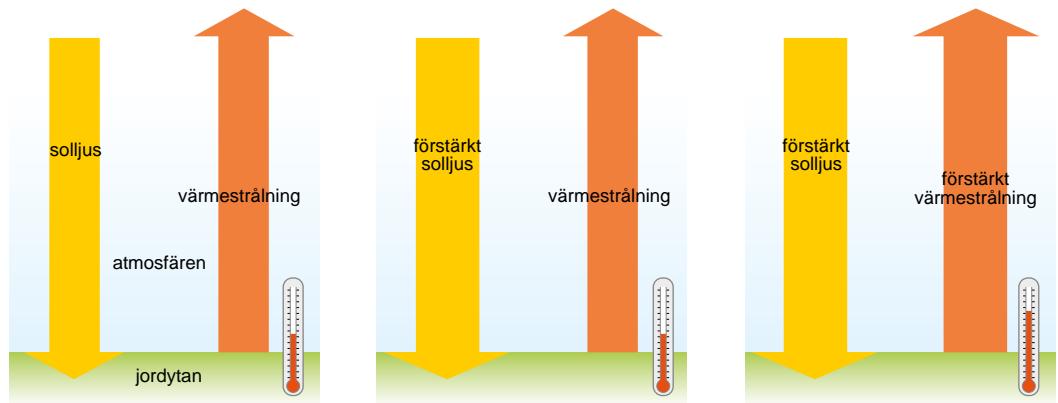
Oscillationer med en sådan periodlängd är knappast att betrakta som klimatförändringar i egentlig mening. Klimatet är en beskrivning av vädrets genomsnittliga egenskaper under loppet av decennier snarare än några få år (se s. 13), och därför kan även fleråriga svängningar i vädret rymmas inom ramen för ett oförändrat klimat.

Men mycket tyder på att klimatsystemet – och därmed vädret – också genomgår interna skiftningar som är så långvariga att de faktiskt kan räknas som klimatförändringar. Helt klart är att oscillationer såsom NAO och ENSO kan variera även sett i längre tidsskala än några få år. Exempelvis kan svängningen under flera decennier vara kraftigare eller svagare än vanligt. Den kan också under ganska lång tid ha balansen mer förskjuten åt det ena av sina båda ändlägen än normalt.

Långsiktiga förändringar av sådana slag skulle delvis kunna vara orsakade av yttre påverkan, men mycket talar för att de framför allt uppträder spontant. Till stor del beror de på långsamma omfördelningar i djupled av den solvärme som lagrats i världshavet.

## Balansen mellan solljus och värmestrålning

I dessa enkla principskisser försummar vi atmosfärens inverkan på både solljus och värmestrålning. Vi återkommer snart till atmosfärens roll, men då blir det genast mer komplicerat.



Normalt råder jämvikt mellan den mängd solljus som absorberas av jorden och den mängd värme som jorden avger mot rymden.

Jämvikten kan tillfälligt rubbas, exempelvis genom att mängden inkommande solljus av någon anledning ökar.

Då blir det varmare på jordytan. Värmestrålningen ut mot rymden ökar, och efterhand återställs på så sätt jämvikten.

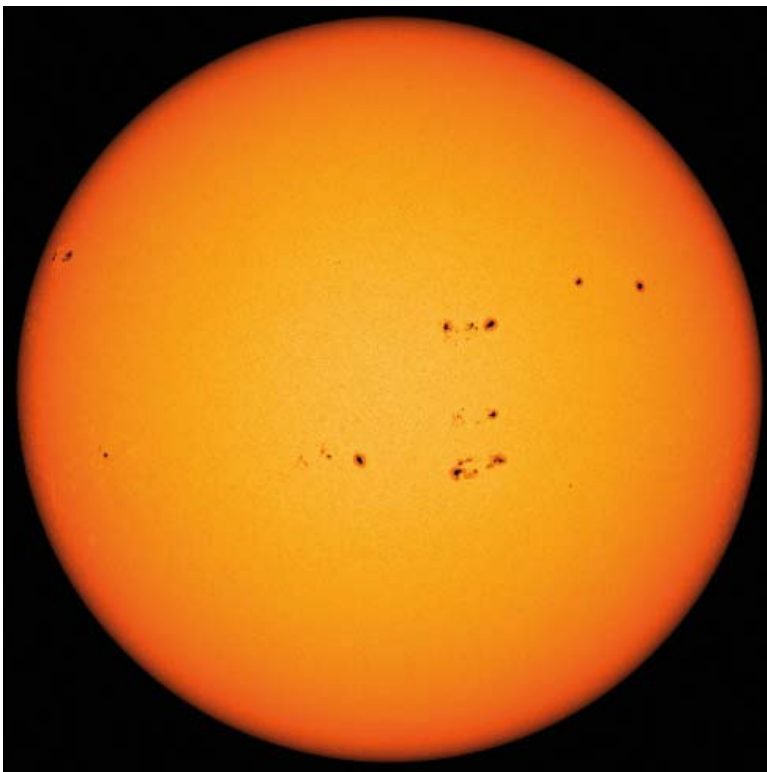
## Solens ljusstyrka är inte alldeles konstant

De yttre (externa) faktorer som kan förändra klimatet är av flera olika slag, men alla yttrar sig som långsiktiga ökning eller minskning – naturliga eller ej – av energiflödena genom atmosfären.

En stor del av den energi som jorden tar emot i form av solljus absorberas av mark och vatten och blir omvandlad till värme. All denna värmeenergi måste förr eller senare återsändas ut i rymden i form av värmestrålning; i annat fall skulle det ständigt bli allt varmare vid jordytan.

För det mesta råder i stort sett balans mellan inkommande och utgående energimängder, men det händer också att balansen rubbas. Exempelvis skulle det inkommande solljuset av en eller annan anledning kunna förstärkas. I så fall stiger temperaturen på jorden, och därmed ökar också värmeutstrålningen. Detta fortsätter tills utstrålningen har nått upp i jämnhöjd med den förhöjda instrålningen. Då är balansen återställd, men på en högre nivå än tidigare – klimatet har blivit varmare.

Vi vet numera att solens ljusstyrka faktiskt inte är alldeles konstant. Antalet fläckar på solytan varierar i en ganska regelbunden cykel, med ett maximum ungefär vart elfte år. När solfläckarna är talrika förekommer också andra störningar på solytan i ökat antal – man brukar säga att *solaktiviteten* är hög. Nettoresultatet är en viss förhöjning av den totala energiutstrålningen från solen. Förändringarna under loppet av en elvaårscykel är små, men det utesluter inte att solens ljusstyrka kan variera kraftigare sett på längre sikt.



NASA / SDO

När solfläckarna är många kunde man tro att solen lyser svagare än annars. Det är i själva verket tvärtom, eftersom andra

delar av solytan då lyser ovanligt starkt. – Solen 17 april 2014, då solaktivitetens elvaårscykel senast nådde sin topp.

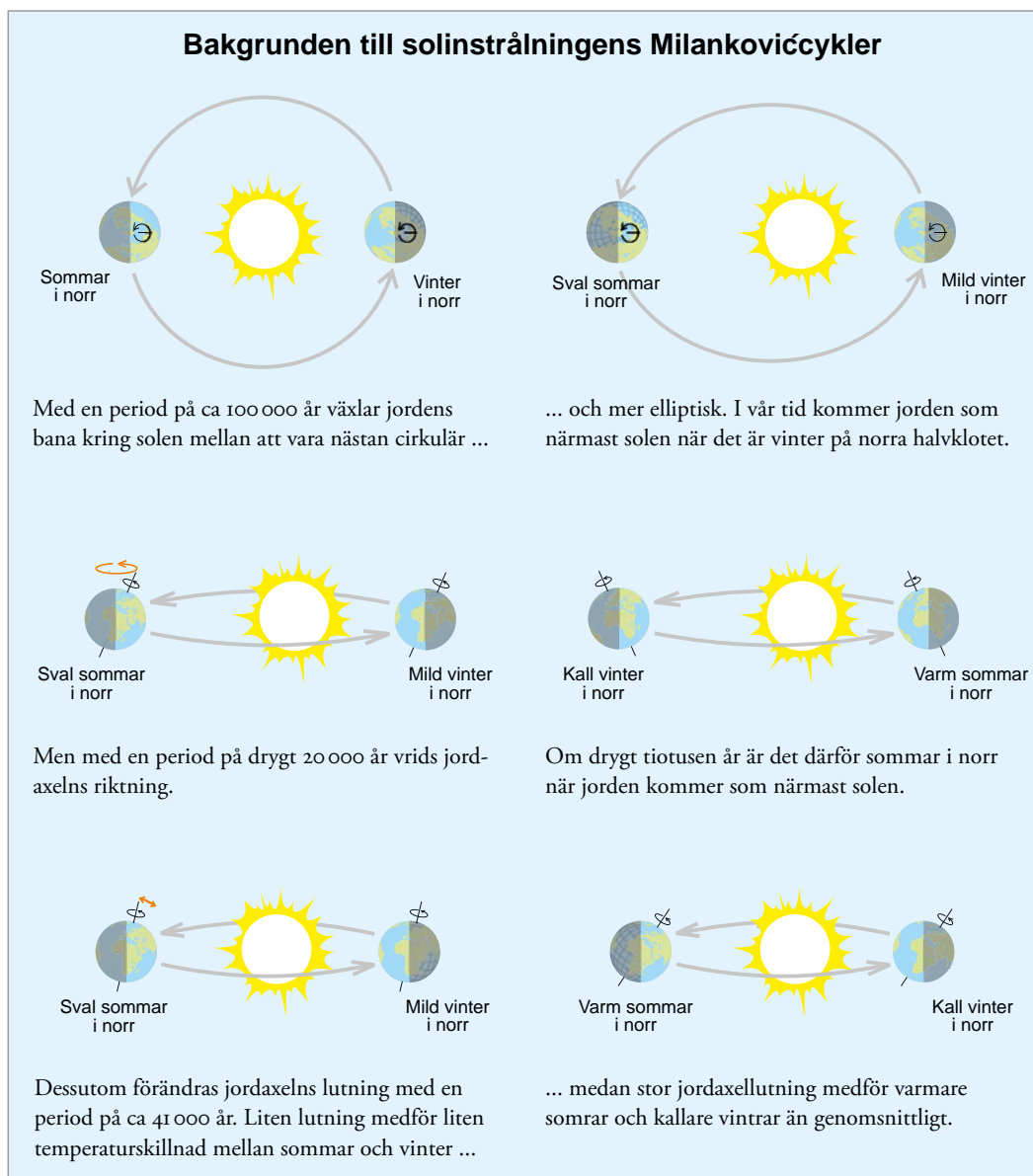
## Solinstrålningen påverkas av jordens läge och rörelser

Instrålningen av solenergi till jordytan påverkas inte bara av solens egen ljusstyrka utan också av långsamma men regelbundna förändringar av jordens läge och rörelser i förhållande till solen:

- *Jordens bana runt solen*, som för närvarande är nästan cirkulär, blir emellanåt mer elliptisk (avlång). Förändringarna av banans form äger rum med en period på nästan 100 000 år. När jordbanan är påtagligt elliptisk varierar avståndet mellan jorden och solen ganska mycket under årets lopp. Då får det stor betydelse vid vilken tid på året jorden befinner sig som närmast solen i sin bana. Om detta sker när det råder sommar på norra halvklotet har somrarna där förutsättningar att bli varmare än

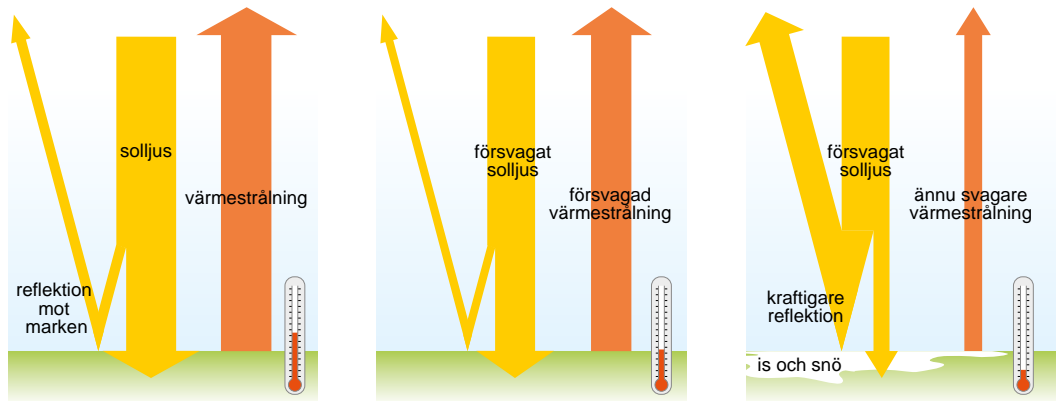
genomsnittligt. Å andra sidan blir solinstrålningen i så fall svagare än genomsnittligt vintertid, eftersom jorden vid den årstiden når sitt största avstånd från solen. På södra halvklotet blir förändringarna de omvända.

- Den tidpunkt då jorden passerar närmast solen i sin bana förskjuts något från år till år. För tiotusen år sedan inföll den under norra halvklotets sommarsäsong, men i våra dagar inträffar den i början av januari. Det här beror främst på att *jordaxelns riktning* är föränderlig. För närvarande pekar jordaxeln ungefär mot Polstjärnan, men under årtusendenas lopp vrider den sig runt i en stor cirkel. Först om drygt 20 000 år är den tillbaka i sin nuvarande riktning.
- Därtill förändras *jordaxelns lutning* i förhållande till banan runt solen. I dagsläget uppgår lutningen till 23,5°, men den är sakta på väg



## Inverkan av is och snö på jordens strålningsbalans

Liksom på s. 17 försummar vi här atmosfärens inverkan på flödena av ljus och värmestrålning till och från jordytan.



En del av det solljus som når jorden reflekteras från marken och återvänder ut i rymden utan att ha värmt upp jordytan.

Om mängden inkommande solljus minskar kommer temperaturen vid jordytan att sjunka.

Då ökar förekomsten av is och snö, vilket medför att en större andel av solljuset reflekteras utan att ha värmt upp jordytan. Det blir ännu kallare.

### Olika ytors albedo (%)

Täta moln	70–90
Tunna moln	35–50
Nyfallen snö	75–95
Äldre snö	55
Havsis	30–40
Torr sand	20–30
Gräs	15–20
Skog	5–10
Bar jord	5–15
Vatten (belyst rakt uppifrån)	3

Moln- och snötäcken reflekterar merparten av det ljus som träffar dem, medan däremot öppet vatten absorberar nästan allt inkommande ljus.

– Från Met Office.

att minska. Den varierar med en period på ca 41000 år, som mest mellan 22° och 24,5°. Ju större lutningen är, desto större blir skillnaderna i solinstrålning och temperatur mellan vinter och sommar.

Förändringarna av jordens bana och jordaxelns riktning och lutning har bara obetydlig inverkan på den totala mängd solljus som jorden tar emot under loppet av ett år. Däremot ger de alltså upphov till långsamma, cykliska variationer i solinstrålningens fördelning mellan olika årstider och olika delar av jordklotet. Dessa *Milankovićcykler* har fått namn efter en serbisk astronom och matematiker som studerade dem på 1930-talet och teoretiskt visade att de borde kunna orsaka avsevärda klimatförändringar.

Milanković påpekade exempelvis att sommartemperaturen på norra halvklotet bör kunna bli osedvanligt låg när jordaxelns lutning är liten samtidigt som jordbanan är påtagligt elliptisk och sommaren inträffar när jorden står som längst från solen. Långt uppe i norr kan somrarna då rentav bli så svala att föregående vinters snö- och istäcken aldrig hinner smälta innan det blir vinter igen. På så sätt skulle en istid kunna ta sin början.

Jordbanans form och jordaxelns riktning kan beräknas med stor noggrannhet miljontals år framåt och bakåt i tiden. Med samma noggrannhet kan man därmed också rekonstruera solinstrålningens Milankovićcykler i det förflutna och förutsäga dem långt in i framtiden.

## Snö, vegetation och moln inverkar på jordens reflektionsförmåga

Egentligen är solinstrålningens cykliska variationer inte så kraftiga att de på egen hand kan ge upphov till växlingarna mellan istider och varmare perioder. Det finns emellertid flera *återkopplingar* som kan förstärka en måttlig klimatförändring. Dit hör ökning eller minskningar av jordytans *albedo*, dvs. dess förmåga att reflektera ljus.

Snö och is är betydligt ljusare – och har därför större reflektionsförmåga – än barmark eller öppet vatten. Om temperaturen sjunker får snö- och istäckena ökad utbredning och förlängd varaktighet. Då kommer en större andel av det inkommande solljuset att återkastas ut i rymden i stället för att absorberas av jordytan och omvandlas till värme. Följden blir att temperaturen sjunker ytterligare, med än mer vidsträckt och långlivad snö- och istäcken som resultat – och kanske i förlängningen en ny istid.

I viss mån påverkas jordytans reflektionsförmåga även av vilken vegetation som växer där. Öppen, gräsbevuxen terräng reflekterar i allmänhet mer ljus – dvs. har högre albedo – än exempelvis barrskog. Öknar är vanligen ännu ljusare än bevuxen mark.

Via sin påverkan på jordytans albedo kan därför såväl människans markanvändning som naturliga vegetationsförändringar inverka på klimatet.

Ett molntäcke kan reflektera merparten av det inkommande solljuset redan uppe i atmosfären, och molniga dagar är ju för det mesta svalare än soliga dagar. Om den genomsnittliga molnigheten av någon orsak ökar eller minskar kan det alltså få påtagliga följder för temperaturklimatet vid jordytan. Men det är ingalunda självklart att en ökning av molnigheten sänker medeltemperaturen för hela dygnet. Molnen utgör nämligen också en effektiv spärr för den värmestrålning som jordytan avger mot rymden. Mulna nätter brukar av den anledningen vara mildare än stjärnkla nätter.

Nettoeffekten av ökad molnighet blir för det mesta en viss sänkning av dygnets medeltemperatur, åtminstone så länge det handlar

om låga moln. En ökning av mängden cirrus (fjädermoln) och liknande moln på hög höjd i atmosfären kan emellertid åstadkomma en temperaturhöjning.

## Partiklar kan verka avkylande – men också uppvärmande

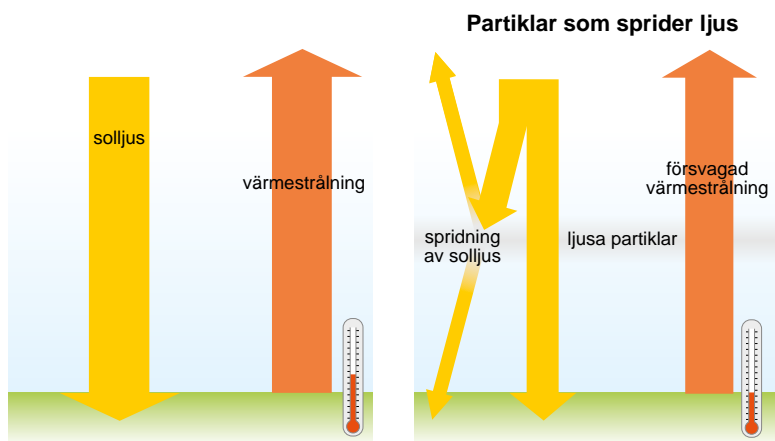
Även i molnfritt väder hejdas en del av solstrålningen innan den har nått ned till jordytan. Det beror bland annat på att luften alltid innehåller mikroskopiska *partiklar*, i typiska fall med en diameter kring en tusendels millimeter eller mindre. Partiklar av den storleken brukar ha en avsevärd förmåga att sprida ljus, dvs. att ändra ljusets riktning. En viss andel av det inkommande solljuset blir på så sätt avlänsad tillbaka ut mot rymden utan att ha bidragit till uppvärmningen av jorden.

En ökning av mängden partiklar i atmosfären får därför i allmänhet en avkylande verkan vid jordytan, något som tydligt kan visa sig i samband med stora, explosiva vulkanutbrott. Sådana eruptioner kan föra upp enorma mängder gasformig svaveldioxid till stratosfären, dvs. till höjder på 10–15 km och däröver. Större delen av svaveldioxiden omvandlas snart till fasta, partikelburna sulfatföreningar. Sulfatpartiklarna kan hålla sig svävande på hög höjd i ett par år, och de sprider sig under den tiden kring hela jorden. Stratosfären blir på så sätt märkbart mindre genomskinlig än vanligt, och följden blir en global temperatursänkning som varar så länge partiklarna förblir luftburna.

Svaveldioxid når också ut i luften genom utsläpp från industrier och förbränningsanläggningar, och därför bidrar även människan till luftens innehåll av sulfatpartiklar. De partiklar som har ett sådant ursprung håller sig i troposfären, dvs. på höjder understigande 10–15 km. Flertalet når bara ett par kilometer över jordytan. Inom några dygn eller på sin höjd några veckor lämnar de atmosfären, framför allt genom att de fångas upp av regn eller annan nederbörd. De får därför aldrig global spridning, men regionalt – i folk- och industritäta delar av världen – kan de ha en avkylande verkan som är mycket påtaglig.

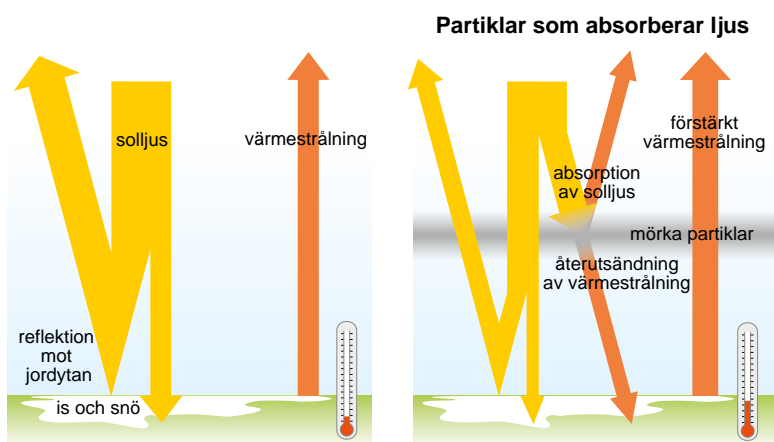
Å andra sidan kan förbränningsutsläpp också innehålla stora mängder sotpartiklar. Sotets svarta färg innebär att sådana partiklar absorberar ljus snarare än sprider det. Om de lägre

### Inverkan av partiklar på jordens strålningsbalans



Ett skikt av sulfatpartiklar eller andra ljusa partiklar i luften kan sprida en del av det inkommande solljuset, dvs. få det att ändra riktning. Det ljus som

sprids tillbaka ut mot rymden medverkar inte till att hålla jordytan varm. Följden blir en viss avkylning.



Sotpartiklar och andra mörka partiklar kan i stället absorbera solljus och sedan återutsända den infångade energin som värmestrålning. En del av denna värmestrålning når jordytan och kan medföra

en viss uppvärmning. Effekten är mest märkbar inom is- och snötäckta områden, där större delen av solljuset skulle ha reflekterats ut i rymden om det inte hade fångats upp av partiklarna.



Den filippinska vulkanen Pinatubos utbrott år 1991 fyllde stratosfären med så mycket partiklar att hela jorden blev märkbart avkyld under de närmast följande åren.

luftlagren tillförs rikligt med sotpartiklar kan så mycket solljus fångas upp där att luften blir *varmare*, vilket i sin tur skulle kunna bidra till en uppvärmning av jordytan.

Partiklarnas inverkan på temperaturen är dessutom beroende av hur underlaget är beskaffat. Sotpartiklarnas förmåga att absorbera ljus får störst temperaturhöjande verkan över snö-, is- och molntäcken, där nästan allt in-

kommande solljus annars skulle ha reflekterats ut i rymden. På motsvarande sätt får sulfatpartiklarnas förmåga att avlämka ljus större avkylande verkan över öppet hav än över land, eftersom vattenytan normalt absorberar mera solljus än landområden.

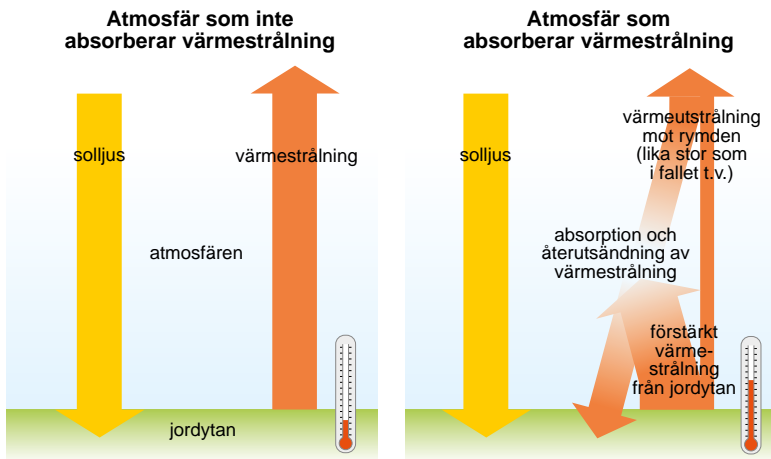
Genom att partiklar spelar en nyckelroll för molnens uppkomst kan de också indirekt inverka på klimatet. Molnen i den lägre atmo-

sfären består av mängder av mycket små vattendroppar som har bildats just kring partiklar. En förhöjd tillförsel av partiklar till luften bör ge upphov till ett ökat antal sådana droppar i molnen, som därigenom kan reflektera mer solljus och alltså får större avkylande verkan.

Om molndropparna blir fler lär det uppvägas av att deras genomsnittliga storlek avtar.

I så fall blir det svårare för dem att slå sig samman till regndroppar, vilket reducerar molnens förmåga att ge upphov till nederbörd. Följden skulle kunna bli att nederbördens geografiska fördelning förändras och att molntäckenas livslängd ökar. Alla dessa indirekta klimatteffekter av luftens partikelinnehåll är dock mycket svårbedömda.

## Växthuseffekten



Om värmestrålningen från jordytan obehindrat hade kunnat passera atmosfären på sin väg ut mot rymden skulle det ha varit mycket kallt vid jordytan.

I verkligheten innehåller atmosfären gaser som absorberar värmestrålning. En del av den uppfångade värmen återsänds mot jordytan, som på så sätt blir varmare än den annars skulle varit.

## Växthusgaserna släpper fram ljus men hejdar värmestrålning

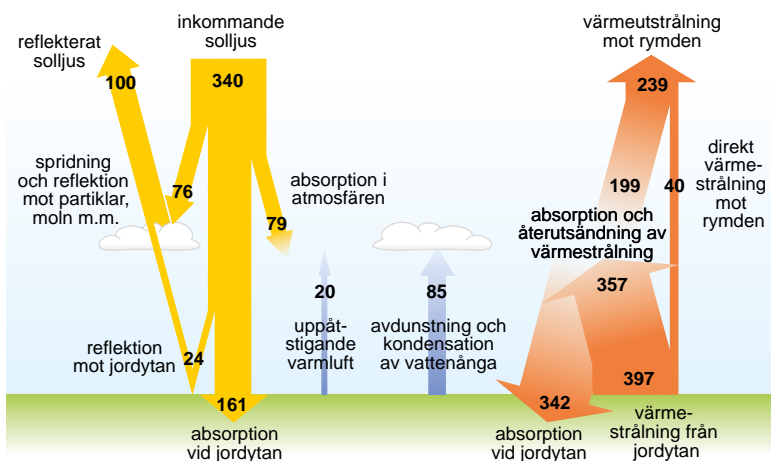
Gaserna i atmosfären hejdar mindre än en fjärdedel av det inkommande synliga ljuset från solen. Luftens dominerande beståndsdelar, kvävgas och syrgas, stoppar inte heller den utgående värmestrålningen i någon större utsträckning.

Men i små kvantiteter innehåller atmosfären också ett antal gasformiga ämnen som effektivt absorberar värmestrålning. Viktigast bland dem är vattenånga och koldioxid ( $\text{CO}_2$ ), men även metan ( $\text{CH}_4$ ), dikväveoxid ( $\text{N}_2\text{O}$ , även kallad lustgas), ozon ( $\text{O}_3$ ) och en rad andra gaser har en sådan förmåga. Tillsammans medför de att den lägre atmosfären är svär genomtränglig för värmestrålning. Om våra ögon vore känsliga för sådan strålning i stället för ljus skulle vi uppfatta omgivningen som ständigt insvept i dimma. Vi skulle behöva ta oss flera kilometer ovanför jordytan för att få någorlunda fri sikt utåt rymden.

De värmeabsorberande gaserna fångar upp merparten av den värmestrålning som avges från jordytan. Större delen av den uppfångade strålningen blir omgående återutsänd, men inte bara i den ursprungliga riktningen utan åt alla möjliga håll. Åtskilligt av värmen strålar sålunda tillbaka från atmosfären mot jordytan, som därigenom blir varmare än den skulle vara om den bara träffades av solljus. Denna förhöjning av temperaturen på jorden har blivit känd under benämningen *växthuseffekten*. De gaser som orsakar uppvärmningen genom sin inverkan på värmestrålningen i atmosfären kallas *växthusgaserna*.

Om jorden hade saknat atmosfär (eller om luften uteslutande hade bestått av gaser utan förmåga att absorbera värmestrålning eller kondenseras till moln) skulle den globala medeltemperaturen vid jordytan ha legat kring  $-19^\circ$ . Under sådana omständigheter hade liv av det slag vi känner till knappast varit möjligt här.

## Energiflöden i atmosfären



Alla de tidigare skisserna över flödena av ljus och värme i atmosfären är starkt förenklade. En något mer fullständig översikt över dessa energiflöden kan se ut som ovan. Här framgår bland annat att atmosfären tar emot energi inte bara genom att absorbera solljus och värmestrålning utan också via uppstigande

luft som har värmts nära markytan. Också den energi som går åt när värmestrålning från jordytan frigörs i atmosfären när vattenånga kondenseras i form av moln. Siffrorna anger genomsnittliga energiflöden år 2000–2010 uttryckta i  $\text{W}/\text{m}^2$ . – Data från Trenberth *et al.* 2009 och Wild *et al.* 2013.



## VÄXTHUS FUNGERAR PÅ ANNAT SÄTT ÄN ATMOSFÄREN

”Växthuseffekten” är numera en mycket väl etablerad benämning på atmosfärens förmåga att absorbera värmestrålning och därigenom hålla jordytan uppvärmd. Men egentligen haltar jämförelsen mellan växthus och jordatmosfär. Bådadera släpper visserligen in solljus som därigenom kan värma upp markytan. Att värmen blir kvar i ett växthus beror emellertid inte i första hand på att glasväggarna absorberar utgående värmestrålning utan på att de hindrar uppvärmd luft från att strömma iväg.



BJÖRN RÖHSMAN / N / IBL

Innehavaren av växthuset på bilden har öppnat ett par luckor i taket för att släppa ut en del av den varma luften och därigenom se till att temperaturen inte blir alltför hög. Att reglera jordens temperatur är dessvärre inte lika enkelt.

Luftens innehåll av värmeabsorberande gaser medför att den nutida medeltemperaturen i stället uppgår till nästan +15°. Denna kraftfulla växthuseffekt är till helt övervägande del naturlig – alla de viktigaste växthusgaserna har funnits i luften sedan jorden bildades.

Växthusuppvärmningen av jordytan innebär att värmeutstrålningen därifrån blir betydligt intensivare än den annars skulle ha varit. Ändå är det inkommande solljuset inte på något sätt förstärkt. Vad händer då med den tidigare omtalade balansen mellan inkommande och utgående energimängder? Jo, balansen upprätthålls genom att det mesta av den värmestrålning som lämnar jorden inte kommer direkt från ytan utan från atmosfärsskikt på flera kilometers höjd. Det är först där uppe som luften börjar bli så tunn och genomtränglig för värmestrålning att denna någorlunda obehindrat kan nå ut i rymden. Det är mycket kallare på sådana höjdnivåer än vid jordytan, och värmestrålningen som avges därifrån är följaktligen svagare än den som avges från ytan.

Vore det bara genom strålning som värmeenergi kunde förflyttas i atmosfären skulle temperaturen avta ännu snabbare mot höjden än vad som faktiskt sker – jordytan skulle vara varmare och de övre luftlagren kallare än de är i verkligheten. Men om luften nere vid ytan värms upp tillräckligt mycket blir den så lätt att den börjar stiga mot höjden i form av stora ”bubblor”. Mellan bubblorna sjunker samtidigt svalare och tyngre luft nedåt från högre nivåer. Denna omblandning, som kallas *konvektion*, jämnar delvis ut temperaturskillnaderna mellan olika luftlager.

Utjämningen kan bli särskilt effektiv ovanför vattenytor eller fuktig mark – när vatten avdunstar därifrån som ånga förbrukas energi, vilket får en avkylande verkan på jordytan. Den energin kan sedan frigöras i högre luftlager om ångan förs dit med stigande varmlufts-bubblor och där uppe kondenseras i form av moln.

Konvektion, avdunstning och kondensation medverkar på det här sättet till att solens och växthusgasernas uppvärmning av jordytan i sin tur höjer lufttemperaturen åtminstone en mil upp i atmosfären.

## Växthuseffekten håller på att förstärkas

Växthusgasernas stora inverkan på klimatet är anmärkningsvärd med tanke på att de uppträder i så låga halter. Vattenångan står för ca 0,4 procent av atmosfärens totala volym, medan övriga växthusgaser sammantagna upptar föga mer än 0,04 procent av luftvolymen. Det här

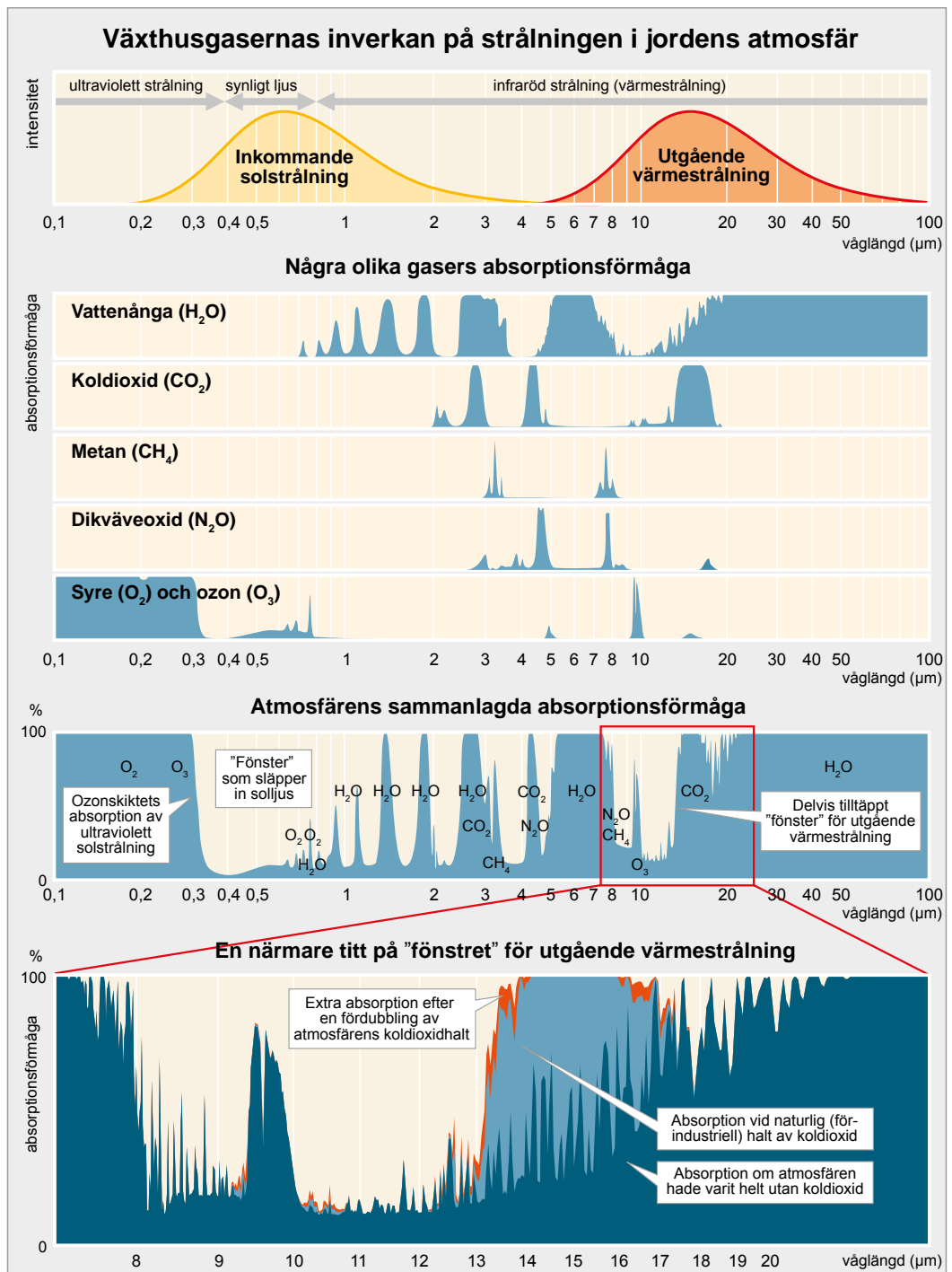
In- och utstrålningen genom jordens atmosfär äger rum på helt skilda våglängder. Eftersom solytan är mycket hetare än jordytan är inkommande solstrålning betydligt energirikare än den värmestrålning som jorden återsänder mot rymden, och ju mer energirik strålningen är, desto kortare är dess våglängd.

Gaserna i jordatmosfären är mer eller mindre genomskinliga för solljus, men några av dem kan absorbera långvägigare strålning. Det är de sistnämnda gaserna som ger upphov till atmosfärens växthuseffekt.

Tillsammans blockerar växthusgaserna en stor del av värmestrålningen från jordytan, men på vissa våglängder är luften lättgenomtränglig även för sådan strålning.

Koldioxid svarar för en betydande del av den naturliga växthuseffekten – gasen absorberar nästan all strålning av våglängder mellan 14 och 16 µm (mikrometer), där utstrålningen från jordytan är mycket intensiv.

– Efter Peixoto och Oort 1992. Data från MODTRAN.



Diagrammet närmast ovan kan ge intrycket att en fördubbling av atmosfärens koldioxidhalt får ganska obetydlig inverkan på växthuseffekten. Vid våglängderna 14–16 µm var absorptionen av värmestrålning total redan då koldioxidhalten låg på förindustriell nivå. En haltfördubbling ser bara ut att kunna göra nämnvärd skillnad vid intilliggande våglängder, där den naturliga absorptionen är ofullständig (se de röda fälten i diagrammet). Men inte ens vid de våglängder där absorptionen är total fångas all strålning upp för gott – den sänds ut på nytt och letar sig förr eller senare ut i rymden. Det är genom att *försvara* strålningens passage genom atmosfären som koldioxiden

åstadkommer en växthuseffekt. Haltfördubblingen gör det *ännu* svårare för strålningen att ta sig ut, även vid våglängderna 14–16 µm. Därigenom förstärker den växthuseffekten.

Vi kan jämföra med vad som händer när vi har ett sängtäck över oss. Täcket fångar upp *all* kroppsvärme; absorptionen är med andra ord total. Visserligen letar sig värmen efterhand vidare ut i rummet – annars skulle temperaturen ständigt stiga i sängen – men ingen värme passerar ohejdat tvärs igenom täcket. Som alla vet får vi det likafullt varmare med två täcken i stället för ett. Orsaken är att kroppsvärmen då får en ännu omständligare väg ut i omgivningen.

**Ingen koldioxid**  
Strålning kring 15 µm våglängd har en god chans att passera ohejdat ut i rymden. Inget bidrag till växthuseffekten.

**Koldioxid i naturlig halt**  
All strålning vid 15 µm absorberas men sänds ut igen och letar sig till sist ut i rymden. Påtagligt bidrag till växthuseffekten.

**Koldioxid i dubbel halt**  
Ännu svårare för strålning vid 15 µm att nå ut i rymden. Viss ytterligare förstärkning av växthuseffekten.

## VAD GÖR EN GAS TILL VÄXTHUSGAS?

Varför bidrar vissa gaser till växthuseffekten medan andra inte gör det? Svaret hänger samman med hur molekylerna som de olika gaserna består av är uppbyggda.

I alla molekyler vibrerar och roterar atomerna ständigt i förhållande till varandra. Hos många gaser medför dessa rörelser att molekylernas elektriska plus- och minusladdningar hela tiden ändrar tyngdpunkt. Molekyler med den egenskapen kan fånga upp strålning och därigenom övergå till ett energirikare tillstånd (kraftfullare vibrationer eller snabbare rotation). Skillnaderna i energi mellan molekylernas olika vibrations- och rotationstillstånd brukar vara sådana att det mest är infraröd strålning (värmestrålning) som absorberas på det här sättet.

Molekyler som bara innehåller två likadana atomer förblir emellertid helt symmetriska hur atomerna än rör sig. Hos dem håller sig plus- och minusladdningarnas tyngdpunkter ständigt kvar i molekylernas centra, vilket betyder att de inte kan fånga upp infraröd strålning. Kvävgas, syrgas och andra gaser som består av tvåatomiga, symmetriska molekyler bidrar därför inte till växthuseffekten.

Alla viktiga växthusgaser består av molekyler med tre eller flera atomer. Sådana molekyler är antingen asymmetriska redan till sin uppbyggnad – hit hör vattenånga, dikväveoxid och ozon – eller också kan de bli asymmetriska genom att vibrera på ett speciellt sätt. Ett exempel på det sistnämnda är koldioxidmolekylen, som är symmetriskt byggd men kan bli asym-

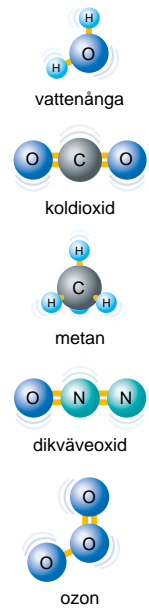
metrisk genom att de tre atomerna vibrerar i otakt eller ”vickar” fram och tillbaka i förhållande till varandra.

Ingen molekyl har möjlighet att röra sig hur som helst – precis som en gitarrsträng kan den exempelvis bara vibrera på vissa bestämda sätt som vart och ett svarar mot en given energinivå. Det betyder att molekylen bara kan absorbera strålning av just sådan energi att det motsvarar skillnaden mellan två energinivåer av det slaget. I stället för att fånga upp *all* värmestrålning kan molekylen med andra ord bara hejda strålning av en serie bestämda våglängder. Det är därför diagrammen på föregående sida över växthusgasernas absorptionsförmåga har ett så ”taggigt” utseende.

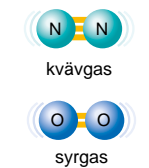
Alldeles exakt behöver våglängderna ändå inte stämma överens med molekylernas inboende energinivåer för att strålningen ska kunna absorberas. Som en följd av att molekylerna ständigt far omkring och kolliderar med varandra förskjuts och störs energinivåerna på så sätt att taggarna i absorptionsdiagrammen breddas. Bitvis flyter taggarna ihop till sammanhängande absorptionsband.

En molekyl som har fångat upp strålning gör sig snart av med överskottsenergin igen, antingen genom att återutsända strålning eller genom att ge en extra knuff åt en annan molekyl som den kolliderar med. I det sistnämnda fallet omvandlas energin till rörelseenergi. Luft som absorberar värmestrålning får på det här sättet ökad temperatur – ju snabbare luftens molekyler rör sig, desto varmare är den.

### Gaser med växthuseffekt



### Gaser utan växthuseffekt



Kvävgas- och syrgasmolekylerna förblir helt symmetriska hur de än vibrerar. Därför bidrar de inte alls till växthuseffekten, trots att de står för nästan 99 procent av atmosfärens innehåll.

betyder att människan märkbart kan påverka växthuseffekten och därmed klimatet utan att behöva förändra atmosfärens sammansättning i grunden.

Som vi ska se längre fram har halterna av de naturliga växthusgaserna koldioxid, metan och dikväveoxid redan stigit påtagligt till följd av föroreningsutsläpp och förändrad markanvändning. Numera innehåller atmosfären dessutom ett stort antal nya, av människan

tillverkade gaser med mycket stor förmåga att absorbera värmestrålning. Växthuseffekten håller på att *förstärkas*.

Men halterna av naturliga växthusgaser var föränderliga redan innan människan började påverka dem. Av detta skäl – och flera andra därtill – har jordens klimat genomgått mycket kraftiga variationer i det förflutna. Dem ska vi se närmare på i nästa kapitel.



# 3 Klimatförändringar i förindustriell tid

ALLT SEDAN SOLEN bildades för nästan fem miljarder år sedan har den sakta men säkert vuxit i storlek. Därigenom har solljuset gradvis blivit allt intensivare. Ändå har klimatet på jorden knappast blivit varmare med tiden. När livet uppkom här för uppåt fyra miljarder år sedan var temperaturen förmodligen minst lika hög som den är nu, trots att solen på den tiden lyste ungefär 30 procent svagare.

## Allt starkare solljus, allt svagare växthuseffekt

Värmen i jordens tidiga ungdom berodde på att atmosfären då hade helt andra egenskaper än i dag. Luften innehöll nästan inget syre, men däremot var halterna av växthusgaserna koldioxid, metan och ammoniak mångfalt högre än de är nu. Resultatet blev en växthuseffekt av gigantiska mått, något som mer än väl kompenenserade för det bleka solljuset.

Sedan dess har livets utveckling förändrat jordatmosfärens kemiska sammansättning. Av störst betydelse var fotosyntesens uppkomst för ungefär tre miljarder år sedan. Havsvattnet fylldes av mikroorganismer som med hjälp av solljus och klorofyll tog upp koldioxid och frigjorde syrgas som avfallsprodukt. Luftens koldioxidhalt började sjunka, samtidigt som syrgashalten efterhand steg. Det här betyder att atmosfärens växthuseffekt sett på mycket lång sikt har minskat kraftigt, vilket till stor del har upphävt inverkan på jordens klimat av solljusets lika långsiktiga förstärkning.

Därmed är inte sagt att klimatet ens tillnärmelsevis har förblivit konstant under livets långa historia på jorden. Under större delen av denna tid tycks det ha varit betydligt varmare än det är i dag – hettan har varit tropisk inte bara

kring ekvatorn utan också ett gott stycke upp mot polerna. Emellanåt har det å andra sidan varit så kallt att stora delar av jorden blivit nedisad. Under den senaste årmiljarden har sådana kalla epoker återkommit med ett par hundra miljoner års mellanrum.

Den näst senaste nedisningsepoken nådde sin höjdpunkt under permperioden för knappt 300 miljoner år sedan. Därefter infann sig på nytt ett tropiskt klimat, och länge var jorden åter praktiskt taget fri från snö och is även i polartrakterna. Men för 40–50 miljoner år sedan började temperaturen än en gång sjunka, och efterhand har nedisningarna återkommit.

I takt med dessa förändringar av klimatet har också koldioxidinnehållet i atmosfären varierat. Under permperiodens istidsförhållanden tycks koldioxidhalten ha hållit sig i närheten av nutida nivåer, dvs. några hundra ppm (miljondelar av den totala luftvolymen), men i det varma klimat som rådde både före och efter denna istidsepok kan halten tidvis ha legat kring tusen ppm eller mer.

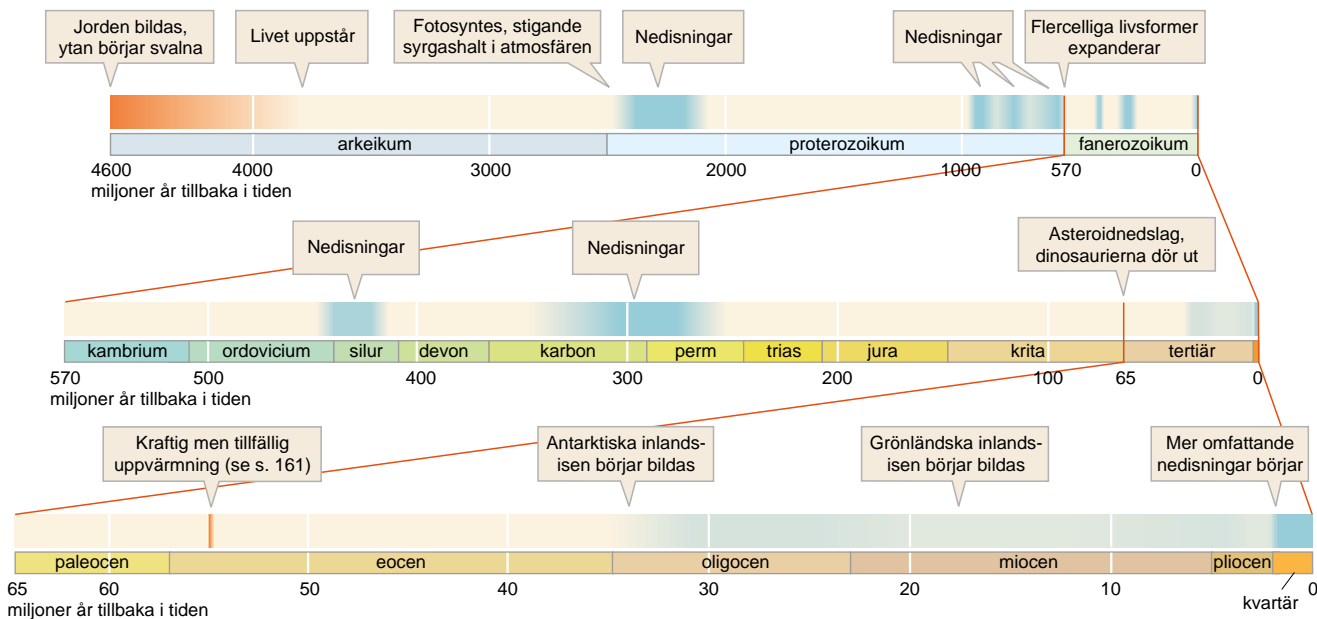
## Kontinenternas vandringar har skapat förutsättningar för nedisning

Växthuseffekten har alltså ingalunda avtagit i jämn takt sedan jorden var ung. I stället har den genomgått kraftiga variationer under årmiljonernas lopp, vilket bidragit till de klimatförändringar som har ägt rum i samma tidsskala. Detta behöver inte betyda att växthuseffektens variationer har varit den primära *orsaken* till klimatförändringarna i förgången tid. Tvärtom är det sannolikt klimatförändringarna som på ett eller annat sätt har fått koldioxidhalten att variera och som därigenom har förstärkt sig själva.

Den grundläggande orsaken till klimatets mycket markanta skiftningar i geologisk tids-

Jorden har under sin långa historia genomgått mycket stora klimatförändringar. Vid en del tidpunkter har jordytan täckts av is och snö; under andra epoker har den dominerats av tropisk växtlighet.

## Jordens klimat sett i geologisk tidsskala



Under större delen av jordens förflutna har klimatet varit betydligt varmare än det är i dag, men framför allt under den senaste årsmiljarden har värmen upprepade gånger avlösts av kyla och nedisning.

skala är snarare *kontinentalförskjutningen*, dvs. kontinenternas långsamma vandringar över jorden.

Snö och is kan inte ansamlas i några större mängder på jordytan annat än om det finns både land och hav i närheten av polerna. Rejäl vinterkyla och stabila snötäcken kan bara uppkomma på land, samtidigt som fuktig och sval luft från havet behövs för att snöfallen ska bli så rikliga och sommartemperaturen så låg att snötäckena blir bestående. Men så snart kontinenternas lägen uppfyller det villkoret finns förutsättningar för en temperaturnedgång. Avkylningen förstärks efterhand genom att allt mer av solljuset reflekteras när de snö- och istäckta områdena växer till (se s. 19).

Till det som har utlöst senare årsmiljoners utveckling mot ett kallare klimat hör sålunda att Antarktis – som länge legat nära sydpolen – efterhand har blivit helt omgivet av hav. Tidigare satt denna kontinent ihop med Australien och Sydamerika, vilket tvingade varmt havsvatten från tropikerna att strömma långt ned mot söder. Efterhand skildes Antarktis dock från de båda andra kontinenterna, först från Australien och för ca 35 miljoner år sedan också från Sydamerika. Det blev fritt fram för ett kretslopp av kalla havsströmmar hela vägen runt sydpolskontinenten, som därigenom isolerades från värmen kring ekvatorn, och det var då som den antarktiska inlandsisen började bildas.

Senare har dessutom den tibetanska högplattan och bergskedjor såsom Alperna, Himalaya,

Anderna och Klippiga bergen skjutit i höjden. Förändringar av det slaget kan påverka klimatet inte bara genom att snötäckena får ökad utbredning utan också genom att luftströmmarna i atmosfären tvingas in i nya banor.

Det finns tecken som tyder på att sådana omläggningar av luft- och havsströmmarna kan äga rum förhållandevis snabbt. Cirkulationsmönster som har bestått i årsmiljoner tycks kunna få helt och hållet förändrade egenskaper inom loppet av enstaka årtusenden eller ännu kortare tid, med drastiska klimatförändringar som resultat.

Med vissa avbrott fortskred temperaturnedgången på jorden även sedan den antarktiska inlandsisen hade bildats. Omkring 18 miljoner år före vår tid hade det blivit så kyligt också i Arktis att en inlandsis började växa till på Grönland.

För ungefär tre miljoner år sedan blev det ännu kallare, vilket sannolikt åtminstone delvis berodde på att cirkulationsmönstret i världshavet hade ändrats på nytt. Nordamerika och Sydamerika hade förenats av ett näs vid Panama, där det tidigare hade funnits ett öppet sund. Nu nådde avkylningen därhän att snötäckena blev kvar året om även i Nordeuropa, Sibirien och den nordamerikanska kontinentens nordligare delar. År för år ansamlades snö i allt mäktigare lager som efterhand packades samman och omvandlades till is. Gradvis blev inte bara Grönland utan också Skandinavien och flera andra landområden i norr nedtyngda av istäcken med

flera kilometers tjocklek. Efter ett uppehåll på hundratals miljoner år rådde åter istid på jorden.

I och kring de nedisade områdena i norr var årsmedeltemperaturen i typiska fall ett tiotal grader lägre än den nutida, och ibland blev det ännu kallare. Söder om istäckena utbreddes sig trädlös tundra långt ned i de centrala delarna av Eurasien och Nordamerika. Avkylningen var märkbar också nere kring ekvatorn, även om temperaturen där kanske bara blev ett par grader lägre än den som råder i tropikerna i dag. Världshavet stod tidvis dryga 100 m under sin nuvarande nivå, eftersom de nyttillkomna inlandsisarna i norr hade bundit stora vattenvolymer i frusen form.

### Solinstrålningen styr växlingar mellan istider och interglacialer

Istidsförhållanden har dominerat under hela *kvartärperioden*, den geologiska epok som inleddes med istäckenas tillväxt på de nordliga kontinenterna för uppåt tre miljoner år sedan och som fortfarande pågår.

Då och då har istidsklimatet emellertid brutits av kortare perioder med betydligt mildare klimat, *interglacialer*. Alla inlandsisar utom de antarktiska och grönländska har då smält bort, havet har stigit, och temperaturerna har närmat sig eller rentav överskridit nutida nivåer. Under den näst senaste interglacialen, en period kallad *eem* som började för ca 130 000 år sedan, blev det i nordliga trakter åtminstone två grader varmare än det är i dag. Havsytan tycks ha nått 5–10 m högre än den nutida nivån.

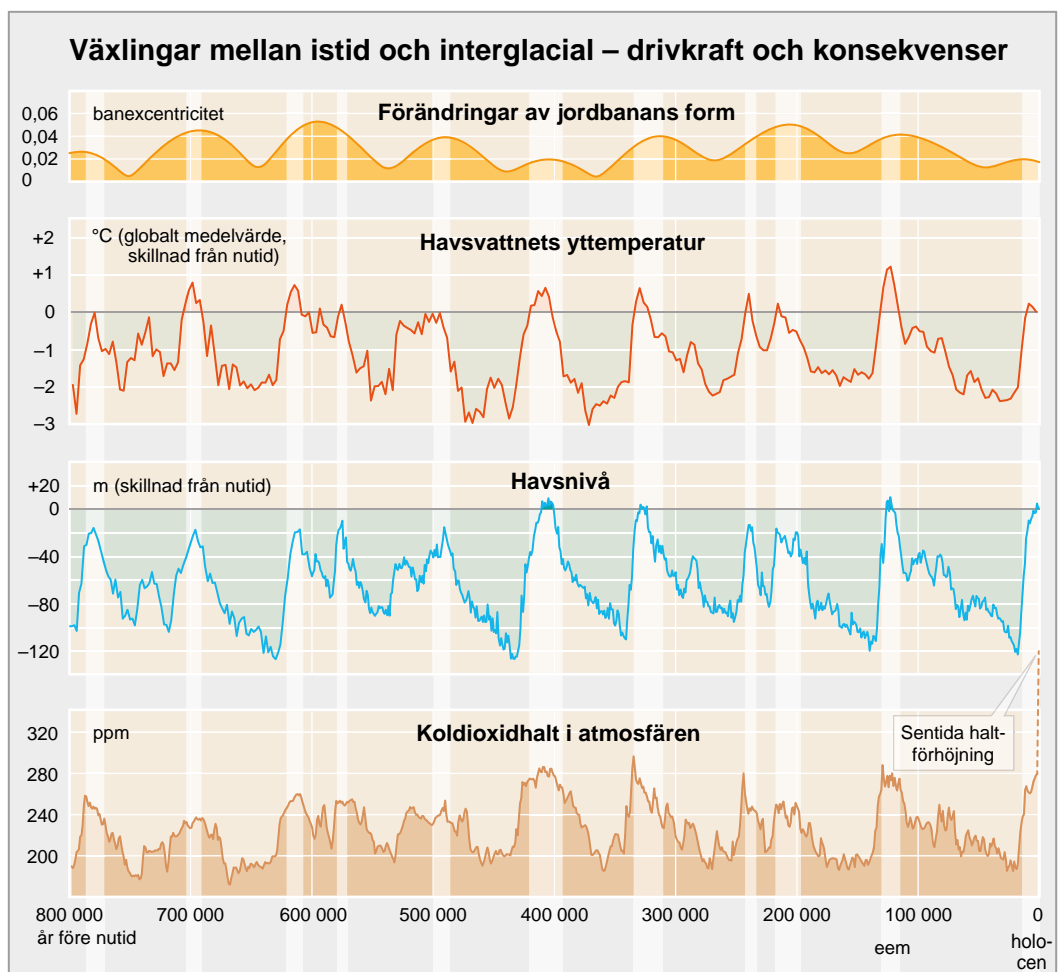
Ganska snart efter varje övergång till ett mildare klimat – inom loppet av tio- till tjugotusen år – har kylan och isarna likväl infunnit sig på nytt. Hittills under kvartärperioden har jorden förmodligen hunnit genomgå åtminstone ett tjugotal istider, åtskilda av mellanliggande interglacialer.

Den senaste årmiljonen har interglacialerna ganska regelbundet återkommit med ungefär 100 000 års mellanrum. Uppenbarligen har växlingarna mellan istider och interglacialer under denna tid framför allt gått i takt med den långsamma av solinstrålningens Milankovićcykler (se s. 18). Det är just under kyliga, istidsdominerade

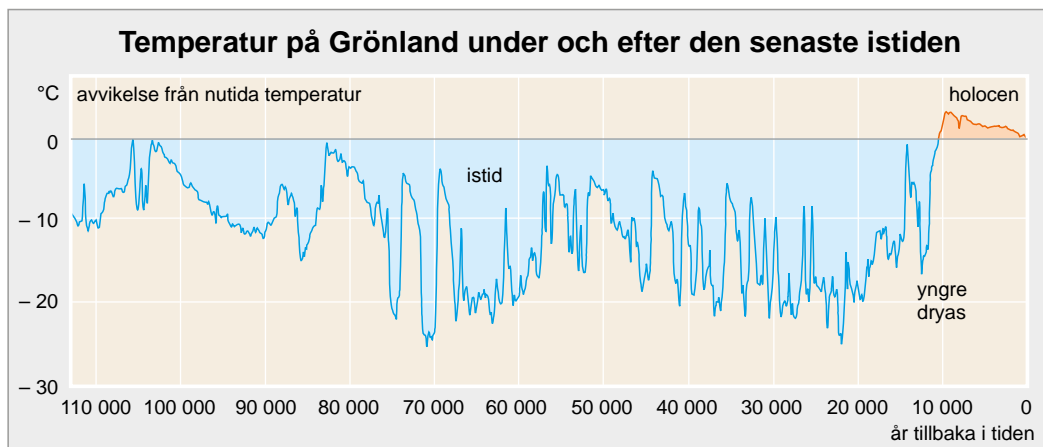
Kvartärtiden har kännetecknats av ständiga växlingar mellan istider och interglacialer (de sistnämnda markerade med ljusa band i figuren). Växlingarna har styrts av regelbundna variationer av solinstrålningen, bl.a. orsakade av förändringar av jordbanans form.

Temperaturväxlingarna har åtföljts av markanta förändringar av havsytnens nivå och av atmosfärens koldioxidhalt. Temperatur- och havsnivådata i figuren har rekonstruerats utifrån studier av havssediment, medan koldioxiddata bygger på analyser av borrhärdor från den antarktiska inlandsisen. Bilden visar också våra dagars snabba ökning av koldioxidhalten.

– Underlag från Lisiecki & Raymo 2005; IPCC 2013, fig. 5.3; Shakun *et al.* 2015.



Kring Nordatlanten tycks klimatet under gångna istider ha varierat betydligt mer än på andra håll i världen. Temperaturrekonstruktionen i diagrammet bygger på analyser av en borrhärna från Grönlands inlandsis. – Från Johnsen *et al.* 1995.



epoker såsom kvartärtiden som Milanković-variationerna får störst genomslag på klimatet. Effekterna på temperaturen av att solinstrålningen förändras blir då förstärkta genom att is- och snötäcken växlande utbredning påverkar jordytans reflektionsförmåga (se s. 19).

Kontinenternas nutida lägen gör att klimatet är känsligast för variationer av solinstrålningen till landområdena uppe i norr. En reduktion av instrålningen sommartid kan där utlösa en nedisning som får konsekvenser för temperaturen på hela jorden. Det hjälper inte att minskad instrålning till norra halvklotet motsvaras av ökad instrålning till det södra, eftersom det enda landområdet långt i söder har så bistra klimatförhållanden att det förblir nedisat även när solinstrålningen där är som kraftigast. I Antarktis händer med andra ord inte mycket som kan öka Milankovićcyklernas lokala inverkan på klimatet.

Förutom isarnas utbredning i norr har även växthuseffekten varierat på ett sätt som förstärkt klimatets globala fluktuationer under kvartärtiden. Analyser av koldioxid- och metaninnehållet i luftbubblor infrusna i den antarktiska inlandsisen visar att dessa växthusgasers haltförändringar i atmosfären har varit slående lika temperaturens variationer under hela den period på 800 000 år som har kunnat följas – ju lägre temperatur, desto lägre halter av koldioxid och metan.

Av allt att döma har växthuseffekten förändrats med en viss fördröjning i förhållande till temperaturvariationerna. När det blivit kallare i inledningen till en ny istid tycks det ha dröjt en tid innan koldioxidhalten börjat sjunka. Det kan därför knappast råda något tvivel om att det i samband med nedisningarna är klimatets förändringar som har utlöst förändringarna av

växthuseffekten, inte tvärtom (vilket inte betyder att det måste vara så även i dag – se s. 63).

Exakt *hur* klimatskiftningarna har påverkat halterna av växthusgaser är inte klarlagt. Allt tyder dock på att havet har varit inblandat på ett eller annat sätt – den koldioxid som försvunnit från atmosfären under istiderna kan knappast ha hamnat någon annanstans än just där. Att vattnets förmåga att ta upp koldioxid ökar med sjunkande temperatur bör vara en del av förklaringen. Det kan också tänkas att planktonfloras tillväxt och koldioxidupptagning gynnas under istidsförhållanden.

### Kraftiga klimatskiftningar genom förändringar i havscirkulationen

I vår del av världen har kvartärtidens klimat skiftat kraftigt även i tidsskalor som är betydligt kortare än Milankovićcyklerna. Framför allt under själva istiderna har medeltemperaturen kring Nordatlanten gjort en lång serie våldsammas kast – ofta med 5–10 grader, i vissa fall ännu mer.

Enbart under den senaste istiden, inledd för ungefär 115 000 år sedan, mildrades klimatet i våra trakter vid åtminstone tjugofem tillfällen så mycket att temperaturen bara hamnade ett fåtal grader under den nutida. Varje sådan uppvärmning tog på sin höjd några decennier i anspråk och följdes av en något långsammare återgång till ett genuint istidsklimat.

Dessa fluktuationer tycks ha hängt samman med förändringar av havsströmmarna i Nordatlanten – cirkulationsmönstret kan där se ut på flera olika sätt. I våra dagar transporteras varmt ytvatten från Atlantens tropiska delar upp till Nordeuropa av Golfströmmen samt dess nordliga fortsättning, kallad Nordatlantiska ström-



men. Detta bidrar till att Skandinavien nu har ett betydligt mildare klimat än andra landområden som är belägna lika långt norrut. Vattnet som anländer med strömmarna från söder har förhållandevis hög salthalt och därmed hög densitet. Utanför Grönland och Labrador kyls det av, vilket ökar densiteten ytterligare och gör vattnet så tungt att det sjunker ned i djuphavet. Långsamt återvänder det sedan söderut längs havsbotten. Vattenmassor som på det här viset omsätts till följd av skillnader i temperatur och salthalt sägs genomgå en *termohalin cirkulation*.

Den bildning av djupvatten (genom nedsjunkning av tungt ytvatten) som nu för tiden äger rum utanför Grönland skedde under utpräglade istidsförhållanden längre söderut i Atlanten. Golfströmmen nådde då knappast längre upp än till havsområdena utanför Sydeuropa, vilket medverkade till att Skandinavien inte var lika gynnat i klimathänseende som i dag utan i stället drabbades av nedisning.

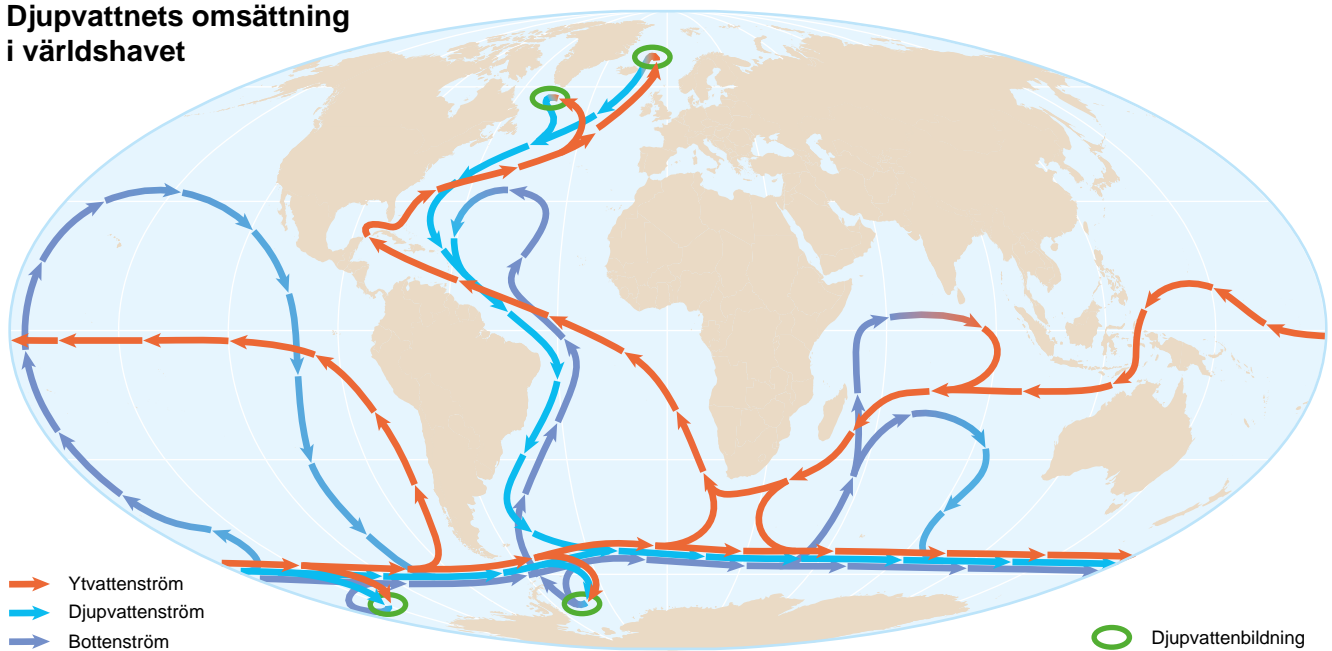
Men flera gånger under den senaste istiden förefaller djupvattenbildningen av okänd anledning ha återgått till ett nordligare läge. Ytvatten som sjunker mot botten måste ersättas av nytt ytvatten från annat håll, och djupvattenbildningen agerar på så sätt som en pump för havsvattnets cirkulation. När den plötsligt försköts

tillbaka mot arktiska havsområden tvingades de varma havsströmmarna från söder därför fortsätta ända dit upp. Följden blev en tillfällig men markant lindring av kylan i norr. Samtidigt blev det å andra sidan kallare än normalt kring Antarktis, och medeltemperaturen på hela jorden påverkades därför ganska obetydligt.

Vid andra tillfällen tycks den termohalina cirkulationen i Nordatlanten inom loppet av några få år ha avstannat nästan helt. En tänkbar orsak är att inlandsisen i Nordamerika emellanåt växte sig så mäktig att den blev instabil. Mängder av is i dess utkanter bröts då loss i form av isberg som drev ut i Atlanten och smälte. Avsmältningen sänkte salthalten i det ytliga havsvattnet, som därigenom blev så lätt att det inte längre förmådde sjunka mot botten och bilda djupvatten. Då uteblev havsströmmarna från söder, och temperaturen uppe i norr sjönk till mycket låga nivåer.

Under istidsförhållanden förefaller cirkulationsmönstret i Nordatlanten med andra ord ha en inbyggd instabilitet. Det kan inte uteslutas att de gångna istidernas cirkulationsförändringar och åtföljande klimatvariationer utlöstes av någon yttre påverkan, men det verkar mer troligt att de utgjorde helt interna omläggningar i klimatsystemet.

### Djupvattnets omsättning i världshavet



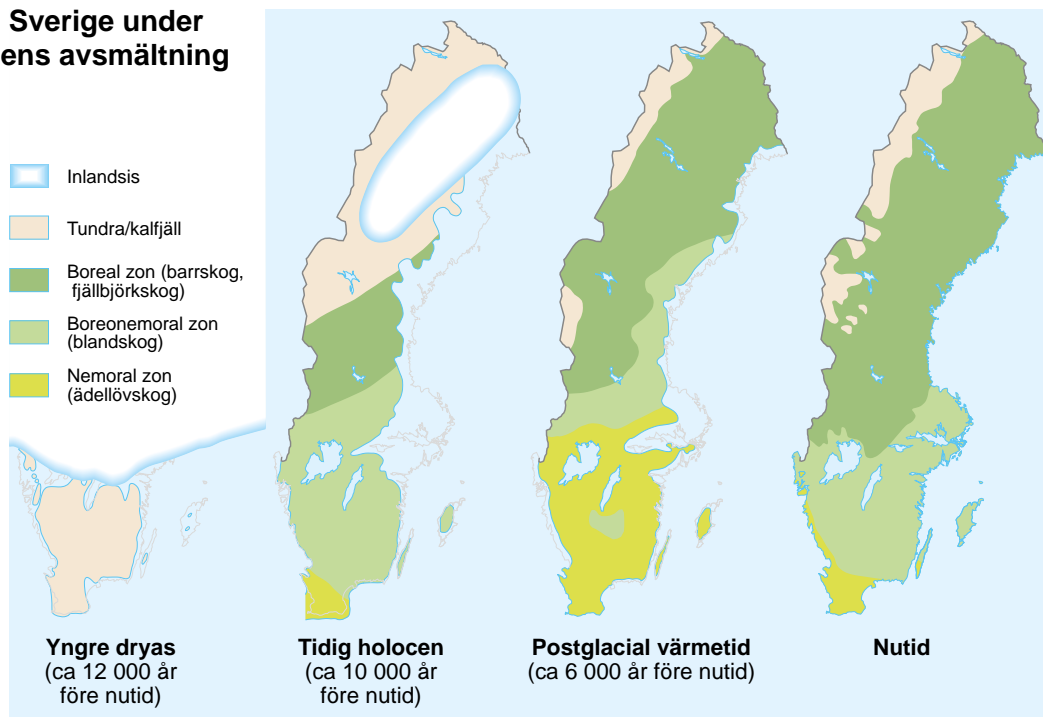
En viktig drivkraft för vattenomsättningen i världshavet är den bildning av djupvatten som i våra dagar äger rum utanför Grönland. Under istidsförhållanden skedde denna djupvattenbildning åtminstone tidvis längre söderut, och emellanåt kunde den upphöra näs-

tan helt. Sådana förändringar fick stora konsekvenser för de varma havsströmmarna från söder, och däri låg av allt att döma upphovet till den senaste istidens stora klimatskiftningar kring Nordatlanten.

– Från Rahmstorf 2002.

## Vegetationszoner i Sverige under och efter inlandsisens avsmältning

Efter den senaste istiden expanderade vegetationszonerna gradvis norrut i Sverige. De nådde som längst upp under den postglaciala varmetiden men har därefter åter tvingats söderut. Lägg också märke till hur landhöjningen har förändrat den svenska kustlinjen.  
– Från Gustafsson & Ahlén 1996.



### Instabil avslutning av senaste istiden

För drygt tjugotusen år sedan nådde inlandsisarna i Skandinavien och Nordamerika sin största utbredning under den senaste istiden. Sammanlagt var då ungefär en tredjedel av jordens nuvarande landareal nedisad, och havsnivån stod närmare 130 m lägre än den gör i dag. Vid det laget var emellertid solinstrålningen under somrarna i norr redan på väg att öka igen, och snart började istäckena krympa.

För ca 14 500 år sedan slog havsströmmarna i Nordatlanten inom loppet av mindre än tjuugo år om till sitt nuvarande cirkulationsmönster – det varma vattnet från söder nådde på nytt ända upp mot de skandinaviska kusterna. I de delar av Sydsverige där inlandsisen hade hunnit smälta bort blev det plötsligt nästan lika varmt som i dag, och allt fler växt- och djurarter vandrade dit från sydligare trakter. Isen fortsatte att dra sig tillbaka upp mot Mellansverige, och Götaland började täckas av fjällbjörkskog. Till följd av istäckenas avsmältning steg havets nivå med åtminstone en meter per århundrade.

Efter knappt tvåtusen år, för ungefär 12 800 år sedan, inträffade emellertid ett dramatiskt bakslag. På några få decennier – eller kanske ännu kortare tid – återgick klimatet kring Nordatlanten till istidsförhållanden. I Sverige hejdades inlandsisens tillbakagång, och fjällbjörkskogen i söder ersattes åter av tundra.

I mer begränsad omfattning var avkylningen märkbar även i många andra delar av världen.

Orsaken till bakslaget tycks ha varit ett enormt utflöde av sötvatten till havet i norr. En vidsträckt sjö med uppdammt smältvatten söder om den krympande inlandsisen i Nordamerika hade plötsligt funnit ett utlopp till Norra ishavet. Något liknande inträffade ungefär samtidigt i Skandinavien, om än i mindre skala. Då fanns här en föregångare till Östersjön, en smältvattenssjö kallad Baltiska issjön som kring den aktuella tidpunkten började tappas av åt väster längs iskanten i Mellansverige.

Den stora tillförseln av sötvatten till nordliga havsområden satte effektivt stopp för den termohalina cirkulationen i Nordatlanten och därmed också för de varma havsströmmarna från söder. Den resulterande återgången till istidsförhållanden blev bestående i mer än tusen år, en period som har fått namnet *yngre dryas*. För drygt 11 500 år sedan upphörde emellertid kylan lika abrupt som den inleddes. Djupvattenbildning och strömmar i Nordatlanten kom i gång igen, och temperaturen i norr steg än en gång åtskilliga grader inom loppet av några decennier. Därmed var istidsklimatet slutgiltigt till ända, även om inlandsisarna i Skandinavien och Nordamerika behövde ytterligare några tusen år för att smälta undan helt och hållet.

Klimatets kraftiga och ofta återkommande förändringar under kvartärperioden har utsatt

jordens flora och fauna för stora påfrestningar, och mängder av växt- och djurarter har slagits ut. Genom att konkurrensen minskat har detta å andra sidan öppnat nya möjligheter för de arter som tack vare hårdighet eller anpassningsförmåga lyckats klara sig. Klimatvariationerna har på så sätt utgjort en skoningslös men effektiv drivkraft för arternas evolution, dvs. för uppkomsten av nya arter och förändrade egenskaper hos redan befintliga arter.

Evolutionen har också gynnats av den skiftande inverkan som nedisningarna haft på geografin. Havsnivåns förändringar och istäckenas fram- och tillbakaryckanden har omväxlande öppnat och skurit av landbryggor mellan olika öar och kontinenter. Detta har ömsom skapat isolering (vilket underlättat lokala genetiska anpassningar) och ömsom brutit den (vilket möjliggjort spridning av organismer med nya anlag till andra delar av världen).

Det är knappast någon tillfällighet att människosläktets snabba framväxt och utveckling har ägt rum just under kvartärtiden. Klimatets ständiga variationer fram till den senaste istidens slut har – sannolikt till priset av svåra umbäranden – format människan till en överlevare.

### Små klimatförändringar under nuvarande interglacial

De senaste dryga elvtusen åren i människans och jordens historia har utspelats under en interglacial, en begränsad mildvädersepisod mellan två istider. Under denna period, kallad *holocen*,

har klimatet inte bara varit gynnsammare utan också avsevärt stabilare än under gångna istider. Efter yngre dryas har årsmedeltemperaturen på jorden troligen inte varierat mer än ett par grader. Under samma tid har även halterna av växthusgaser i atmosfären förändrats ganska obetydligt – till helt nyligen. De stabila klimatförhållandena under holocen har gjort det möjligt för människan att bli jordbrukare, och de har därmed utgjort en grundförutsättning för senare årtusendens explosiva utveckling av kultur, samhälle och teknik.

Men även under denna period har klimatet i viss mån förändrats. I tropikerna tycks temperaturen sakta ha stigit, sannolikt på grund av att förändringarna av jordens bana och axelriktning där har medfört en allt kraftigare solinstrålning. I norr har utvecklingen varit en annan. Den ökning av solinstrålningen sommartid som satte punkt för den senaste istiden upphörde där för drygt tiotusen år sedan och avlöstes i stället av en minskning. Redan kort efter den snabba uppvärmningen i slutskedet av yngre dryas visade temperaturen därför tendenser att sjunka igen över stora delar av norra halvklotet.

I våra trakter medförde dock inlandsisarnas tröga respons att temperaturvariationerna släpade efter instrålningens förändringar. Här fortsatte temperaturen långsamt att stiga ännu flera tusen år efter istidens slut, i takt med att de sista resterna av istäckena i Skandinavien och Nordamerika smälte undan och jordytan därigenom förmådde absorbera allt mer av det inkommande solljuset. Också skogarnas expan-

När isarna smälte bort efter den senaste istiden och ersattes av barmark och lågvuxen vegetation blev jordytan mörkare. Ännu mörkare blev den när den sedan täcktes av skog. Därigenom kunde jordytan fånga upp allt mer solljus, vilket förstärkte uppvärmningen och drev på den fortsatta avsmältningen.

På samma sätt förstärks i dag effekterna av människans klimatpåverkan. Glaciärtungan på bilden, en utlöpare från Columbia Icefield i Klippiga bergen, befinner sig i snabb reträtt. Angränsande vegetation får på så sätt möjlighet att expandera.



sion över tundraområdena i norr bidrog till att göra jordytan mörkare och gradvis mer kapabel att fånga upp solljus och omvandla det till värme.

I Nordeuropa kulminerade värmen för 5–8 000 år sedan. Här låg medeltemperaturen då 1–2 grader över den nuvarande. Under denna *postglaciala värmetid* försvann glaciärerna helt även från de högsta topparna i Alperna och den skandinaviska fjällkedjan. Tallen nådde närmare 200 m högre upp på fjällsidorna än den gör i dag. Ek, alm, lind och andra ädellövträd dominerade skogarna i Götaland och Svealand, och de etablerade sig här och var även i Norrland. Kärrsköldpaddor förekom så långt norrut som i Östergötland, och i Skåne fanns pelikaner.

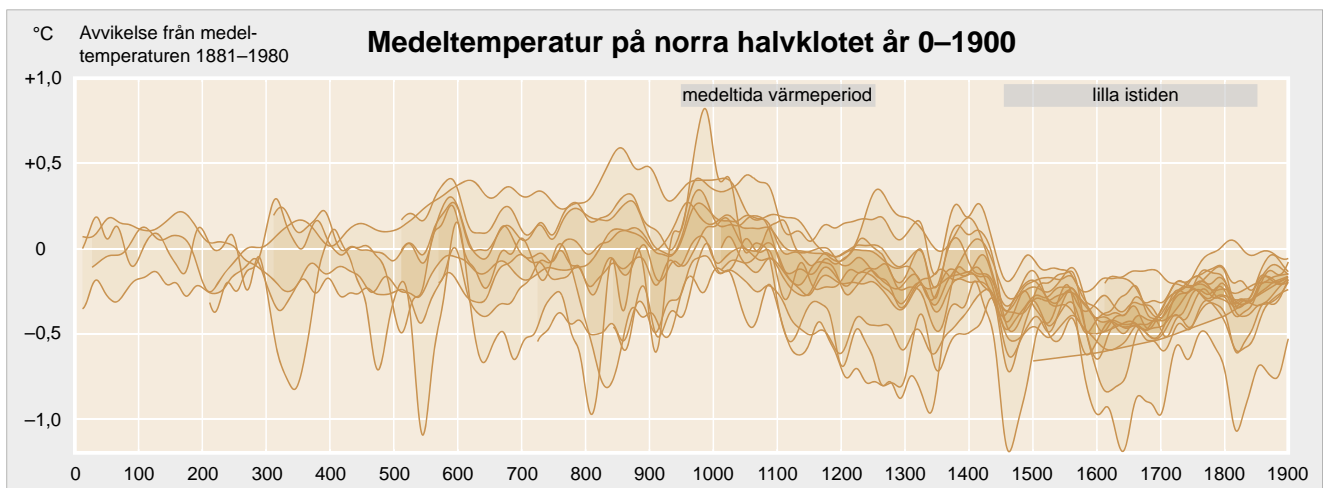
Efter värmetiden avtog temperaturen gradvis även i vår del av världen. I Sverige medförde avkylningen att ädellövträd och andra värmekrävande arter tvingades söderut igen, och uppe i fjällen återbildades glaciärerna. Världshavets nivåhöjning stannade av nästan helt – under de senaste 7 000 åren har havsytan i genomsnitt stigit mindre än 5 cm per sekel.

Liksom under istiderna har klimatet under holocen av allt att döma varierat också i relativt kort tidsskala, om än i måttlig omfattning. Exempelvis inträffade flera kortvariga temperaturnedgångar under interglacialens inledningskede. Under något sekel för 8 200 år sedan förefaller medeltemperaturen i Europa sålunda ha varit ungefär två grader lägre än annars, vilket tillfälligt pressade ned trädgränsen i Alperna med ett par hundra meter. Orsaken var förmodligen ett nytt utflöde av smältvatten från Nordamerika.

I Skandinavien tycks glaciärerna ha expanderat och dragit sig tillbaka i flera omgångar under senare årtusenden, sannolikt som en följd av mindre variationer i sommartemperatur eller vinternederbörd. Och i sedimentlagren på Nordatlantens botten finns spår som pekar på att drivisens utbredning i området har ökat och minskat i en tidsskala på några få sekler under hela holocen. Vi har ingen säker kunskap om orsakerna till dessa variationer, men vi vet att den vulkaniska aktiviteten har genomgått betydande förändringar under perioden.

Under värmetiden för 5–8 000 år sedan spred sig ek, alm, lind och andra ädellövträd ända upp i Norrland. Längs nedre Dalälven finns en del områden med sådana värmekrävande trädslag kvar, trots senare årtusendens avkylning.





Åtskilliga försök har gjorts att rekonstruera medeltemperaturens förändringar under gångna sekler. Här återges femton olika temperaturkurvor byggda på analyser av årsringar, glaciärer och andra indirekta källor till klimatdata. Kurvorna är utjämnade för att framför allt visa variationer i en tidsskala på 50 år eller mer.

De genomsnittliga klimatförändringarna på norra halvklotet tycks ha varit små under åren 0–1900, men inom mer begränsade områden, såsom Nordatlanten och dess omgivning, kan klimatet ha genomgått betydligt större variationer.

– Underlag från IPCC 2013, fig. 5.7.

### Långsam temperaturnedgång efter vikingatiden

Ju mer vi närmar oss vår egen tid, desto säkrare och mer detaljerade bedömningar kan vi göra av hur klimatet har förändrats. Direkta mätningar av temperatur, nederbörd, lufttryck etc. påbörjades visserligen tidigast under 1600- eller 1700-talen – och då bara på enstaka platser – men vi har numera tillgång till en hel arsenal av indirekta analysmetoder som möjliggör relativt tillförlitliga rekonstruktioner av klimatet mer än tusen år bakåt i tiden. Till dessa metoder hör studier av trädens årsringar, av stalagmiter i grottor, av koraller och av borrhärdar från inlandsisar eller bottensediment i sjöar och hav.

Också historiska dokument kan ge fingerisningar om klimatets egenskaper i förfluten tid. Från vår egen del av världen finns exempelvis åtskilliga historiska vittnesbörd som tyder på att klimatet var förhållandevis gynnsamt under vikingatiden och början av medeltiden. Jordbruket expanderade i Skandinavien, och Grönland koloniserades av nordbor med boskapsskötsel som huvudnäring.

Denna ”medeltida värmeperiod” tycks på 1400-talet ha följts av en period med osedvanligt bistra väderförhållanden, numera ofta kallad ”lilla istiden”. Åtskilliga händelser som inträffade i vår omgivning under de följande seklerna – marknader på Themsens is, Karl X

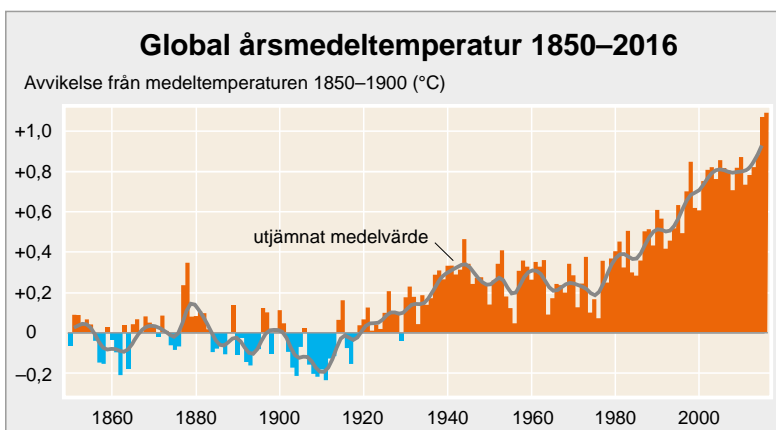
Gustavs tåg över de tillfrusna danska Bälten år 1658 etc. – skulle sällan eller aldrig ha varit möjliga i det klimat som råder här nu för tiden. Kylan förefaller ha hållit i sig närmare femhundra år, med vissa fluktuationer. Ända fram till senare delen av 1800-talet drabbades det svenska jordbruket upprepade gånger av missväxt till följd av svår frost under sommarhalvåret, och sjöfarten blockerades nästan varje vinter av ishinder även nere i sydligaste Sverige.

Nutida naturvetenskapliga klimatrekonstruktioner har delvis bekräftat den här bilden av temperaturens förändringar kring Nordatlanten under de senaste dryga tusen åren. I många klimatanalyser från andra delar av världen framträder däremot varken den medeltida värmeperioden eller lilla istiden lika tydligt. De flesta sådana analyser antyder visserligen att mindre klimatvariationer har ägt rum, men förändringarna tycks inte alltid ha skett samtidigt som i Nordeuropa eller på Grönland.

Det här betyder att det rekonstruerade temperaturgenomsnittet för hela norra halvklotet i själva verket har varierat ganska obetydligt under större delen av det gångna årtusendet. Det tycks visserligen ha varit svalare under årtusendets senare del än det var under vikingatid och tidig medeltid, men skillnaden uppgår bara till några tiondelar av en grad. Nedgången ligger i linje med den långsiktiga avkylning som har ägt rum på norra halvklotet under större delen av holocen.

# 4 Klimatförändringar i modern tid

FRÅN OCH MED senare delen av 1800-talet har väderobservationer genomförts regelbundet och i allt större omfattning i många av världens länder. De visar att temperaturklimatets utveckling slog in på en helt ny bana under 1900-talet. Den långsamma avkylning som tycks ha ägt rum under tidigare sekler, åtminstone på norra halvklotet, förbyttes då i snabb uppvärmning.



De mätningar som sedan 1800-talet har gjorts av temperaturen vid jordytan vittnar om en markant global uppvärmning under de senaste hundra åren.

– Data från Climate Research Unit, University of East Anglia. Mätserie: HadCRUT4. Medelvärdet för 2016 är en preliminär uppskattning.

## Varmare i både luften och havet

Jämfört med klimatets förändringar längre tillbaka i tiden har temperaturuppgången under de senaste hundra åren varit anmärkningsvärt kraftig. Från senare hälften av 1800-talet till perioden 2006–2015 steg den globala medeltemperaturen vid jordytan med 0,83 grader. På norra halvklotet är den senaste trettioårsperioden förmodligen den varmaste som förekommit på åtminstone 1400 år.

De tio varmaste år som registrerats sedan mätningarna började bli tillförlitliga kring 1850 har alla infallit sedan 1998. De hittills allra

varmaste åren, 2015 och 2016, nådde medeltemperaturen för första gången mer än en grad över genomsnittsnivån i slutet av 1800-talet.

Uppvärmningen har emellertid inte fortskridit i jämn takt. Åren 1910–1945 steg den globala medeltemperaturen markant, men därefter kom uppgången av sig. Under perioden 1945–1975 föreföll temperaturen i stället sjunka en aning. Efter 1975 fortsatte uppgången, och enbart sedan dess har medeltemperaturen på jorden nu stigit med mer än en halv grad.

På land har uppvärmningen i allmänhet varit kraftigare än till havs. Lufttemperaturen vid markytan har sedan 1970-talet stigit med nästan en grad i genomsnitt, medan havets ytemperatur under samma tid ökat knappt en halv grad. Havsvattnets temperaturhöjning har varit tydligt märkbar även under ytan, i alla fall ned till ca 700 meters djup. Från större djup finns det ganska sparsamt med data, men något varmare förefaller det ha blivit också där.

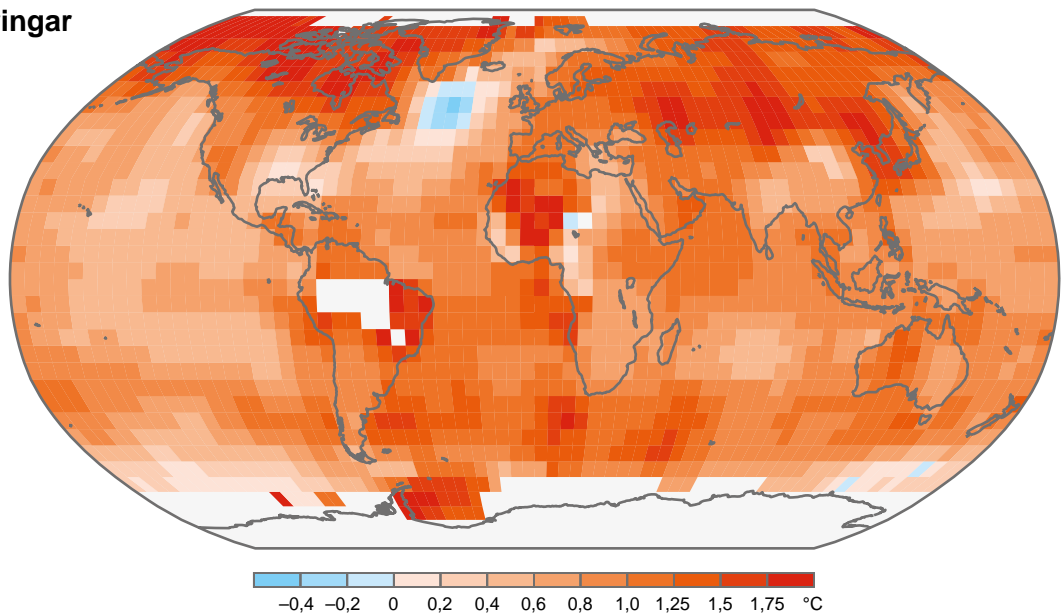
Uppe i atmosfären mäts temperaturen numera regelbundet med hjälp av ballonger och satelliter. Mätningarna visar att de lägre luftlagren under senare decennier har värmts upp minst lika snabbt som själva jordytan. I stratosfären, på höjder mellan ca 10 och 50 km, har temperaturen däremot sjunkit påtagligt sedan slutet av 1970-talet.

Inom en begränsad del av världen förändras temperaturen sällan på exakt samma sätt som det globala genomsnittet. Kring Nordatlanten har temperaturen varierat mycket oregelbundet under det gångna seklet, och där är det på flera håll bara obetydligt varmare i dag än för hundra år sedan. Söder om Grönland är det rentav något svalare. I andra områden har temperaturen under samma tid stigit avsevärt mer än medelvärdet för hela jorden. Till de sistnämnda regionerna hör inte minst stora delar av Arktis samt området kring Antarktiska halvön.

## Temperaturförändringar 1901–2012

Räknat från 1900-talets början har temperaturen stigit nästan överallt på jorden där mätningar gjorts. Till de få undantagen hör havet söder om Grönland. Från polartrakterna och vissa andra svårtillgängliga områden saknas tillförlitliga data.

– Från IPCC 2013, fig. 2.21. Data från GISS.



### EN PAUS I UPPVÄRMNINGEN?

År 1998 blev den globala medeltemperaturen vid jordytan med god marginal den högsta som dittills noterats sedan regelbundna mätningar inleddes. En viktig orsak var den omfattande naturliga oscillation i klimatsystemet som kallas ENSO (se s. 16). När denna svängning befinner sig i sitt ena ändläge, El Niño, brukar medeltemperaturen på jorden bli lite högre än annars. Just 1998 års El Niño var extremt utpräglad.

Svängningen vände sedan tillbaka, och de följande åren blev inte fullt lika varma som 1998. Ett stycke in på 2000-talet var årsmedeltemperaturen emellanåt uppe kring 1998 års nivå igen, men den visade inga tecken till att stiga mycket högre än så. Efterhand började allt fler fråga sig om den långsiktiga temperaturhöjning som hade rått under 1900-talet nu hade upphört.

År 2013 drog FN:s klimatpanel slutsatsen att uppvärmningen hade slagit av på takten, om än inte upphört helt. Enligt deras analys hade temperaturen i genomsnitt bara stigit hälften eller en tredjedel så snabbt under åren 1998–2012 som under hela perioden 1951–2012.

Klimatpanelen påpekade samtidigt att en långsiktig och fortgående uppvärmning av jorden mycket väl kan inrymma 10–15 år långa perioder utan påtaglig temperaturhöjning vid själva jordytan. Genom intern omfördelning av värme i klimatsystemet skulle all uppvärmning då i stället kunna äga rum under havsytan.

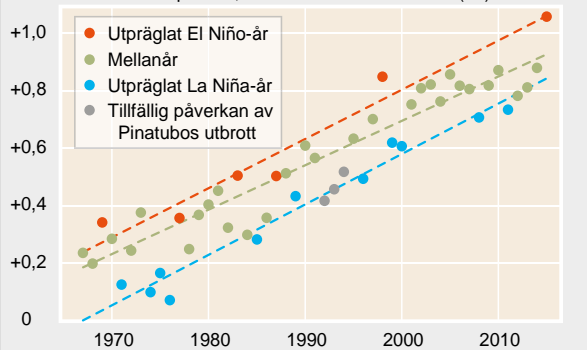
Vill man klarlägga den globala medeltemperaturens utveckling på lång sikt blir det missvisande att utgå från ett extremår som 1998, och åtskilliga klimatforskare ifrågasatte huruvida uppvärmningen alls hade saktat in ens

vid jordytan. Enligt en del analyser av temperaturkurvorna förekom inget nämnvärt trendbrott kring 1998. Hur som helst nådde temperaturen nya toppnivåer 2015 och 2016 – även nu med bidrag från en kraftig El Niño – vilket eliminerade alla förhoppningar om att den globala uppvärmningen hade avstannat av sig själv.

Den skenbara ”pausen” i uppvärmningen efter 1998 (som inte var någon paus men kanske en inbromsning) kan sannolikt till stor del ses som ett tillfälligt resultat av svängningarna mellan El Niño och dess motsats, La Niña (som brukar åtföljas av en viss sänkning av jordens medeltemperatur). Sett i ett längre tidsperspektiv har temperaturhöjningen fortgått i stort sett ohejdad.

### Inverkan av El Niño på uppvärmningen

Global årsmedeltemperatur, avvikelse från 1850–1900 (°C)



Om El Niño-år, La Niña-år och ”mellanår” analyseras separat ser vi att de alla var för sig har kännetecknats av stigande temperatur. I snitt är El Niño-åren drygt 0,2 grader varmare än La Niña-åren.

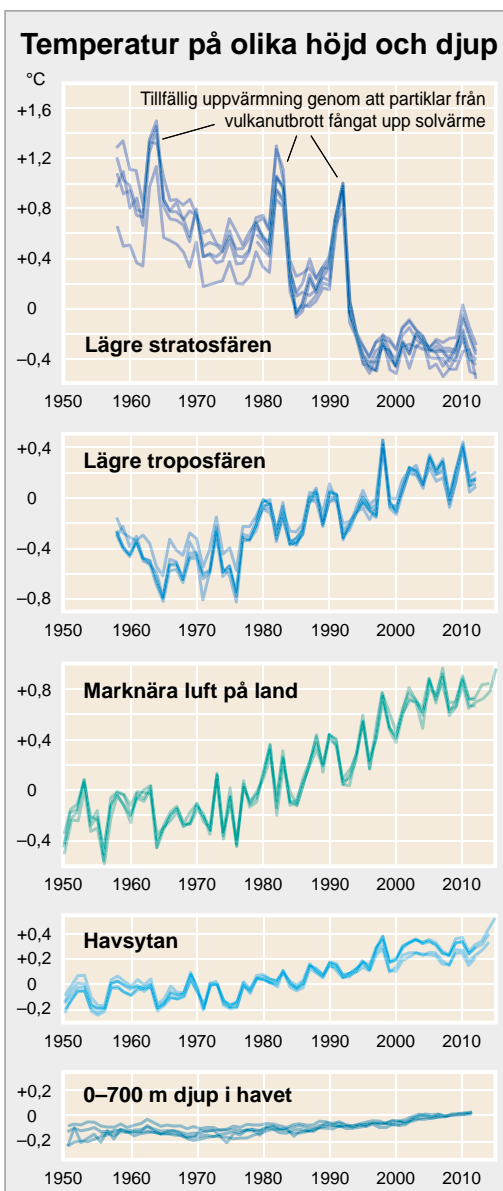
– Analys enligt Nielsen-Gammon 2012. Mätserie: HadCRUT4.

Medan det blivit varmare i den lägre troposfären (inom några km från marken) har det i stället blivit kallare i stratosfären. Mätningar där uppe görs med satellit eller med ballonger som den på bilden.

Vid jordytan har luften värmts ungefär dubbelt så snabbt på land som till havs (där temperaturen i de lägsta luftlagren i hög grad styrs av hur varmt det är i ytvattnet). Uppvärmningen är tydlig också flera hundra meter under havsytan.

Varje diagram återger flera olika mätserier eller beräkningar av den globala medeltemperaturen. Temperaturen anges i förhållande till medelvärdet 1981–2010 (i troposfären och stratosfären), 1961–90 (marknära luft samt havsytan) eller 2006–10 (på 0–700 m djup).

– Underlag från IPCC 2013, fig. 2.14, 2.18, 2.24 och 3.2, med kompletteringar av vissa serier (NOAA/NCDC, CRUTEM, ERSST.v3b, COBE-SST).

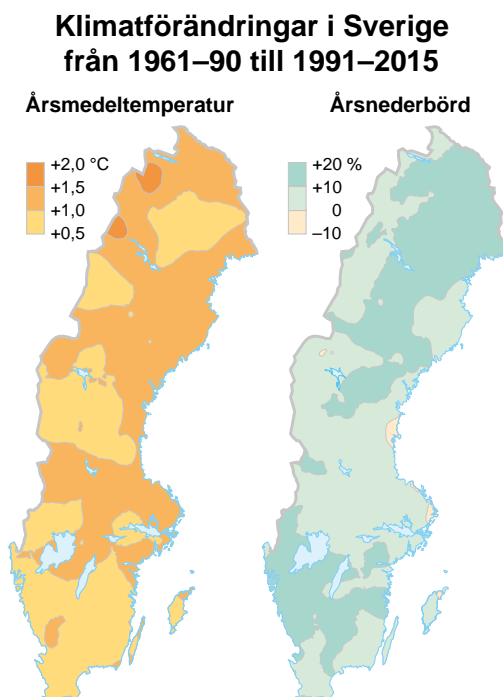


DAVID R. FRAZIER / IBL

I sina femdygnsprognoser har SMHI på senare år allt oftare angett att det under kommande dagar väntas bli varmare än normalt. Orsaken är att ordet ”normalt” avser genomsnittsförhållandena under åren 1961–90. I jämförelse med denna s.k. normalperiod har klimatet i Sverige nu hunnit bli märkbart varmare, på de flesta håll också blötare.

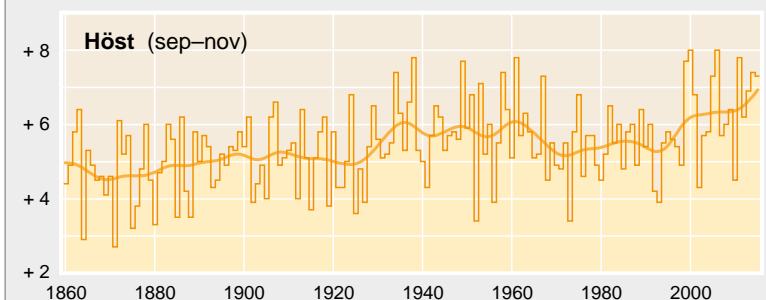
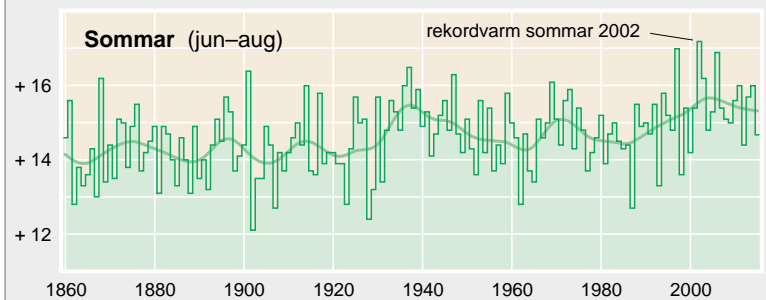
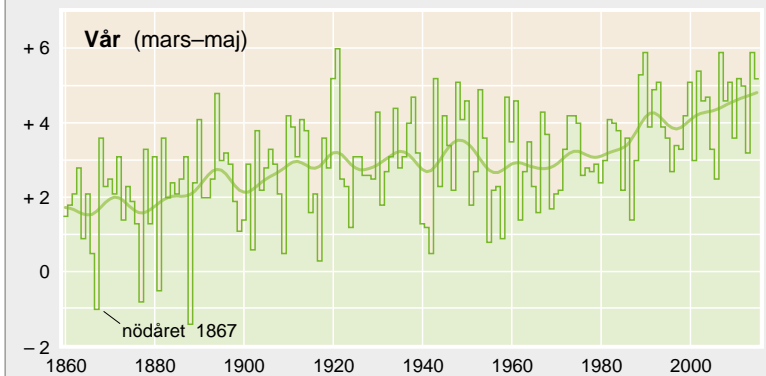
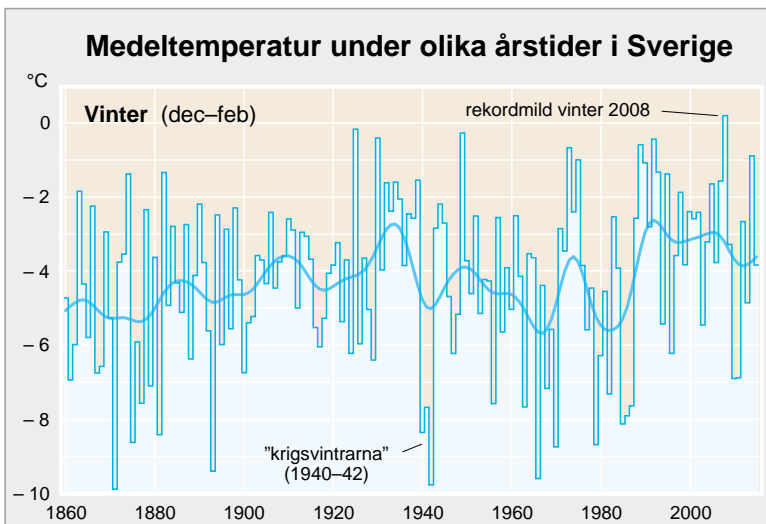
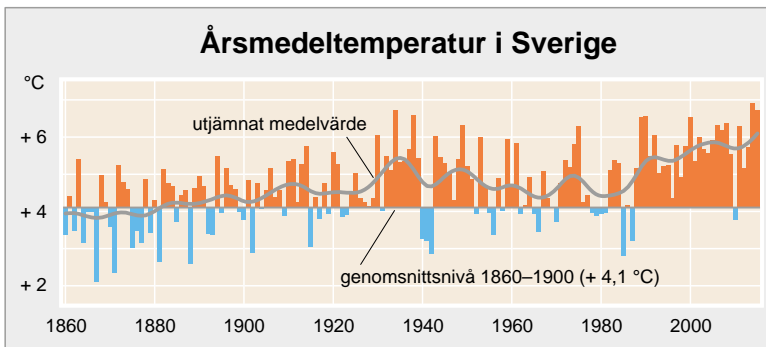
Merparten av SMHI:s väderobservationer utförs i dag vid automatstationer. Den på bilden till höger står vid Stora Sjöfallet.

– Från SMHI.



SMHI





## Allt varmare också i Sverige, men inte utan "bakslag"

I Sverige har temperaturen stigit ungefär dubbelt så mycket sedan 1800-talet som det globala medelvärdet. Perioden 1991–2015 var i genomsnitt 1,7 grader varmare i vårt land än perioden 1861–1890.

Liksom på andra håll kring Nordatlanten har uppvärmningen dock varit allt annat än regelbunden. Redan på 1930-talet var temperaturens långtidsmedelvärde i Sverige sålunda drygt en grad högre än det hade varit i slutet av 1800-talet. I landets norra delar var förändringen särskilt markant. Senare blev det emellertid åter svalare. Nedgången fortsatte in på 1980-talet, bortsett från en tillfällig temperaturhöjning i mitten av 1970-talet. Sammantaget sjönk temperaturen under denna period med ungefär en halv grad, och även nu blev förändringen större i norr än i söder.

Efter tre mycket kalla vintrar åren 1985–87 och en osedvanligt sval sommar 1987 var det få i vårt land som funderade på växthuseffekten. I massmedia diskuterades utsikterna till en nära förestående istid. År 1988 kom dock ett markant omslag till avsevärt mildare förhållanden, och sedan 1990-talet har temperaturens långtidsmedelvärde legat kring eller över det som rådde på 1930-talet.

Årsmedeltemperaturens variationer i Sverige avspeglar framför allt vad som händer vintertid, eftersom temperaturen skiftar mer då än under övriga årstider. Temperaturhöjningen från slutet av 1800-talet till 1930-talet var visserligen märkbar året om, och likadant har det varit med den senaste tidens uppvärmning. Nedgången under mellanliggande period berörde däremot bara sommar, höst och vinter, medan vårtemperaturens långtidsmedelvärde har ökat nästan oavbrutet sedan tillförlitliga mätningar började bedrivas i Sverige för drygt 150 år sedan.

Inom ett så begränsat område som Sverige kan medeltemperaturen variera flera grader från ett år till nästa på grund av de naturliga skiftningarna i klimatsystemet. Variationerna skapar ett "brus" som kan göra det svårare att urskilja långsiktiga temperaturförändringar än i globala genomsnittsdata, där lokala väder- och klimatfluktuationer i olika delar av världen till stor del tar ut varandra. Ändå står det klart att uppvärmningen sedan slutet av 1800-talet har varit ännu kraftigare i vårt land än i världen som helhet. – Diagrammen bygger på mätningar vid 35 svenska väderstationer. Från SMHI.

## FELKÄLLOR I KLIMATSTATISTIKEN

Vår kunskap om klimatets utveckling sedan 1800-talet, då väderobservationer blev rutin på många håll i världen, är betydligt tillförlitligare än de data vi har om klimatiförändringarna längre tillbaka i tiden. Ändå kan det vara svårt att få en fullständig och helt rättvisande bild av vad som har hänt med klimatet även i modern tid.

Till problemen hör att vissa väderstationer är belägna i städer som med åren har blivit allt större. Temperaturförändringarna vid en sådan station är sällan representativa för regionen i stort, eftersom lokalklimatet i en nutida storstad tidvis kan vara ett par grader varmare än klimatet på den omgivande landsbygden.

I en del fall har därtill mätmetoderna ändrats på ett sätt som kan ha påverkat resultaten. Ett exempel gäller observationerna av havsvattnets temperatur, som till stor del har gjorts från fartyg. Långt in på 1900-talet mättes temperaturen i pytsar som kastades överbord och sedan halades upp igen, men sedan 1940-talet har den i stället allt oftare mätts i det kylvatten som pumpas in till maskinerna. Resultaten av de två mätmetoderna kan skilja sig med en halv grad eller mer.

Ett annat exempel är att väderstationernas nutida nederbördsräknare fångar upp regn och snö effektivare än den apparatur som utnyttjades förr. Trots denna förbättring är nederbörds mängder och nederbördsfördelning alltjämt svåra att mäta någorlunda exakt. Delvis beror det på att nederbörden uppvisar mycket stora lokala variationer, men det finns också rent tekniska mätproblem som än i dag är svårbemästrade. Liksom temperaturmätningarna kan nederbördsräkningarna också påverkas av förändringar i väderstationens omedelbara närhet, såsom uppväxande träd. Samma sak gäller i än högre grad mätningar av vindhastigheten.

Förändringar av frekvens eller intensitet hos mer ovanliga väderfenomen – såsom extrema temperaturer, extremt rikliga regn, stormar eller åska – kan vara besvärliga att påvisa just för att fenomenen förekommer så sporadiskt. Flera av dem uppträder dessutom mycket lokalt och är av den anledningen svåra att registrera på ett heltäckande sätt.

De många tänkbara felkällorna innebär att alla väderobservationer som ska utnyttjas i klimatstatistiken måste granskas noga. En del av dem behöver justeras eller sällas bort för att inte påverka medelvärden, trender och slutsatser på ett sätt som vi vet vore missvisande.

Ett stort arbete har genom åren lagts ned på denna kvalitetskontroll, och flera felkällor har därigenom i



En av världens längsta meteorologiska mätserier härrör från Observatoriekullen i Stockholm (till vänster i bilden). Där har väderdata registrerats varje dag sedan 1756. Under denna långa tid har den omkringliggande staden gradvis vuxit, vilket märkbart har påverkat lokalklimatet – temperaturen har stigit mer här än ute på landsbygden. För att kunna bidra till vår kunskap om hur klimatet har förändrats i hela Sverige eller hela världen måste mätningarna från Stockholm därför justeras.

stort sett eliminerats. Dit hör den effekt som växande storstäder kan ha haft på regionala och globala temperaturmedelvärden. Ett tecken på att den effekten saknar nämnvärd betydelse – åtminstone efter genomförda justeringar – är att den kraftigaste uppvärmningen sedan 1800-talet enligt klimatstatistiken ingalunda har ägt rum i tätbefolkade delar av världen utan tvärtom i områden såsom nordligaste Kanada och delar av Antarktis (se kartan på s. 37).

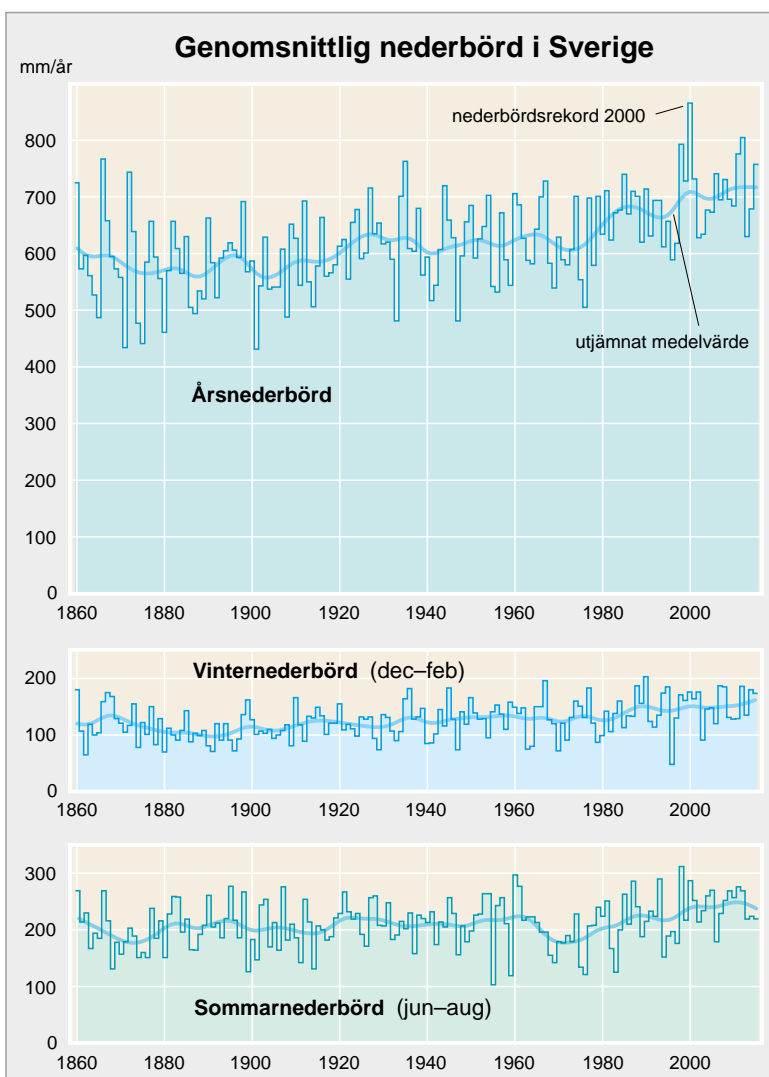
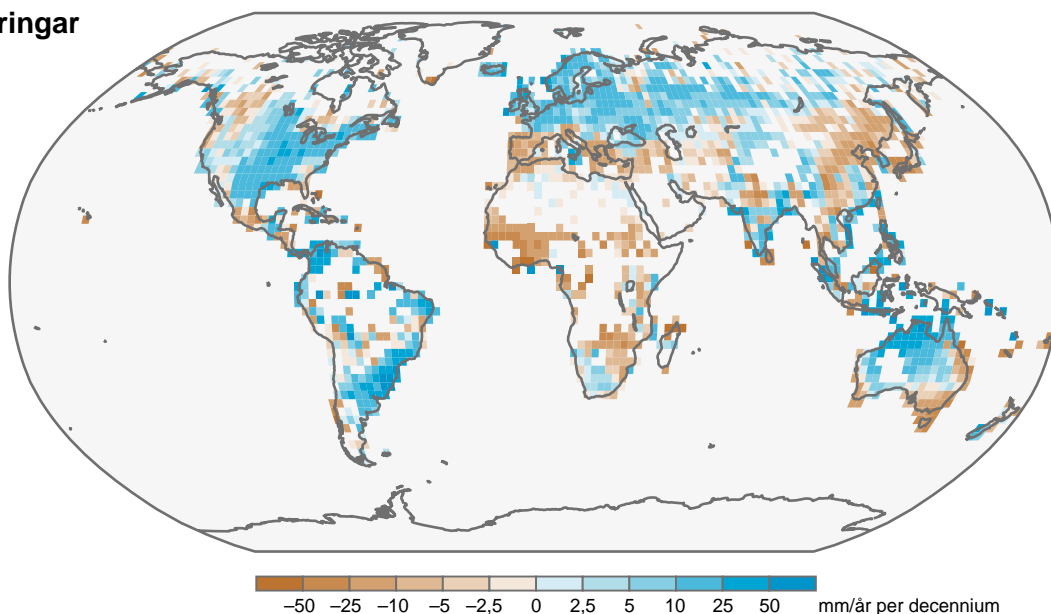
Men det finns också stora luckor i stationsnäten. Från delar av polartrakterna saknas äldre observationer nästan helt. Även havsområdena, som omfattar drygt 70 procent av jordens yta, förblev mycket ofullständigt täckta ända tills en del väderdata började samlas in med hjälp av satelliter. Visserligen finns sedan tidigare mängder av fartygsobservationer registrerade – däribland mer än 100 miljoner temperaturmätningar – men de är långt ifrån jämnt fördelade över världshavet.

Bristen på heltäckande observationer försvårar inte minst beräkningar av genomsnittsdata för hela jordklotet. Olika rekonstruktioner av gångna decenniers globala klimatiförändringar har hanterat luckorna i stationsnäten på olika sätt. Det bidrar till att resultaten kan skilja sig något från varandra trots att de i allt väsentligt bygger på samma mätningar. Ändå är de återstående osäkerheterna i mätserier och klimatrekonstruktioner så små att de kan inte dölja att klimatet de senaste hundra åren har genomgått betydande förändringar.

## Nederbördsförändringar 1951–2010

Sedan mitten av 1900-talet har nederbörds­mängderna i allmänhet ökat i norr, medan de har minskat i många tropiska och subtropiska områden. De lokala variationerna är emellertid stora. Mätningarna är dessutom långt ifrån heltäckande, och många av dem är täm­ligen osäkra.

– Från IPCC 2013, fig. 2.29. Mätserie: GPCC.



Den uppmätta genomsnittsnederbörden i Sverige ökade markant under 1900-talet. Fram till ca 1920 kan mätningarna ha underskattat nederbörds­mängderna, men inget tvivel råder om att siffrornas

uppgång under de senaste decennierna avspeglar en faktisk ökning av nederbörden.

– Diagrammen bygger på mätningar vid 87 nederbördsstationer. Från SMHI.

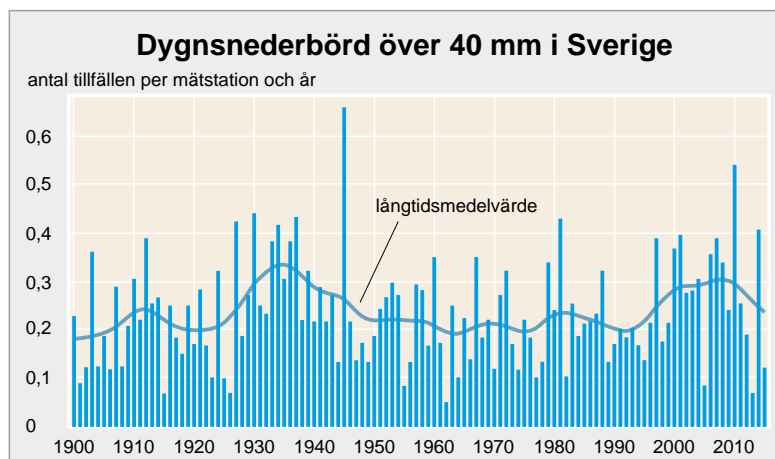
## Mer nederbörd i norr, mindre längre söderut

Den globala uppvärmningen under de senaste hundra åren har på många håll åtföljts av ökad *nederbörd*. Särskilt markant har detta varit i östra Nordamerika och de nordligare delarna av Eurasien.

I Sverige var genomsnittsnederbörden i början av 2000-talet nästan 20 procent rikligare än den man mätte upp hundra år tidigare. Den ökning som registrerades fram till 1920-talet kan visserligen till stor del ha berott på mättekniska förbättringar, men uppgången under senare decennier är odiskutabel. Åren 1998, 2000 och 2012 blev de nederbördsrikaste i vårt land sedan mätningarna inleddes.

I många tropiska och subtropiska landområden har nederbörden i stället avtagit. Den kraftigaste nedgången under det gångna seklet har noterats i Västafrika och i Sahelområdet söder om Sahara – där en återhämtning dock ägt rum sedan slutet av 1980-talet – men även i Medelhavsområdet har nederbörds­mängderna i allmänhet minskat.

De stora skillnaderna mellan olika delar av världen gör det inte lätt och inte heller särskilt meningsfullt att försöka påvisa någon långsiktig nederbördstrend i global skala. Den sammanlagda nederbörden över jordens alla landområden tycks visserligen ha ökat under första hälften av 1900-talet, men därefter minskade den fram till början av 1990-talet för att sedan åter öka.



Att det regnar eller snöar mer än 40 mm på ett dygn händer inte särskilt ofta i Sverige, men det har varit vanligare på 2000-talet än under senare hälften av 1900-talet.

– Diagrammet bygger på data från 60 nederbördsstationer. Från SMHI.

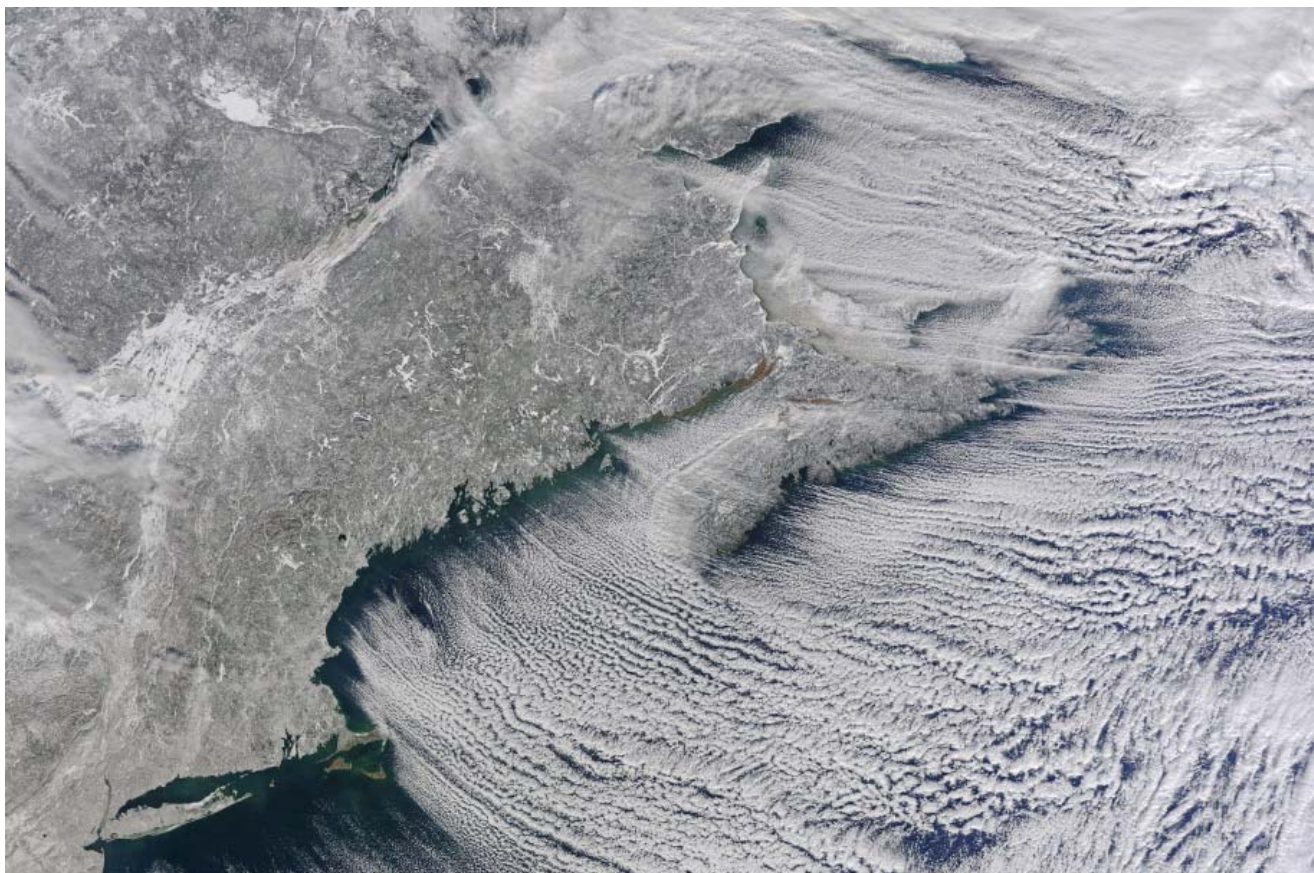
Ute till havs saknar vi nästan helt tillförlitliga mätningar av hur nederbörden har förändrats. Vi vet å andra sidan att havsvattnets salthalt under senare decennier har sjunkit både kring ekvatorn och i polernas närhet, medan den har stigit på mellanliggande subtropiska breddgrader. En rimlig tolkning är att uppvärmningen har lett till ökad nettoavdunstning från havsytan på de nederbördsfattiga mellanbredderna. Allt mer vattenånga har därigenom transporterats norrut och söderut med vindarna och medfört tilltagande nederbörd över de redan neder-

bördsrika havsområdena på höga latituder och i tropikerna.

Luftens förmåga att ta upp vattenånga ökar närmare bestämt med ca 7 procent för varje grad temperaturen stiger. En tydlig förhöjning av *luftfuktigheten* (mätt exempelvis som vattenångans andel av den totala luftvolymen) har också påvisats sedan 1970-talet, även om uppgången på sistone tycks ha avstannat.

Att mängden vattenånga i luften har stigit bör i sin tur ha medverkat till det faktum att *extremt riklig nederbörd* blivit allt vanligare på många håll i världen, inte minst i Europa och delar av Nordamerika. Den andel av totalnederbörden som faller i form av intensiva regn eller snöfall har med andra ord blivit allt större. Tendensen är ofta märkbar även i områden där den sammanlagda årsnederbörden har minskat.

I Sverige har antalet tillfällen med dygnsnederbörd överstigande 40 mm varit större under de senaste tjugo åren än under decennierna dessförinnan. Rotblötor av den kalibern tycks å andra sidan ha varit vanliga också på 1930-talet. Flertalet sådana regn uppträder sommartid och är mer eller mindre lokala.



NASA EARTH OBSERVATORY

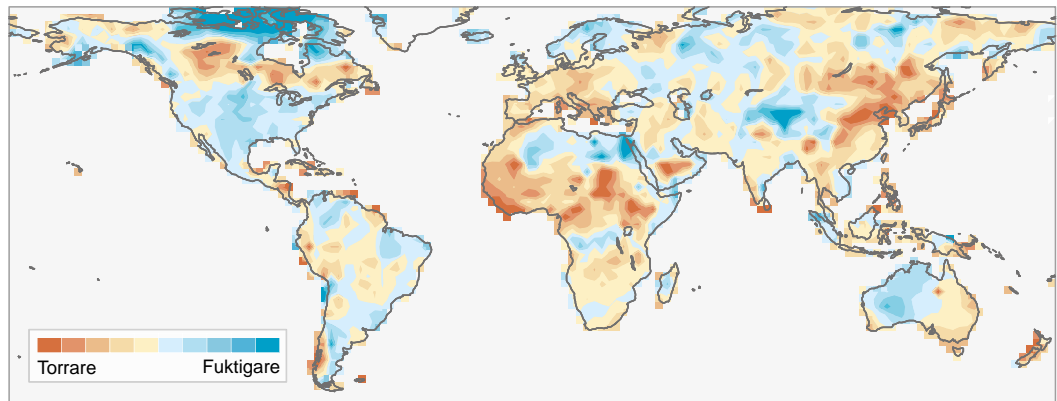
Förekomsten av moln uppvisar inga tydliga trender i global skala, även om den i vissa delar av världen och på vissa höjdnivåer tycks ha ökat eller minskat något under det gångna halvsekle.

Molnen på bilden uppkom när kalla nordvästvindar svepte ut över Atlanten från New England och Kanada en januaridag 2011. Long Island syns nere till vänster, och uppe till höger döljer sig Newfoundland under molnen.

## Förändringar av markfuktigheten 1950–2010

Kartan visar förändringar av markfuktigheten enligt beräkningar som bygger på uppmätt nederbörd och temperatur. Resultaten antyder att torka kan ha blivit vanligare även i vissa områden där nederbörden blivit rikligare, däribland Centraleuropa (jfr kartan på s. 41).

– Från Dai 2013.



### Ökad avdunstning kan motverka effekterna av nederbördsökning

På en del håll i världen, inte minst i norra Ryssland och andra områden kring Norra ishavet, har *vattenföringen* i floderna tilltagit under senare decennier, av allt att döma som en följd av att nederbörden ökat. I andra områden, exempelvis Sydeuropa, har avrinningen via vattendragen i stället minskat.

I svenska åar och älvar har vattenföringen sedan 1980-talet i allmänhet varit högre än den var

under 1970-talet och närmast föregående decennier, särskilt i landets norra delar. Går vi längre tillbaka i tiden, till 1900-talets första decennier, finner vi emellertid att genomsnittsfledena var ungefär lika stora då som de är i dag. Med andra ord har avrinningen i Sverige inte ökat lika mycket under det gångna seklet som de uppmätta nederbörds mängderna. Skillnaden tycks i första hand bero på att de tidiga nederbörds mätningarna ofta utgjorde underskattningar.

Men vattenföringen i åar och älvar styrs inte bara av nederbörden utan snarare av nederbörd minus avdunstning, och det är inte osannolikt att avdunstningen har tilltagit i Sverige. Ett skäl är förstås att det har blivit varmare, men dessutom har skogarna tätat. Ett träd återför stora mängder vattenånga till atmosfären, framför allt genom att ta upp vatten ur marken via rötterna och sedan avge det till luften via löv eller barr. Eftersom skogstillväxten för det mesta överstigit avverkningen har träden blivit allt fler och större under de senaste hundra åren (se s. 71), och även detta kan ha bidragit till ökad avdunstning.

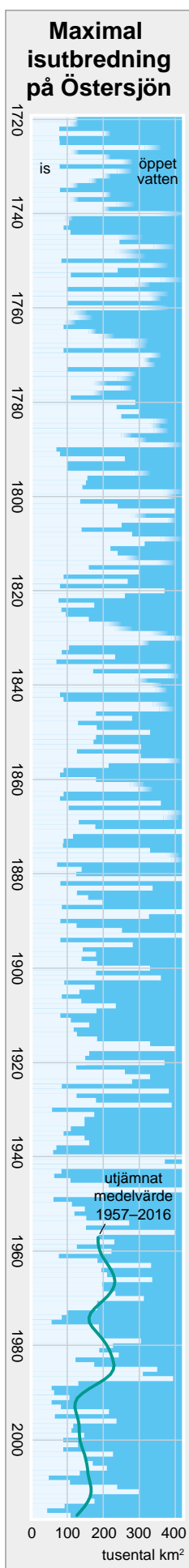
Liksom vattenföringen i åar och älvar regleras också *markens fuktighet* av skillnaden mellan nederbörds mängd och avdunstning. Markfuktigheten har av allt att döma ökat i exempelvis delar av Nordamerika och norra Eurasien, men på åtskilliga andra håll har det i stället blivit torrare. Även i områden där nederbörden har tilltagit kan markfuktigheten ha minskat till följd av uppvärmning och ökad avdunstning.

Svår torka har under senare årtionden drabbat bl.a. Medelhavsområdet, Västafrika, Ostasien samt sydöstra Australien. Fenomenet är dock ingalunda nytt – på många håll i världen syns tecken på att minst lika omfattande och långvarig torka som i våra dagar har förekommit även under tidigare sekler.



GULIANG / CHINA PHOTOPRESS / IBL

Centrala och norra Kina har under senare tid fått stora problem med torka. Den torrlagda flodbädden på bilden finns i Gulang i Gansu-provinsen.



På Östersjön har isens maximala utbredning under vintern i genomsnitt minskat med 30 procent från åren 1961–1990 till 1991–2015. – Data för 1957 och framåt från SMHI, äldre data från Haapala *et al.* 2015.

## Allt mindre snö och is

Som en följd av den allmänna uppvärmningen på norra halvklotet har *snötäckets* utbredning där avtagit markant, särskilt under vår och försommar. I juni månad har de snötäckta arealerna gott och väl halverats sedan 1960-talet.

Slående är också den nedgång av snötäckets varaktighet som har konstaterats i södra Sverige. I stora delar av Götaland och Svealand har snösäsongen sedan 1990 varit åtminstone 20 dagar kortare i genomsnitt än under de tre föregående decennierna. I nästan hela landet har därtill vinterns maximala snödjup reducerats under samma tid, i norra Svealand och södra Norrland med 10–20 cm. I Norrlandsälvarna kommer nu vårfloden i snitt mer än en vecka tidigare än den gjorde så sent som på 1970-talet.

Även *sjöisens* varaktighet har gradvis minskat. På ett antal insjöar i Norden och norra USA har den i genomsnitt förkortats med 26 dygn sedan mitten av 1800-talet.

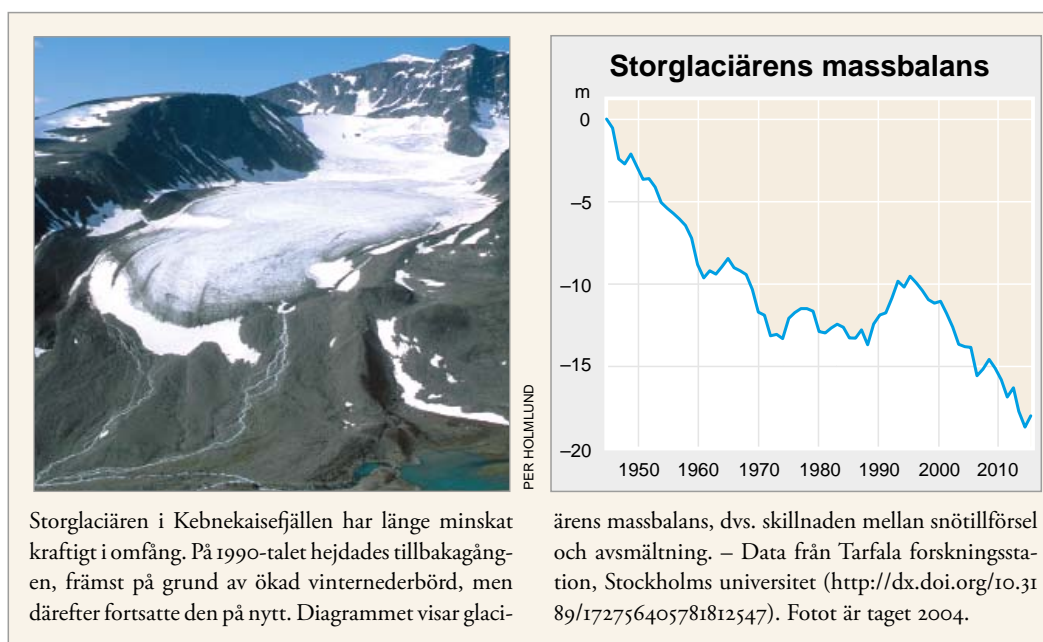
*Permafrost* (ständig tjäle) uppträder också i allt mindre omfattning. I nordvästra Ryssland finns exempel på att jordlager som ännu på 1970-talet var frusna ned till 10–15 meters djup nu har tinat helt och hållet. Permafrostens sydgräns i området tycks under samma tid ha förskjutits norrut med 50–80 km.

På Norra ishavet minskade *havsisens* utbredning under perioden 1979–2015 med 15 procent på helårsbasis och med nästan 40 procent på sensommaren (i september). Få andra förändringar som jordens klimatsystem har genomgått de senaste decennierna är lika påtagliga som denna. Den andel av havsisen som överlever i flera år och därigenom hinner växa sig riktigt grov har reducerats särskilt kraftigt. Isens genomsnittliga tjocklek vintertid tycks i stort sett ha halverats från 1980 till 2008. Kring delar av Antarktis har havsisens utbredning däremot ökat något sedan 1970-talet, kanske som en följd av förändringar hos områdets dominerande luftströmmar.

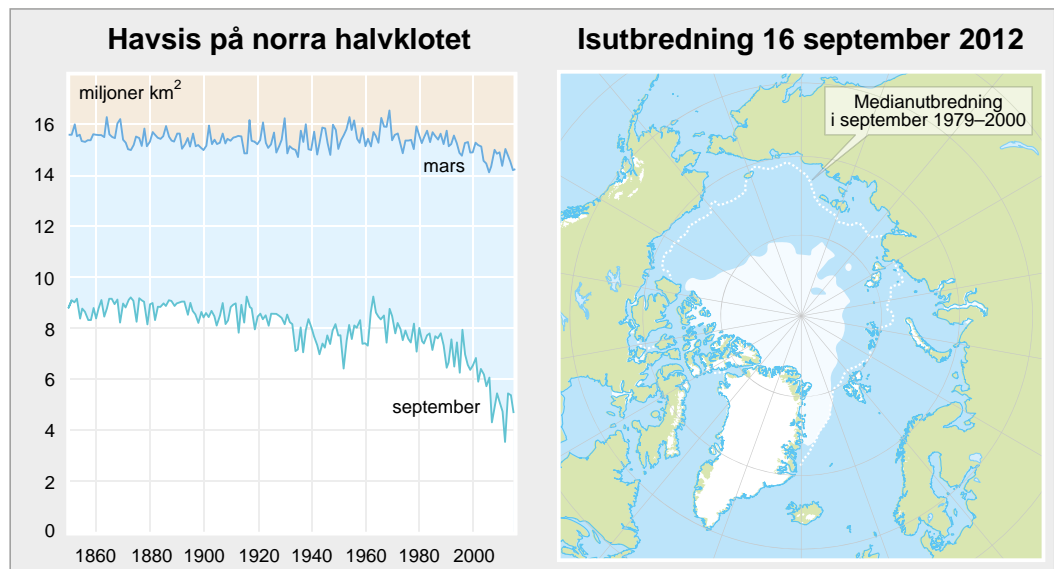
I samtliga bergstrakter på jorden, däribland de skandinaviska fjällen, har *glaciärerna* krympt markant sedan 1800-talet. I typiska fall har de dragit sig tillbaka med 5–20 m per år, och många har helt försvunnit. Mycket tyder på att Alpernas glaciärer nu är mindre än på flera tusen år. En av indikationerna är ”ismannen” Ötzi som år 1991 upptäcktes i ett bergspass på gränsen mellan Österrike och Italien. Det är ingen tillfällighet att han töade fram just i vår tid efter att ha legat infrusen i mer än femtusen år.

På många håll i världen började glaciärernas tillbakagång redan i mitten av 1800-talet, ett bra tag före våra dagars markanta temperaturhöjning. Förmodligen var detta ett resultat av den mer blygsamma uppvärmning som markerade slutet på lilla istiden (se s. 35).

Men glaciärernas omfång är inte bara beroende av temperaturen och dess inverkan på isavsmältningen utan också av den nederbörd som



Istäcket på Norra ishavet har krympt påtagligt under de senaste decennierna, i synnerhet sommartid. I september 2012 var havsisens utbredning den i särklass minsta som dittills uppmätts. Vidsträckt havsområden norr om Sibirien låg helt isfria, liksom även Nordvästpassagen genom Kanadas övärld.  
– Data från Walsh *et al.* 2016 och National Snow and Ice Data Center, Boulder.



År 2016 började år och sjöar med smältvatten uppträda på den grönländska inlandsisens yta redan i juni. Via sprickor i isen tar sig mycket av smältvattnet efterhand ned till istäckets botten. Då minskar friktionen mellan is och underlag, vilket innebär att isen kan börja glida snabbare ut mot havet.

Området på satellitbilden nedan mäter ca 20 km tvärs över.

svarar för isens återväxt. I de västliga delarna av den skandinaviska fjällkedjan slutade många glaciärer att krympa kring 1990, och åtskilliga av dem började växa igen. Det här var främst en respons på att vintrarnas snöfall tillfälligt hade blivit rikligare. På senare år har vinternederbörden i området åter minskat, samtidigt som uppvärmningen har fortsatt. Glaciärerna har därför återupptagit sin reträtt. Eftersom glaciärer kan behöva flera decennier för att till fullo anpassa sin storlek till ett förändrat klimat lär deras tillbakagång fortsätta världen över, även om den globala uppvärmningen plötsligt skulle upphöra.

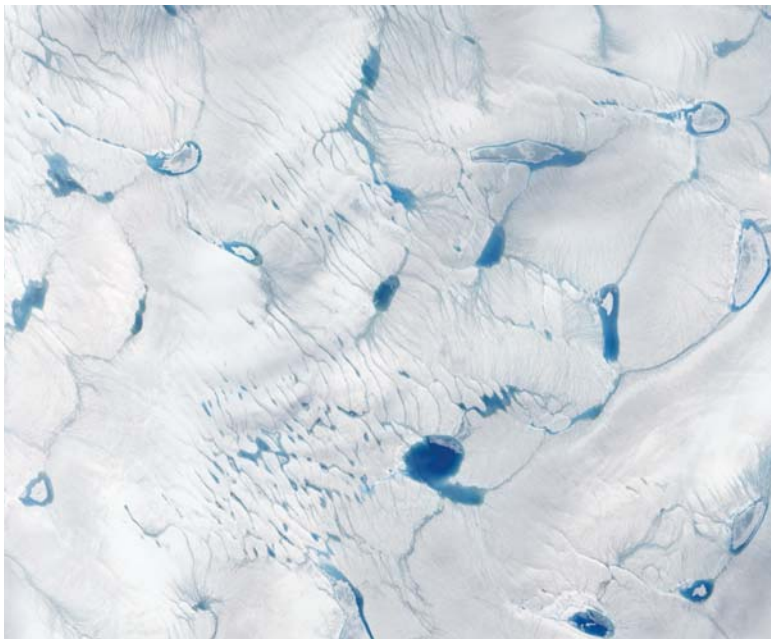
De stora *inlandsisarna* på Grönland och i Antarktis kan behöva årtusenden för att nå balans med ett nytt klimat, exempelvis när en istid har avlösts av en interglacial. Inte desto

mindre har de visat sig reagera oväntat raskt på den nutida temperaturhöjningen.

Sedan 1990-talet har Grönlandsisens omfång sålunda avtagit i ett allt snabbare tempo. Avsmältningen sommartid har inte bara ökat kraftigt längs inlandsisens ytterkanter utan även spridit sig allt längre in mot istäckets centrala delar. En hel del is försvinner också via de glaciärtungor som sakta glider ut mot havet, där de smälter eller lämnar ifrån sig isberg genom ”kalvning”. I Antarktis domineras förlusterna av is helt av den sistnämnda processen. Där är det så kallt att smältvattenavrinningen är nästan obefintlig även sommartid. Ändå har även den antarktiska inlandsisen minskat i omfång sedan 1990-talet, av allt att döma i accelererande takt.

Det vi nu kan konstatera är att en glaciärtunga överraskande snabbt och lätt kan börja glida fortare. Så har exempelvis skett på Antarktiska halvön under de senaste decennierna – flera vidsträckta shelfisar som länge legat och flutit utanför kusten har där skingrats efter en markant lokal höjning av lufttemperaturen. Shelfisarna bestod av is som långsamt hade strömmat ut till havs via ett antal glaciärtungor. Så länge de låg kvar utgjorde de ett hinder för dessa isströmmar, men när de försvann började glaciärtungorna röra sig upp till åtta gånger snabbare än förut.

På andra håll, inte minst på Grönland, tycks det ökade utflödet av is till havet främst bero på att havsvattnet har blivit varmare. Glaciärtungor som mynnar i havet har gradvis underminerats genom avsmältning. På så sätt har de börjat tappa kontakten med berggrunden och kunnat glida allt snabbare.



## EXTREMA VÄDERHÄNDELSE SEDAN ÅR 2000

Var för sig behöver ingen av de händelser som beskrivs här betyda att klimatet har förändrats. Sammantagna talar de likväl för att flera extrema vädertyper har blivit vanligare än förr.

### Några exempel från Sverige

**2000** Året blev det mest nederbördsrika som hittills registrerats i landet. Efter intensiva höstregn i Bohuslän och Dalsland steg sjön Glafsforden i november drygt 3 m över sin medelvattennivå, varvid låglänta delar av Arvika översvämmades. Vattnet fortsatte mot Vänern, vars vattenstånd ett par månader senare nådde 4 dm högre än det gjort någon gång sedan sjön reglerades år 1939.

**2002** Sommartemperaturen blev den högsta som någonsin uppmätts i Sverige. På många håll rådde torka, men lokalt förekom häftiga åskregn. Över västra Orust föll ca 200 mm regn natten till den 2 augusti, med svåra skador på vägar och annan infrastruktur som resultat.

**2005** Stormen Gudrun, som drog fram över Götaland den 8–9 januari, blev genom sina härjningar i skogarna den värsta naturkatastrof som drabbat vårt land i modern tid (se s. 136).

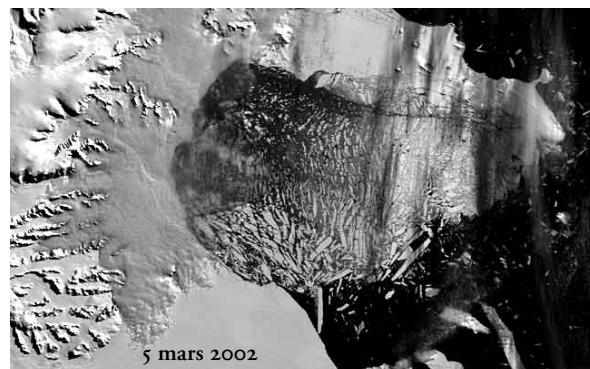
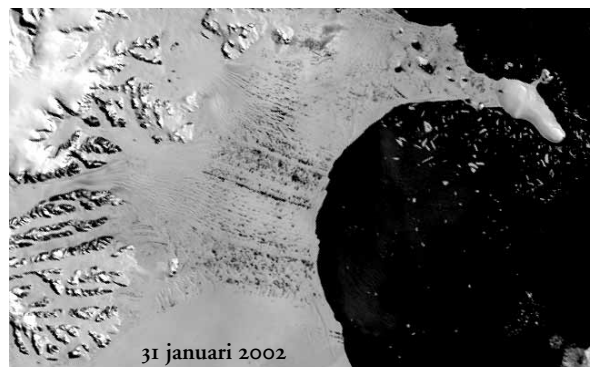
**2006** Hösten blev rekordblöt i stora delar av landet. Efter ihållande regn inträffade i december ett jordskred som drog med sig nästan 500 m av Europaväg 6 utanför Munkedal i Bohuslän.



E6 i Bohuslän efter jordskredet 2006.

**2014** Årsmedeltemperaturen blev den högsta som hittills noterats i landet. I juli/augusti medverkade hetta och torka till att en skogsbrand i Västmanland blev den största som förekommit i Sverige på mycket länge (se s. 10). Följande vinter blev isutbredningen i Östersjön den minsta som någonsin registrerats.

### Några exempel från omvärlden



MODIS & NATIONAL SNOW AND ICE DATA CENTER

Den is som 2002 försvann från den Antarktiska halvön täckte ett område stort som Gotland.

**2002** I februari bröts 3 250 km<sup>2</sup> av den drygt 200 m tjocka shelfisen Larsen B vid Antarktiska halvön sönder och skingrades. Mycket talar för att shelfisen funnits på plats under alla de drygt tiotusen år som passerat sedan istiden, men under senare hälften av 1900-talet steg medeltemperaturen i området med 1,5 grader, och det blev mer än vad isen tålde.

**2002** Häftiga regn åstadkom i augusti omfattande översvämningar i Centraleuropa, framför allt i Tjeckien, Österrike och sydöstra Tyskland. Förödelsen betecknades som den värsta i sitt slag som förekommit i området i historisk tid. I Dresden steg floden Elbe 7,4 m högre än normalt, den högsta nivå som uppmätts sedan noteringar inleddes år 1275. Delar av staden måste evakueras. Även Prag sattes delvis under vatten, och många gamla byggnader och andra kulturskatter förstördes. Översvämningarna vållade mer än hundra dödsfall, och skadorna värderades till drygt 130 miljarder kronor.

ADAMIHSE/TTNYHETSBYRÅN



**2003** I Centraleuropa inträffade i augusti en värmebölja som av allt att döma saknade motstycke minst 500 år bakåt i tiden (se s. 149). Mängder av gamla, svaga eller sjuka människor dukade under av överhettning och uttorkning. Sammanlagt krävde hettan mer än 40 000 dödsoffer, vilket gjorde den till Europas svåraste naturkatastrof sedan jordbävningen i Messina år 1908.

**2004** I mars bildades en tropisk cyklon utanför Brasiliens kust, den första som någonsin iakttagits på Sydatlanten. Vattentemperaturen i detta havsområde hade tidigare ansetts vara alltför låg för att tropiska cykloner skulle kunna utvecklas där, men den uppfattningen fick nu revideras.



MODIS/NASA

Sydatlantens första tropiska cyklon, utanför Brasilien år 2004.

**2005** På hösten drabbades Nordatlanten av en orkansäsong som slog nästan alla rekord. Av de 28 tropiska cykloner som då uppträdde i området nådde femton orkanstyrka. Hos fyra av dessa översteg medelvindarna 69 m/s, vilket innebar att de räknades till orkankategori 5, den värsta av alla.

En av orkanerna var Katrina, som vållade 1 800 dödsoffer och skador för 150 miljarder dollar när den svepte in över New Orleans. En annan, Vince, blev den första som dragit in över Spanien och Portugal. En viktig orsak till den höga cyklonaktiviteten var att havsvattnet under sommaren och hösten var rekordvarmt i de delar av Atlanten där ovädren utvecklades.

**2009** Under en extrem värmebölja med temperaturer kring 45 grader drabbades Australien av en rad intensiva skogs- och buskbränder som enbart den 7 februari krävde 173 dödsoffer.

**2010** Sommarhettan i Europa blev ännu intensivare än den hade varit 2003. I Ryssland bedöms ca 55 000 personer ha mist livet på grund av värmen samt röken från ett stort antal skogsbränder (se s. 149).

**2012** Norra ishavet blev under sensommaren isfritt i större omfattning än vad som förut inträffat under alla de år övervakningen pågått (se s. 45). Samtidigt blev sommarens ytavsmältning på Grönlandsisen rekordstor.

**2015–16** En kraftig El Niño (se s. 37) medverkade till att den globala årsmedeltemperaturen för första gången nådde mer än en grad över förindustriell nivå. Medeltemperaturen för februari 2016 låg 1,6 grader över februarigenomsnittet för åren 1881–1900. I Kuwait noterades den 21 juli 2016 värmerekord för Asien med 54 grader.

Under sommaren och hösten 2015 bidrog hetta och torka till omfattande skogsbränder i bl.a. Indonesien. Att koldioxidhalten i atmosfären under 2015 steg kraftigare än vad som någonsin tidigare uppmätts bör åtminstone delvis ha varit en följd av bränderna och torkan i tropikerna.

Den höga ytvattentemperaturen i Stilla havet utanför Mexiko medverkade till att den tropiska orkanen Patricia i oktober slog rekord i medelvindhastighet med drygt 95 m/s. Under vintern frös Norra ishavet i mindre omfattning än vad som någonsin tidigare registrerats.

I samband med rekordvärme och torka utbröt i maj 2016 en skogsbrand kring Fort McMurray i Alberta som kom att omfatta 5 900 km<sup>2</sup> och blev den kostsammaste naturkatastrofen i Kanadas historia.



BLOOMBERG/GETTY IMAGES

Skogsbranden kring Fort McMurray i Kanada rasade i två månader innan den i juli 2016 bedömdes vara under kontroll.

## Havsytan stiger, av flera skäl

Våra dagars globala uppvärmning har också medverkat till att *världshavets nivå* stiger. Den kraftiga nivåhöjning som inleddes i den senaste istidens slutskede upphörde nästan helt för ca 3 000 år sedan, men under senare delen av 1800-talet började havet sakta stiga på nytt. Under 1900-talet höjdes vattenståndet med ca 17 cm, och på sistone förefaller höjningen ha accelererat. Enligt mycket noggranna satellitmätningar som påbörjades 1993 har havsnivån sedan dess stigit i en takt motsvarande ca 34 cm per sekel.

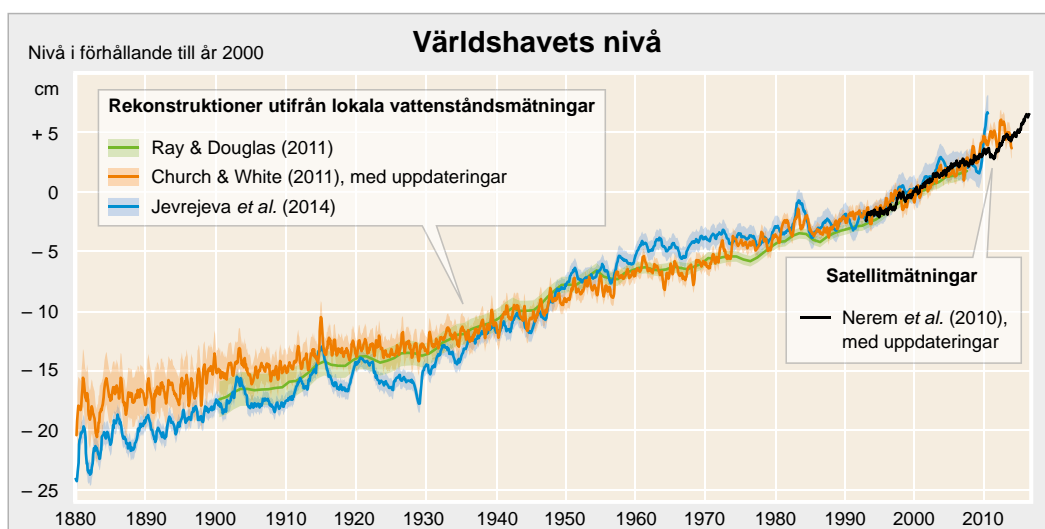
En av orsakerna till att havet stiger är att vatten expanderar när det värms upp. Sedan 1960-talet har världshavets genomsnittstemperatur mellan ytan och 700 meters djup ökat med en tiondels grad (se s. 37). En mindre temperaturuppgång tycks ha ägt rum också på större djup. I takt med att uppvärmningen sprider sig nedåt från ytan får vattnets expansion allt större inverkan på havsnivån. Den bedöms ha svarat för en dryg tredjedel av nivåhöjningen sedan 1993.

Havsnivån påverkas därtill när vatten omfördelas mellan land och hav. Drygt en fjärdedel av nivåhöjningen sedan 1993 beror på vattentillförseln från smältande glaciärer i bergstrakterna. I och med att också inlandsisarna på Grönland och i Antarktis har börjat krympa lämnar även de numera ett märkbart bidrag till havsnivåns höjning. Tillsammans beräknas de ha stått för närmare 20 procent av höjningen sedan 1993. Att deras bidrag till stor del består i förhöjd ut-

transport av is i stället för smältvattenströmmar gör ingen skillnad – effekten på vattenståndet i havet blir densamma. De glaciärtungor som glider ut från inlandsisarna inverkar på havsnivån så snart de når kusten och sjösätts i form av shelfisar eller isberg. Att isbergen senare smälter ute till sjöss saknar däremot betydelse för vattenståndet, som inte heller förändras när havsis bildas eller smälter.

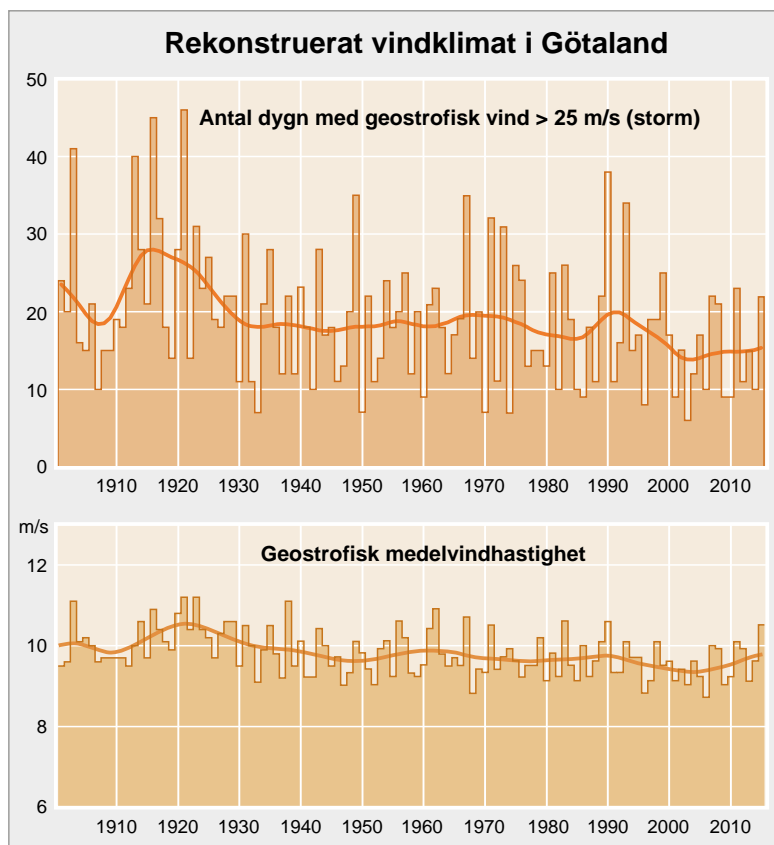
I viss mån har fördelningen av vatten mellan land och hav även förändrats genom direkta mänskliga ingrepp. Med hjälp av de dammar och vattenreservoarer som byggts under de senaste hundra åren hindrar vi så mycket flodvatten från att rinna direkt ut i havet att det motsvarar en sänkning av världshavets nivå med 2–3 cm. Att pumpa upp grundvatten får motsatt verkan – våra dagars stora grundvattenuttag för bl.a. bevattning beräknas ha bidragit med minst 10 procent av havsnivåhöjningen sedan 1993.

Det lokala vattenståndet längs kusterna kan förändras på ett helt annat sätt än havets globala medelnivå, främst till följd av landhöjning eller landsänkning. I norra och mellersta Sverige är landhöjningen så snabb att den mer än väl uppväger världshavets nutida nivåhöjning. Där fortsätter landet att stiga ur havet precis som det har gjort allt sedan den skandinaviska berggrunden upphörde att tyngas ned av inlandsis. I stora delar av Götaland är landhöjningen däremot så långsam att den inte längre förmår hålla takten med havsnivåns höjning, och där åter sig havet nu på flera håll märkbart in på kustlinjerna.



Världshavets nivå stiger av allt att döma i accelererande takt. De senaste årens noggranna satellitmätningar tyder på att havsnivån nu höjs nästan dubbelt så snabbt som genomsnittet för 1900-talet.

Förutom satellitdata visar diagrammet tre olika rekonstruktioner av havsnivåns förändringar sedan drygt hundra år. De bygger på sammanvägningar av ett stort antal lokala vattenståndsmätningar.



I Sverige är det mindre blåsigt i dag än det var i början av 1900-talet.

Diagrammen visar beräkningar som bygger på lufttrycksskillnaderna mellan Lund, Göteborg och Visby. Den geostrofiska vinden är den vind som tryckskillnaderna skulle orsakat om luften inte hade bromsats av friktion mot jordytan. Den faktiska vindstyrkan vid marken är i allmänhet lägre än den geostrofiska.

– Data från SMHI.

## Oklar utveckling av stormfrekvensen

Att finna trender i *stormarnas* antal och intensitet är besvärligt. Någorlunda tillförlitliga mätningar av vindhastigheten finns bara sedan 1900-talets mitt, och stormarna är så pass ovanliga att det av rent statistiska skäl är svårt att avgöra huruvida de långsiktigt har blivit fler eller färre under en så begränsad tidrymd.

I global skala går det i alla händelser inte att utläsa någon entydig förändring av stormfrekvensen under det gångna halvsekle. På Nordatlanten syns dock en tendens till att vinterstormarna sedan 1950-talet blivit fler och intensivare på höga latituder, medan de blivit färre på mellanbredderna. Det kan hänga samman med att lågtrycksbanorna under samma period tycks ha dragit sig närmare polerna.

En del indirekta metoder ger vissa möjligheter att spåra förändringar i stormfrekvensen även när vindmätningarna själva inte är tillräckligt användbara. Exempelvis ger de lufttrycksskillnader som i ett visst ögonblick rådde mellan olika väderstationer en ganska god uppfattning om hur mycket det då blåste i området mellan stationerna. Ju större tryckskillnaderna var, desto kraftigare bör vinden ha varit.

På det sättet har förekomsten av vinterstormar i Nordvästeuropa analyserats från slutet av 1800-talet och framåt. Resultaten tyder på att stormar var vanliga fram till omkring 1920, men att frekvensen sedan på de flesta håll avtog till 1960-talet. Därefter ökade antalet stormar markant fram till början av 1990-talet, för att på sistone åter minska. Sett över hela perioden har stormfrekvensen avtagit inom större delen av området, även om nedgången i allmänhet inte är statistiskt säkerställd.

I Sverige, där mer detaljerade analyser utförts med samma teknik, har stormfrekvensens nedgång sedan 1990-talet varit mycket påtaglig. Här ser vi också en långsiktig minskning av medelvindhastigheten sedan 1900-talets början.

De *tropiska cykloner* som tidvis härjar närmare ekvatorn har enligt tillgänglig statistik varken blivit fler eller färre på senare år. Men cyklonernas skadeverkningar är strängt taget av större intresse än deras antal, och åtminstone på Atlanten har deras destruktivitet av allt att döma tilltagit. Där har de allra våldsammaste cyklonerna – med genomsnittliga vindstyrkor kring 60 m/s och däröver – utan tvekan blivit fler och intensivare sedan 1970-talet.

Tropiska cykloner kan bara utvecklas över varma havsområden. Närmare bestämt måste ytvattnets temperatur överstiga 26 grader, men den globala uppvärmningen innebär att så nu sker under allt längre tid och inom allt större områden. Cyklonernas tendens att bli intensivare skulle därför kunna vara en direkt följd av den pågående temperaturhöjningen.

## Någonting har hänt – men varför?

Den temperaturuppgång som inleddes i början av 1900-talet avviker markant från klimatets tidigare utveckling allt sedan vår tideräknings början och sannolikt ännu längre bakåt. Samtidigt som det blivit varmare har nederbörden blivit intensivare, glaciärerna har dragit sig tillbaka, snö- och istäckena har krympt, och havet har börjat stiga snabbare än det gjort på åtskilliga tusen år. Någonting har uppenbarligen hänt med jordens klimat under det senaste århundradet. Men att vi har kunnat *påvisa* en markant klimatförändring är en sak – en helt annan sak är att avgöra vad som är *upphovet* till förändringen. I nästa kapitel ska vi granska de förklaringar som ligger närmast till hands.

# 5 Varför förändras klimatet nu?

ÅR 1988 FÖREFÖLL OROANDE saker hända med klimatet på jorden. Sommarhettan blev på många håll extrem, med förödande torka som följd, och den globala årsmedeltemperaturen nådde högre än vad som någonsin tidigare hade registrerats. I USA framförde atmosfärfysikern James E. Hansen inför en senatskommitté sin övertygelse att klimatet höll på att bli varmare. Han hävdade att detta med 99 procents sannolikhet var människans verk.

## Delade meningar om människans roll

Tanken att människan kunde vara på väg att förändra klimatet var ingalunda ny – sedan flera decennier hade den möjligheten studerats inom klimatforskningen. Men uppfattningen fick kraftigt ökad spridning bland massmedia, allmänhet och beslutsfattare efter James E. Hansens uttalande, inte minst genom att detta sammanföll i tiden med vädersituationer som vållade mycket kännbara problem.

Samma år, 1988, upprättades den internationella klimatpanelen *IPCC*, ett samarbetsorgan för klimatforskare i hela världen. Under ordförandeskap av Bert Bolin, professor i meteorologi vid Stockholms universitet, inledde flera hundra forskare omgående arbetet med att sammanställa en första omfattande utvärdering av klimatförändringarnas upphov och konsekvenser.

Utvärderingen, som publicerades av *IPCC* år 1990, pekade på både naturliga och antropogena (dvs. av människan orsakade) processer som kunde ha medverkat till uppvärmningen på jorden under 1900-talet. Forskarna ansåg sig ännu inte kunna fastslå att människan hade

påverkat klimatet, men de förutspådde att vi framöver kommer att förorsaka en fortsatt temperaturhöjning som med tiden kan få allvarliga följder för både samhället och naturen.

Samtidigt höjdes röster som starkt ifrågasatte *IPCC*:s bedömningar. Enstaka kritiker fanns inom klimatforskarnas egna led, och deras invändningar har i flera fall bidragit till ökad kunskap genom att de föranlett en skärpt granskning av tillgängliga observationer, teorier och modeller. Men klimatförändringar är ett ämne som engagerar många, och kritik mot de dominerande uppfattningarna inom området framfördes även av personer utanför kretsen av egentliga klimatforskare.

Kritik av det slaget, välunderbyggd eller ej, fick ett stort publikt genomslag, åtminstone till en början med massmediernas hjälp. Allmänheten delgavs en tämligen missvisande bild av klimatforskarna såsom delade i två ungefär jämnstarka läger, sinsemellan djupt oeniga om vilken roll människan spelar för jordens klimat.

Framför allt i Nordamerika har *IPCC* och den etablerade klimatforskningen också mött ett organiserat motstånd från konservativa tankesmedjor, lobbyister och PR-institut. Bakom detta motstånd, som på åtskilliga håll fortgår än i dag, ligger i allmänhet ekonomiska intressen – många företag och branscher har känt sig hotade av de åtgärder som skulle kunna bli aktuella för att reducera klimatförändringarna.

Återkommande teman i kritiken har varit att klimatet i själva verket inte alls har förändrats under senare tid, *eller* (om det trots allt har förändrats) att förändringen är övervägande naturlig, *eller* (om den trots allt inte är naturlig) att uppvärmningen är och förblir harmlös, kanske rentav välgörande. Kontentan har blivit att ingenting behöver göras för att minska människans eventuella inverkan på klimatet.

## FN:S KLIMATPANEL IPCC

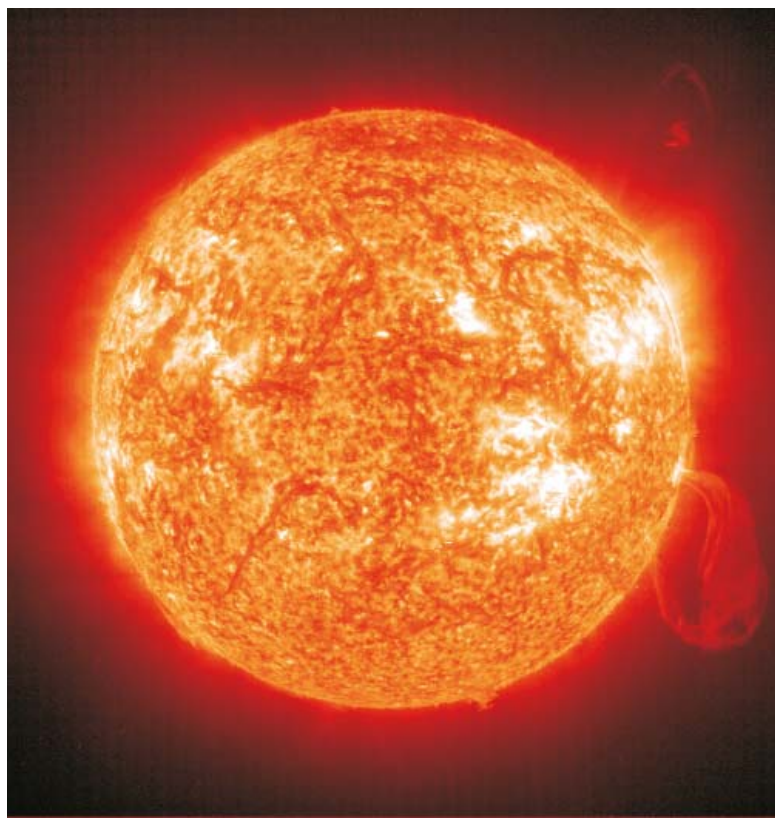
Den internationella klimatpanelen IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) upprättades år 1988 av FN:s miljöprogram UNEP och Världsmeteorologiska organisationen (WMO). Klimatpanelens uppgift är att utvärdera och sammanfatta vetenskaplig, teknisk och socioekonomisk kunskap som kan belysa följderna av mänsklig påverkan på klimatet.

Alla länder och organisationer som är medlemmar i UNEP eller WMO kan också delta i klimatpanelens arbete. För närvarande medverkar hela 195 nationer i IPCC. Merparten av arbetet bedrivs inom tre arbetsgrupper inriktade på (I) klimatsystemet och dess förändringar, (II) klimatförändringarnas konsekvenser för samhälle och naturmiljö, inklusive de möjligheter som finns till anpassning, samt (III) metoder för begränsningar av växthusgasutsläppen och andra möjligheter att reducera klimatförändringarna.

Panelens rapporter utformas av ett stort antal forskare som nominerats av medlemsländerna. Mer än 800 forskare deltog i arbetet med de rapporter som

IPCC publicerade år 2013–14. Rapporterna bygger på befintlig vetenskaplig litteratur – IPCC bedriver ingen egen forskning och inga egna observationer av klimatets förändringar. Inte desto mindre har panelens utvärderingar ofta inspirerat till ny forskning. Innan utvärderingarna publiceras genomgår de en omfattande vetenskaplig granskning. Mer än 100 000 expertkommentarer togs emot och bedömdes under arbetet med de rapporter som offentliggjordes 2013–14. En sammanfattning av varje rapport, riktad till politiker och andra beslutsfattare, granskas också av representanter för de medverkande staternas regeringar.

Klimatpanelens utvärderingar lämnar inga rekommendationer om lämpliga åtgärder mot klimatstörningarna utan är i stället avsedda som beslutsunderlag. De har blivit allmänt accepterade som vetenskaplig grundval för de förhandlingar om begränsningar av klimatpåverkande utsläpp som bedrivs inom ramen för FN:s klimatkonvention (se s. 172). Tillsammans med Al Gore tilldelades IPCC Nobels fredspris 2007.



SOHO/ET (ESA & NASA)

Sedd i ultraviolett ljus ger solen ett dramatiskt intryck. Den förefaller kapabel att orsaka hur våldsamma klimatförändringar som helst. Men i själva verket är det en ganska obetydlig del av solenergin som sänds ut inom det här våglängdsområdet, och det är oklart i vad mån det ultravioletta solljuset över huvud taget inverkar på klimatet vid jordytan.

## Liten och numera minskande inverkan av solaktiviteten

Temperaturens fortsatta uppgång har gjort det allt svårare att med någon som helst trovärdighet ifrågasätta att klimatet håller på att förändras. Alltjämt framförs däremot vitt skilda åsikter om *orsakerna* till den pågående klimatförändringen, och i all synnerhet om huruvida naturliga eller antropogena processer dominerar.

Den källa till naturliga klimatförändringar som står i centrum för intresset är variationerna i *solens* aktivitet och ljusstyrka. Förändringarna av solens totala energiutstrålning kunde emellertid inte mätas med någonlunda säkerhet förrän 1978. De satellitobservationer som inleddes då har visat att solstrålningen varierar i takt med solfläckarnas och solaktivitetens elvaårscykel (se s. 17), men att förändringarna bara uppgår till en knapp promille. Så små skiftningar i solens totala ljusstyrka kan inte få annat än obetydliga effekter på jordens klimat. Med viss möda går det ändå att urskilja en inverkan av solens elvaårscykel på temperaturen vid jordytan, men förändringarna är inte större än en tiondels grad. Det innebär att de oftast drunknar bland andra naturliga eller antropogena klimatvariationer.

Med hjälp av data om solfläckar och annan solaktivitet har flera försök gjorts att rekonstruera hur solstrålningen förändrades innan satellitobservationerna inleddes. Rekonstruktionerna är osäkra, men de tyder på att strålningen ökade något under 1900-talets första hälft. Om detta är riktigt bör ökningen i viss mån ha bidragit till temperaturuppgången på jorden under samma tid. Solaktivitetens kraftigaste uppgång under det gångna seklet ägde å andra sidan rum på 1940- och 1950-talen, ett tjugotal år *efter* den markanta temperaturhöjningen i seklets början.

Att den snabba uppvärmning som ägt rum på jorden sedan 1970-talet skulle ha orsakats av ökad solstrålning förefaller däremot uteslutet. Solen står numera under fortlöpande och noggrann övervakning. De upp- och nedgångar i energitustrålningen som hör till elvaårscykeln kan följas i detalj, men mätningarna visar ingen långsiktig ökning som skulle kunna förklara temperaturens uppgång. Tvärtom har solaktiviteten och solstrålningen tenderat att minska de senaste decennierna. Enligt de nyss nämnda rekonstruktionerna kan strålningen fortfarande vara något kraftigare än den var under 1700- och 1800-talen, men skillnaden är av allt att döma liten.

Oavsett vad som har hänt med solstrålningen kan den dessutom inte förklara att det nu har blivit kallare i stratosfären samtidigt som det har blivit varmare vid jordytan (se s. 37). En förändring av strålningen får samma värmande eller avkylande effekt i hela atmosfären, såväl på hög höjd som nere vid marken.

### **Även vulkanismen har motverkat den sentida uppvärmningen**

*Vulkanutbrottens* förmåga att påverka klimatet via sin inverkan på stratosfärens partikelinnehåll är väldokumenterad. Efter den ostindiska vulkanen Tamboras utbrott år 1815 – sannolikt den största explosiva eruption som har inträffat på jorden sedan medeltiden – blev det så kallt att 1816 i stora delar av Europa och Nordamerika fick benämningen ”året utan sommar”. Ett annat exempel är den filippinska vulkanen Pinatubos eruption år 1991, som sänkte temperaturen på norra halvklotet med ett par tiondelar av en grad åren 1992 och 1993 (se s. 21).

Historiska dokument i kombination med kemiska analyser av bl.a. inlandsis ger goda möj-

ligheter att spåra vulkanutbrott mer än tusen år bakåt i tiden. Mycket talar för att vulkanismen kan förklara en stor del av klimatets variationer under förindustriella sekler.

Visserligen avklingar klimateffekterna av en enskild eruption inom ett par år, i och med att partikelslöjorna gradvis lämnar stratosfären och återvänder mot jordytan. Inte desto mindre åstadkommer slumpen tidvis flera stora vulkanutbrott i ganska tät följd, vilket kan medföra en avkylning som varar i ett eller flera årtionden. Så tycks exempelvis ha skett under senare delen av 1200-talet, liksom kring år 1800. Också kring år 1900 inträffade ett antal stora eruptioner, men därefter var den vulkaniska aktiviteten ovanligt låg under åtskilliga decennier. Till viss del kan detta ha medverkat till temperaturens uppgång under första hälften av 1900-talet.

Mot slutet av seklet kom åter en serie relativt stora eruptioner – Agung 1963, El Chichón 1982 och framför allt Pinatubo 1991, som fick störst effekt på klimatet av alla utbrott under det gångna århundradet. Sammantagna innebär dessa eruptioner att vulkanismens avkylande verkan tilltog något under 1900-talets sista decennier, även om effekterna av varje enskilt utbrott blev kortvariga. Men den perioden kännetecknades ju i själva verket av markant stigande medeltemperatur på jorden. Förklaringen till denna sentida uppvärmning måste alltså sökas någon annanstans än i vulkanismen.

### **Kraftigt ökade halter av naturliga växthusgaser**

I jordatmosfären och dess sammansättning finner vi förändringar som faktiskt bör ha haft goda förutsättningar att åstadkomma den snabba temperaturhöjningen sedan 1970-talet: Atmosfärens *växthusverkan* har under denna tid stadigt ökat till följd av raskt stigande halter av växthusgaser.

Luftens halt av *koldioxid* började så sakta öka redan kring år 1800 efter att dessförinnan ha hållit sig kring eller strax under 280 ppm (parts per million, dvs. miljondelar av den totala luftvolymen) allt sedan istiden upphörde. Det är genom analyser av luftbubblor i is från olika djup i inlandsisarna som vi har kunnat följa haltförändringarna så långt tillbaka i tiden.

Ännu på 1960-talet hade koldioxidhalten inte nått högre än 320 ppm, men vid det laget

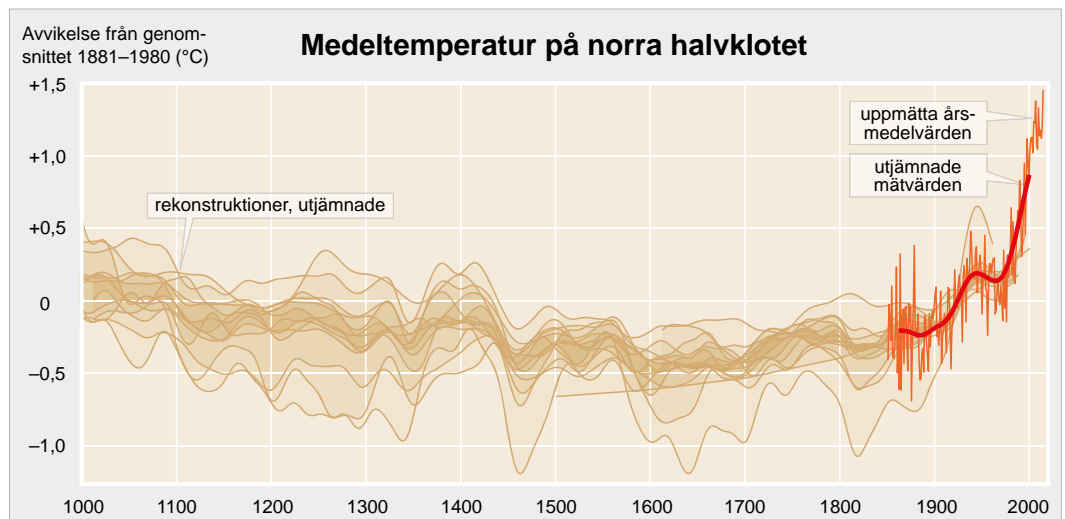
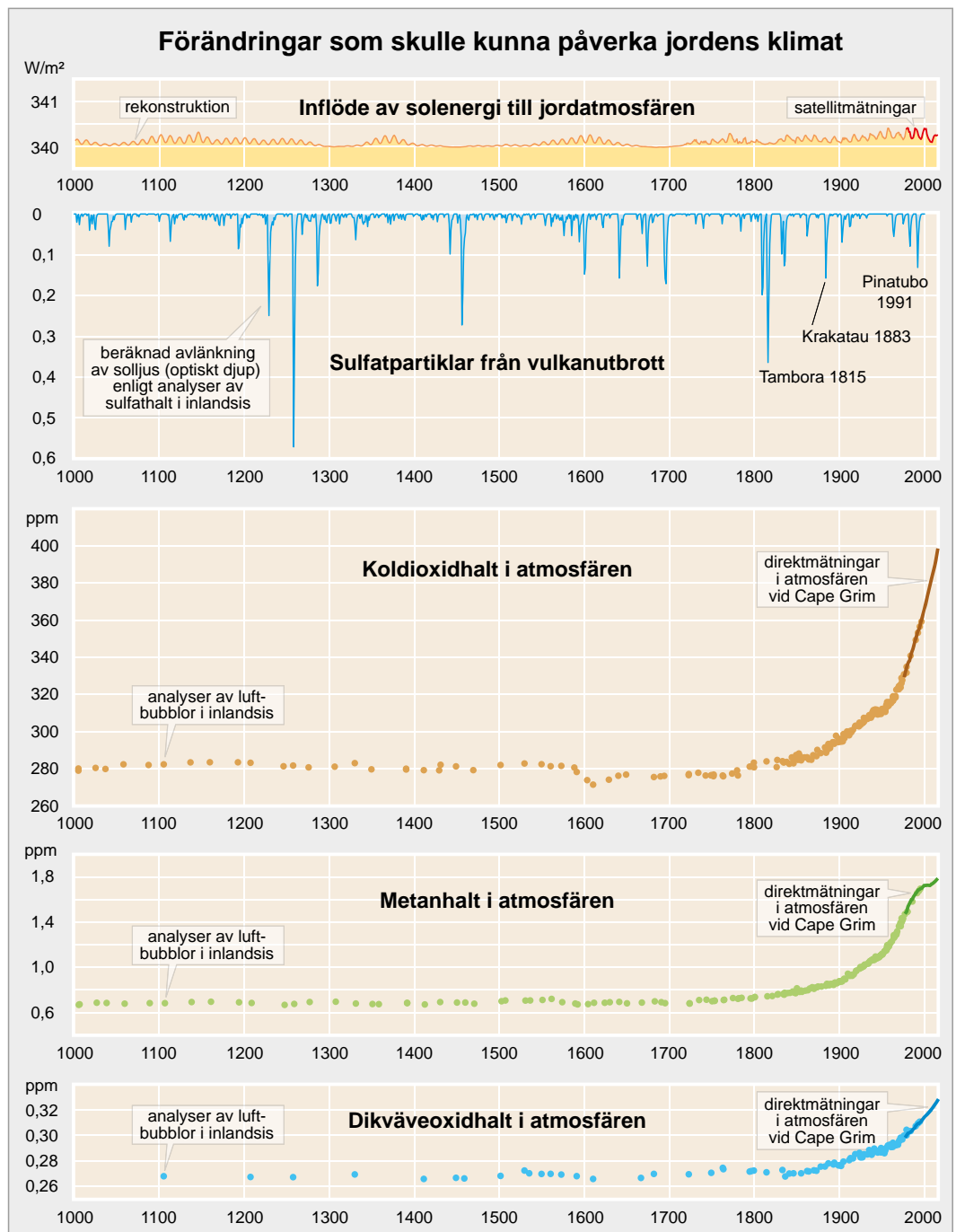
Förändringar av energiinflödet från solen skulle kunna inverka på jordens klimat, men de nutida variationerna är mycket små.

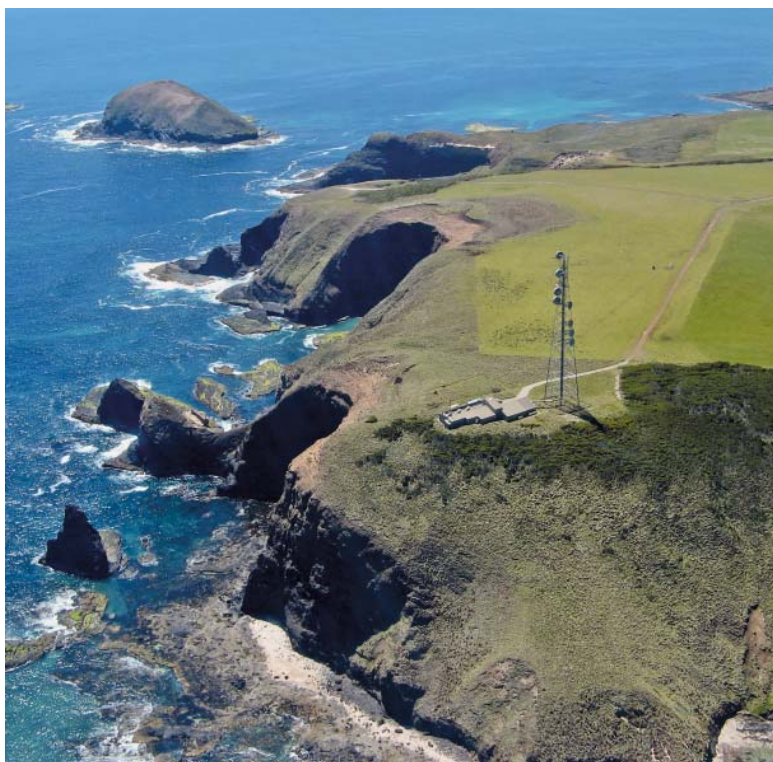
Partiklar från vulkanutbrott kan blockera solljuset och därigenom få en påtaglig kylande verkan, men de effekterna är sällan långvariga.

Människans utsläpp av koldioxid, metan och dikväveoxid har medfört att luftens halter av dessa gaser stiger sedan ett par sekler tillbaka. På så sätt förstärks atmosfärens växthuseffekt. Merparten av utsläppen äger rum på norra halvklotet, men gaserna sprider sig världen över. På södra halvklotet, där mätningarna i diagrammen har gjorts, är halterna nästan lika höga som i norr.

– Underlag från IPCC 2013, box TS5 fig. 1, samt Fröhlich 2006 med uppdateringar från PMOD (solstrålning); Crowley & Unterman 2013 (vulkanism); IPCC 2013, fig 6.11, med uppdateringar från CSIRO (växthusgaser).

Det senaste seklets kraftiga uppvärmning stämmer väl överens med växthusgasernas haltökningar, medan solstrålningen och vulkanismen har varierat på annat sätt. Här återges data från norra halvklotets kontinenter. Globalt är uppvärmningen något mindre, men mönstret är detsamma. – Underlag från IPCC 2013, fig. 5.7, samt CRU, Univ. of East Anglia (mätserie: CRUTEM<sub>4</sub> NH).





Vid Cape Grim på Tasmaniens västkust, långt från alla större föroreningskällor, finns en av de mätstationer som nu fortlöpande övervakar luftens innehåll av växthusgaser. När halterna stiger på en sådan här plats är det ingen tvekan om att det avspeglar förändringar i hela jordens atmosfär.

hade ökningen börjat accelerera kraftigt. Under senare tid har halten gått upp med ungefär 2 ppm per år, och accelerationen har tenderat att fortsätta. I dag har koldioxidhalten passerat 400 ppm, och så hög har den inte varit på åtminstone 800 000 år. Även ökningstakten tycks sakna motstycke under hela denna tid.

Till största delen beror koldioxidens haltökning på utsläpp vid förbränning av fossila bränslen såsom kol och olja, men som vi ska se längre fram (s. 69) påverkar människan luftens koldioxidinnehåll också genom sitt sätt att bruka åkrar, skog och annan mark.

Genom utsläpp och förändrad markanvändning inverkar människan därtill på atmosfärens halter av växthusgaserna *metan* och *dikväveoxid* (*lustgas*). Också dessa halter genomgick under gångna årtusenden bara långsamma och relativt små förändringar, men under 1700-talet började metanhalten märkbart röra sig uppåt, mot slutet av 1800-talet även dikväveoxidhalten. Halten av metan har sedan dess mer än fördubblats, medan dikväveoxidhalten har stigit med drygt 15 procent. I slutet av 1990-talet upphörde metanhalten tillfälligt att öka, men sedan 2007 har den åter stigit.

Fortfarande uppträder både metan och dikväveoxid i jämförelsevis blygsamma mängder i luften – de nutida globala genomsnittshalterna uppgår till drygt 1,8 respektive 0,32 ppm. I de våglängdsområden där dessa gaser absorberar

värmestrålning är atmosfären ännu relativt transparent (lättnomtränglig). Men det betyder att redan ganska små tillskott av metan och dikväveoxid märkbart ökar absorptionen vid våglängderna ifråga, med en tydlig förstärkning av växthuseffekten som följd.

Koldioxid har alltid förekommit många gånger rikligare i luften än metan och dikväveoxid. Det innebär att atmosfären redan i förindustriell tid var svärgenomtränglig för värmestrålning vid de våglängder där koldioxiden absorberar som kraftigast. När koldioxidhalten stiger försvåras värmestrålningens passage genom atmosfären ytterligare även vid dessa våglängder (se s. 24), men förstärkningen av växthuseffekten blir ändå relativt begränsad. Med andra ord måste koldioxidutsläppen vara förhållandevis omfattande för att påtagligt kunna inverka på värmestrålningen.

Utsläppen av koldioxid är mycket omfattande, och trots allt svarar de därigenom för mer än hälften av växthuseffektens förstärkning sedan förindustriell tid. Räknade per molekyl (eller per ton) får tillskotten av metan och dikväveoxid likväl mångfalt större växthusverkan än koldioxidutsläppen. Dessa ämnens bidrag till växthuseffekten är därför ingalunda försumbara jämfört med koldioxidens, fastän de släpps ut i betydligt mindre mängder.

En annan viktig växthusgas är *ozon* ( $O_3$ ), ett ämne som bildas i luften genom inverkan av solljus på andra gaser (se s. 77). Ozon är reaktivt och kortlivat, vilket innebär att det till skillnad från mer stabila ämnen – såsom koldioxid, metan och dikväveoxid – aldrig hinner få jämn spridning i hela jordatmosfären. Med andra ord varierar ozonhalten kraftigt mellan olika platser, höjdnivåer och tidpunkter. Det är därför svårt att bedöma atmosfärens genomsnittliga ozoninnehåll och hur det förändras på längre sikt. Sannolikt har den globala medelhalten av ozon i marknära luftlager stigit med 30–50 procent sedan förindustriell tid, men i Europa och andra industritäta områden tycks uppgången ha varit större. Den största ökningen ägde troligen rum 1950–80. På senare år har halten slutat stiga i Europa, men den fortsätter uppåt i tredje världen, en direkt följd av att industrialiseringen har spridit sig även dit.

Till de gaser som medverkar vid ozonbildningen i den lägre atmosfären hör kolmonoxid, kväveoxider och lättflyktiga kolväten (inklusive



metan). Alla dessa ämnen släpps numera ut som föroreningar av människan, vilket innebär att de uppträder i högre halter i dag än de gjorde i förindustriell tid – det är därför som även ozonhalten har stigit i marknära luftlager. Med undantag för metan saknar ämnena ifråga växthusverkan för egen del, men genom sina bidrag till uppkomsten av ozon fungerar de ändå som *indirekta* växthusgaser.

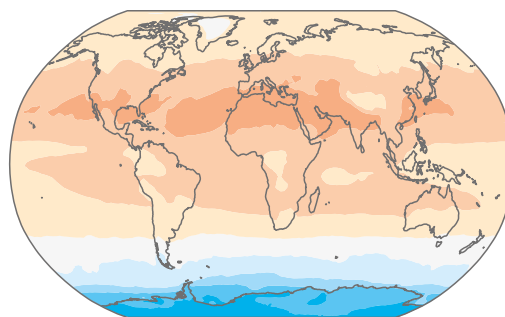
## Nya föroreningar förstärker växthuseffekten ytterligare

Upp i stratosfären finns betydligt större ozonmängder än i den lägre atmosfären, men där har ozonhalterna minskat. Detta beror på människans utsläpp av vissa mycket stabila gaser som innehåller klor eller brom. Hit hör främst olika varianter av *CFC* (klorfluorkarboner eller ”freoner”), *HCFC* (klorfluorkolväten) samt *haloner*. De sprider sig efterhand upp till stratosfären, och där bryter de ned ozonmolekyler.

Ozonskiktet i stratosfären är livsviktigt, eftersom det absorberar en stor del av den energirika ultravioletta strålning som kommer från solen. Om denna strålning ohejdad nådde ned till jordytan skulle den få en förödande verkan på alla levande organismer, inklusive människan. Därför väckte det oro när det på 1980-talet stod klart att ozonskiktet var på väg att tunnas ut.

Ozonuttunnningen tycks också vara huvudorsaken till temperaturnedgången i stratosfären sedan 1960-talet (se s. 38). Den solstrålning som absorberas av ozonet tillför stratosfären en hel del energi, men eftersom ozonmolekylerna är färre än tidigare har energitillförseln och därmed också lufttemperaturen avtagit på dessa höjdnivåer.

## Förändring av ozonhalten 1850–2000 – inverkan på strålningsbalansen



–0,88 –0,62 –0,38 –0,12 0,12 0,38 0,62  
strålningsdrivning (W/m<sup>2</sup>)

I marknära luftlager har halten av ozon ökat sedan 1800-talet. Detta har fått en värmande effekt, eftersom ozon är en växthusgas och alltså fångar upp värmestrålning. I stratosfären har ozonhalten emellertid sjunkit, över Antarktis så kraftigt att de sammantagna ozonhaltsförändringarna där har fått kylande verkan.

– Från Shindell *et al.* 2013.

våer. Minskad ozonhalt i stratosfären innebär därtill minskad absorption av den värmestrålning som anländer dit underifrån. Följden blir en viss försvagning av växthuseffekten som kan påverka klimatet även nere vid jordytan.

Å andra sidan fångar även de ozonnedbrytande ämnena upp värmestrålning. Räknat per molekyl är de i det avseendet tusentals gånger effektivare än koldioxid, framför allt på grund av att de absorberar strålning vid våglängder där atmosfären tidigare var nästan helt transparent. De orsakar därigenom en förstärkning av växthuseffekten som med råge uppväger den försvagning de indirekt åstadkommer genom ozonnedbrytning.

Numera tillförs atmosfären dessutom ett antal fluorhaltiga föroreningar som inte påverkar ozonskiktet men som i likhet med de ozonnedbrytande ämnena har mycket stor växthusverkan räknat per molekyl (se s. 78).

## Växthusgasernas verkan har delvis motverkats av sulfatpartiklar

Som vi sett har koldioxidens och flera andra viktiga växthusgasers haltförändringar med god noggrannhet kunnat mätas eller rekonstrueras långt tillbaka i förindustriell tid (ozon är det enda betydelsefulla undantaget). Det innebär att vi likaledes med god noggrannhet kan bedöma hur deras inverkan på värmestrålningen i atmosfären har förändrats sedan dess.

Hur förändringarna av strålningsbalansen i sin tur har inverkat på jordens temperatur är inte lika lätt att bedöma i detalj. Åtminstone de senaste årtiondenas förstärkning av växthuseffekten borde emellertid ha varit tillräcklig för att åstadkomma en tydlig uppvärmning vid jordytan.

Länge tydde likväl flertalet beräkningar av växthusgasernas klimateffekter på att uppvärmningen borde ha blivit större än den som faktiskt uppmättes. Överensstämmelsen mellan teori och verklighet blev betydligt bättre i början av 1990-talet, då klimatforskarna i sina beräkningar också tog med *sulfatpartiklarnas* förmåga att länka av inkommande solljus och därigenom kyla jordytan (se s. 20).

Det är helt klart att människans utsläpp av svaveldioxid – främst i samband med förbränning av fossila bränslen med höga svavelhalter – har medfört ökade halter av sulfatpartiklar

## KUNSKAPEN OM VÄXTHUSEFFEKTEN OCH MÄNNISKANS KLIMATPÅVERKAN — EN KORT HISTORIK

**1824** Joseph Fourier, fransk fysiker och matematiker, påpekar att atmosfären är mer genomsläpplig för det inkommande synliga solljuset än för den osynliga värmestrålning som jorden sänder tillbaka mot rymden. Därav drar han slutsatsen att jordytan är varmare än den skulle ha varit om det inte hade funnits någon atmosfär.

**1859** John Tyndall, kemist av irländskt ursprung, inleder mätningar av olika gasers förmåga att absorbera värmestrålning. Han finner att vattenånga och koldioxid står för det mesta av värmeabsorptionen i atmosfären.

**1895** Arvid Högbom, svensk geolog, kartlägger för första gången kolets kretslopp i naturen och visar att människan genom sin förbränning av stenkol borde kunna öka atmosfärens koldioxidinnehåll.

**1896** Svante Arrhenius, svensk fysiker och kemist, beräknar hur förändringar av atmosfärens koldioxidinnehåll skulle påverka temperaturen på jorden. Egentligen söker han en förklaring till istiderna, men han finner också att en fördubbling av koldioxidhalten borde höja medeltemperaturen med 5–6 grader. Utgående från sin tids kolförbrukning bedömer han att det kan ta 3 000 år för människan att åstadkomma en sådan fördubbling. Arrhenius beräkningar möter snart invändningar. Några kritiker hävdar att koldioxid bara kan fånga upp värmestrålning av våglängder som också vattenångan effektivt absorberar. Enligt dem borde förändringar av koldioxidhalten därför sakna betydelse för klimatet. Andra pekar på att havet innehåller långt mer koldioxid än atmosfären, vilket borde innebära att nästan all koldioxid som människan släpper ut i luften omgående tas upp av havsvattnet. Inom några få år betraktas Arrhenius slutsatser allmänt som förlegade.



CENTRUM FÖR VETENSKAPSHISTORIA, KVA

År 1896 deltog Svante Arrhenius som forskare i S.A. Andrées första expedition till Spetsbergen, varifrån Andrée avsåg att fortsätta till nordpolen med ballong. På bilden sitter Arrhenius till höger om mitten, omgiven av övrig besättning på det fartyg som förde expeditionen till Spetsbergen.

Samma år publicerade Arrhenius en artikel där han hävdade att människans utsläpp av koldioxid kan höja temperaturen på jorden. Han såg dock inte detta som något problem. Risken för negativa konsekvenser av en uppvärmning uppmärksammades först under senare delen av 1900-talet.

**1909** Robert W. Wood, amerikansk kemist och fysiker, blir den förste som i tryck använder ordet ”växthus” i samband med teorin om atmosfärens förmåga att värma jordytan. Wood framhåller emellertid att liknelsen egentligen är felaktig – att det blir varmt i ett växthus som står i solen beror inte i första hand på att glaset hejdar utgående värmestrålning utan på att det hindrar uppvärmd luft från att ge sig iväg från utrymmet ifråga.

**1938** Guy S. Callendar, brittisk ingenjör och amatörforskare, återupplivar Arrhenius teori sedan han sammanställt haltmätningar som antyder att atmosfärens koldioxidinnehåll ökat sedan 1800-talet. Callendar menar att ökningen är ett resultat av människans förbränning av kol och andra fossila bränslen. Han anser också att haltökningen kan förklara den uppvärmning på några tiondelar av en grad som ägt rum i Nordamerika och Nordeuropa under samma tid. Men luftens koldioxidhalt går fortfarande inte att mäta med någon större noggrannhet. Callendars slutsatser ifrågasätts och väcker ringa uppmärksamhet.

**1954** Evelyn Hutchinson, amerikansk biolog, påpekar att avskogning kan bidra till en höjning av atmosfärens koldioxidhalt.

**1956** Gilbert N. Plass, fysiker med kanadensiskt påbrå, finner att förändringar av koldioxidhalten faktiskt borde kunna påverka klimatet. Han utnyttjar nya mätningar som visar att koldioxid och vattenånga bara delvis absorberar värmestrålning av samma våglängder.

**1957** Roger Revelle och Hans Suess, amerikanska oceanografer, pekar på nya mätresultat som innebär att havets förmåga att ta upp koldioxid från luften inte är så stor som många har föreställt sig. De drar slutsatsen att människans fortsatta utsläpp kan medföra en påtaglig ökning av koldioxidhalten i atmosfären.

Samma år inleder den amerikanske kemisten Charles David Keeling mätningar av atmosfärens koldioxidinnehåll med ny och noggrann teknik. Redan efter ett par år kan han konstatera att halten är på väg uppåt.

**1967** Syukuro Manabe och Richard Wetherald från Japan respektive USA genomför den första någorlunda tillförlitliga beräkningen av hur en fördubbling av atmosfärens koldioxidhalt skulle kunna inverka på temperaturen. Under de följande åren utvecklas allt mer realistiska modeller av det globala klimatsystemet och hur det påverkas av en förstärkt växthuseffekt.

**1975** Veerabhadran Ramanathan, klimatforskare av indiskt ursprung, visar att människan kan förstärka växthuseffekten även genom att släppa ut andra föroreningar än koldioxid. Han påvisar stark växthusverkan hos de klorfluorkarboner (CFC) som nyligen har börjat tillverkas och läcka ut i omgivningen. Under de närmast följande åren finner andra forskare att också växthusgaserna metan, dikväveoxid och ozon uppträder i ökande halter i luften på grund av mänskliga utsläpp.

**1990** FN:s klimatpanel IPCC, bildad 1988, publicerar sin första utvärdering av klimatförändringarna. Under det gångna decenniet har en vetenskaplig samsyn vuxit fram kring många grundläggande frågor rörande växthuseffekten, och klimatpanelen slår fast att utsläppen av växthusgaser framöver kommer att medföra ett varmare klimat. Men ännu anses det vara för tidigt att peka ut någon specifik orsak till de gångna hundra årens temperaturhöjning: ”Uppvärmningens storlek överensstämmer i allt väsentligt med klimatmodellernas förutsägelser, men den är också av samma storleksordning som klimatets naturliga variabilitet.”

**1995** Klimatmodellerna har efterhand förfinats och kunskapen om växthusgaserna förbättrats. I sin andra utvärdering finner IPCC tiden mogen för ett ställningstagande beträffande 1900-talets klimatförändringar: ”En sammanvägning av faktaunderlaget tyder på att människan märkbart har påverkat det globala klimatet.”

**2001** I sin tredje utvärdering granskar IPCC de alternativa förklaringar till uppvärmningen som har förts fram av skeptiker till växthusteorin, men slutsatsen blir att indicierna för en mänsklig klimatpåverkan väger allt tyngre: ”Sett i ljuset av nya fakta och med hänsyn tagen till kvarstående osäkerheter är det sannolikt att merparten av den uppvärmning som registrerats under de senaste femtio åren har orsakats av växthusgasernas haltökningar.”

**2007** Åtskilliga av de kvarvarande osäkerheterna har kunnat undanröjas, och i IPCC:s fjärde utvärdering bedöms det vara ”mycket sannolikt att huvuddelen av den uppvärmning som ägt rum sedan 1950 har orsakats av ökande halter av växthusgaser i atmosfären”.

**2013** Bilden av klimatförändringarna har klarnat allt mer, och att uppvärmningen i huvudsak orsakats av människan betecknas nu av IPCC som ”ytterst sannolikt” (att tolkas som en sannolikhet på minst 95 procent).

i luften sedan förindustriell tid. Svaveldioxidutsläppen bör därför delvis ha maskerat växthusgasutsläppens temperaturhöjande verkan.

Att den globala uppvärmningen tillfälligt kom av sig under perioden 1945–1975 (se s. 36) kan sålunda till stor del ha berott på att utsläppen av svaveldioxid då tilltog snabbare än utsläppen av växthusgaser. Ett stöd för den tanken är att avbrottet i uppvärmningen blev tydligast på norra halvklotet, där svaveldioxidutsläppen var störst.

I exempelvis Europa och USA har dessa utsläpp under senare decennier reducerats kraftigt, vilket innebär att luftens partikelinnehåll där har minskat och att växthusgasernas inver-

På grund av människans utsläpp av svaveldioxid innehåller atmosfären nu betydligt mer sulfatpartiklar än på 1800-talet. På sistone har halterna främst ökat i Syd- och Ostasien. I Europa och Nordamerika har de minskat, men de är fortfarande förhöjda där. Sulfatpartiklarna avlänkar inkommande solljus och har därigenom kylande verkan.

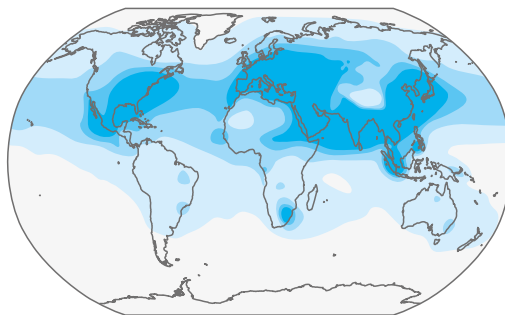
Sotpartiklar frigörs bl.a. vid ofullständig förbränning av fossila bränslen och biobränslen. Utsläppens tyngdpunkt låg tidigare i västvärlden men har nu förskjutits till Syd- och Ostasien. Sotpartiklarna absorberar solljus och har därför värmande verkan.

Sammantagna har de partiklar som härrör från mänsklig verksamhet i allmänhet avkylande verkan, men i bl.a. öknar och istäckta områden kan de åstadkomma en viss uppvärmning. Partiklarnas indirekta effekter på molnigheten är dock inte medräknade här.

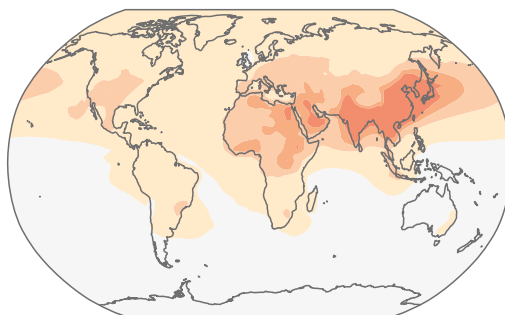
– Från Shindell *et al.* 2013.

### Förändring av partikelhalter 1850–2000 – inverkan på strålningsbalansen

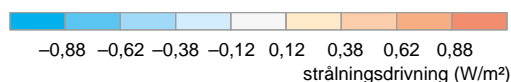
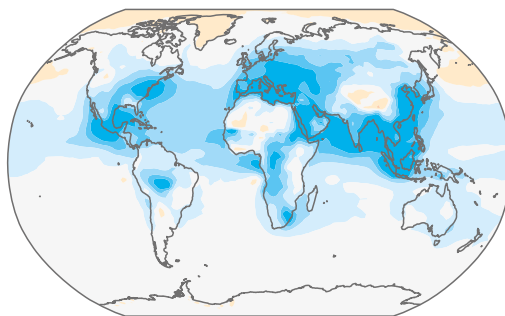
#### Sulfatpartiklar



#### Sotpartiklar från bränslen



#### Alla slags partiklar



kan på klimatet har kunnat slå igenom med ökad styrka. Samtidigt har svaveldioxidutsläppen och partikelhalterna snabbt stigit i exempelvis Kina, Indien och Sydostasien, vilket bör ha begränsat uppvärmningen i dessa områden.

Till skillnad från koldioxid och andra växthusgaser som är jämnt spridda över hela jorden kan sulfatpartiklar alltså uppträda rikligt i vissa regioner men sparsamt i andra. Orsaken är att partiklarna är relativt kortlivade i atmosfären – liksom i fallet ozon medför detta att förekomsten kan skifta kraftigt i både tid och rum.

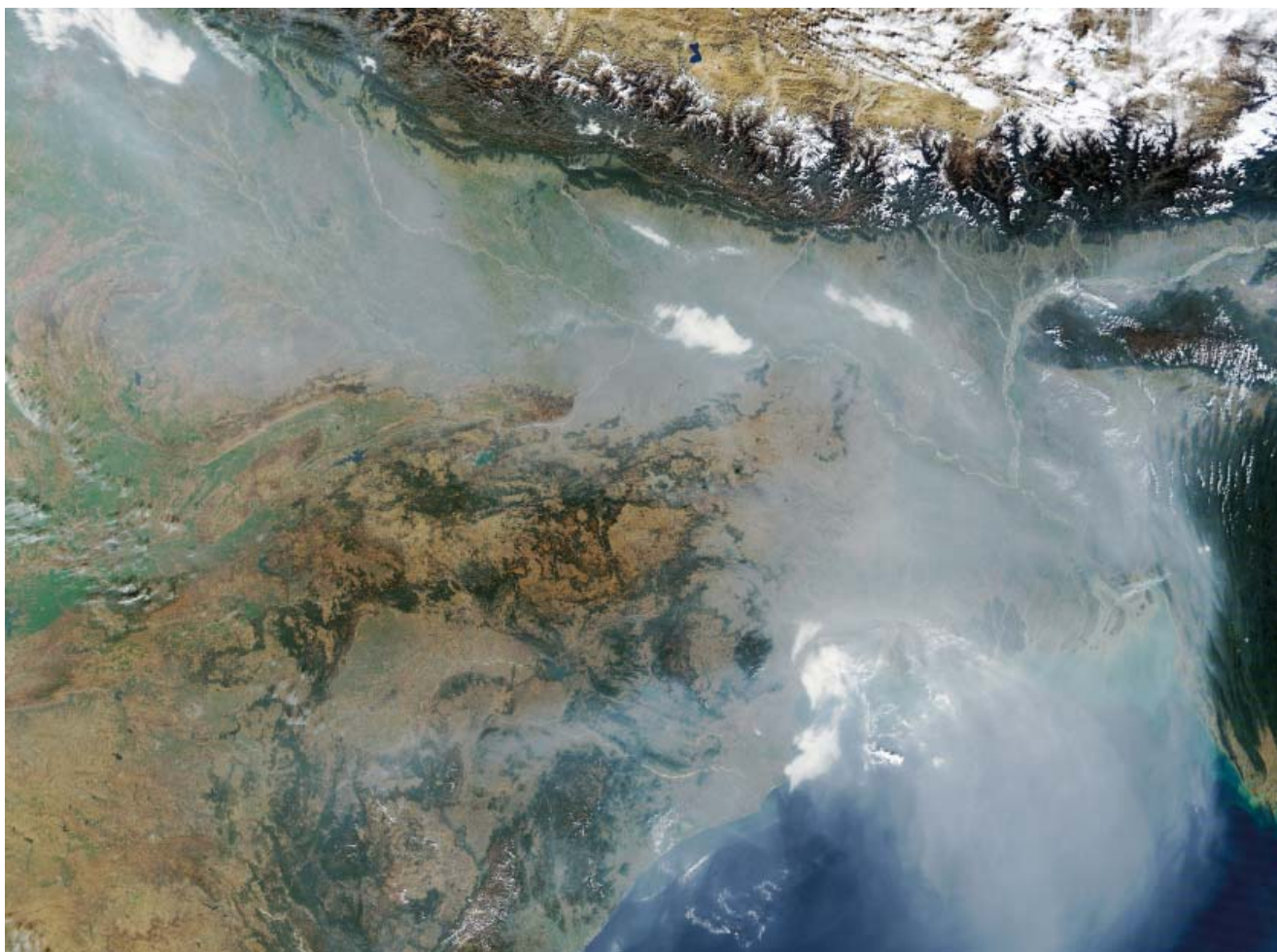
Skiftningarna gör det svårt att rekonstruera hur den genomsnittliga halten av sulfatpartiklar har utvecklats på lång sikt. Det är också besvärligt att beräkna partiklarnas inverkan på flödet av solljus genom atmosfären, inte minst för att de uppträder i vitt skilda storlekar och former. Av dessa skäl är beräkningarna av sulfatpartiklarnas klimatpåverkan osäkrare än motsvarande siffror för exempelvis koldioxiden, vars molekyler alla har identiska egenskaper och vars halt är ungefär densamma i hela atmosfären.

### Olika klimatteffekter av olika slags partiklar, men kylverkan dominerar

Förutom sulfatpartiklar tillförs atmosfären åtskilliga andra slags partiklar som kan inverka på klimatet. Förbränning – inte bara av fossila bränslen utan också av ”förädlade” biobränslen såsom biodiesel, etanol eller biogas – frigör exempelvis kolväten och andra organiska ämnen som i luften främst uppträder i partikelform. Liksom sulfatpartiklarna har dessa *organiska partiklar* en avkylande effekt som dock sannolikt är ganska måttlig.

Ofullständig förbränning av fossila bränslen eller biobränslen medför dessutom att luften tillförs *sotpartiklar* som absorberar solljus och därför i regel har en uppvärmande i stället för avkylande verkan (se s. 20). De globala utsläppen av sot har nästan fördubblats sedan 1960-talet. I västländerna har utsläppen minskat under senare decennier, men i utvecklingsländerna har de fortsatt att öka.

I dagsläget dominerar den temperaturhöjande effekten av sotpartiklar från fossila bränslen och förädlade biobränslen sannolikt över de organiska partiklarnas kylande verkan. Sotet kan inverka på klimatet inte bara medan det är luftburet utan även om det sedan faller ned på snö-



På den här satellitbilden från den 3 januari 2016 är stora delar av Bangladesh och nordöstra Indien insvepta i partikelslöjor. Partiklarna härrör av allt att döma inte bara från städer och industrier utan också från småskalig eldning på landsbygden, exempelvis för matlagning.

täckt mark, eftersom snön i så fall blir mörkare och därigenom kan fånga upp mer solvärme. Sett i global skala är den sistnämnda effekten liten. I Arktis kan den ändå ha stor betydelse, inte minst genom att uppfångningen av värme kan leda till att snön smälter och att jordytan därigenom blir ännu mörkare, med ytterligare uppvärmning som resultat.

Organiska partiklar och sotpartiklar bildas även när ved och annan biomassa brinner ute i naturen eller i spisar, pannor och öppna eldstäder. Luftburna partiklar som har sitt ursprung i biomassa härrör till stor del från skogs- och gräsbränder och har därför alltid funnits i atmosfären. Sedan länge har likväl människan påverkat deras förekomst, inte bara genom vedeldning utan också genom att anlägga eller släcka bränder. De värmande och kylande effekterna av partiklar som bildas när biomassa brinner tycks å andra sidan i stort sett ta ut varandra.

I alla tider har dessutom *mineralstoff* förts upp i luften genom vindarnas inverkan, inte minst från öknar och torrlagda sjöbottnar. I en del andra områden har människan eliminerat ett naturligt växttäckte – exempelvis genom

upplöjning eller överbete – och på så sätt ökat risken för stoflflykt. Förmodligen har mineralpartiklarna en viss avkylande effekt, men det är oklart hur stor andel av den som är antropogen.

Ytterligare en partikelkategori är de *nitratpartiklar* som kan uppkomma genom utsläpp av kväveoxider eller ammoniak. De bildas på ungefär samma sätt som sulfatpartiklar bildas vid svaveldioxidutsläpp, och de har sannolikt samma slags kylande verkan. Halterna av nitratpartiklar har förblivit höga även i områden där mängden sulfatpartiklar nu har minskat.

Som vi tidigare sett (på s. 22) kan luftburna partiklar inverka på klimatet inte bara genom sin direkta effekt på solstrålningen i atmosfären utan också på *indirekt* väg, exempelvis genom att öka molnens reflektionsförmåga eller förändra deras egenskaper på något annat sätt. Dessa indirekta effekter är mycket svårbedömda, men de tycks kunna ha minst lika stor betydelse för temperaturen vid jordytan som partiklarnas direktverkan på solljuset.

Om vi inkluderar både indirekta och direkta effekter finner vi att människans bidrag till atmosfärens partikelinnehåll har en kylverkan

som är högst påtaglig. Enligt IPCC:s senaste bedömningar maskeras på så sätt ungefär en tredjedel av de hittills utsläppta växthusgasernas värmande inverkan. Uppskattningen gäller jorden som helhet – i områden där partiklarna i luften är fler än genomsnittligt kan de dölja en större andel av växthusuppvärmningen.

Å andra sidan är det ingen tvekan om att växthusgasernas inverkan på temperaturen ökar. Sett i global skala är det i våra dagar koldioxidhalten snarare än partikelhalterna som stiger, vilket innebär att partiklarnas relativa betydelse för klimatet av allt att döma minskar.

### Flygets kondensationsstrimmor värmer – men inte mycket

En annan typ av utsläpp påverkar atmosfärens genomskinlighet på ett sätt som var och en kan iaktta. Det handlar om avgaserna från jetplan – dessa innehåller stora mängder vattenånga som ofta kondenseras till mikroskopiska iskristaller när de når ut i den kalla luften uppe på flygplanens marschhöjd. Resultatet blir tunna,

vita *kondensationsstrimmor*, ett slags konstgjorda cirrusmoln.

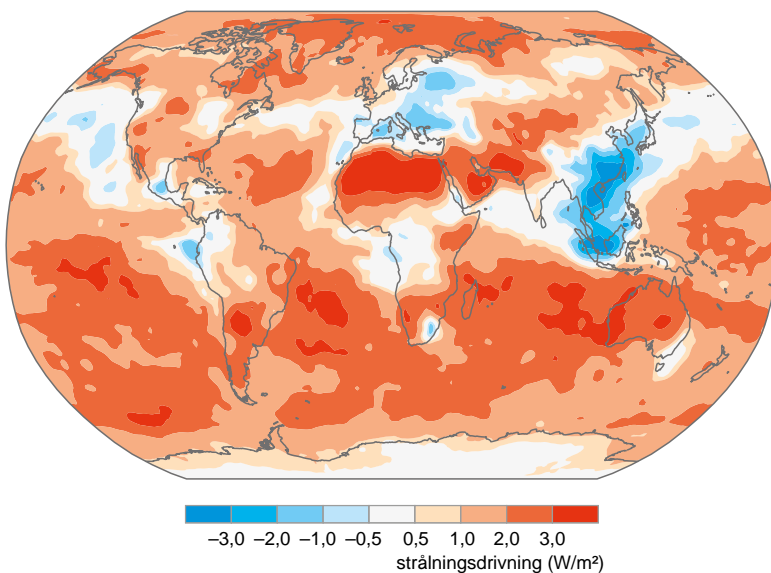
I likhet med naturliga cirrusmoln (se s. 20) reflekterar strimmorna en del av det inkommande solljuset men hejdar ännu mer av den utgående värmestrålningen. I princip skulle de därför kunna medverka till en viss uppvärmning, men effekten är så liten att den knappast är mätbar.

### Begränsad inverkan av albedoförändringar

I någon mån kan människan också ha påverkat klimatet genom att avskogning och uppodling har ökat jordytans *albedo* (se s. 19). I exempelvis Centraleuropa, Nordamerika och Ostasien fanns det förr vidsträckta skogar som fångade upp det mesta av solljuset, men en avsevärd del av dem har ersatts med öppna fält som är betydligt ljusare. Skillnaden blir särskilt tydlig vintertid, då öppna områden i dessa delar av världen ofta täcks av snö medan kvarvarande skogar förblir mörka genom att träden hela tiden sticker upp ovanför snötäcket. Genom sin inverkan på reflektionen av solljus bör avskogningen alltså ha fått en viss temperatursänkande effekt.

En del av förändringen ägde rum långt tillbaka i förindustriell tid, men merparten av den har skett från 1700-talet och framåt. I världen som helhet har åkrars och betesmarkers andel av landarealen vuxit från 6–7 procent kring år 1750 till en dryg tredjedel i dag. I tropikerna har avskogningen fortsatt i rask takt även på senare år, men där är det långt ifrån självklart att den har temperatursänkande effekt. Visserligen medför den att markytan fångar upp mindre solljus, men samtidigt reduceras avdunstningens kylverkan eftersom öppen mark avger mindre vattenånga till atmosfären än skog.

### Förändringar av föroreningshalter 1850–2000 – sammanlagd inverkan på strålningsbalansen

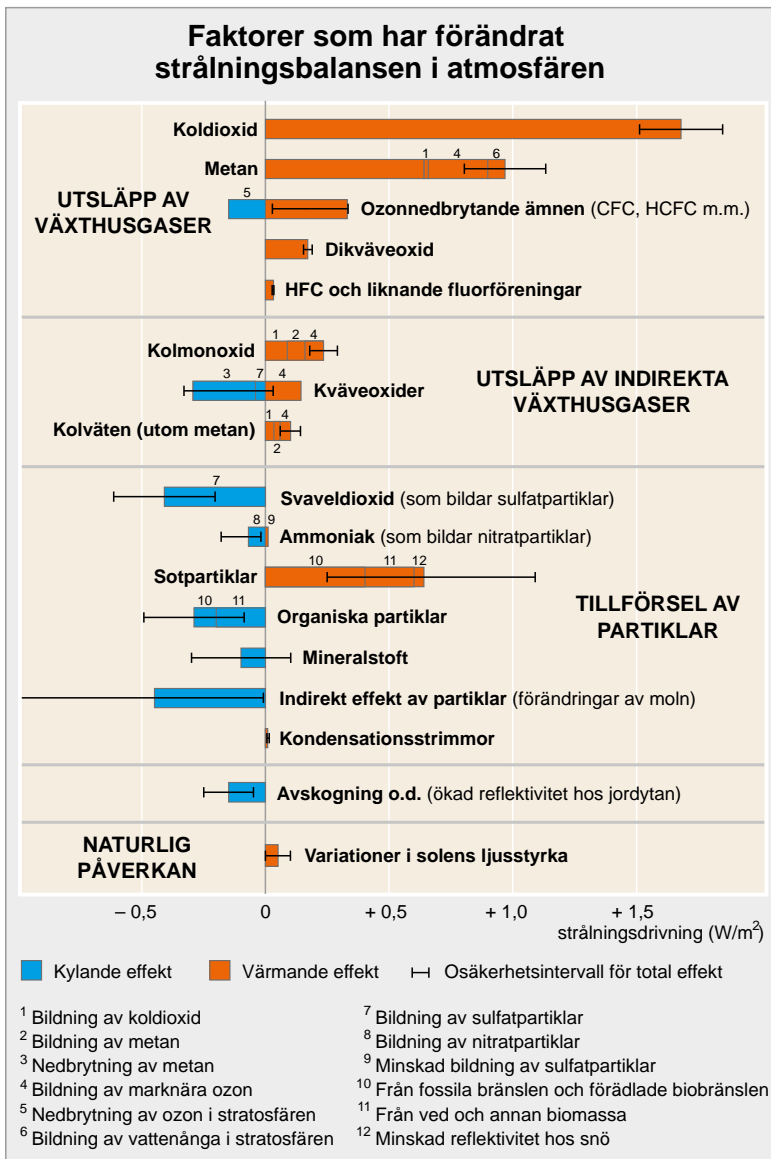


Kartan visar hur strålningsbalansen i atmosfären har påverkats sedan 1800-talet av alla föroreningsutsläpp sammantagna. Här ingår alltså effekterna av såväl växthusgas- som partikelutsläpp (inklusive partiklarnas indirekta verkan på molnigheten). På grund av de omfattande utsläppen av växthusgaser är nettoeffekten på strålningsbalansen positiv (dvs. värmande) över större delen av jordklotet. Det mest markanta undantaget utgörs av Sydostasien, där utsläppen av partiklar i dag är så stora att deras kylande verkan dominerar. Även där har klimatet likväl blivit varmare, vilket beror på att vindar och havsströmmar transporterar dit värme från omgivande delar av världen.

Liksom kartorna på s. 55 och 58 bygger den här kartan på modellberäkningar som väglettas av tillgängliga mätdata. – Från Shindell *et al.* 2013.

### Strålningsdrivning – ett mått på olika störningars klimatteffekter

Alla de ovan omtalade förändringarna – av solens ljusstyrka, atmosfärens innehåll av växthusgaser och partiklar, molnens egenskaper och jordytans albedo – skapar obalanser i jordens energiutbyte med omgivningen. En del påverkar energiinflödet från rymden (det inkommande solljuset); andra påverkar energiutflödet tillbaka mot rymden (värmestrålning plus re-



Sedan förindustriell tid har balansen mellan in- och utflöde av ljus och värme-strålning i atmosfären påverkats av flera olika faktorer. En del av förändringarna har uppvärmande verkan, andra avkylande. I några fall har utsläppen av föroreningar påverkat strålningsbalansen på indirekt väg, exempelvis genom att

förändra förekomsten av andra ämnen i luften. Många av faktorerna är svåra att beräkna, men inverkan av växthus-gasernas haltökningar är förhållandevis väl känd.

– Figuren visar förändringar från 1750 till 2011. Underlag från IPCC 2013, fig. 8.17.

flekterat solljus); några påverkar både in- och utflödet av energi.

Om det inkommande energiflödet blir större än det utgående – exempelvis genom att solens ljusstyrka ökar – säger man att det uppkommer en positiv *strålningsdrivning*. En förstärkning av växthuseffekten skapar också positiv strålningsdrivning, eftersom den utgående värmestrålningen då fångas upp i ökad omfattning. Ökad halt av partiklar från exempelvis vulkanutbrott eller svaveldioxidutsläpp ger däremot upphov till negativ strålningsdrivning, eftersom reflektionen av solljuset förstärks och energiinflödet därigenom blir mindre än utflödet.

Efterhand jämnas sådana obalanser mellan energiflödena ut genom att jordytans och atmosfärens temperatur stiger eller sjunker, även om det kan ta lång tid innan jämvikten är helt återvunnen. En positiv strålningsdrivning tenderar förstås att öka medeltemperaturen och vice versa. Genom att använda strålningsdrivning som ett gemensamt mått på olika slags klimatpåverkande förändringar kan man jämföra deras betydelse för temperaturen på jorden.

Enligt IPCC:s senaste sammanställning har människan sedan förindustriell tid åstadkommit en långt kraftigare strålningsdrivning än de naturliga förändringar som bedöms ha ägt rum under samma period. Till följd av minskad solaktivitet och intensifierad vulkanism bör den naturliga strålningsdrivningen i själva verket ha reducerats något under de senaste femtio åren, medan människans klimatpåverkan under samma tid har ökat snabbare än någonsin tidigare.

## Modeller behövs för noggrannare studier av klimatstörningar

Den strålningsdrivning som en störning utövar kan alltså användas som en första fingervisning om vilken effekt den får på jordens temperatur. Men sambanden mellan strålningsdrivning och klimatförändringar är långt ifrån enkla. En orsak är att varje påverkan på jordens klimatsystem kan få förstärkande eller försvagande följd effekter som är svåra att förutsäga.

Ett snötäckt fält reflekterar mycket mer solljus än den betydligt mörkare skogen. Jordbrukets expansion under gångna sekler har därigenom ökat jordytans albedo.



En annan orsak är att delar av klimatsystemet reagerar med lång eftersläpning på vad som händer med flödena av ljus och värmestrålning i atmosfären.

Temperaturförändringarna kan dessutom skilja sig kraftigt mellan olika delar av världen och olika höjdnivåer i atmosfären. Och vill man veta vad som händer med andra klimatfaktorer än temperaturen – såsom nederbördsmängden – ger strålningsdrivningen mycket liten ledning.

För att få en mer tillförlitlig och fullständig uppfattning om vad olika störningar betyder för klimatet måste man i praktiken studera deras

effekter på en matematisk–fysikalisk *modell* av jordens klimatsystem (se s. 89). Åtskilliga beräkningar har gjorts av hur klimatmodeller av detta slag reagerar på uppmätta eller rekonstruerade förändringar av strålningsdrivningen sedan slutet av 1800-talet. Under den perioden finns det ju möjlighet att jämföra modellstudierna med observationer av vad som i verkligheten har hänt med jordens klimat.

Beräkningar som enbart innefattar naturlig strålningsdrivning (orsakad av vulkanism plus rekonstruerade variationer i solens ljusstyrka) kan uppvisa acceptabel likhet med temperaturens faktiska förändringar fram till mitten av 1900-talet. De misslyckas däremot helt med att efterlikna de senaste decenniernas kraftiga temperaturhöjning vid jordytan. Det är bara om beräkningarna också inbegriper strålningsdrivning orsakad av människan (i första hand effekterna av växthusgas- och partikelutsläpp) som de kan fås att stämma väl överens med hur klimatet har förändrats i vår tid.

## Människan huvudansvarig för den senaste tidens klimatförändringar

Att utsläppen av växthusgaser och andra föroreningar måste inkluderas i klimatmodellerna för att beräkningarna ska gå ihop med den snabba uppvärmning som inleddes på 1970-talet är ett starkt indicium för att jordens klimat åtminstone sedan dess har påverkats av människan. Slutsatsen stärks av temperaturens allt tydligare avvikelse från de nivåer som rådde under förindustriell tid. Av allt att döma skulle avvikelsen nu ha varit ännu större om inte förhöjningen av partikelhalterna hade motverkat växthusgasernas effekt.

Det mesta talar för att människan också har medverkat till de förändringar av nederbörd, luftfuktighet, lufttryck och vindar som har noterats under senare tid.

De som fortfarande avvisar teorin om människans inverkan på klimatet framhåller gärna att den trots alla indicier förblir obevisad. Men i själva verket kommer vi *aldrig* att kunna åstadkomma något egentligt bevis vare sig för eller mot människans klimatpåverkan, oavsett hur klimatet förändras framöver.

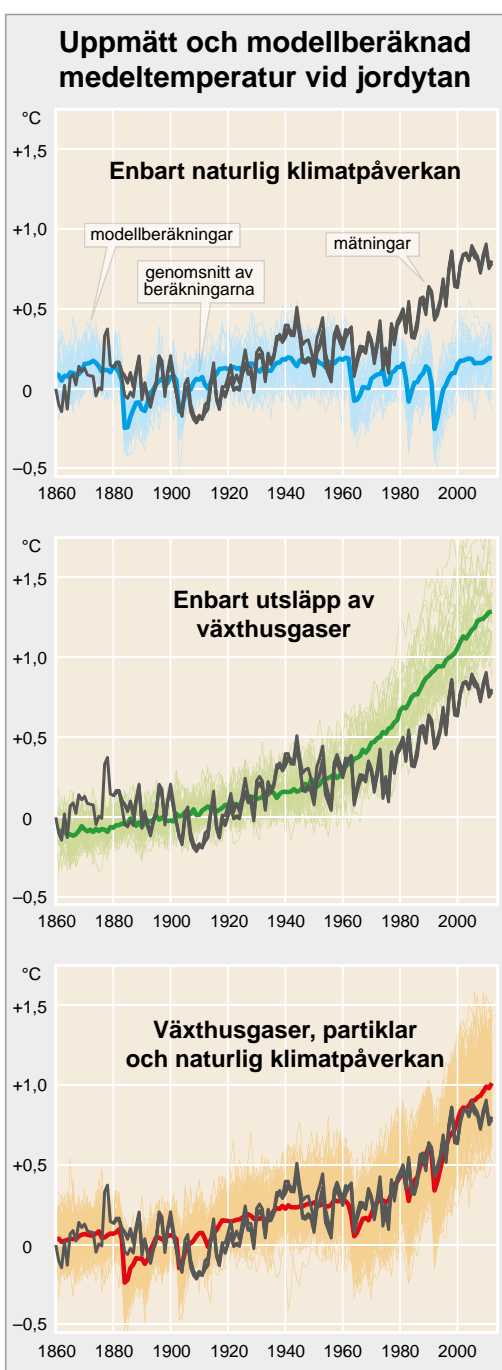
Vetenskaplig bevisföring i strikt mening förekommer bara inom abstrakta och teoretiska discipliner såsom matematik och logik. Ute i

Om man i modellberäkningar av klimatets förändringar bara inkluderar naturlig påverkan (vulkanism och solaktivitet) stämmer resultaten dåligt med hur temperaturen faktiskt har varierat sedan mitten av 1900-talet. Här återges uppmätt och beräknad temperatur i förhållande till genomsnittet för 1880–1919.

Beräkningar som i stället bara tar hänsyn till människans utsläpp av växthusgaser stämmer bättre med klimatets faktiska förändringar, men de överskattar i viss mån uppvärmningens storlek.

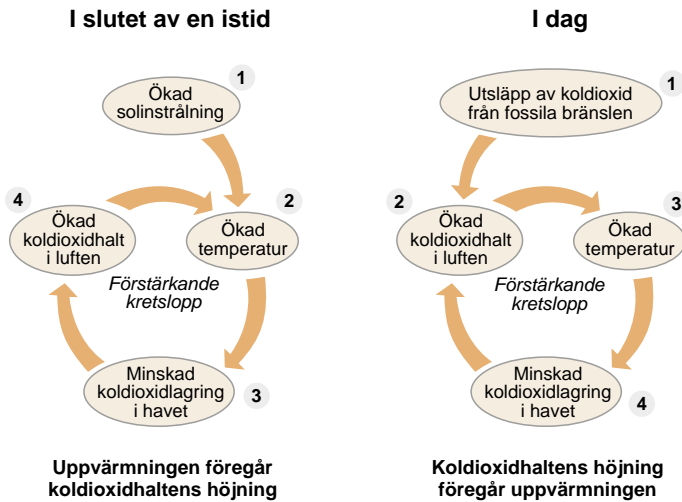
För att med riktig framgång kunna efterlikna de uppmätta temperaturförändringarna måste beräkningarna innefatta effekter av såväl partiklar som växthusgaser och naturlig klimatpåverkan.

– Underlag från IPCC 2013, fig. 10.1.





## STYRS TEMPERATUREN AV KOLDIOXIDHALTEN – ELLER TVÄRTOM?



Att temperaturen steg i de gångna istidernas slutskeden berodde på förändringar av solinstrålningen till olika delar av jordytan, i sin tur orsakade av förändringar i jordens rörelser kring solen och kring sin egen axel. Uppvärmningen reducerade havets förmåga att lagra koldioxid, med stigande koldioxidhalt i luften som resultat. Genom att växthuseffekten på så sätt tilltog blev temperaturhöjningen ytterligare förstärkt. Men i grunden var det uppvärmningen som under dessa omständigheter orsakade koldioxidhaltens uppgång, inte tvärtom. Detta framgår inte minst av att haltökningen inleddes först efter det att temperaturen hade börjat stiga (se s. 30).

Av en del skeptiker till människans inverkan på klimatet har det här använts som argument för att det även i dag måste vara temperaturen som styr koldioxidhalten. Den nutida förstärkningen av växthuseffekten är enligt dem inte en orsak till uppvärmningen utan en följd av den. Men ingenting säger att det som hände för tiotusen år sedan nödvändigtvis måste äga rum på samma sätt i dag. Visserligen är samma förstärkande kretslopp i verksamhet nu som då – uppvärmningen bidrar till att koldioxidhalten stiger, vilket medverkar till ytterligare uppvärmning – men nu drivs rundgången inte av ökad solinstrålning utan av en ny slags påverkan, nämligen människans utsläpp av växthusgaser. Utsläppen höjer luftens koldioxidhalt, vilket i sin tur höjer temperaturen. I dag är det alltså koldioxidhalten som styr temperaturen.

Att utsläppen är huvudorsak till koldioxidhaltens nutida ökning framgår exempelvis av att ökningen är betydligt snabbare än den kunnat vara om den enbart hade berott på uppvärmningen.

den komplicerade och svåröverskådliga verklighet som omger oss är det omöjligt att uppnå fullkomlig säkerhet om orsak och verkan. I stället får vi nöja oss med uppskattningar av hur sannolik den ena eller andra slutledningen är.

Otaliga undersökningar har exempelvis visat att rökare oftare än andra får lungcancer. Det är därför mycket sannolikt att rökning faktiskt kan orsaka sådan cancer, och vi gör klokt i att ta den slutsatsen på allvar – likafullt är och förblir den obevisad.

Inte ens tyngdlagen är egentligen bevisad. Äpplen och andra ting kommer med största sannolikhet att falla till marken även i morgon, precis som de (såvitt vi vet) alltid har gjort hitills, men ingen har kunnat prestera något bevis för att det *måste* bli så.

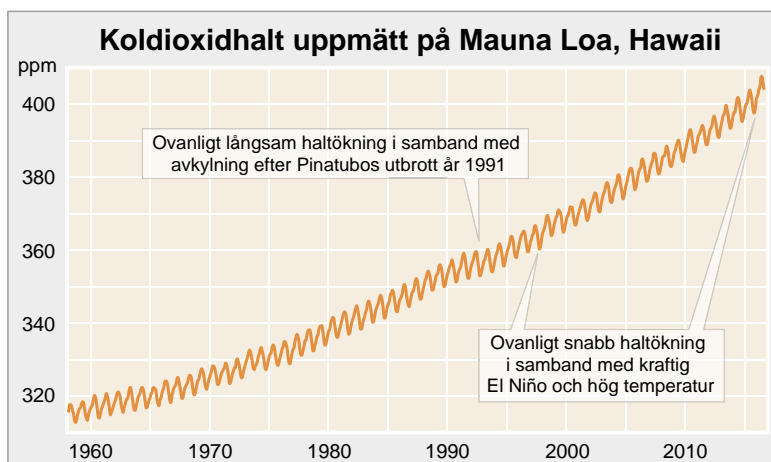
Om en viss teori med stor sannolikhet kan anses vara riktig är det skäligen att vi åtminstone tills vidare accepterar den. I sin andra utvärdering, publicerad 1995–96, gjorde IPCC en bedömning av det slaget. Med rimlig grad av säkerhet ansåg man sig kunna slå fast att människan faktiskt hade börjat förändra klimatet. År 2001, då den tredje utvärderingen publicerades, hade både fortsatt forskning och fortsatt uppvärmning medverkat till att befästa den slutsatsen ytterligare.

I klimatpanelens fjärde utvärdering, som offentliggjordes 2007, bedömdes människan med minst 90 procents sannolikhet vara huvudansvarig för den uppvärmning som ägt rum sedan 1950. I den femte och senaste utvärderingen, publicerad 2013, hade den uppskattningen höjts till minst 95 procent.

IPCC:s bedömningar utesluter inte att också naturliga variationer har inverkat på den sentida klimatutvecklingen. Det är möjligt att sådana variationer fortfarande spelade huvudrollen under 1900-talets första hälft. Det förblir däremot oklart exakt *vilka* naturliga processer som kan ha medverkat till klimatets förändringar under det senaste århundradet. Och för den kraftiga uppvärmningen sedan 1970-talet tycks människans påverkan kunna räcka helt på egen hand som förklaring.

# 6 Källor och sänkor för växthusgaser

NOGGRANNA MÄTNINGAR AV luftens koldioxidinnehåll visar att halten genomgår en liten men regelbunden årstidsvariation. Den når som lägst under sensommaren och som högst under senvin- tern. Haltens förändringar kan beskrivas som en följd av vegeta- tionens årliga ”andetag”. Under vår och sommar tar växterna upp koldioxid ur luften för att med fotosyntesens hjälp bygga upp bladverk och annan biomassa. Under höst och vinter går fotosyn- tesen på sparlåga. Då återförs i stället koldioxid till luften i sam- band med att stora mängder biomassa förmultnar och bryts ned.



På Hawaii har mätningar av atmosfärens koldioxidinnehåll pågått sedan 1950-talet. Resultaten avslöjar framför allt den långsiktiga haltuppgång som orsakas av människans koldioxid- utsläpp. Dessutom framträder en naturlig årstidsvariation – under som- marhalvåret sjunker halten tillfälligt på grund av att växtligheten då tar upp koldioxid ur luften. Under vinterhalv- året stiger halten igen, eftersom kol- dioxid då återförs till atmosfären från multnande organiskt material.

På Hawaii och andra platser norr om ekvatorn är det i första hand vege- tationens årsrytm på norra halvklotet som ger utslag på koldioxidhaltens

årstidsvariationer. Den omvända års- rytmen på södra halvklotet slår inte alls igenom lika mycket. Detta beror dels på att det finns mindre växtlighet i söder än i norr, dels på att luftutbytet tvärs över ekvatorn är ganska begränsat.

Inne på vegetationsklädda konti- nenter är koldioxidhaltens årstidsvari- ationer så stora att den långsiktiga haltuppgången kan vara svår att studera i detalj. Det här är en viktig orsak till att övervakningen av atmosfärens koldioxidinnehåll i första hand bedrivs på isolerade platser såsom Hawaii.

– Data från P. Tans, NOAA/ESRL, och R. Keeling, Scripps Institution of Oceanography.

## Biobränslen ingår i kolets kretslopp – fossila bränslen har lämnat det

Uppbyggnad och nedbrytning av biomassa (or- ganiskt material) medför ett ständigt utbyte av kol mellan atmosfären och det levande. Större delen av den koldioxid som binds i organismer är tillbaka i luften inom något eller några år.

Koldioxid som tas upp av ett träd och om- vandlas till vedämnen kan visserligen bli kvar i den formen så länge trädet lever, ibland också ett antal år därefter. Även i humus, markens innehåll av ofullständigt nedbrutet organiskt material, kan kol hållas bundet under förhål- landevis lång tid. Inom något eller några sekler bryts likväl både veden och större delen av hu- musämnena ned på ett eller annat sätt, och då återgår deras kolinnehåll till atmosfären i form av koldioxid.

Det händer emellertid också att lämningar av växter och djur begravs i syrefri miljö un- der markytan eller i sjö- och havsbotten innan de har hunnit genomgå en fullständig kemisk sönderdelning. I sådan miljö avstannar ned- brytningen nästan helt. Under de omständig- heterna kan det organiska materialet bli kvar i årtusenden eller årmiljoner.

Av all den biomassa som fotosyntesen årligen producerar är det bara en mycket liten andel som undgår fullständig nedbrytning. Under ti- dernas lopp har likafullt stora anhopningar av växt- och djurrester hunnit byggas upp på det sättet. Efterhand har de täckts av allt tjockare skikt av sediment eller andra avlagringar, och i dag återfinns vi dem nere i berggrunden. Det är dessa förråd av organiskt material från för- fluten tid som vi i dag utnyttjar i form av fossila bränslen.

Olja och fossilgas (naturgas) härrör framför allt från växt- och djurplankton som efter sin död sjönk till botten i sjöar eller havsområden.



ASHLEY COOPER / IBL

Stor efterfrågan och stigande priser på olja ledde för en del år sedan till utveckling av ny teknik för exploatering av fyndigheter som tidigare ansetts svåra att utnyttja. I Alberta i Kanada inleddes omfattande utvinning av oljesand, en blandning av sand eller lera och tjärliknande petroleumämnen. Bilden ovan visar en anläggning där olja siljs av från dittransporterad oljesand genom ångning och raffinering.

I USA påbörjades utvinning av olja och gas genom hydraulisk spräckning ("fracking") av skifferavlagringar. På bilden nedan bränns överskottsgas från en fyndighet i North Dakota dit man ännu inte hunnit dra gasledning.

Båda exploateringsmetoderna är kostsamma och energikrävande, och de medför stora lokala miljöstörningar. Intresset för den nya tekniken svalnade i viss mån när oljepriset kraftigt sjönk år 2014, men utvinningen pågår fortfarande i stor omfattning.



JIM WEST / IBL

Kolet å sin sida har bildats av växter i våtmarker uppe på land. Växtresterna omvandlades först till torv, som senare i sin tur har ombildats till brunkol och stenkol.

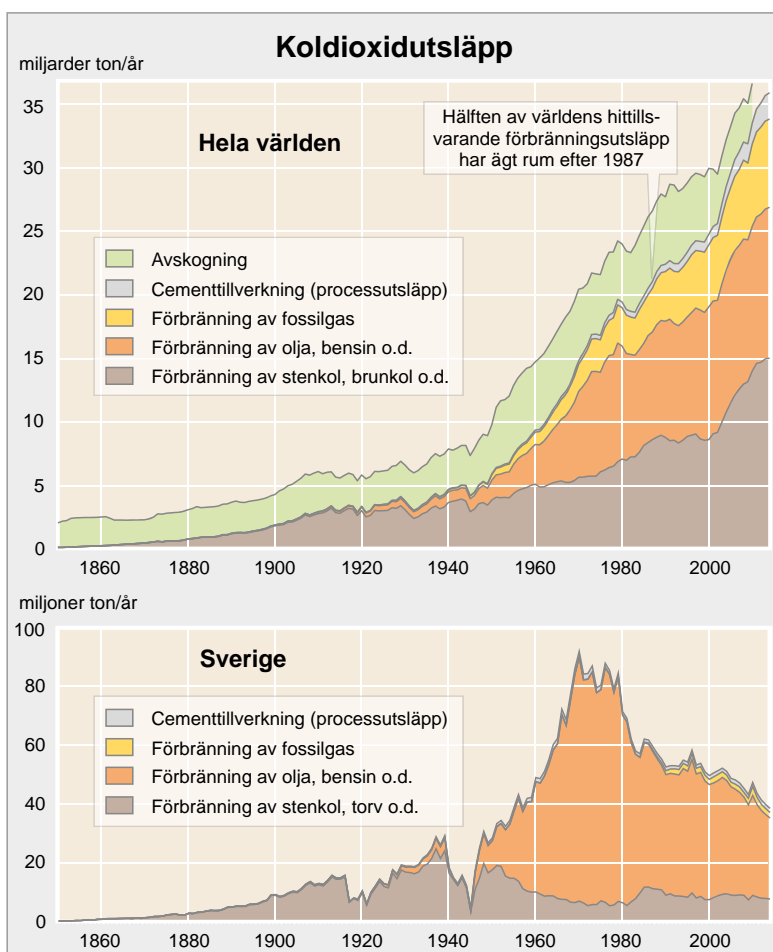
Att människan nu hämtar upp fossila bränslen ur jordskorpan och eldar med dem innebär att deras oavslutade nedbrytning till sist fullbordas. Det som händer när de brinner har mycket gemensamt med vad som äger rum då organiskt material förmultnar – de kolföreningar som bränslena är uppbyggda av delas sönder, varvid kolet förenas med syre från luften och avgår i form av koldioxid. Samma sak händer vid förbränning av biobränslen, både "färsk" biomassa såsom ved och förädlade bränslen såsom etanol eller biogas.

Ändå finns det en grundläggande skillnad mellan koldioxidutsläpp som härrör från biobränslen och sådana som kommer från fossila bränslen. När vi eldar med exempelvis ved återfår atmosfären koldioxid som träden hade tagit upp därifrån relativt nyligen – i huvudsak under de senaste decennierna. Förbränningen innebär dessutom bara att vi i någon mån påskyndar ett naturligt förlopp. Om vi i stället lämnade kvar veden i skogen skulle den likafullt snart brytas ned och återlämna sitt kolinnehåll till luften, antingen genom förmultning eller också genom skogsbrand.

Med andra ord kan vi i allt väsentligt betrakta eldning av ved och andra biobränslen som ett inslag i kolets naturliga kretslopp mellan luft och vegetation. I summeringar av hur människan påverkar atmosfärens innehåll av koldioxid brukar utsläppen från förbränning av biobränslen av den anledningen sällan räknas med.

När vi eldar med fossila bränslen frigör vi däremot koldioxid som inte har deltagit i kolets kretslopp på mycket länge – sådana bränslenas uppkomsthistoria sträcker sig hundratals miljoner år bakåt i tiden. Inom en bråkdel av den tidrymden, bara ett par hundra år, har människan nu hämtat upp och förbränt en inte obetydlig del av de väldiga mängder kolföreningar som lagrats i berggrunden under gångna geologiska epoker.

Våra dagars omfattande användning av olja, stenkol och andra fossila bränslen har därför försatt kolets kretslopp i obalans. Luften tillförs betydligt mer koldioxid än vad den hinner bli av med, och följderna blir att ämnet nu uppträder i snabbt ökande halt i atmosfären.



Sedan 1900-talets början har merparten av människans koldioxidutsläpp uppkommit genom förbränning av fossila bränslen. Redan tidigare hade atmosfärens koldioxidinnehåll börjat påverkas av att människan röjde skog för att vinna jordbruksmark. De svenska utsläppen minskade rejält kring 1980 tack vare reducerad oljeanvändning, men därefter har de avtagit långsammare. – Data från Boden *et al.* 2015, Le Quééré *et al.* 2015 samt Naturvårdsverket (svenska data från 1990 och framåt).



## Kraftig ökning av de globala koldioxidutsläppen

Det var i samband med den begynnande industrialiseringen under 1800-talet som fossila bränslen först började utnyttjas i sådan omfattning att det gav utslag på atmosfärens sammansättning. Längre framför allt stenkol som kom till användning, och kolet övertog mot slutet av 1800-talet vedens ställning som industriländernas viktigaste enskilda bränsleslag. Kolanvändningen behöll sin dominans fram till 1960-talet, då den passerades av den snabbt tilltagande förbrukningen av olja (inklusive oljeprodukter såsom bensin, diesel och flygfotogen). Världens sammanlagda användning av fossila bränslen steg vid den tiden med 5 procent årligen.

I flertalet nord- och västeuropeiska länder upphörde bränsleförbrukningen dock att öka efter ett par kraftiga höjningar av oljepriset under 1970-talet. Dessa "oljekriser" bromsade den ekonomiska tillväxt som hade drivit på efterkrigstidens oljekonsumtion, men de ökade också intresset för energisparande och effektiviserad energianvändning. Med tiden har länderna i den här delen av Europa dessutom i allt högre grad ersatt fossila bränslen med biobränslen och andra förnybara energikällor. Sakta har deras inhemska utsläpp av koldioxid därigenom börjat minska igen.

En liknande utveckling har ägt rum på andra håll i världen, men i allmänhet senare än i nordvästra Europa. I Östeuropa och de forna Sovjetstaterna nådde bränsleförbrukningen en topp strax före kommunismens fall i slutet av 1980-talet. Till följd av ekonomisk tillbakagång minskade den därefter med drygt 40 procent men har sedan legat kvar på ungefär samma nivå.

I Sydeuropa och i rika utomeuropeiska länder såsom USA, Kanada och Australien medförde oljekriserna bara ett tillfälligt avbräck för användningen av fossila bränslen – oljeförbrukningen och koldioxidutsläppen började snart öka igen. Uppgången fortsatte ännu i början av

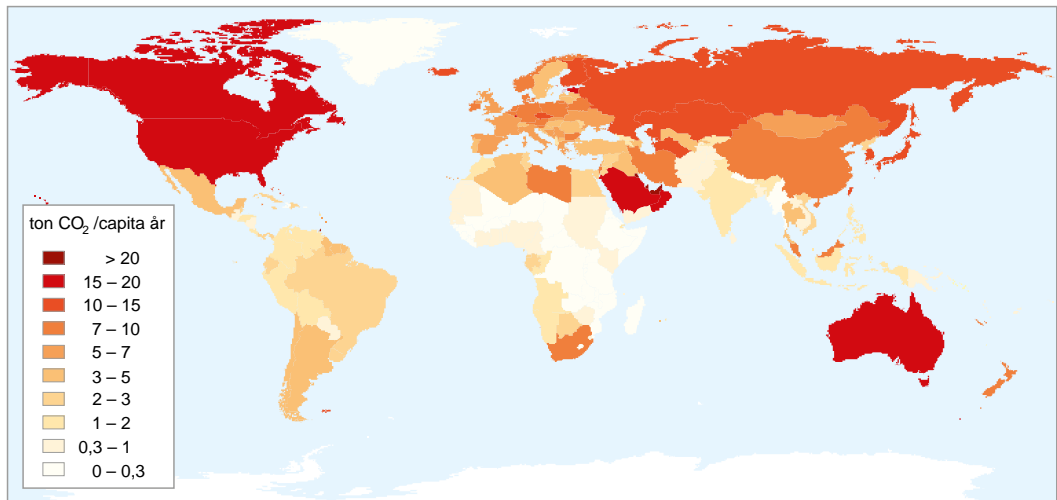
En närmare titt på hur koldioxidutsläppen har förändrats i olika delar av världen avslöjar tydliga samband med ekonomisk tillväxt och tillbakagång.

– Data från Boden *et al.* 2015.

## Koldioxidutsläpp per capita

I de fattigaste delarna av världen kan utsläppen per capita av koldioxid räknas i enstaka procent av vad som släpps ut i exempelvis USA eller Kanada.

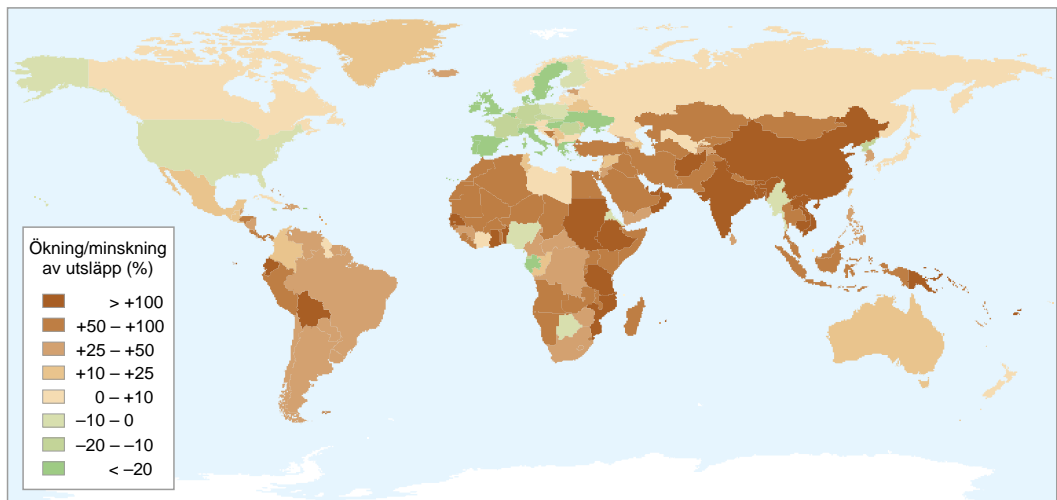
– Kartan anger 2014 års utsläpp per capita från fossila bränslen i varje enskilt land på jorden. Data från EDGAR (Olivier *et al.* 2015).



## Förändringar av koldioxidutsläpp 2000–2014

I Europa har användningen av fossila bränslen nu kulminerat och i viss mån börjat minska igen. I många utvecklingsländer är koldioxidutsläppen alltjämt på väg uppåt, men de har oftast en bra bit kvar till västerländsk nivå.

– Data från EDGAR (Olivier *et al.* 2015).



2000-talet, och först under de senaste åren har den vänt i en nedgång.

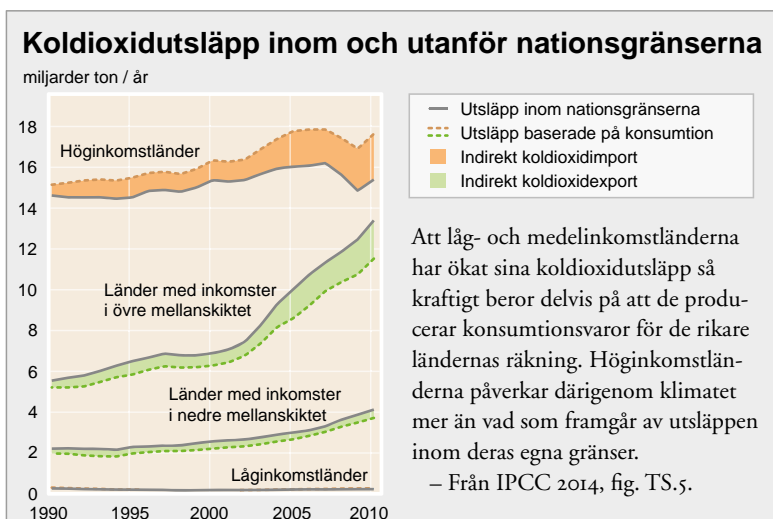
I åtskilliga utvecklingsländer som till helt nyligen var mer eller mindre fattiga har industrialisering och ekonomisk tillväxt de senaste decennierna revolutionerat befolkningens tillvaro. I och med det har också bränsleanvändning och koldioxidutsläpp ökat i snabb takt,

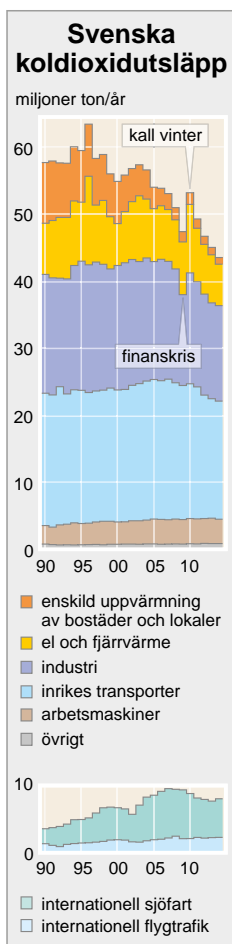
inte minst i Syd- och Ostasien samt delar av Sydamerika.

Särskilt dramatiska har förändringarna varit i Kina. I början av 2000-talet växte ekonomin där med ca 10 procent per år, och ännu snabbare ökade koldioxidutsläppen. Ännu 2005 var det USA som släppte ut mest koldioxid av världens alla länder, men året efter hade Kina kommit i kapp.

I Kina är det framför allt användningen av stenkolk som har ökat. Landet har mycket stora koltillgångar, och några år in på 2000-talet öppnades varje vecka nya koleldade kraftverk. Utvecklingen innebar en renässans för kolet, som på nytt började tävla med oljan om ställningen som världens mest utnyttjade bränsle. I förhållande till den utvunna energin frigör koleldning 30–40 procent mer koldioxid än oljeeldning, och 2005 gick kolet därigenom om oljan som största globala källa till koldioxidutsläpp.

Följden blev också att världens sammanlagda utsläpp av koldioxid steg snabbare än på länge – medan de på 1990-talet inte ökade mycket mer





I Sverige är det framför allt uppvärmningen av bostäder och andra lokaler som har minskat sitt beroende av fossila bränslen och som därigenom har bidragit mest till senare års minskning av landets koldioxidutsläpp. Kategorin "övrigt" innefattar utsläpp från avfall, jordbruk, lösningsmedel och annan produktanvändning.

– Från Naturvårdsverket. Utsläpp från fartyg och flygplan i utrikes trafik som bunkrar i Sverige ingår inte i den nationella statistiken och visas därför separat.

än 1 procent per år tilltog de under 2000-talets första decennium med 3 procent årligen. Kolanvändningen fortsatte att öka även efter 2010, och likadant var det med användningen av olja och fossilgas. Utsläppen från gasförbränning är förhållandevis måttliga – räknat per energienhet frigörs ca 25 procent mindre koldioxid än vid oljeeldning – men förbrukningen av fossilgas har stadigt stigit år för år, opåverkad av alla variationer i oljepriset.

Räknade per capita har koldioxidutsläppen i vissa utvecklingsländer nu nått europeisk nivå. I Kina tycks de på sistone ha kulminerat, varigenom också den globala utsläppsökningen åtminstone tillfälligt stannade av kring 2015. I många andra utvecklingsländer, exempelvis Indien, fortsätter utsläppen uppåt, men där uppgår de alltjämt bara till en bråkdel av västerländska nivåer, uttryckta per capita. Om hela jordens befolkning började förbruka fossila bränslen i samma omfattning som den genomsnittlige amerikanen skulle de klimatpåverkande utsläppen tredubblas.

## Svenska utsläppen har minskat, men trafikökningen har hållit emot

Industri, elproduktion och bostadsuppvärmning svarar tillsammans för omkring fyra femtedelar av den totala förbrukningen av fossila bränslen i världen. I såväl Europa som USA, Kina, Indien och många andra länder är en stor del av eltillförseln baserad på koleldning.

Sveriges användning av fossila bränslen avviker dock på flera sätt från omvärldens. Här var koldioxidutsläppen som störst kring 1970, då både bostadsuppvärmningen och elproduktionen till betydande del var oljebaserad. I takt med att kärnkraften byggdes ut under de följande åren avtog emellertid de fossila bränslenas bidrag till den svenska eltillförseln. Det bidraget är numera nere i enstaka procent – den el som i dag produceras i Sverige härrör till mer än 90 procent från kärn-, vatten- eller vindkraft.

Följden blev att de svenska koldioxidutsläppen minskade med en tredjedel från 1970-talet till mitten av 1980-talet. Räknade per capita har utsläppen sedan dess varit måttligare här än i många andra industriländer. Under senare år har dessutom uppvärmningen av bostäder och lokaler i Sverige till allt större del åstadkommit med hjälp av biobränslen – flis, avverknings-

rester, biprodukter från skogsindustrin etc. – i stället för olja och kol.

Ändå visade det sig svårt att reducera förbrukningen av fossila bränslen ytterligare i Sverige. Liksom i flera av våra grannländer förblev koldioxidutsläppen här nästan oförändrade under 1990-talet – först därefter började de gradvis minska igen. Orsaken var att den avtagande användningen av fossila bränslen för el- och värmeproduktion uppvägdes av den allt mer omfattande trafiken och dess förbrukning av bensin, diesel, bunkerolja, flygfoto-gen m.m.

Trafiken är det främsta skälet till att olja och oljeprodukter har förblivit så betydelsefulla i förhållande till andra bränsleslag. I Sverige svarar oljan i dag för ca 80 procent av den totala förbrukningen av fossil energi. Kolet står för det mesta av återstoden, medan den svenska användningen av fossilgas har förblivit relativt obetydlig.

I världen som helhet står trafiken numera för ungefär en femtedel av de samlade koldioxidutsläppen från fossila bränslen, men i Sverige är andelen större. Här uppgick den år 2014 till 41 procent (eller 50 procent om vi också inkluderar den svenska försäljningen av bränsle till internationell sjöfart och flygtrafik).

Den största delen av trafikens koldioxidutsläpp kommer från bilarna. Enbart sedan 1990 har personbilstrafiken i Sverige vuxit med drygt 15 procent och lastbilstrafiken med hela 80 procent. Samtidigt har bilarnas genomsnittliga vikt och motorstyrka ökat.

Trafikökningens följder för utsläppsmängderna har å andra sidan motverkats av att bilmotorerna blivit effektivare och att en allt större andel av dem drivs med diesel i stället för bensin – en dieselmotor släpper ut mindre koldioxid än en lika kraftig bensinmotor. Även förnybara drivmedel såsom biodiesel och biogas används nu i tilltagande omfattning.

Tack vare den utvecklingen började den svenska vägtrafikens koldioxidutsläpp minska när trafikökningen år 2008 slog av på takten. På sistone har utsläppsminskningen dock upphört, delvis på grund av stigande försäljning av fyrhjulsdrivna personbilar med hög bränsleförbrukning.

Numera bidrar också svenskarnas flygresor till ungefär lika stor klimatpåverkan som deras användning av personbilar. Flygtrafiken inrikes har visserligen minskat sedan 1990, men den



I Brasilien har vidsträckta skogar bränts ned för att ersättas av odlingsmark. En stor del av kolet som fanns i träden finns nu i atmosfären i form av koldioxid.

betydligt mer omfattande utrikestrafiken har ungefär fördubblats under samma tid.

En annan orsak till att de svenska koldioxidutsläppen varit svåra att begränsa är att flera av landets viktigaste industribranscher förbrukar stora mängder fossila bränslen. Järn- och stålindustrin använder exempelvis kol både som energikälla och som råvara i vissa tillverkningsprocesser. Klimatpåverkande utsläpp kommer även från industriella processer där kalksten utnyttjas som råvara. Viktigast är cementtillverkningen, där kalksten genom upphettning sönderdelas i bränd kalk och koldioxid.

## Avskogning bidrar till människans koldioxidtillförsel

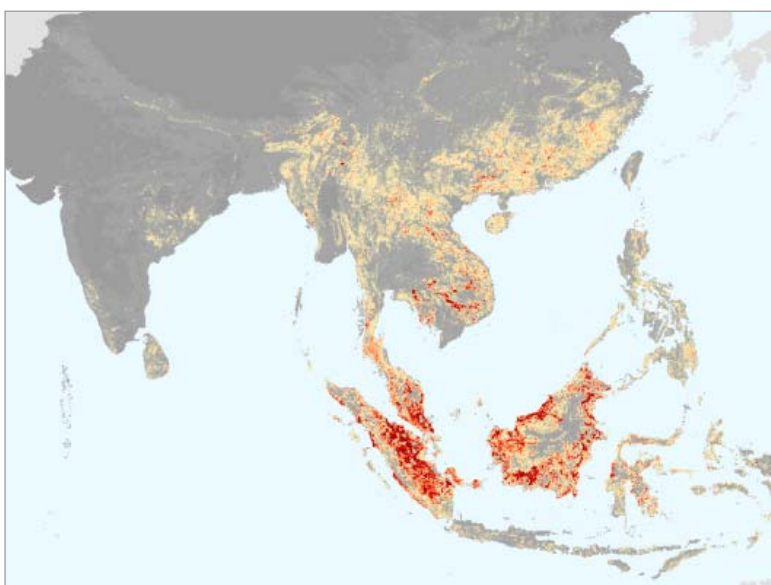
Människan frigör koldioxid inte bara via skorstenar och avgasrör utan också från skogs- och jordbruksmark. Långt före industrialiseringens tidevarv började våra förfäder reducera mängden biomassa på jorden, framför allt genom att röja undan skog för att i stället använda marken till odling. Det kol som hade varit bundet i träden hamnade i stället i luften i form av koldioxid – biomissan i de grödor som kom i skogens ställe uppgick bara till några få procent av vad som hade funnits i träden.

I humusämnen och annat organiskt material i marken kan en skog binda ännu större kolmängder än i själva träden. Även detta kolförråd bryts efterhand ned och omvandlas till koldioxid om skogen försvinner.

Under förindustriell tid var avskogningen långsam och i första hand begränsad till Europa och delar av Asien. På 1800-talet fick den dock kraftigt ökad omfattning i bl.a. Nordamerika. Sedan mitten av 1900-talet är det framför allt tropiska skogar som har glesats ut eller helt försvunnit i snabb takt. I nordligare trakter finns numera knappast något behov av ytterligare uppodling. Här har i stället en del överflödigt jordbruksmark börjat återbeskogas, men detta har bara till en mindre del kunnat uppväga avskogningen i tropikerna.

Virket i de försvunna skogarna har till stor del bränts upp, antingen på plats – dvs. genom anlagd skogsbrand – eller genom att det tagits tillvara och utnyttjats som bränsle. Mot den

## Avskogning i Sydostasien 2000–2012



I Sydostasien har avskogningen under senare tid varit snabb i bl.a. Indonesien och Malaysia. Kartan visar beräknade förluster av kol från skogsmark i området under åren 2000–2012. De rödaste områdena har blivit av med mer än 100 ton kol per hektar.

– Från Tyukavina *et al.* 2015.

## TORVTÄKT OCH TORVFÖRBRÄNNING



ANDRÉ MASLENNIKOV / TT NYHETSBYRÅN

Torvtäkt i Härjedalen.

I Sverige utnyttjas *torv* som bränsle i relativt stora kvantiteter, framför allt i vissa kraftvärmeverk. De svenska torvmossarna har alla bildats efter den senaste istiden och är i typiska fall några tusen år gamla. Efter brytning kan torven återbildas, men detta skulle kunna kräva många sekler eller rentav årtusenden. Så länge kan det därmed också dröja innan koldioxid som har frigjorts genom torvförbränning upphör att bidra till växthuseffekten. I sammanhang där vi studerar klimatstörningar i kortare tidsskalor än något tusental år måste vi därför jämföra torven med de fossila bränslena och inkludera torveldningen i människans påverkan på luftens koldioxidinnehåll.

Förbränning av torv medför relativt stora koldioxidutsläpp – i förhållande till den utvunna energin blir utsläppen rentav något större än vid koleldning. I Sverige har torveldningen minskat påtagligt sedan 2010, men den svarar fortfarande för en dryg procent av landets totala växthusgasutsläpp. En hel del torv utnyttjas också som jordförbättringsmedel eller stallströ, och även den frigör koldioxid eftersom den snabbt bryts ned så snart den kommit till användning.

För att rätt kunna bedöma torvanvändningens netto-bidrag till växthuseffekten måste vi emellertid ta hänsyn

till en rad faktorer utöver koldioxidutsläppen från den utvunna torven. Det hör exempelvis till saken att en orörd torvmosse kan vara en ganska betydande källa till metan (se s. 75). Om mossen dikas ut för att kunna tas i bruk för torvtäkt förbättras syretillgången i torvlagren. Då minskar metanavgången, men i stället frigörs ökande mängder koldioxid och därtill ibland dikväveoxid.

Av betydelse för torvanvändningens klimatpåverkan är också vad som händer med ett exploaterat område när torven är utbruten. Låter man området återgå till att bli våtmark börjar koldioxid på nytt bindas i växande torvlager, men samtidigt kan metanutsläppen återigen bli stora. Ett bättre alternativ sett ur klimatsynvinkel kan vara att plantera skog på det exploaterade området och därigenom påskynda bindningen av koldioxid, eller att anlägga en sjö där. I båda fallen finns goda utsikter att nästan helt undvika metanavgång.

Ändå innebär koldioxidutsläppen i samband med förbränning eller annat nyttjande att torvanvändning sammantaget får klimateffekter av samma storleksordning som användning av mer konventionella fossila bränslen.

bakgrunden kan det verka motsägelsefullt att inkludera avskogning i människans påverkan på atmosfärens koldioxidinnehåll – vi såg ju ovan att förbränning av biomassa *inte* behöver räknas med i sådana sammanhang. Men en förutsättning för att vedeldning ska kunna ses som ett inslag i kolets naturliga kretslopp är att det uppledde virket efterhand ersätts med nya träd. Så är ju inte fallet på avskogad mark som har börjat användas för något annat än skogsbruk.

Den sammanlagda skogsarealen i världen har sedan 1700-talet reducerats med en dryg

femtedel. På så sätt har atmosfären tillförts ca 700 miljarder ton koldioxid, vilket är ungefär en tredjedel av de kvantiteter som totalt har släppts ut genom mänsklig verksamhet sedan förindustriell tid. Men medan utsläppen från fossila bränslen länge fortsatte att öka i rask takt upphörde avskogningen att intensifieras under senare delen av 1900-talet. Efter år 2000 kan den rentav ha reducerats något i omfattning. Avskogningens andel av människans globala koldioxidutsläpp har därigenom gradvis minskat. Under perioden 2005–2014 medförde



nettoförändringarna av markanvändningen – avskogning minus återbeskogning – att atmosfären årligen fick ta emot drygt 3 miljarder ton koldioxid. Det utgjorde ungefär en tiondel av de totala koldioxidutsläppen under dessa år.

I Sverige har skogsarealerna under senare tid fått ett årligt tillskott på ungefär en promille per år, till stor del genom beskogning av jordbruksmark eller utdikad våtmark. Beskogningen leder till att koldioxid binds i de uppväxande träden. Men även avskogning förekommer fortfarande i vårt land, framför allt genom att bebyggelse, vägnät och annan infrastruktur breder ut sig. Eftersom avskogningen inte är fullt lika omfattande som beskogningen ökar den totala skogsarealen i Sverige sakta men säkert. Ändå är koldioxidfrigörelsen i samband med avskogning i dagsläget ungefär dubbelt så stora som koldioxidupptagningen i samband med beskogning. Ett av flera skäl är att borttagningen av virke vid avskogning går snabbare än virkestillväxten på nyligen beskogade arealer.

Nettoeffekten av dagens markanvändningsförändringar i Sverige är att atmosfären årligen tillförs drygt 2 miljoner ton koldioxid. Det motsvarar ca 5 procent av de svenska utsläppen från fossila bränslen.

## Skogar och skogsmark kan ta upp mer koldioxid än de ger ifrån sig

Totalt fick luften under perioden 2005–2014 i genomsnitt ta emot 36 miljarder ton koldioxid per år till följd av förbränningsutsläpp och förändrad markanvändning världen över. Ändå

ökade atmosfärens koldioxidinnehåll inte med mer än ca 16 miljarder ton per år. Mer än hälften av det årliga tillskottet försvann tydligen omgående från luften. Utöver de källor som tillför ämnet finns det alltså även stora *sänkor*, dvs. processer som befriar atmosfären från utsläppt koldioxid.

En betydande del av koldioxidtillskotten till luften tas upp av havet. Under senare tid har varje år 9–10 miljarder ton överförts dit. Årstoden, i genomsnitt ca 11 miljarder ton koldioxid per år, har tagits om hand av vegetationen på land. Skogsarealerna har visserligen minskat, men i många av världens kvarvarande skogar har träden under senare decennier blivit allt fler och/eller allt större. Det innebär att skogarna har tagit upp allt mer koldioxid och bundit kolet i ved och annat organiskt material.

En orsak till den här utvecklingen är att vi har förändrat vårt sätt att bruka skogen. Inte minst gäller detta i Sverige, där skogarna i början av 1900-talet var glesa och deras tillväxt långsam. Skogstillgångarna hade utarmats såväl av den gryende industrin som av den växande befolkningens konsumtion av brännved och husbehovsvirke. Dittills hade ingen större möda ägnats åt att få upp nya träd efter avverkingarna.

År 1903 beslöt emellertid riksdagen att den som avverkar skog också ska se till att den växer upp igen. Skogstillväxten främjades genom åtgärder såsom plantering, dikning, gödsling och markberedning. Avverkingarna fortsatte gradvis att intensifieras under nästan hela 1900-talet, men virkestillväxten ökade ännu mer – för det mesta översteg den virkesuttagen med god marginal.

Resultatet har blivit att det nu finns dubbelt så mycket virke på rot i Sverige som det fanns på 1920-talet. Denna återhämtning efter 1700- och 1800-talens hårda nyttjande av skogarna har alltså inte i första hand åstadkommit genom beskogning av övergiven jordbruksmark eller annan trädlös mark. I stället beror den mest på att befintliga skogar nu hanteras annorlunda än förr.

Men virkesmängderna har ökat även i skogar som förblivit helt orörda, vilket främst tycks bero på att en del luftföroreningar har en gödslande verkan på träden. För den svenska skogen är kväveföreningar viktigast i det avseendet. Skogstillväxten gynnas därtill av koldi-

Skogsplantering efter avverkning har liksom annan skogsvård bidragit till att Sveriges virkestillgångar för närvarande växer och binder allt mer koldioxid.



Sedan början av 1900-talet växer de svenska skogarna snabbare än de avverkas. Därigenom har träden år för år bundit allt mer koldioxid. Att år 2005 blev ett undantag berodde på omfattande stormfällning.

– Från Naturvårdsverket 2015, med uppdateringar från Skogsstyrelsen och SLU.



oxiden själv, som ju utnyttjas av vegetationen i samband med fotosyntesen (se s. 64). Även den globala uppvärmningen kan ha bidragit till utvecklingen, eftersom den har förlängt vegetationens tillväxtsäsong i områden med kalla vintrar.

Förutom träden själva kan också marken under dem agera som koldioxidsänka. Förutsättningen är att markens innehåll av kol i form av ofullständigt nedbrutna växtrester och annat organiskt material blir allt större. Så tycks i dag vara fallet i stora delar av världen.

I Sverige beräknas skogsmarkens mineraljordsskikt nu lagra upp så mycket kol i organiskt bunden form att det motsvarar en upptagning av ungefär 14 miljoner ton koldioxid per år. Å andra sidan frigörs en hel del koldioxid från markens ytliga humusskikt och från skogbevuxen torvmark som dikats i syfte att öka skogstillväxten. Dikningen har inneburit att grundvattennivån sjunkit och att marken därigenom tillförs mer syre än tidigare. Följden har blivit att torven gradvis bryts ned, varvid dess innehåll av kol avgår i form av koldioxid.

Nettoresultatet av virkestillsättningens tillväxt och förändringarna i skogsmarken är likvärdigt att de svenska skogarna nu i genomsnitt binder mer än 40 miljoner ton koldioxid årligen. Det som händer i skogarna kan med andra ord sägas

uppväga Sveriges koldioxidutsläpp från fossila bränslen, som under senare tid också har legat kring 40 miljoner ton per år.

Även det virke som vi hämtar ut från skogarna kan fungera som en koldioxidsänka, förutsatt att vi inte omedelbart använder det som bränsle och därigenom frigör den koldioxid som bundits i veden. Ungefär hälften av det svenska virkesuttaget utnyttjas som sågtimmer eller för tillverkning av pappersprodukter eller spånskivor och annat skivmaterial. Också sådana produkter kommer till sist att brännas upp eller förmultna, men i typiska fall har de en livslängd på ett antal år eller decennier, vilket innebär att frigörelsen av koldioxid blir uppskjuten.

”Förrådet” av svensktillverkade skogsprodukter bedöms för närvarande växa genom att nytillskotten är större än de kvantiteter som tas ur bruk. Produktionen beräknas därigenom årligen binda mer än 5 miljoner ton koldioxid.

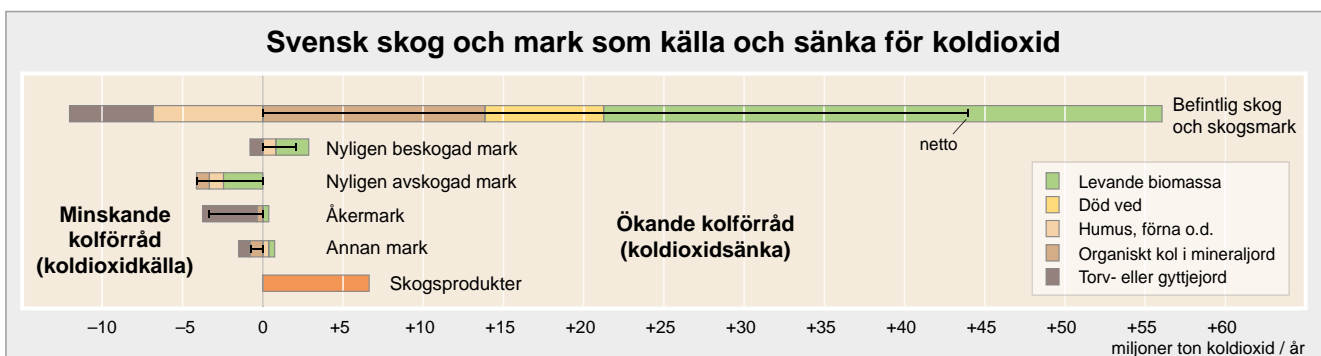
## Koldioxidsänkorna i skog och mark varar inte för evigt

Skogarnas stora förmåga att ta upp koldioxid har gjort att många företag och privatpersoner numera gärna lämnar bidrag till skogsplantering för att med bättre samvete kunna använda fossila bränslen, exempelvis i samband med flygresor.

Men skogarnas roll som koldioxidsänka har begränsad varaktighet. Trädens nettoupptagning av koldioxid fortgår bara så länge virkesmängderna ökar, och det kan de inte göra hur länge som helst. Även om näringstillgång och andra tillväxtbetingelser skulle bli aldrig så goda finns det en gräns för hur många och hur stora träd det ryms i en skog. I svenska skogar kan koldioxidupptagningen fortsätta i betydande omfattning i decennier, men hur vi än brukar

För närvarande binds allt mer koldioxid i levande och död ved ute i skogarna, och därtill i skogsprodukter såsom papper och byggmaterial. Sveriges åkermark utgör däremot en källa till koldioxid, framför allt genom nedbrytning av torv- och gyttejordar. Figuren visar beräknade årsmedelvärden av kolförrådets förändringar under 2009–2013.

– Data från Naturvårdsverket.



skogen kommer dess totala virkesinnehåll på längre sikt att sluta öka.

Det skulle inte ens hjälpa om vi helt avstod från avverkningar och i stället lät skogen växa i fred. Ju äldre en skog blir, desto långsammare blir dess virkestillväxt och nettoupptagning av koldioxid. Till sist uppkommer en jämvikt mellan de levande trädens tillväxt och de döda trädens förmultnande. Då har skogen upphört att fungera som sänka för koldioxid.

Skulle skogens virkesinnehåll längre fram minska igen – genom avverkning, brand, stormfällning eller någon annan störning – kommer den i stället att börja uppträda som koldioxidkälla. Stormen Gudruns härjningar i januari 2005 (se s. 136) blev en tydlig påminnelse om den saken. Vindbyarna fällde så många träd att den långsiktiga ökningen av Sveriges samlade virkestillgångar tillfälligt kom av sig helt.

## Uppodlad våtmark och sjöbotten frigör mycket koldioxid

Svensk åkermark utgör i allmänhet en källa till koldioxid – sammanlagt frigör den varje år ungefär 4 miljoner ton. Merparten kommer från åkrar med ett förflutet som våtmark eller sjöbotten, trots att dessa inte står för mycket mer än 5 procent av dagens totala åkerareal. Ur-

sprungligen bestod jordlagren där till stor del av torv eller gyttja. När de ”luftades” genom torrläggning, plöjning och harvning började detta organiska material brytas ned i snabb takt. Nedbrytningen frigjorde näringsämnen, vilket gjorde den nyvunna åkermarken mycket bördig, men samtidigt frigjordes förstås också koldioxid.

Nedbrytningsprocesserna fortgår allttjämt, även om de i viss mån har tappat fart genom att torv- och gyttjejordarna blivit utarmade på organiskt material. Koldioxidfrigörelsen från dessa s.k. organogena jordar kan fortsätta långt in i framtiden, oavsett om de används till odling eller ej. Den skulle dock kunna bromsas om jordarna sätts under vatten igen, exempelvis genom återskapande av våtmarker.

## Landmiljöns koldioxidupptagning varierar från år till år

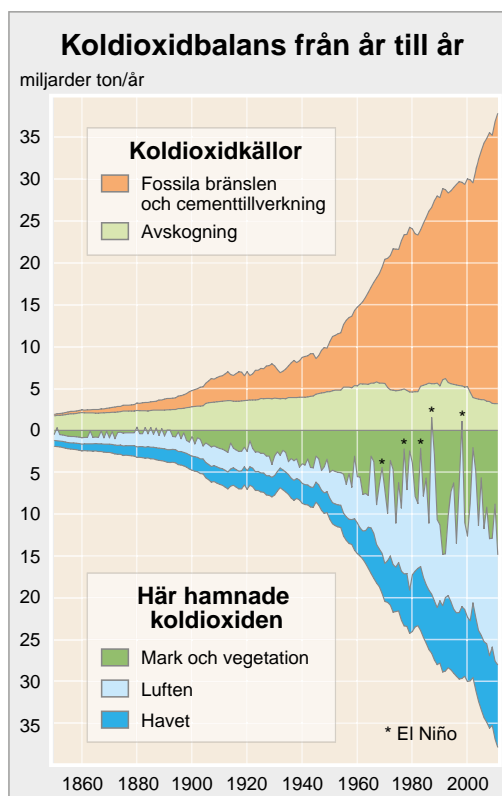
Slår vi samman svenska skogars, skogsmarkers och jordbruksmarkers upptagning och frigörelse av koldioxid finner vi att de för närvarande utgör en betydande sänka för denna växthusgas. Nettot kan dock förändras kraftigt från ett år till ett annat, exempelvis på grund av stormfällningar och varierande virkesuttag.

Också sett i global skala utgör landmiljön i dagsläget en koldioxidsänka som visserligen är stor men också snabbt skiftande. Det sistnämnda framgår av att koldioxidens haltökning i luften varierar från det ena året till det andra. I början av 1990-talet upphörde halten för en tid nästan helt att stiga (se s. 64), vilket sannolikt berodde på att temperaturen på jorden tillfälligt sjönk efter vulkanen Pinatubos utbrott år 1991. Avkylningen bör ha bromsat nedbrytningen av humus och annat dött organiskt material i marken, med minskad frigörelse av koldioxid som resultat.

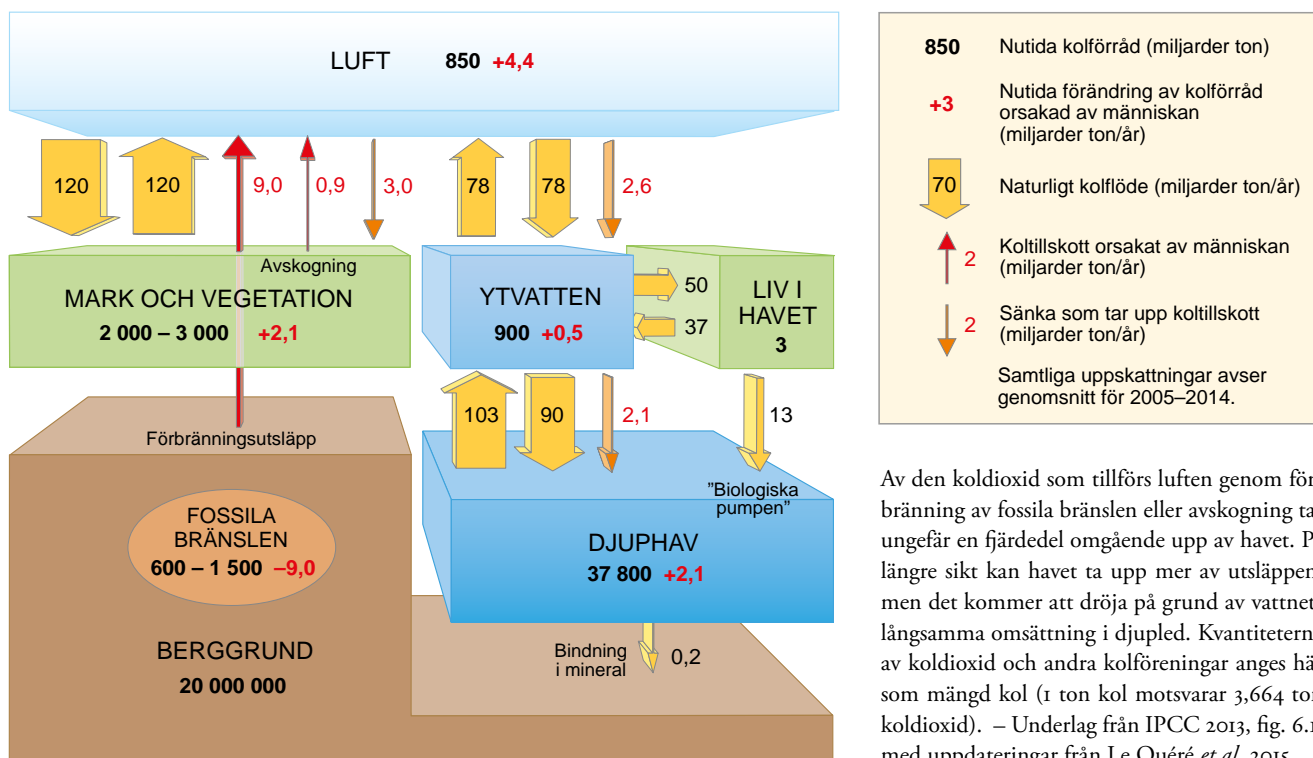
År 2015 blev haltökningen i stället större än vad som någonsin tidigare hade registrerats. De mycket utpräglade El Niño-förhållanden som rådde då medförde framför allt i tropikerna högre temperatur och mindre nederbörd än vanligt. Värmen och torkan reducerade vegetationens tillväxt, påskyndade nedbrytningen av organiskt material och ökade förekomsten av skogsbränder. Alla dessa förändringar försvagar landmiljöns funktion som sänka för koldioxid eller förstärker dess funktion som källa.

En betydande del av människans koldioxidutsläpp tas upp av vegetationen, men växtlighetens förmåga att binda koldioxid varierar från år till år. Den kan exempelvis minska på grund av den värme och torka som följer med väderfenomenet El Niño. Under sådana omständigheter blir större delen av den utsläppta koldioxiden i stället kvar i luften.

– Underlag från IPCC 2013, fig. 6.8.



## Koldioxidutsläpp och kolets kretslopp



Av den koldioxid som tillförs luften genom förbränning av fossila bränslen eller avskogning tas ungefär en fjärdedel omgående upp av havet. På längre sikt kan havet ta upp mer av utsläppen, men det kommer att dröja på grund av vattnets långsamma omsättning i djupled. Kvantiteterna av koldioxid och andra kolföreningar anges här som mängd kol (1 ton kol motsvarar 3,664 ton koldioxid). – Underlag från IPCC 2013, fig. 6.1, med uppdateringar från Le Quéré *et al.* 2015.

### Havet tar på sikt upp det mesta av koldioxiden – men inte allt

Havet har mångfalt större kapacitet än landmiljön att ta upp den koldioxid som människan frigör. I havsvattnet lagras merparten av koldioxiden i form av kolsyra, som i sin tur omvandlas till vätekarbonat- och karbonatjoner.

Full effekt som sänka får havet först på lång sikt. Visserligen råder ett omfattande utbyte av koldioxid mellan luften och det ytliga havsvattnet (ned till något hundratal meters djup). Koldioxidens haltförhöjning i atmosfären följs därför med bara något års eftersläpning av en förhöjning av mängden kolföreningar i havets ytskikt. Men lagringsmöjligheterna i detta skikt är begränsade, och det mesta av koltillskottet förs efterhand vidare ned mot djuphavet. Där finns de riktigt stora vattenkvantiteterna, och där nere finns följaktligen också den riktigt stora kapaciteten för lagring av kolföreningar.

Haken är att vattenomsättningen mellan ytskikt och djuphav är mycket långsam. Det är bara inom begränsade delar av världshavet – däribland vissa områden kring Grönland – som ytvattnet över huvud taget förmår sjunka ned mot djupet (se s. 31). För att omsättas i sin helhet behöver havsvattnet därför åtskilliga hundra år, kanske mer än tusen.

Det här betyder att djuphavet ännu långt ifrån har uppnått jämvikt med dagens förhöjda koldioxidhalter i ytvattnet och atmosfären. Än i dag återspeglar dess innehåll av kolföreningar till stor del förindustriella förhållanden.

Den långsamma omsättningen medför att havet på kort sikt inte tar hand om mer än en fjärdedel av de nutida koldioxidutsläppen till atmosfären, trots att det vid jämvikt borde kunna lagra närmare 85 procent av denna tillförsel. Förr eller senare kommer jämvikten dock att infinna sig – via ytvattnet kommer djuphavet under mer än tusen år att fortsätta ta emot koldioxid från de utsläpp som har ägt rum fram till i dag.

Om utsläppen nu omgående upphörde helt skulle atmosfärens koldioxidhalt därigenom börja sjunka, först ganska snabbt men sedan under seklernas lopp allt långsammare. Ända ned till den förindustriella nivån på ca 280 ppm skulle halten aldrig nå, åtminstone inte inom överskådlig tid. Det koldioxidtillskott som har orsakats av människans hittillsvarande utsläpp skulle i stället fortsätta att cirkulera mellan atmosfären och havet under mycket lång tid framöver. Liksom landmiljön har även havsvattnet sina begränsningar som koldioxidsänka.

Efter uppnådd jämvikt med havet kommer alltså drygt 15 procent av den hittills utsläppta

koldioxiden att finnas kvar i atmosfären (om vi bortser från landmiljöns möjligheter att långsiktigt lagra en del av denna koldioxid). Om utsläppen fortsätter kommer emellertid en allt större andel av de nya koldioxidtillskotten att bli kvar i luften. Ju mer koldioxid som redan har lagrats i havet, desto mindre benäget blir havsvattnet nämligen att ta upp ännu mer av detta ämne. Vattnets förmåga att lagra koldioxid minskar ytterligare om det till följd av klimatets förändringar blir varmare.

På mycket lång sikt kommer luft och hav likväl att kunna befrias från merparten av människans koldioxidbidrag genom att ämnet reagerar med kalkavlagringar (kalciumkarbonat), i första hand på havsbotten. Sannolikt tar emellertid den processen många tusen år i anspråk. En mindre del av den utsläppta koldioxiden – kanske 8 procent – lär dessutom finnas kvar i atmosfären även när kalkavlagringarna till sist har tagit hand om allt de förmår. Denna återstod kommer med tiden att kunna elimineras

i samband med vittring av silikatmineral, men det är ett förlopp som troligen kräver hundratusentals år. Med andra ord kommer dagens koldioxidutsläpp att kunna få en utomordentligt långvarig inverkan på klimatet.

### Jordbruket dominerande källa till metan och dikväveoxid

Som vi har sett uppkommer koldioxid när organiskt material bryts ned i närvaro av syre. Om nedbrytningen äger rum i syrefri miljö – s.k. anaerob nedbrytning – frigörs i stället en annan av de dominerande växthusgaserna, nämligen *metan*. Torvmossar och andra våtmarker hör därför till de viktigaste naturliga metankällorna. Vätan i sådana marker blockerar syretillförseln till de stora mängder multnande växtrester som har ansamlats där.

Också i avfallstippar spelar anaeroba nedbrytningsprocesser en framträdande roll. Där brukar syret vara helt förbrukat redan någon

En hel del av människans tillskott till atmosfärens metaninnehåll kommer från risodling. Risfält som står under vatten utgör en syrefattig miljö, vilket gynnar uppkomsten av metan. En annan viktig metankälla utgörs av idisslande boskap.

Bilden är tagen på Bali i Indonesien.





Sveriges utsläpp av metan och dikväveoxid härrör till största delen från jordbruket.

– Data från Naturvårdsverket.

meter under ytan. I Sverige står avfallsupplagen i dag för en fjärdedel av de antropogena metanutsläppen. Metanavgången från de svenska tipparna bedöms emellertid ha minskat med över 60 procent sedan början av 1990-talet. Det beror framför allt på att hushållsavfall och annat organiskt avfall inte längre får deponeras, men också på att metan i ökande omfattning utvinns från avfallsupplagen. Eftersom gasen är brännbar kan den användas för energiproduktion och som drivmedel för fordon.

Idisslande boskap är en annan stor källa till metanavgång. Djuren andas ut eller rapar upp gasen sedan den bildats genom anaerob nedbrytning av födan i våm och nätmage. Ett mindre bidrag kommer också från stallgödseln. Idisslande djur har funnits mycket länge på jorden, men sedan människan tog dem i bruk som tamboskap har deras antal ökat kraftigt. I Sverige är boskapskötseln nu den helt dominerande källan till metan, även om utsläppen sedan 1990 har reducerats med drygt 10 procent till följd av minskad djurhållning.

Metan bildas också vid förbränning av såväl biobränslen som fossila bränslen. Ämnet utgör dessutom huvudbeståndsdelen i fossilgas och kan därför läcka ut i samband med utvinning, transport och annan hantering av sådan gas. Nya uppgifter tyder på att detta läckage kan vara av betydligt större omfattning än vad som tidigare varit känt.

Sammantaget svarar människan för 50–65 procent av den nutida globala metantillförseln till atmosfären. Både de naturliga och de antropogena metanutsläppen är emellertid ofullständigt kartlagda, eftersom de till stor del härrör från mark och andra ”diffusa” källor och därför är svåra att mäta.

*Dikväveoxid (lustgas)*, som också hör till de viktigare växthusgaserna, avgår naturligt till atmosfären framför allt från hav och skogsmark. De antropogena bidragen härrör främst från jordbruksmark som har kväveberikats genom gödsling, odling av kvävefixerande grödor eller nedfall av kvävehaltiga luftföroreningar.

Kvävetillförseln till de svenska åkrarna har avtagit under senare år, främst genom minskad gödsling. Jordbrukets utsläpp av dikväveoxid bedöms av den anledningen ha reducerats med något över 10 procent sedan 1990.

Dikväveoxid släpps också ut i samband med en del industriella processer – såsom framställ-

ning av salpetersyra – samt vid rening av avloppsvatten och förbränning av fossila bränslen och biomassa.

Globalt beräknas människan svara för uppåt 40 procent av den nutida tillförseln av dikväveoxid till atmosfären, men liksom när det gäller metan är bedömningen osäker eftersom källorna huvudsakligen är diffusa. En stor del av såväl de naturliga som de antropogena utsläppen äger rum i tropikerna.

## Förbränningsutsläpp förstärker bildningen av marknära ozon

*Ozon* skiljer sig från alla andra växthusgaser genom att ämnet inte tillförs atmosfären från jordytan, vare sig genom utsläpp eller naturliga processer. I stället bildas ozonmolekylerna (O<sub>3</sub>) uppe i luften genom att ensam syreatomer (O) slår sig samman med syremolekyler (O<sub>2</sub>).

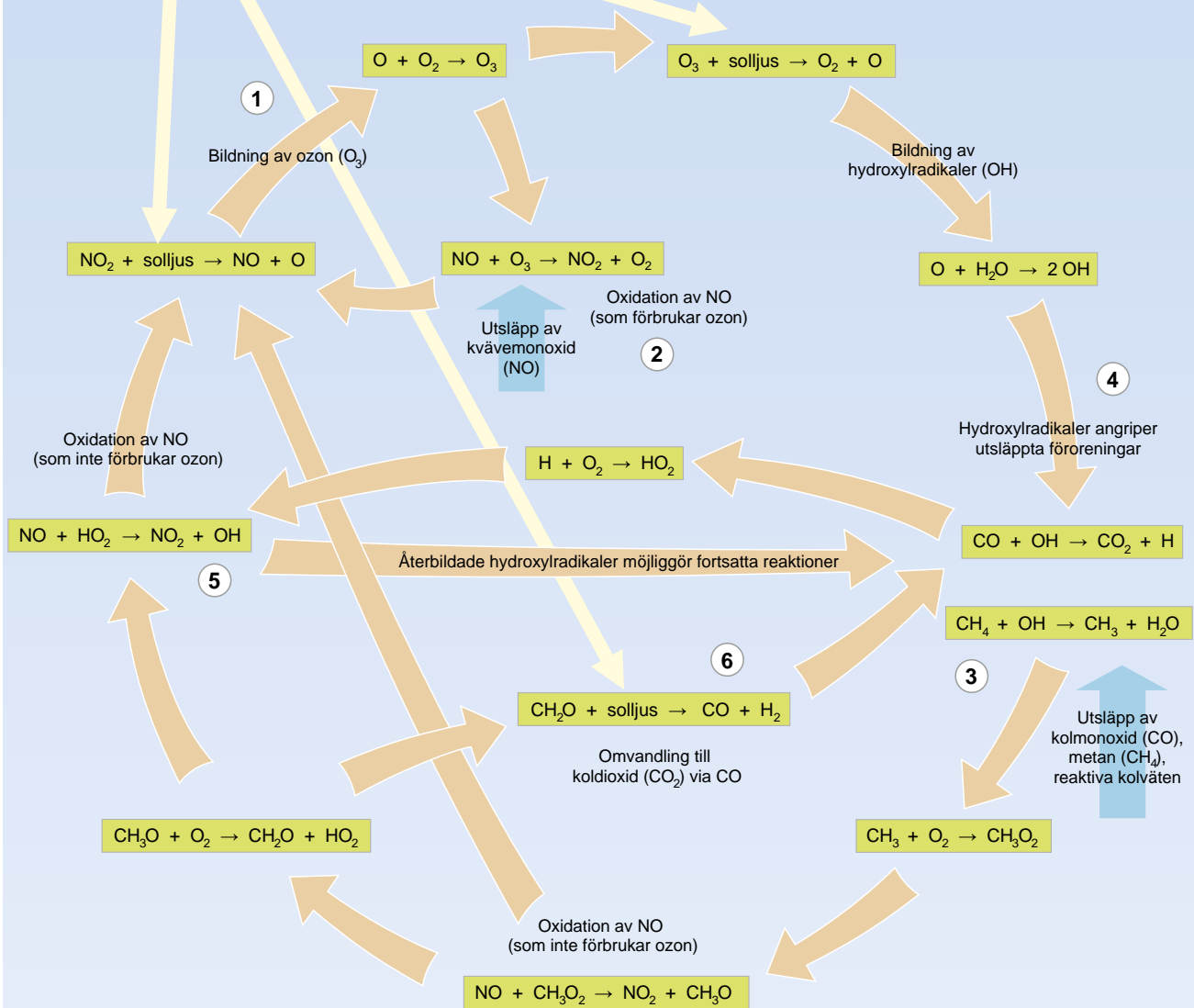
De ensam syreatomerna är mycket kortlivade i atmosfären, och ozonbildning förutsätter därför att förrådet av dem ständigt fylls på. I de lägre luftlagren sker detta främst genom att solljuset sönderdelar kvävedioxid (NO<sub>2</sub>) till kvävemoxid (NO) och syreatomer. Kväveoxider uppkommer framför allt vid förbränningsprocesser, och de uppträder nu i påtagligt förhöjda halter i luften till följd av utsläpp från exempelvis biltrafiken. Dessa utsläpp har bidragit till att ozonhalterna i marknära luftlager är högre i våra dagar än de var i förindustriell tid (se s. 54).

En komplikation i sammanhanget är att kväveoxidutsläppen domineras av kvävemoxid. I atmosfären oxideras denna gas snabbt till kvävedioxid, men oxidationen ombesörjs delvis av ozonmolekyler som därvid förstörs – vilket ju tenderar att *sänka* ozonhalten. Men det finns också reaktionskedjor som omvandlar kvävemoxid till kvävedioxid utan förbrukning av ozon. I dessa kedjor deltar bl.a. kolmonoxid (CO) och olika slags reaktiva kolväten. Även dessa ämnen uppträder numera i förhöjda halter i luften, vilket har medverkat till ozonhaltens uppgång.

I likhet med kväveoxiderna släpps kolmonoxid och kolväten ut från förbränningsmotorer och fasta förbränningsanläggningar. De lättflyktiga kolväten som ingår i exempelvis bensin eller lösningsmedel kan också dunsta till luften utan hjälp av förbränning.

## Ozon, metan och indirekta växthusgaser – ett kemiskt nätverk

Under inverkan av solljus kan utsläpp av föroreningar såsom kväveoxider, kolmonoxid, metan och reaktiva kolväten medföra ökad ozonhalt i de lägre luftlagren. Med undantag för metan har föroreningarna ifråga ingen egen växthus-effekt, men genom sin inverkan på växthusgasen ozon fungerar de som indirekta växthusgaser.



1. I den lägre atmosfären bildas ozon när kvävedioxid (NO<sub>2</sub>) sönderdelas av solljus och de frigjorda syreatomerna (O) reagerar med syremolekyler (O<sub>2</sub>). Mänskans utsläpp av kväveoxider har därför medverkat till en förhöjning av ozonhalten i marknära luftlager.

2. Visserligen består kväveoxidutsläppen mest av kvävemoxid (NO). Om NO oxideras till NO<sub>2</sub> genom reaktioner med ozon kommer ozonet att förbrukas.

3. Utsläpp av föroreningar såsom kolmonoxid (CO), metan (CH<sub>4</sub>) eller reaktiva kolväten utlöser emellertid kedjor av reaktioner som medför att NO oxideras till NO<sub>2</sub> utan förbrukning av ozon. Indirekt medverkar därför även sådana utsläpp till en förhöjning av ozonhalten.

Figuren visar exempel på hur kolmonoxid och metan kan omvandlas – reaktiva kolväten genomgår ungefär samma slags reaktioner som metan.

4. Reaktionskedjorna inleds genom att föroreningarna angrips av hydroxylradikaler (OH), ursprungligen bildade genom att ozon sönderdelats av solljus.

5. Hydroxylradikalerna förbrukas när de reagerar med föroreningarna, men de återbildas längre fram i processen.

6. Både metan och kolmonoxid omvandlas i slutändan till koldioxid.

Ozonhaltens förhöjning i de lägre luftlagren har sannolikt också bidragit till ökningen av luftens koldioxidinnehåll. Orsaken är att ozon kan vara skadligt för växter och att ämnet därigenom kan reducera vegetationens livskraft, tillväxt och upptagning av koldioxid.

## Nya fluorhaltiga gaser sparar ozonskiktet men inte klimatet

Uppe i stratosfären är ozonbildningen betydligt effektivare än i marknära luftlager. Dit når ultraviolett solstrålning som är så energirik att den kan frigöra enskilda syreatomer genom att splittra syremolekyler. Syreatomerna kan sedan tillsammans med andra syremolekyler bilda ozon på samma sätt som i den lägre atmosfären. På så sätt skapas och upprätthålls det stratosfäriska ozonskiktet.

Som vi sett (s. 55) har ozonhalten i stratosfären emellertid sjunkit till följd av angrepp av ozonnedbrytande gaser – främst CFC, HCFC och haloner – som dessutom har kraftfull växthusverkan. Dessa gaser är utan undantag artificiella. Ingen av dem hade förekommit i atmosfären förrän de på 1900-talet började framställas av människan. Ämnena visade sig kunna utnyttjas i en rad olika tekniska sammanhang, och produktionen av dem mångfaldigades på kort tid. Efterhand läckte de ut i omgivningen

från de produkter där de hade kommit till användning.

Ännu på 1980-talet ökade luftens innehåll av CFC och liknande gaser därigenom med flera procent per år. Vid det laget hade man emellertid börjat uppmärksamma deras skadliga inverkan på ozonskiktet i stratosfären. Sedan dess har CFC-produktionen reducerats kraftigt, och luftens halter av dessa ämnen är sakta på väg nedåt igen. Uttunnningen av ozonskiktet upphörde i början av 1990-talet, och nu syns en begynnande återhämtning. I de rika länderna har även HCFC-användningen nu avvecklats nästan helt, men många utvecklingsländer fortsätter produktionen, och atmosfärens innehåll av HCFC ökar alltjämt.

En av utvägarna för att minska användningen av CFC och HCFC har varit att i stället börja utnyttja *fluorkolväten* (HFC), en närbesläktad grupp av fluorhaltiga föreningar som inte har negativ verkan på ozonskiktet. Men som växthusgaser är HFC-ämnena fullt jämförbara med de ozonnedbrytande gaserna, och de återfinns i dag i små men snabbt ökande mängder i atmosfären. Den viktigaste källan är läckage från kyl- och frysanläggningar, luftkonditioneringssystem och värmepumpar.

En annan typ av fluorhaltiga gaser, *fluorkarboner* (FC eller PFC), släpps i första hand ut som föroreningar vid aluminiumframställning. I likhet med *svavelhexafluorid* ( $\text{SF}_6$ ), en gas som utnyttjas i tyngre elektrisk apparatur och efterhand kan läcka ut därifrån, har fluorkarbonerna mycket hög växthusverkan räknat per molekyl. En av fluorkarbonerna uppträder också naturligt i atmosfären, men de andra är i likhet med övriga fluorhaltiga växthusgaser genomgående tillverkade av människan.

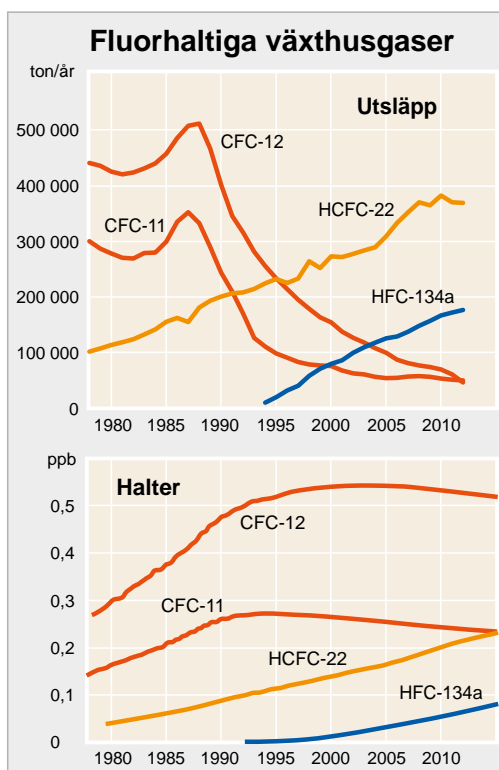
## Nedbrytning i luften blir slutet för alla växthusgaser, utom en

För flera av växthusgaserna är atmosfären en tämligen aggressiv miljö, där de ständigt riskerar att förstöras av energirikt solljus eller reaktiva ämnen.

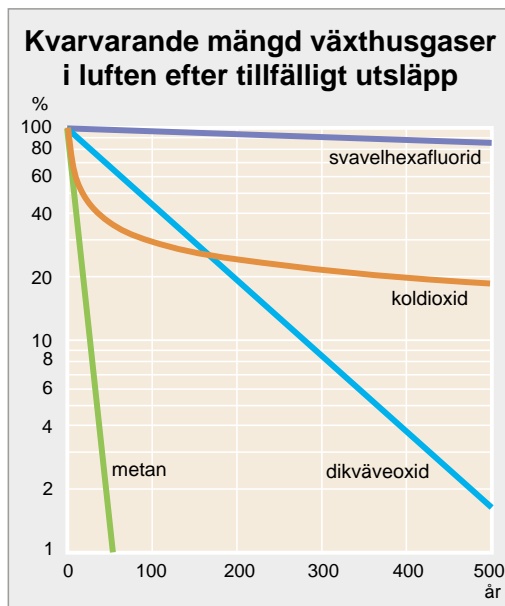
Exempelvis brukar nybildade ozonmolekyler redan inom några dygn brytas ned på samma sätt som de uppkommit, dvs. genom reaktioner med andra gaser. Den tidigare nämnda oxidationen av kväveoxid till kvävedioxid är ett exempel på en sådan reaktion. Ozonmolekyler

Användningen och frigörelsen av klorfluorkarboner (CFC) har minskat sedan 1980-talet, och ämnena uppträder nu i sjunkande halter i atmosfären. CFC har gradvis ersatts av andra ämnen, till en början HCFC (som har måttlig ozonnedbrytande verkan) men senare främst HFC (som inte alls påverkar ozonskiktet). Dessa ämnen förekommer nu i stigande halter i luften, och liksom CFC har de kraftigt växthusverkan.

– Data från Rigby *et al.* 2014 (utsläpp) samt Butler & Montzka 2015 (halter).







kan dessutom sönderdelas av ultraviolett solstrålning, framför allt i stratosfären men även i lägre luftlager. De ensamma syreatomer som därvid frigörs kan reagera med vattenmolekyler, och då bildas hydroxylradikaler (OH).

Hydroxylradikalerna är så instabila och reaktionsbenägna att de kan betecknas som molekylfragment snarare än egentliga molekyler. De angriper och omvandlar många olika ämnen, och de påverkar därmed ett stort antal gasformiga föroreningars halter och livslängd i atmosfären. Reaktionen med OH i de lägre luftlagren utgör den huvudsakliga sänkan både för växthusgaser såsom metan, HFC och HCFC (vars livslängd därigenom i de flesta fall begränsas till något decennium) och för indirekta växthusgaser såsom kvävedioxid, kolmonoxid och reaktiva kolväten (som brukar överleva mindre än ett år i atmosfären).

Dikväveoxid, svavelhexafluorid, fluorkarboner, CFC och haloner är däremot okänsliga för hydroxylradikalernas attacker. I den lägre atmosfären finns över huvud taget ingenting som kan bryta ned dessa mycket stabila växthusgaser. Gradvis sprids de emellertid upp i stratosfären eller ännu högre, och där uppe kan de sönderdelas av kortvägig ultraviolett strålning från solen. Transporten upp till den övre atmosfären är tidskrävande, vilket bidrar till att gaserna har en minimilivslängd på ungefär tjugo år.

Några av de nämnda växthusgaserna är så motståndskraftiga mot nedbrytning att deras livslängd kan räknas i sekler eller ännu mer. Detta gäller i all synnerhet svavelhexafluorid

Efter ett tillfälligt utsläpp av en växthusgas kommer atmosfärens halt av gasen gradvis åter att minska. Diagrammet visar hur många procent av den tillförda kvantiteten som återstår i luften under de 500 åren närmast efter utsläppet. I åtskilliga fall avtar den kvarvarande mängden på ett regelbundet och lättförutsägbart sätt: Om den har halverats efter ett visst antal år krävs lika många år för en ytterligare halvering. I ett logaritmiskt diagram av det här slaget följer haltförändringen i ett sådant fall en rät linje.

Koldioxiden avviker från det mönstret. Inledningsvis sjunker halten snabbt genom upptagning i vegetation och ytvatten, men där uppkommer snart jämvikt med luftens koldioxidinnehåll. Sedan sker en avsevärt långsammare anpassning till djuphavets koldioxidinnehåll. När även denna jämvikt har infunnit sig kvarstår 15–20 procent av den utsläppta mängden, och så förblir det i tusentals år.

– Underlag från IPCC 2013, TFE7, fig. 1.

och fluorkarboner, som inte börjar sönderdelas förrän de har nått upp till mesosfären, dvs. till höjder på mer än 50 km. De kan överleva i atmosfären i många tusen år, vilket innebär att det i dagsläget inte råder någon som helst jämvikt mellan utsläpp och nedbrytning av dessa ämnen. Trots att utsläppen är förhållandevis små uppträder gaserna ifråga nu i stadigt stigande halter i luften, och även efter en rejäl minskning av utsläppen skulle halterna kunna fortsätta att öka.

En enda av de många växthusgaserna i jordens atmosfär, koldioxiden, förblir fullkomligt oberörd av såväl solstrålning som aggressiva kemiska ämnen i luften. Så länge den håller sig kvar ovan mark är den praktiskt taget oförstörbar.

## Koldioxiden dominerar dagens växthusgasutsläpp

Växthusgasernas vitt skilda livstider och förmåga att absorbera värmestrålning innebär att deras klimatpåverkan kan vara svår att jämföra inbördes. Deras bidrag till växthuseffekten kan emellertid sammanställas och adderas till varandra om man multiplicerar mängden av varje enskild gas med dess *GWP-faktor* (GWP = global warming potential). Denna faktor anger hur effektiv gasen är som klimatpåverkare i förhållande till koldioxid. Med hjälp av GWP-faktorerna kan man med andra ord räkna om utsläppen av olika växthusgaser i *koldioxid-ekvivalenter*.

Växthusgaser i atmosfären – en översikt						
Naturliga växthusgaser som också släpps ut av människan						
Namn	Kemisk formel	Halt (ppm)		Strålningsdrivning (W/m <sup>2</sup> )	Livslängd (år)	GWP <sub>100</sub>
		år 1750	år 2015			
Koldioxid	CO <sub>2</sub>	278	400	1,95	*	1
Metan	CH <sub>4</sub>	0,72	1,82	0,50	12,4	28
Dikväveoxid	N <sub>2</sub> O	0,270	0,327	0,19	121	265
Naturlig växthusgas som bildas i atmosfären (delvis genom utsläpp av föroreningar)						
Namn	Kemisk formel	Halt i marknära luftlager (ppm)		Strålningsdrivning (W/m <sup>2</sup> )	Livslängd (år)	GWP <sub>100</sub>
		år 1750	år 2015			
Ozon	O <sub>3</sub>	0,24	0,34	0,40	0,06	
Ozonnedbrytande växthusgaser (samtliga helt artificiella)						
Namn	Kemisk formel	Halt (ppb)		Strålningsdrivning (W/m <sup>2</sup> )	Livslängd (år)	GWP <sub>100</sub>
		år 1750	år 2015			
CFC-11	CFCl <sub>3</sub>	0	0,231	0,061	45	4 660
CFC-12	CF <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	0	0,520	0,166	100	10 200
CFC-113	CF <sub>2</sub> ClCFCl <sub>2</sub>	0	0,072	0,022	85	5 820
Koltetraklorid	CCl <sub>4</sub>	0	0,081	0,014	26	1 730
HCFC-22	CHF <sub>2</sub> Cl	0	0,236	0,050	12	1 760
HCFC-141b	CH <sub>3</sub> CFCl <sub>2</sub>	0	0,025	0,004	9,2	782
HCFC-142b	CH <sub>3</sub> CF <sub>2</sub> Cl	0	0,023	0,004	17,2	1 980
Fluorhaltiga, icke ozonnedbrytande växthusgaser (flertalet helt artificiella)						
Namn	Kemisk formel	Halt (ppb)		Strålningsdrivning (W/m <sup>2</sup> )	Livslängd (år)	GWP <sub>100</sub>
		år 1750	år 2015			
Perfluormetan	CF <sub>4</sub>	0,035	0,082	0,004	50 000	6 630
Perfluoretan	C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	0	0,004	0,001	10 000	11 100
Svavelhexafluorid	SF <sub>6</sub>	0	0,008	0,005	3 200	23 500
HFC-23	CHF <sub>3</sub>	0	0,028	0,005	222	12 400
HFC-125	CHF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	0	0,018	0,004	28	3 170
HFC-134a	CF <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> F	0	0,082	0,013	13,4	1 300
HFC-143a	CH <sub>3</sub> CF <sub>3</sub>	0	0,017	0,003	47	4 800
HFC-152a	CH <sub>3</sub> CHF <sub>2</sub>	0	0,007	0,001	1,5	138

Tabellen ovan tar upp de viktigaste växthusgaser som släpps ut eller på annat sätt påverkas av människan.

Här redovisas bl.a. de olika gasernas halter i förindustriell tid och nutid (år 1750 resp. 2015). Observera att halterna av koldioxid, metan, dikväveoxid och ozon anges i ppm (miljondelar av den totala luftvolymen) medan alla övriga halter anges i ppb (miljarddelar).

I nästa kolumn anges den **strålningsdrivning** (inverkan på strålningsbalansen i atmosfären) som haltökningarna fram till 2015 har orsakat.

**Livslängden** är den tid det tar innan större delen (närmare bestämt 63 procent) av en utsläppt kvantitet

gas har brutits ned eller på annat sätt lämnat atmosfären för gott.

**GWP<sub>100</sub>** anger (utom för ozon) hur stor växthusverkan en viss mängd av en gas har i förhållande till samma mängd koldioxid (räknat över 100 år).

– Data från AGAGE, NOAA och T.J. Blasing, CDIAC (halter och strålningsdrivning) samt IPCC 2013 (livslängd och GWP).

\* För koldioxid kan ingen entydig livslängd anges. En del av gasen lämnar atmosfären inom några få år, men den sista återstoden blir kvar i tusentals år (se s. 75).

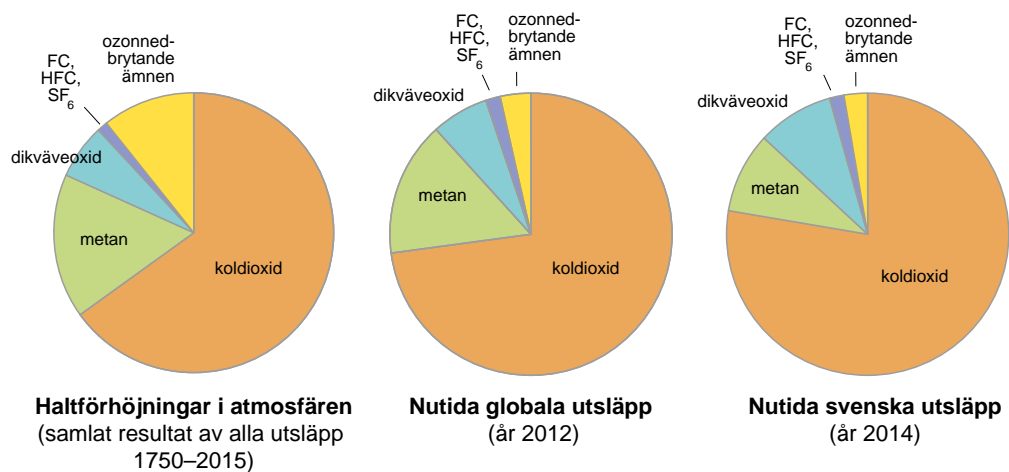
GWP-faktorerna är beroende av vilket tidsperspektiv man är intresserad av. Sammanräknat över en tidsperiod på tjugo år får ett metanutsläpp 84 gånger större växthusverkan än ett lika stort koldioxidutsläpp, vilket kan uttryckas som att metanets  $GWP_{20}$ -faktor är 84. Men eftersom metan har relativt kort livslängd i atmosfären – ungefär ett decennium – avtar metanutsläppens växthusverkan betydligt snabbare än koldioxidutsläppens. Sett i en längre tidsskala, exempelvis hundra år, är metan därför inte fullt lika överlägset som växthusgas i jämförelse med koldioxid – dess  $GWP_{100}$ -faktor uppgår bara till 28.

Omvandlar vi på detta sätt dagens globala utsläpp av olika växthusgaser till koldioxid-

ekvivalenter finner vi att nästan tre fjärdedelar av deras samlade klimatpåverkan (sedd i ett hundraårsperspektiv) härrör från koldioxiden själv. Metan- och dikväveoxidutsläppen bidrar tillsammans med drygt 20 procent, medan de artificiella växthusgaserna trots sina mycket höga GWP-faktorer bara står för ca 5 procent av de nutida utsläppens totala klimatpåverkan.

Likafullt medverkar alla dessa ämnen till att klimatförändringarna är kraftigare än om de enbart hade berott på koldioxiden och dess haltförhöjning från ungefär 280 till 400 ppm. Räknar vi om dagens halter av olika växthusgaser i atmosfären till koldioxidekvivalenter kan vi konstatera att de sammantagna nu har stigit till mer än 480 ppm.

### Olika gasers bidrag till växthuseffektens förstärkning



Koldioxiden är och förblir dominerande bland de växthusgaser som människan släpper ut. Det framgår om vi räknar om halter och utsläpp av övriga växthusgaser till koldioxidekvivalenter – då kan vi jämföra kvantiteterna med varandra. Enligt mätningar av haltförändringarna i atmosfären står koldioxidutsläppen för nästan två tredjedelar av växthuseffektens förstärkning sedan förindustriell tid. För återstoden svarar främst metan, dikväveoxid samt CFC, HCFC och andra ämnen som bryter ned ozonskiktet i stratosfären. I dessa beräkningar är dock inte ozonhaltens förändringar medräknade.

Ser vi enbart till den nutida tillförseln av växthusgaser finner vi en ännu större dominans för koldioxiden, inte minst i Sverige. De ozonnedbrytande ämnenas andel av utsläppen är på väg att minska.

De olika gasernas växthusverkan har genomgående beräknats i ett hundraårsperspektiv. Inverkan av skogsbruk och förändrad markanvändning är inte inräknad i de nutida utsläppen.

– Data från AGAGE och NOAA (haltförhöjningar till 2015), WRI/CAIT och Rigby *et al.* 2014 (nutida globala utsläpp) samt Naturvårdsverket (svenska utsläpp).

## PLANETÄR INGENJÖRSKONST

Inför hotet om allt mer omfattande, kostsamma och farliga klimatstörningar har många idéer framförts om hur vi på teknisk väg skulle kunna minska växthusgasutsläppens effekter, kanske utan att alls behöva reducera själva utsläppen. Alla sådana försök att hantera klimatproblemen skulle innebära avsiktliga ingrepp i hela jordens miljö. De brukar därför sammanfattas under beteckningen ”geoengineering”, ofta översatt till ”planetär ingenjörskonst”.

Det finns i huvudsak två typer av åtgärder som man åtminstone teoretiskt skulle kunna vidta: antingen att befria atmosfären från utsläppt koldioxid, eller också att minska den mängd solstrålning som når jordytan och absorberas där. I praktiken framstår emellertid all slags planetär ingenjörskonst som mycket riskabel jämfört med en snabb omställning till klimatvänliga energikällor (mer om det alternativet i kapitel 12).

### **Koldioxid kan fångas upp och lagras på flera olika sätt, men alla är problematiska**

För att kunna befria atmosfären från koldioxid måste vi på ett eller annat sätt fånga upp gasen ur luften och sedan se till att den varaktigt hålls lagrad någon annanstans, exempelvis i marken, berggrunden eller djuphavet. Idéer på det här temat brukar gå ut på att vi ska utnyttja någon av de naturliga processer som tar upp koldioxid från atmosfären. Till dem hör ju växternas fotosyntes, och ett vanligt förslag är att vi ska skörda biomassa i form av skog eller åkergrödor för att därefter förbränna den, skilja bort koldioxid från förbränningsgaserna och sedan pumpa ned koldioxiden i berggrunden (se s. 164).

Som ett alternativ skulle vi här och var kunna låta biomassan förkolna i stället för att förbränna den fullständigt. Det ”biokol” som skapas på så sätt kan plöjas ned i jordbruksmark, där det skulle kunna bli kvar i tusentals år utan att brytas ned. Genom olika slags anpassningar av jordbruket skulle vi också i viss mån kunna öka åkerjordens innehåll av växtrester i form av organiskt bundet kol – även detta är en form av koldioxidlagring. Ytterligare en möjlighet, också den användbar åtminstone i begränsad skala, är att i ökad omfattning utnyttja virke som byggnadsmaterial för att på så vis binda och långtidsförvara mer kol i vårt eget samhälle.

En annan variant vore att låta skogen stå kvar och växa sig allt tätare i stället för att avverka den, och att dessutom återbeskoga mark som tidigare avskogats. På

det sättet skulle skogen själv kunna tjänstgöra som koldioxidlager. En avigsida med den lösningen är att skog i allmänhet är mörkare än avskogad mark och därför absorberar mer solstrålning. I områden som täcks av snö vintertid skulle återbeskogningens positiva klimat-effekt (infångningen av koldioxid) rentav kunna motverkas helt genom ökad absorption av solljus. En annan begränsning utgörs av bristen på tillgänglig mark. Inte ens en komplett återbeskogning av alla de arealer som en gång varit skogklädda (inklusive all mark som nu används för jordbruk eller bebyggelse) skulle reducera atmosfärens koldioxidhalt med mer än 40–70 ppm.

Konkurrensen om utrymme sätter ofrånkomligen gränser även för möjligheterna att bli av med koldioxid genom biomassaförbränning kombinerad med lagring av den frigjorda koldioxiden i berggrunden. För att kunna utnyttja tekniken i den skala som skisseras i de mest optimistiska framtidsscenarierna skulle vi mot slutet av seklet behöva odla energiskog eller andra energigrödor inom arealer motsvarande halva Europas yta.

Kanske vore det enklare att ta havet till hjälp? Där produceras nästan lika mycket biomassa som i världens alla skogar, till största delen av planktonalger. När algerna dör och sjunker mot djupet för de med sig kolet som de med hjälp av fotosyntesen har tagit upp från ytvattnet. Denna koltransport – ofta kallad ”den biologiska pumpen” (se bilden på s. 74) – medför att ytvattnets och därmed även atmosfärens koldioxidhalt är betydligt lägre än den annars skulle ha varit. Om vi kunde förstärka pumpen genom att förse algerna med näring borde vi kunna befria atmosfären från ytterligare en del koldioxid. På de flesta håll i världshavet lider planktonfloran brist på järn, och småskaliga försök med ”järngödsling” av havsvattnet har i flera fall visat sig öka planktonproduktionen markant. Ändå är det osäkert om vi skulle kunna begränsa växthuseffekten särskilt mycket ens om vi började gödsla hela havet med järn, något som knappast vore realistiskt.

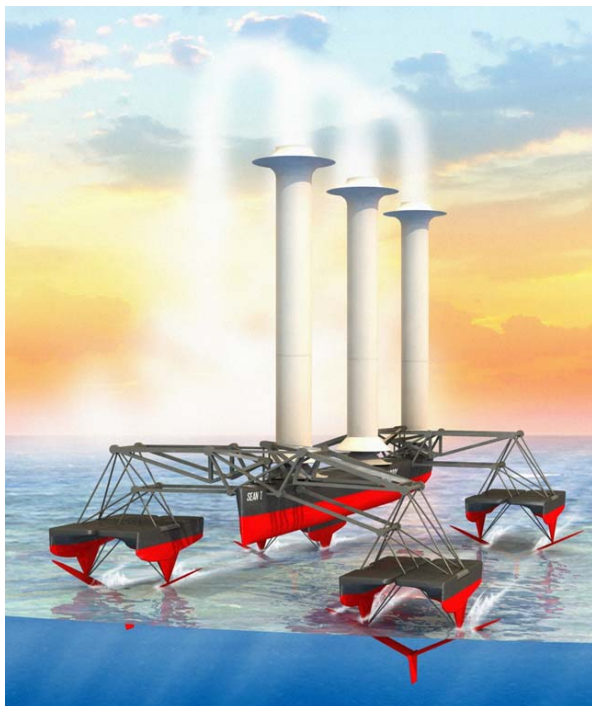
Ett alternativ till att dra nytta av fotosyntesen kunde eventuellt vara att försöka påskynda den kemiska mineralvittring som binder koldioxid i jordlagren, berggrunden eller havsbotten, normalt i en tidsskala på tusentals år. Om man bryter olivin eller något liknande silikatmineral, krossar det och sprider det över exempelvis jordbruksmark kommer vittringsprocesserna i viss mån att förstärkas. På liknande sätt skulle man kunna driva på havsbottnarnas koldioxidupptagning genom att sprida

krossad kalksten i havet. Det råder ingen brist på sådana mineral, men för att kunna få nämnvärda effekter på klimatet skulle tillförseln behöva äga rum i gigantisk skala, med höga kostnader och sannolikt omfattande miljöstörningar som följd.

Med olika slags kemiska metoder skulle man i princip också kunna samla in koldioxid i koncentrerad form direkt från luften för att sedan pumpa ned den i berggrunden. Men eftersom koldioxiden står för en så liten del av luftens sammansättning skulle det bli orimligt dyrt och ineffektivt att göra något sådant i stor skala.

Dessutom motverkas alla minskningar av atmosfärens koldioxidinnehåll av att upplagrad koldioxid från tidigare utsläpp då kommer att återföras till luften från mark och vatten. Om luftens koldioxidhalt ska kunna sänkas till förindustriell nivå räcker det inte med att vi eliminerar hela det överskott av ämnet som finns i atmosfären i dag – vi behöver också ta hand om ungefär lika mycket till som nu finns i andra delar av vår omgivning. I själva verket måste i så fall *all* koldioxid som vi har släppt ut under gångna sekler fångas upp igen och bindas på något mer långsiktigt sätt. Och dessvärre kan vi aldrig veta säkert hur länge koldioxid som vi pumpar ned i berggrunden eller lagrar i virke, åkerjord eller djuphav faktiskt blir kvar där.

En annan hake med nästan all teknik för att befria atmosfären från koldioxid är att den kräver lång tid för att få full effekt – kanske ett sekel eller mer. Det betyder att den inte möjliggör någon snabb minskning av vår klimatpåverkan ens om den sätts in i mycket stor skala.



STEPHEN SALTER / JOHN MCNEILL

## Går det att skärma av solljuset?

Om vi i stället försökte motverka växthuseffekten genom att minska inflödet av solstrålning till jordytan skulle vi teoretiskt kunna sänka den globala medeltemperaturen inom loppet av ett decennium eller två.

Den metod som har diskuterats flitigast går ut på att sprida svavelföreningar i stratosfären, exempelvis med hjälp av flygplan. På samma sätt som vid vulkanutbrott skulle svavelföreningarna bilda svävande sulfatpartiklar som avläskar solljus och därigenom åstadkommer en viss avkylning. Tekniskt och ekonomiskt verkar metoden ligga inom gränserna för vad som är genomförbart. Å andra sidan är den helt oprövad, och den skulle behöva tillämpas i mycket stor omfattning för att få avsedd verkan. För att motverka klimateffekterna av hittillsvarande koldioxidutsläpp skulle vi varje år behöva föra upp flera miljoner ton svavel i stratosfären, något som skulle kunna få påtagligt negativ inverkan på ozonskiktet.

Ett alternativ kunde möjligen vara att skicka upp havssaltpartiklar i luften över oceanerna. En sådan åtgärd kan öka molnens förmåga att reflektera solljus, men det är mycket osäkert hur verksamt den skulle kunna bli.

Oavsett om vi försökte dämpa vår klimatpåverkan med hjälp av svavel eller saltpartiklar skulle vi dessutom behöva fortsätta med tillförseln så länge atmosfärens koldioxidhalt förblir förhöjd, det vill säga i tusentals år. Om tillförseln avbröts skulle växthuseffekten snart slå igenom med full kraft. Den globala medeltemperaturen skulle kunna stiga med flera grader på bara något årtionde, dvs. betydligt snabbare än den stiger i dag.

Idéer har också framförts om att vi skulle kunna öka själva jordytans reflektivitet, exempelvis genom att odla grödor som är ljusa till färgen, eller att vi skulle avskärma en del solljus genom att skicka upp skymmande föremål i omloppsbanan kring jorden. Men åtgärder av den typen bedöms av de flesta som antingen otillräckliga eller orealistiska, eller bådadera.

Alla insatser mot klimatstörningarna som bygger på att avskärma eller reflektera solstrålning har också det gemensamt att de inte kan förhindra koldioxidens försurande inverkan på havsvattnet (se s. 129). De anses dessutom kunna öka risken för torka på många håll. Biverkningar av sistnämnda slag kan göra det svårt att nå enighet om var och hur eventuella åtgärder ska sättas in.

---

Inget förslag om att minska uppvärmningen genom avskärmning av solljus har prövats i stor skala, och flera av idéerna har drag av science fiction. Här en skiss av en tänkt farkost som pumpar upp havssaltpartiklar i luften.

# 7 Klimatscenarier och klimatmodeller

UTSLÄPPEN AV VÄXTHUSGASER, som med all sannolikhet har orsakat större delen av den senaste tidens globala uppvärmning, lär under kommande decennier få en gradvis tilltagande inverkan på klimatet. Allt talar för att de kommer att behålla ett påtagligt inflytande på jordens temperatur i årtusenden framöver. Uppskattningar av de fortsatta växthusgasutsläppen är därför en given utgångspunkt för varje bedömning av klimatets framtida förändringar.

## Tillförlitliga utsläppsprognoser är en omöjlighet ...

Dessvärre är det omöjligt att åstadkomma tillförlitliga prognoser för hur utsläppen av växthusgaser kommer att förändras i framtiden. Enkla extrapoleringar (framskrivningar) av de nutida utsläppstrenderna kan visserligen fungera hjälpligt för de allra närmaste åren, men vi har små möjligheter att räkna oss till vad som kommer att hända med utsläppen på längre sikt än så.

En grundläggande orsak till osäkerheten är förstås att utsläppen kommer att påverkas av tekniska, ekonomiska och sociala förändringar som inte går att förutsäga. Vid 1900-talets början kunde ingen förutse det kommande seklets världskrig, revolutioner, dramatiska folkökning och enorma tekniska och industriella utveckling. Lika litet kan vi nu annat än spekulera om hur samhället kommer att förändras under innevarande sekel.

En ytterligare komplikation är att människan knappast kommer att låta utsläppskvantiteterna förbli styrda enbart av en oförutsägbar teknisk och ekonomisk utveckling. Vi har ju en förmåga att medvetet och aktivt ingripa i skeenden som vi själva har satt i gång. Föränd-

ringar där människan är inblandad har därför en tendens att återverka på sig själva.

Med andra ord har vi åtminstone teoretiskt goda möjligheter att vända på en samhällstrend som går åt oönskat håll. Vi har redan lyckats reducera utsläppen av många slags föroreningar, och oron över framtida eller redan inträffade klimatförändringar skulle efterhand kunna leda till att också växthusgasutsläppen begränsas mer aktivt än hittills. Men att i detalj förutsäga sådana insatser är lika svårt som att försöka förutspå samhällets förändringar i andra avseenden.

## ... men vi kan skapa scenarier för hur vår klimatpåverkan förändras

I stället för att försöka konstruera prognoser för utsläppen av växthusgaser arbetar klimatforskarna med *scenarier* – dvs. beskrivningar av olika *tänkbara* utvecklingslinjer – utan att nödvändigtvis peka ut något av dessa scenarier som mer trovärdigt än de andra. Hellre än att åta sig den omöjliga uppgiften att förutsäga både utsläpp och klimat många år in i framtiden försöker de alltså besvara frågan hur klimatet kommer att förändras *förutsatt* att utsläppen eller halterna av växthusgaser utvecklas på det ena eller andra sättet.

Genom att utgå från flera skilda utsläpps- eller haltscenarier kan forskarna studera hur jordens klimatsystem fungerar under olika påverkan, samtidigt som de skapar ett brett underlag för diskussion och beslut om hur samhället ska förhålla sig till fortsatta utsläpp av växthusgaser.

Tusentals scenarier har genom åren skisserats för hur människans klimatpåverkan kan komma att förändras framöver. En del scenarier bygger på att utsläppen av växthusgaser efterhand begränsas genom nya åtgärder; andra utgår från att utvecklingen fortsätter som hittills, utan fler



ALY SONG / TT NYHETSBYRÅN

Dagens samhälle, teknik och livsstilar var knappast möjliga att föreställa sig för hundra år sedan. Därför var det också svårt att förutse nutidens omfattande klimatpåverkan.

Lika svårt är det för oss som lever i dag att förutsäga de kommande hundra årens samhällsförändringar och utsläpp av växthusgaser. Ändå är det väsentligt att vi funderar över vart olika tänkbara utvecklingslinjer kan leda.

– Bilden är tagen i dagens Shanghai.

åtgärder mot utsläppen än de som redan beslutats.

Inför den utvärdering som FN:s klimatpanel IPCC skulle publicera 2013–14 valde forskarsamhället ut fyra scenarier såsom representativa för olika varianter inom den brokiga floran av framtidsvisioner. Inget av dessa *RCP-scenarier* bedömdes dock som mer sannolikt än de andra. Vart och ett av dem beskriver tänkbara förändringar av vår klimatpåverkan fram till år 2100. Närmare bestämt specificerar scenarierna hur vi kan komma att inverka på strålningsdrivningen (dvs. strålningsbalansen i atmosfären, se s. 61), framför allt genom att ändra luftens halter av växthusgaser och partiklar.

Varje RCP-scenario betecknas med siffror som på ett ungefär anger 2100 års strålningsdrivning (räknad i  $W/m^2$ ) i förhållande till den förindustriella nivån. Förkortningen RCP står för ”representative concentration pathway”. De två sista orden markerar att scenarierna inte bara

specificerar nivån för vår klimatpåverkan just år 2100 utan också hur halterna av växthusgaser och andra föroreningar förändras på vägen dit.

Ett av scenarierna, RCP8,5, beskriver en utveckling där gångna decenniernas utsläppstrender håller i sig nästan seklet ut. Befolkningsökning, ekonomisk tillväxt och brist på effektiva åtgärder för energisparande leder i det här scenariot till en allt mer omfattande användning av fossila bränslen. Det innebär att koldioxidutsläppen år 2100 har nått ungefär tre gånger dagens nivå och fortfarande ökar. Halten av koldioxid i atmosfären är då uppe i nästan 950 ppm.

I två andra scenarier, RCP6,0 och RCP4,5, kulminerar koldioxidutsläppen kring 2080 respektive 2040, något som sannolikt förutsätter mer långtgående klimatpolitiska åtgärder än de hittills beslutade. I båda dessa scenarier fortsätter luftens koldioxidhalt likväl att stiga ännu vid seklets slut – då den har nått ca 670 respektive 540 ppm – trots att utsläppen vid det laget har

börjat minska igen. Orsaken är förstas att koldioxiden överlever så länge i atmosfären när den väl har släppts ut.

Det fjärde scenariot, RCP2,6, förutsätter mycket kraftfulla begränsningar av människans klimatpåverkan. I det här scenariot kulminerar utsläppen av koldioxid redan kring 2020 för att därefter minska i snabb takt. Luftens koldioxidhalt fortsätter långsamt att stiga till seklets mitt, då den når drygt 440 ppm. Sedan börjar halten så sakta sjunka igen, men för att något sådant ska vara möjligt måste koldioxidutsläppen enligt de flesta beräkningar bli "negativa" mot slutet av seklet. Med andra ord skulle vi då på ett eller annat sätt behöva fånga upp mer koldioxid från atmosfären än vad vi släpper ut.

Utsläppen av metan fortsätter i likhet med koldioxidutsläppen att öka kraftigt i scenario RCP8,5, medan de minskar i RCP2,6. Eftersom metan är relativt kortlivat i atmosfären följs sådana utsläppsförändringar med bara något årtiondes eftersläpning av motsvarande förändringar av luftens metanhalt.

Atmosfärens innehåll av riktigt långlivade växthusgaser – främst fluorkarboner och svavelhexafluorid men också dikväveoxid – kan däremot väntas stiga under hela återstoden av det här seklet, nästan oavsett hur samhället utvecklas framöver. Även om vi kunde åstadkomma betydande utsläppsminskningar skulle dessa ämnen fortsätta att ackumuleras i luften, om än i reducerad takt.

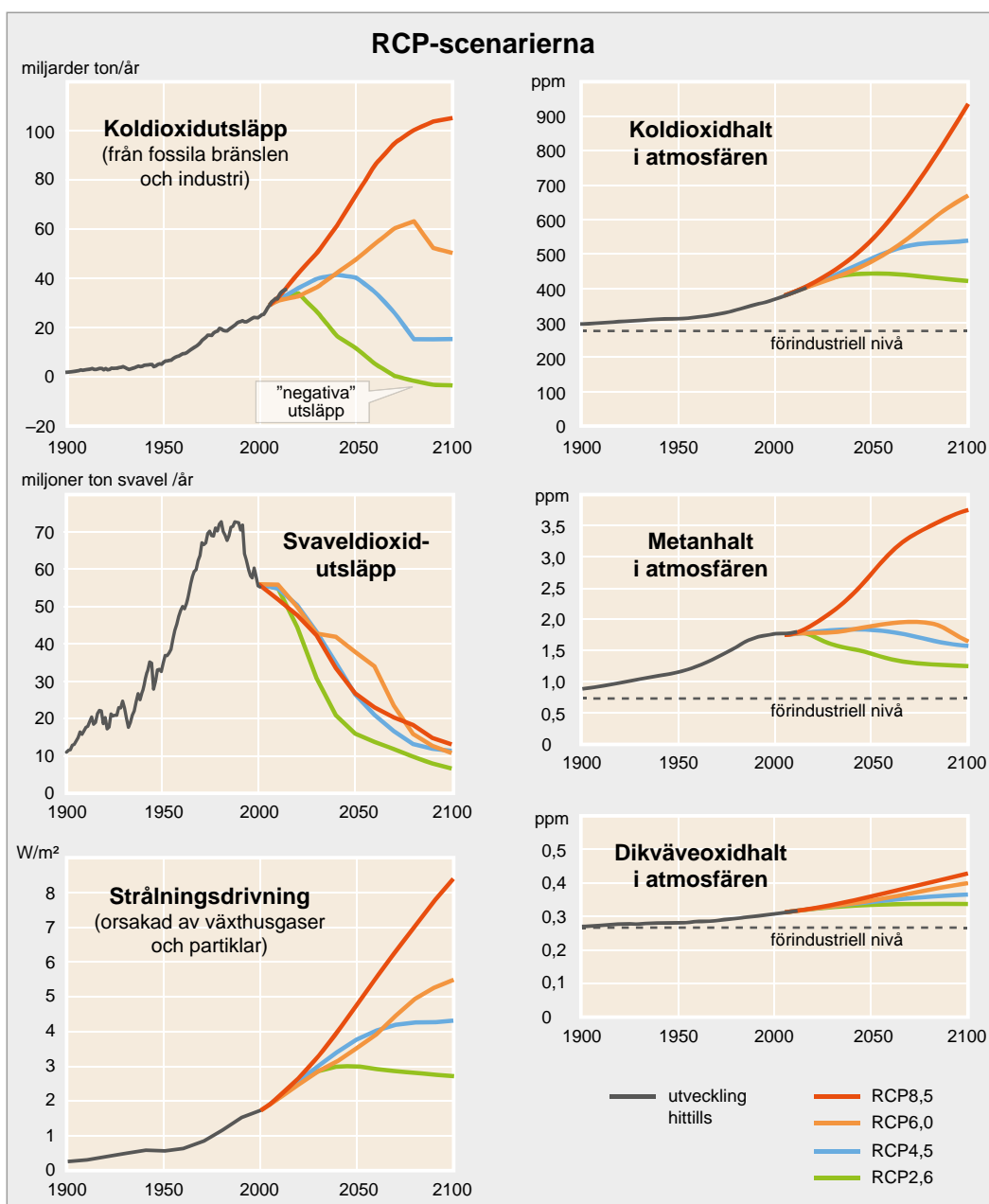
I den senaste utvärderingen från FN:s klimatpanel används fyra huvudscenarier för människans klimatpåverkan. De bygger på vitt skilda antaganden om framtida utsläpp och halter av föroreningar.

Luftens halter av långlivade växthusgaser såsom koldioxid kan fortsätta att stiga även i scenarier där utsläppen av dessa gaser framöver börjar minska igen.

Utsläppen av svaveldioxid har redan kulminerat, vilket bör betyda att halterna av "kylande" sulfatpartiklar nu är på väg att minska. Den utvecklingen väntas fortsätta, vilket innebär att växthusgasernas värmande effekt kan slå igenom med ökad kraft.

Den sammanlagda strålningsdrivning som orsakas av människans utsläpp av luftföroreningar ökar ännu år 2100 i samtliga scenarier utom RCP2,6, främst på grund av fortsatta utsläpp av koldioxid.

– Underlag från IPCC 2013, box 1.1; RCP Database 2009 (strålningsdrivning); Stern 2006 (svaveldioxidutsläpp).





Också ozonnedbrytande ämnen såsom CFC kan vara relativt långlivade, men i de fallen har utsläppen i allmänhet minskat kraftigt sedan åtskilliga år. Halterna av CFC har därför börjat avta, och den utvecklingen kan väntas fortsätta. Följden bör bli att stratosfärens uttunnade ozonskikt efterhand återhämtar sig alltmer, vilket ju är precis vad som har eftersträvats med utsläppsbegränsningarna. Men eftersom även ozon är en växthusgas får återhämtningen en uppvärmande effekt som i viss mån motverkar klimateffekten av att de ozonnedbrytande växthusgaserna gradvis försvinner.

I marknära luftlager påverkas uppkomsten och halten av ozon i hög grad av människans utsläpp av kolmonoxid, kväveoxider samt metan och andra kolväten (se s. 55). Med ett enda undantag minskar dessa utsläpp i samtliga RCP-scenarier, åtminstone under senare delen av seklet. Undantaget utgörs av den fortsatta ökning av metanutsläppen som förutses i RCP8,5. Konsekvensen blir att halten av marknära ozon sjunker i alla scenarier utom RCP8,5, där den i stället stiger ytterligare.

Utsläppen av partiklar (eller partikelbildande gaser såsom svaveldioxid) har redan minskat påtagligt i de rikare länderna, och ska vi tro RCP-scenarierna kommer de relativt snart att börja avta också i övriga delar av världen. Detta vore en mycket önskvärd utveckling, eftersom luftburna partiklar i höga halter kan vara allvarligt hälsovådliga. Men genom att merparten av partiklarna har kylande verkan på klimatet innebär en minskning av halterna samtidigt att växthusgasernas värmande effekt får allt större genomslag.

Som vi tidigare sett (s. 20) håller sig partiklar sällan svävande i atmosfären mer än ett par veckor. Medan det kan dröja decennier innan en begränsning av koldioxidutsläppen resulterar i minskad uppvärmning av jordytan medför en begränsning av partikelutsläppen därför praktiskt taget omedelbart att temperaturen i stället tenderar att stiga.

Det sammanlagda resultatet av hur växthusgas- och partikelhalter förändras blir i alla scenarier en fortsatt ökning av människans klimatpåverkan (mätt som strålningsdrivning) under de närmaste decennierna. I RCP2,6 vänds ökningen därefter till en minskning, men i de andra scenarierna fortsätter vår klimatpåverkan att förstärkas seklet ut.

## Bedömningar av framtidens klimat måste bygga på modeller

För att kunna bedöma hur människans inverkan på växthuseffekten och strålningsbalansen i atmosfären kommer att förändra klimatet i fortsättningen utnyttjar forskarna *klimatmodeller*. En sådan modell är en beskrivning av jordens klimatsystem och samspelet mellan dess olika delar, grundad på fysikens lagar. En beräkning av det framtida klimatet som baseras på ett visst utsläpps- eller haltscenari och genomförs med hjälp av en viss klimatmodell kan betecknas som en *klimatprojektion* eller ett *klimatscenario*.

Klimatmodellerna är utformade som datorprogram, och de är vanligen så omfattande och komplicerade att de ställer mycket höga krav på datorkraft. Även en snabb och avancerad dator kan behöva köras dygnet runt i flera veckor för att klara av en enda modellberäkning av klimatets utveckling under kommande decennier.

Att vetenskapliga utsagor om det framtida klimatet är grundade på modeller gör dem i somligas ögon tvivelaktiga. Själva ordet "klimatmodell" kan ge ett intryck av att klimatforskarna ägnar sig åt verklighetsfrämmande teoribyggen i stället för att studera det autentiska klimatet och dess förändringar.

Onekligen skulle bedömningarna av det framtida klimatet få ökad tyngd om de också byggde på experimentella studier. Sett ur vetenskaplig synvinkel vore det på sätt och vis önskvärt att kunna utsätta jordens atmosfär för den ena störningen efter den andra, och att efter varje sådant försök studera och utvärdera det globala klimatsystemets förändringar. I praktiken är detta naturligtvis ogenomförbart. Människans nutida utsläpp av växthusgaser skulle visserligen kunna betraktas som just ett experiment med jordens klimat, om än ett oavsiktligt sådant. Ändå är detta fullskaleförsök av begränsat vetenskapligt värde i dagsläget, eftersom vi inte kan avgöra vad det slutligen leder till förrän tidigast efter flera sekler.

För den som vill kunna uttala sig någorlunda specifikt om klimatets fortsatta utveckling finns det i själva verket inget egentligt alternativ till modellstudier. Faktum är att de allra flesta kvalificerade framtidsbedömningar utgår från modeller, oavsett om de handlar om naturvetenskapliga, sociala eller ekonomiska företeelser.

I alla sådana sammanhang är modellberäkningar ofrånkomliga om man vill åstadkomma något mer genomtänkt än att bara förlänga hittillsvarande trender (eller helt enkelt hävda att förhållandena i framtiden blir identiska med de nutida).

### Vädret kan förutsägas allt bättre – inom vissa gränser

Till de ”framtidsbedömningar” som nästan helt bygger på avancerade modellberäkningar hör meteorologernas väderprognoser. Sådana prognoser utnyttjar atmosfärsmodeller där lufthavet är uppdelat i ett stort antal ”boxar” eller celler. I typiska fall mäter den enskilda cellen någon mil i fyrkant och några hundra meter i höjddled.

Utarbetandet av en prognos börjar med att atmosfärsmodellen förses med data från meteorologiska observationsstationer om det för

ögonblicket rådande väderläget. Varje cell tilldelas aktuella värden för vind, lufttryck, temperatur, fuktighet etc. Också jordytans egenskaper – topografi, temperatur och förekomst av snö, is, vegetation eller vatten – måste specificeras. Utgående från fysikaliska lagar beräknar modellen sedan hur mycket rörelseenergi, värme och fuktighet som hinner överföras under loppet av några minuter, dels mellan de olika atmosfärs-cellerna, dels mellan atmosfären och jordytan. För varje cell resulterar denna överföring i något förändrade väderdata, som i sin tur utnyttjas för en ny beräkning. Steg för steg kartlägger modellen på så sätt hur väderläget utvecklas under ett antal timmar eller dygn.

En del väderfenomen är svåra att återge i atmosfärsmodellerna på grund av att de har mindre utsträckning än en enskild cell. Exempelvis kan modellerna av den anledningen inte hantera individuella stack- eller bymoln (cumulus-

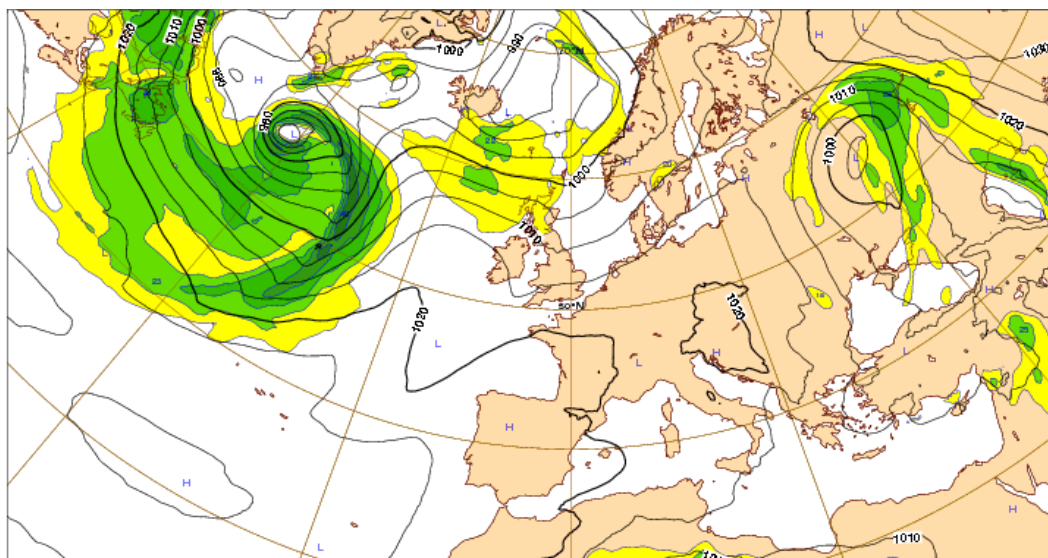
Nutida väderprognoser bygger på modellberäkningar som är så omfattande att de kräver superdatorer för att kunna genomföras. Datorn på bilden finns vid European Centre for Medium-Range Weather Forecasts i Reading i England, en organisation där även Sverige medverkar.



Beräkningar med en prognosmodell kan resultera i kartor som denna över vädersituationen under kommande dygn.

Modeller för studier av framtida klimatförändringar fungerar på ungefär samma sätt som meteorologernas prognosmodeller, men de beräknar tänkbara väderutvecklingar under loppet av decennier i stället för enstaka dygn.

– Från ECMWF.



respektive cumulonimbusmoln). För att ändå kunna beskriva och ta hänsyn till fenomen av det slaget tillgriper man *parametrisering* – för varje cell införs förenklade mått (parametrar) som anger på vad sätt och i vilken omfattning fenomenen ifråga uppträder i cellen vid den aktuella tidpunkten.

Atmosfärmodellerna har gradvis utvecklats under det senaste halvsekle. I takt med att de allt noggrannare har kunnat beskriva de processer som styr vädret har prognoserna blivit allt säkrare. Ändå finns det oöverstigligen gränser för vad modellerna klarar av. Oavsett hur mycket de vidareutvecklas och förfinas kommer de troligen aldrig att kunna förutsäga vädret mer än högst ett par veckor in i framtiden.

Orsaken ligger i egenskaperna hos klimatsystemet självt. Genom att det är så komplext och utsatt för påverkan av så skiftande slag är det i viss mån instabilt (se s. 15). Även en mycket liten störning kan under vissa omständigheter växa till sig och inom loppet av några dygn få ett dominerande inflytande på väderläget. Enligt ett välkänt talesätt skulle fladdret av en fjärilsvinge kunna utlösa en serie händelser som efterhand skapar ett omfattande oväder i en helt annan del av världen.

Det här betyder förstås att varken väderobservationer eller atmosfärmodeller någonsin kan bli detaljrika nog för att inkludera allt som skulle kunna få betydelse för vädret på längre sikt. Förr eller senare kommer därför varje långtidsprognos för väderutvecklingen att börja avvika från vad som händer i verkligheten.

### **Klimatmodellerna har blivit allt mer omfattande**

Modeller för studier av klimatets långsiktiga utveckling är i grunden uppbyggda på samma sätt som modeller för väderprognoser. I centrum finns i båda fallen en beskrivning i sifferform av atmosfärens egenskaper på olika platser och höjdnivåer. Och oavsett om man vill åstadkomma en prognos för vädret om några dagar eller en simulering av klimatet om hundra år måste modellen räkna sig igenom väderlägets förändringar timme för timme, dygn för dygn.

Men medan en väderprognos förlorar sin giltighet så snart den börjar hamna i otakt med verklighetens väderutveckling behöver detta inte vara fallet för klimatsimuleringen. Klima-

tet kan ju ses som en sammanfattning av vädrets karakteristiska egenskaper och variationsmönster. Så länge klimatmodellen förutsäger medelvärden och spridning av olika väderdata på ett riktigt sätt förblir den därför användbar, trots att den inte alls duger för långsiktiga prognoser för de faktiska väderskiftningarna från dag till dag. En välfungerande klimatmodell kan exempelvis ange hur vanligt det skulle kunna bli med snö på julafton mot slutet av det här seklet, men den kan inte säga oss precis vilka år julen kommer att bli vit.

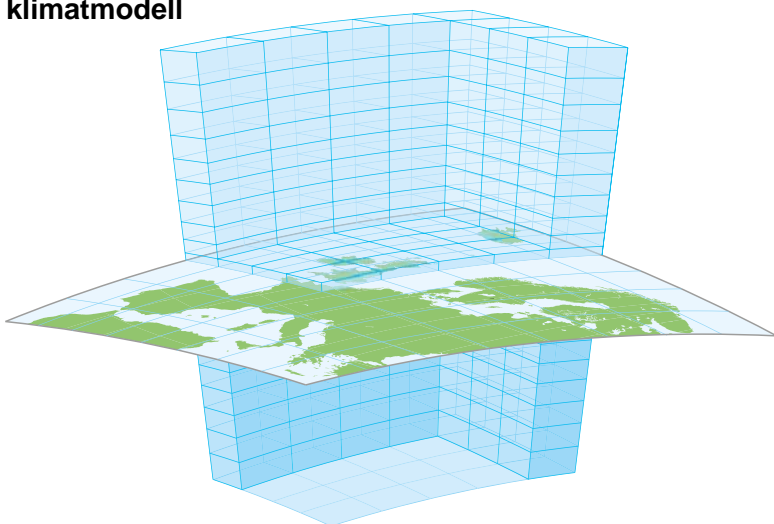
Med andra ord är kraven på detaljerad överensstämmelse med verkligheten inte desamma i klimatberäkningar som när det gäller väderprognoser. Av rent nödtvång är återgivningen av atmosfären grövre i typiska klimatmodeller än i de modeller som används för att förutsäga vädret. Atmosfärscellerna är oftast 100–300 km i fyrkant, och väderförändringarna följs vanligen i tidssteg som är längre än några få minuter. Orsaken är naturligtvis den oerhörda mängd beräkningar som krävs för att simulera vädret under loppet av decennier eller sekler.

I andra avseenden är vädertjänstens modeller emellertid enkla och okomplicerade i jämförelse med klimatmodellerna. Så länge man exempelvis sysslar med prognoser för det kommande dygnet i Sverige kan man ofta nöja sig med att kartlägga väderutvecklingen inom Europa eller ett ännu mindre område. Väderläget på andra sidan jordklotet hinner inte få återverkningar här under den korta tid som prognosen omfattar. Man kan också utgå från att egenskaperna hos havet och andra förhållandevis ”tröga” delar av klimatsystemet förblir oförändrade under en så begränsad tid.

Ingen av dessa förenklingar duger om man vill beräkna vädrets utveckling under en längre tidrymd. Klimatmodellerna måste därför vara globala, och de måste omfatta mer av klimatsystemet än bara atmosfären och jordytan. I all synnerhet måste de kunna beskriva vad som händer med havsvattnet.

Grundstommen i simuleringarna av framtidens klimat har länge utgjorts av *globala klimatmodeller* (*GCM*, ursprungligen kallade *generella cirkulationsmodeller*), dvs. återgivningar av luftströmmar och andra storskaliga företeelser i hela jordatmosfären. I sådana modeller kan klimatforskarna låta luftens halter av växthusgaser förändras, varefter de beräknar hur dessa för-

## Cellindelning hos en klimatmodell



I en klimatmodell är atmosfären indelad i ett stort antal celler, både i horisontell led och i höjddled. Under en modellkörning beräknas förändringarna av atmosfärens egenskaper timme för timme i varje sådan cell. På motsvarande sätt kan också havsvattnets egenskaper studeras. Bilden visar en del av cellerna i ett litet utsnitt ur en global klimatmodell som omfattar både hav och atmosfär.

ändringar via sina effekter på värmestrålningen påverkar temperatur, tryck, vindar, fuktighet, molnighet och andra atmosfärs-egenskaper.

Sedan 1980-talet har klimatforskarna utnyttjat cellindelade cirkulationsmodeller även för havet. De enskilda havscellernas egenskaper kan göras beroende inte bara av vad som sker i omgivande celler utan också av vad som händer i en modell av atmosfären ovanför. Denna kan på motsvarande vis göras beroende av förändringarna i havsmodellen. Genom att på det sättet kombinera en atmosfärs- och en havsmodell förenar man dem till en enda *kopplad klimatmodell* eller *AOGCM* (atmosphere–ocean general circulation model).

Modeller av det sistnämnda slaget kan följa det ständiga växelspelet mellan å ena sidan vädret, å andra sidan ytvattentemperatur, havsströmmar och havsis. De beskriver också hur värme som har tagits upp från atmosfären av havets ytskikt långsamt sprider sig ned i djuphavet. Därigenom kan de återge hur havet fördröjer klimatets respons på yttre påverkan.

Också omsättningen av kolföreningar (såsom koldioxid och metan) mellan atmosfär, hav och landmiljö är numera inbyggd i en del större klimatmodeller, s.k. *jordsystemmodeller* (*ESM*). I vissa fall simulerar sådana modeller därtill hur klimatförändringarna påverkar och påverkas av vegetationens utbredning och egenskaper. Någ-

ra av de nyare klimatmodellerna återger även kemiska processer i atmosfären. De kan exempelvis beskriva hur utsläppta luftföroreningar bidrar till uppkomsten av ozon och partiklar, som sedan förflyttas med vindarna och inverkar på solljus, värmestrålning och lufttemperatur.

## Svåröverskådliga återkopplingar i klimatsystemet skapar osäkerhet

Både i det verkliga klimatsystemet och i dagens sofistikerade klimatmodeller finner vi prov på olika återkopplingar, dvs. på att förändringar utlöser följdverkningar som innebär att förändringarna ifråga förstärks eller försvagas (man talar i sådana fall om positiv respektive negativ återkoppling).

En återkoppling som vi redan tidigare har berört (se s. 19) uppkommer genom samspelet mellan lufttemperaturen och förekomsterna av snö och is. Om det av någon anledning blir varmare på jorden börjar snö- och istäckena krympa. Eftersom jordytan då blir mörkare ökar dess förmåga att absorbera solljus, varigenom det blir ännu varmare. Uppvärmningen blir alltså förstärkt, och återkopplingen ifråga är med andra ord positiv.

En minst lika viktig återkoppling är knuten till vattenångan i atmosfären. En temperaturhöjning möjliggör högre halt av vattenånga i luften. Eftersom vattenånga har kraftfull växthusverkan kommer temperaturen därigenom att öka ytterligare. En förhöjd vattenångahalt skulle dessutom kunna leda till ökad molnbildning, något som beroende på omständigheterna kan få antingen uppvärmande eller avkylande verkan (se s. 20). Den sistnämnda återkopplingen kan med andra ord vara både positiv och negativ. Molnbildningen kan också på mer direkt väg påverkas av en temperaturhöjning, liksom av förändringar i atmosfärens cirkulationsmönster.

Det finns även återkopplingar via kolets kretslopp i naturen. Om koldioxidinnehållet i atmosfären fortsätter att stiga kommer havet att ta upp mer koldioxid därifrån än det gör i dag (inte i procentuella tal, men väl räknat i ton). Eftersom ämnet gynnar vegetationens tillväxt kan också landmiljöns koldioxidupptagning väntas öka när halten stiger i luften, särskilt i tropikerna och andra områden med rik växtlighet. Det här begränsar i viss mån effekterna av våra

koldioxidutsläpp på atmosfärens koldioxidhalt och växthuseffekt.

Samtidigt motverkas havets koldioxidupptagningsförmåga av den uppvärmning som koldioxidutsläppen åstadkommer – varmt vatten kan inte lagra lika mycket koldioxid som kallare vatten. Vad som händer med kolföreningarnas omsättning i landmiljön när det blir varmare är inte lika säkert. Områden som redan har ett varmt klimat kommer att börja avge mer koldioxid till luften om växtligheten där far illa av hetta, torka och bränder. Områden med kyligare klimat skulle i stället kunna ta upp ökade mängder koldioxid genom att vegetationssäsongen förlängs när temperaturen stiger. Uppe i Arktis finns det å andra sidan också risk att

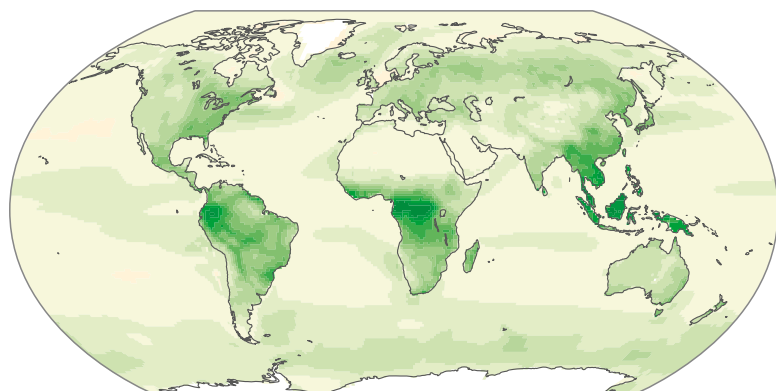
både metan och koldioxid börjar frigöras från smältande permafrost. Mycket talar därtill för att metanavgången från våtmarker kommer att öka när det blir varmare. Den sammanlagda effekten av hur havet och landmiljön svarar på en uppvärmning lär hur som helst bli att luftens halter av växthusgaser stiger mer än de skulle ha gjort i ett oförändrat klimat, något som ju återverkar på temperaturen.

Om återkopplingarna inte fanns skulle en fördubbling av atmosfärens koldioxidhalt (räknat från den förindustriella nivån på 280 ppm) på sikt höja jordens medeltemperatur med drygt en grad. Den verkliga uppvärmningen lär bli kraftigare, inte minst på grund av återkopplingen via vattenångehalten. Exakt hur stor den skulle bli är emellertid tämligen osäkert. Återkopplingarna via molnbildningen är speciellt svårbedömda och hanteras på skilda sätt av olika klimatmodeller. En del andra återkopplingar, däribland de som orsakas av samspelet mellan klimat och vegetation, är ännu så länge bara inkluderade i vissa modeller.

Allt detta bidrar till att olika klimatmodeller ger olika svar på hur en förstärkning av växthuseffekten inverkar på den globala medeltemperaturen. Den beräknade långsiktiga uppvärmningen efter en fördubbling av koldioxidhalten – definierad som jordens *klimatkänslighet* – hamnar dock i de flesta fall mellan 1,5 och 4,5 grader. Dagens kunskap tyder på att det sanna värdet ligger i närheten av 3 grader.

## Återkopplingar mellan klimatpåverkan och kolets kretslopp

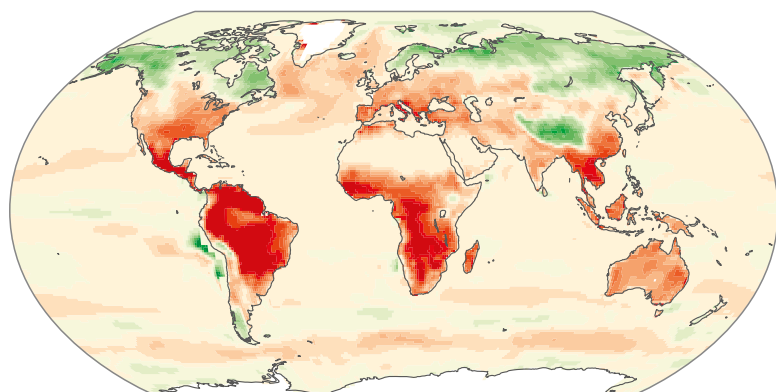
### Inverkan av ökad koldioxidhalt i luften



Förändring av koldioxidupptagningen

0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 g kol / m<sup>2</sup> / ppm

### Inverkan av global uppvärmning



Förändring av koldioxidupptagningen

-1000 -500 0 500 1000 g kol / m<sup>2</sup> / °C

När koldioxidhalten i luften stiger förändras både havets och landmiljöns koldioxidupptagning, vilket återverkar på luftens innehåll av ämnet. Också den globala uppvärmning som orsakas av koldioxidhaltens uppgång återverkar på kolets kretslopp (och därmed även på klimatet). Här återges beräkningar av båda dessa återkopplingar var för sig. Beräkningarna utgår från att koldioxidhalten stiger med 1 procent per år.

– Underlag från IPCC 2013, fig. 6.22.

## Många modeller och många scenarier

Ett stort arbete har lagts ned på att utveckla och förbättra de klimatmodeller som används för bedömningar av människans klimatpåverkan. Ett sätt att testa modellerna är att se hur väl de lyckas efterlikna det senaste seklets globala uppvärmning, något som de numera klarar på ett övertygande sätt. En del modeller har också utnyttjats för studier av klimatsystemet längre tillbaka i tiden, vilket exempelvis har resulterat i trovärdiga rekonstruktioner av istidernas klimatförhållanden. Modellerna har därtill med framgång kunnat återge effekter av kortvarig klimatpåverkan, såsom följderna av vulkanen Pinatubos utbrott år 1991.

Men att en modell med god noggrannhet förmår efterlikna klimatförändringar i det för-

## TRE SLUTSATSER OM KLIMATMODELLER

Moderna klimatmodeller beskriver förändringar i hela klimatsystemet, inklusive havet och havsisen. De visar exempelvis att polarisen i Arktis kan väntas minska märkbart i omfång när luftens innehåll av växthusgaser ökar och den globala medeltemperaturen stiger.

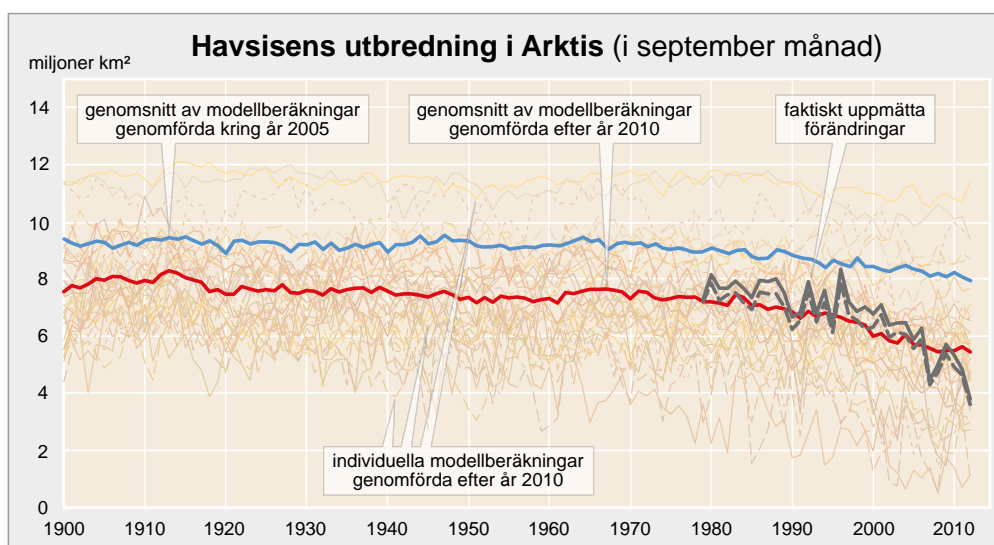
Ända till nyligen underskattade emellertid flertalet klimatmodeller istäckets tillbakagång i förhållande till hur kraftigt och snabbt det i verkligheten var på väg att krympa. Den senaste generationen av klimatmodeller har lyckats betydligt bättre med att efterlikna polarisens faktiska förändringar. Spridningen mellan enskilda mo-

dellresultat är fortfarande avsevärd, men i genomsnitt stämmer dagens modellberäkningar relativt väl med satellitmätningarna av istäckets omfång. Av detta kan vi lära följande:

- Beräkningar av samma förlopp med olika klimatmodeller kan avvika kraftigt från varandra.
- Modellerna kan såväl underskatta som överskatta följderna av människans klimatpåverkan.
- Klimatmodellerna har utvecklats och efterhand blivit allt bättre.

Olika modellberäkningar av hur polarisens utbredning har förändrats sedan år 1900 går fortfarande vitt isär, men medelvärdet av dem stämmer numera ganska bra med senare års satellitobservationer av isens omfång.

– Underlag från IPCC 2013, fig. 9.24, med uppdateringar.



flutna är ingen garanti för att den lika framgångsrikt kan behandla de återkopplingar som uppkommer när klimatet fortsätter att förändras. Som vi just såg kan skillnaderna vara betydande mellan olika modellers simuleringar av ett framtida klimat påverkat av växthusgasutsläpp. Det går inte heller att utse en enskild klimatmodell såsom den överlag bästa. En del modeller kan vara bättre än andra på att beräkna exempelvis temperaturförändringar, men samtidigt kan de vara sämre på att beräkna förändringar av nederbörden.

Den utväg som IPCC har valt för att hantera sådana skillnader är att sammanställa resultaten från ett antal olika klimatmodeller – man brukar tala om en ”ensemble” av modeller – utan att betygsätta eller rangordna dem inbördes. De bedömningar av klimatförändringarna fram till år 2100 som klimatpanelen publicerade år 2013 bygger på ett fyrtiotal olika AOGCM-

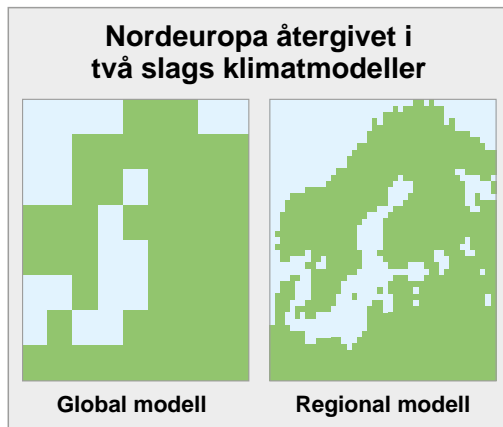
och jordsystemmodeller, utvecklade på skilda håll i världen.

Spridningen mellan olika modellberäkningar som alla utgår från ett och samma scenario för människans klimatpåverkan kan betraktas som ett mått på vår nuvarande osäkerhet om hur klimatsystemet fungerar och hur det lämpligen bör beskrivas i modellform. Fortsatt forskning och modellutveckling bör efterhand kunna reducera den osäkerheten.

Utöver den spridning mellan klimatförutsägelsena för år 2100 som beror på klimatmodellernas olikheter orsakas en ännu större spridning av skillnaderna mellan olika scenarier för vår klimatpåverkan. Dessa skillnader avspeglar ju vår okunnighet om den framtida samhällsutvecklingen och vad våra efterkommande kommer att göra för att styra den i önskad riktning. Den okunnigheten får vi leva med även i fortsättningen.

Globala klimatmodeller brukar dela in jordytan i ett så grovmaskigt rutnät att detaljer av Skandinaviens storlek blir svåra att urskilja. Regionala klimatmodeller har betydligt högre upplösning och återger därigenom jordytan med större noggrannhet.

– Från Rossby Centre.



### Område täckt av den regionala klimatmodellen RCA4



Rosby Centre vid SMHI i Norrköping har utvecklat en regional klimatmodell som täcker Europa och dess närmaste omgivningar. Modellen har använts för simuleringar av klimatförändringar fram till år 2100.

– Från Rossby Centre.

## Klimatförutsägelser för Sverige kräver regionala klimatmodeller

Trots alla osäkerheter finns det på global nivå flera grundläggande överensstämmelser mellan olika beräkningar av det framtida klimatet. Enligt nästan samtliga kombinationer av klimatmodeller och RCP-scenarier som redovisas av IPCC kommer jordens medeltemperatur att vara påtagligt högre mot slutet av det här seklet än i dag (se s. 96). I allmänhet förutsäger olika modeller också likartade förändringar av temperaturens och nederbördens storskaliga geografiska mönster.

Regionalt och lokalt kan resultaten av beräkningar med olika globala klimatmodeller skilja

sig betydligt mer, inte minst när det gäller nederbörden. Detta begränsar våra möjligheter att bedöma klimatets fortsatta utveckling i mindre skala än den globala.

Grundorsaken till att de globala modellerna har svårt att behandla regionala klimatförhållanden är deras relativt grovmaskiga nät av celler. Genom att de avbildar jordytan i form av rutor som i typiska fall mäter ett tjugotal mil i fyrkant kan de endast mycket översiktligt beskriva hur klimatet skiljer sig från plats till plats. Med den detaljeringsgraden är exempelvis Sverige, Östersjön och den skandinaviska fjällkedjan nätt och jämnt urskiljbara, och de stora svenska insjöarna försvinner helt och hållet. Inte ens en i övrigt perfekt modell kan under sådana omständigheter återge eventuella klimatskillnader mellan Sverige och omvärlden på ett tillförlitligt sätt.

Bedömningarna av det framtida klimatet inom en begränsad del av världen kan emellertid förbättras genom *regional nedskalning*, dvs. genom att de globala klimatberäkningarna utökas med mer detaljerade beskrivningar av det aktuella området. Ett sätt att åstadkomma detta är att komplettera en global modell med en *regional klimatmodell (RCM)* som har betydligt finmaskigare cellindelning. Väderförhållandena längs den regionala modellens ytterkanter styrs hela tiden av vad som händer i den globala modellen, men innanför dessa kanter gör den regionala modellen en egen beräkning av vädrets vidare utveckling.

På det här sättet har exempelvis klimatforskningsenheten Rossby Centre vid SMHI studerat tänkbara klimatförändringar i Europa fram till år 2100. De senaste beräkningarna har genomförts med en regional klimatmodell kallad RCA4 som delar in Europa och atmosfären därövan i celler på 50 x 50 km eller mindre. Modellen har kombinerats med nio olika globala klimatmodeller samt flera olika scenarier för människans framtida klimatpåverkan, framför allt RCP4,5 och RCP8,5.

I nästa kapitel ska vi se vad både de globala klimatmodellerna och de regionala svenska modellberäkningarna har att säga om klimatets utveckling under återstoden av det här seklet.





# 8 Klimatet under återstoden av seklet

DEN FÖRSTÄRKNING AV växthuseffekten som nu pågår kommer förmodligen att fortsätta länge än, och vi måste i så fall räkna med en fortlöpande höjning av jordens medeltemperatur under hela tjugohundratalet. År 2100 kommer klimatet att kunna skilja sig markant från det nuvarande. Den slutsatsen drar FN:s klimatpanel IPCC på grundval av beräkningar med ett stort antal globala klimatmodeller och flera olika scenarier för människans framtida klimatpåverkan.

## Uppvärmningen fortsätter

I tre av de fyra huvudscenarier som klimatpanelen har utnyttjat fortsätter växthuseffekten att förstärkas under hela återstoden av det här århundradet (se s. 86). Under sådana förutsättningar kommer också temperaturen på jorden att fortsätta uppåt under hela seklet.

Det fjärde scenariot, RCP2,6, bygger på att människan redan före 2020 börjar reducera utsläppen av växthusgaser, och att den utvecklingen sedan drivs vidare så effektivt att nettoutsläppen av koldioxid är nere i noll framåt 2080. Om detta lyckas bör den globala uppvärmningen kunna stanna av under senare delen av det här seklet. Scenariot måste emellertid betecknas som ytterligt optimistiskt – att förverkliga det skulle kräva en utomordentligt snabb och genomgripande samhällsomställning. De faktiska utsläppen av koldioxid förändrades ännu i början av 2010-talet på ett sätt som snarare liknade scenariot med de största utsläppen, RCP8,5.

På kort sikt påverkas klimatförändringarna ändå ganska måttligt av vad som händer med våra utsläpp framöver. Enligt klimatpanelens sammanställning blir jordens medeltemperatur under perioden 2016–2035 troligen 0,9–1,3 grader högre än den var under senare delen av

1800-talet. Temperaturintervallet täcker alla de fyra RCP-scenarierna, och osäkerheten beror främst på skillnaderna mellan de olika klimatmodeller som använts för beräkningarna.

Att eventuella förändringar av vår klimatpåverkan inte hinner inte få någon större effekt på temperaturutvecklingen fram till 2035 beror delvis på koldioxidens långa livslängd i atmosfären. Den innebär att koldioxidhalten i luften ofrånkomligen fortsätter att stiga de närmaste decennierna, även om koldioxidutsläppen skulle börja minska i enlighet med scenario RCP2,6.

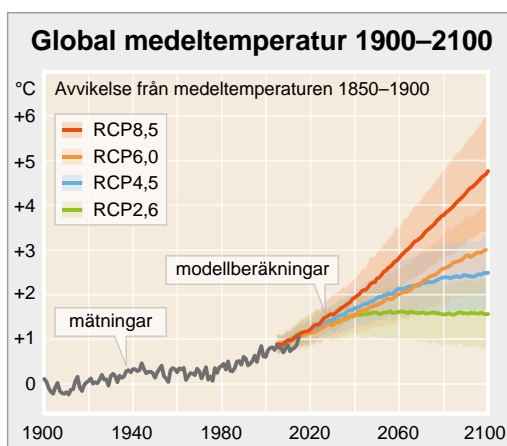
En annan orsak är att djuphavets temperatur endast mycket långsamt anpassar sig till vad som händer i atmosfären, något som får hela klimatsystemets respons på förändringar av växthuseffekten att dra ut på tiden. Utan havets fördröjande inverkan skulle temperaturen på jorden sannolikt ha hunnit öka ungefär en halv grad mer än den i verkligheten gjort sedan förindustriell tid. Det är med andra ord gångna års utsläpp av växthusgaser som medför att temperaturen fortsätter att stiga de kommande decennierna, nästan oavsett hur vi förändrar utsläppen från och med nu. Vi har byggt in en obalans i klimatsystemet som vi ännu inte har sett de fulla konsekvenserna av.

På längre sikt än ett par årtionden har vi betydligt större möjligheter att påverka klimatets utveckling. Under återstoden av det här seklet går de olika scenarierna för människans klimatpåverkan allt mer isär, inte bara vad avser utsläpp och halter av växthusgaser utan också när det gäller följderna för temperaturen på jorden.

De beräkningar som bygger på det ”värsta” huvudscenariot, RCP8,5, tyder i genomsnitt på att seklets två sista decennier blir ca 4,3 grader varmare än andra hälften av 1800-talet. Dessutom lär temperaturen då fortfarande vara på väg uppåt i rask takt. Om utsläppen av växthusgaser i stället kunde begränsas i enlighet med

Satellitbilden på föregående sida är tagen den 15 mars 2002 och visar förhållanden som nu är tämligen typiska för den årstiden. I Götaland och södra Svealand råder barmark, och sjöarna är isfria. På Östersjön finns is kvar nästan bara i Bottenviken, norra Bottenhavet och det innersta av Finska viken.

Inom några decennier kan medeltemperaturen i Skandinavien ha stigit så mycket att det här i stället skulle kunna vara en bild av typiska midvinterförhållanden.



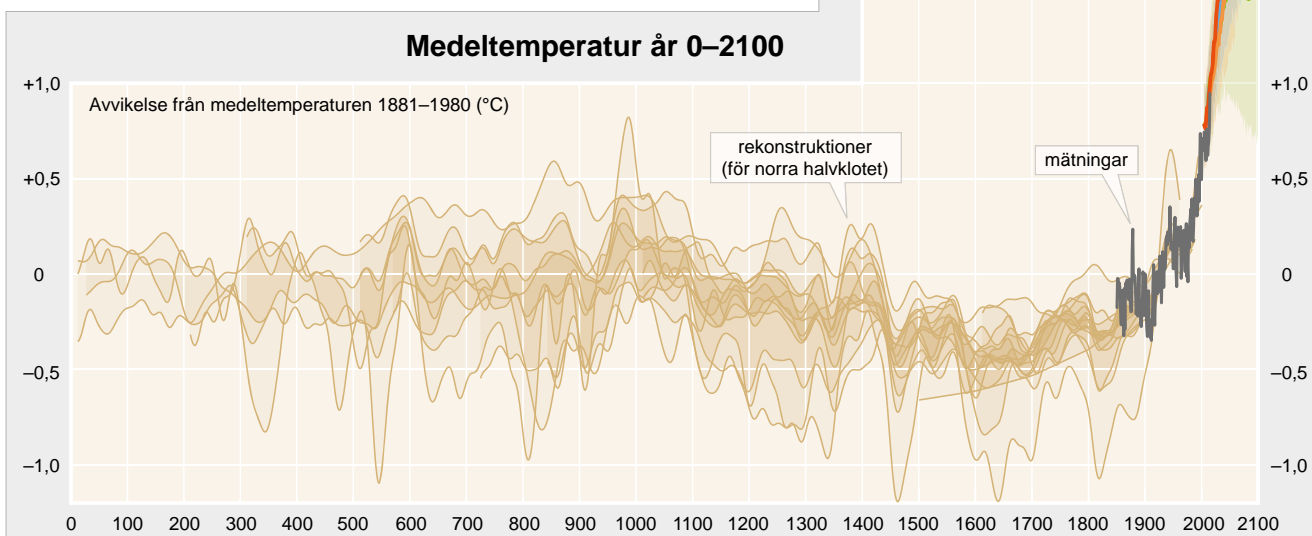
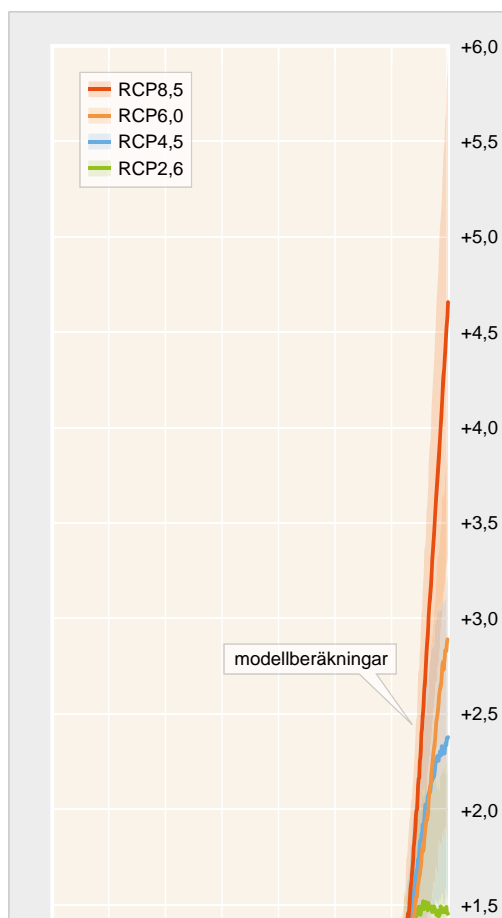
Temperaturens fortsatta utveckling simulerades inför IPCC:s senaste utvärdering med ett fyrtiotal globala klimatmodeller. De färgade kurvorna i diagrammet till vänster anger genomsnittresultat för de fyra RCP-scenarierna, och de färgade fälten visar spridningen mellan de olika modellberäkningarna.

Den globala temperaturhöjning som förutses under återstoden av seklet utgör en dramatisk förändring i förhållande till vad vi tidigare har upplevt. Detta blir tydligare i diagrammet nedan, där modellberäkningarna har skarvats ihop med mätningar och rekonstruktioner av temperaturens variationer sedan Kristi födelse (jfr. s. 35). – Underlag från IPCC 2013, fig. TS15 och 5.7. Mätserie: HadCRUT4.

RCP2,6-scenariot säger beräkningarna i medeltal att temperaturen under perioden 2081–2100 bara skulle hamna ca 1,6 grader över nivån i slutet av 1800-talet. Motsvarande medelvärden för mellanliggande scenarier (RCP4,5 och RCP6,0) uppgår till 2,4 respektive 2,8 grader.

Ingen av dessa uppskattningar är säker. På grund av skillnaderna mellan klimatmodellerna kan olika temperaturberäkningar som bygger på ett och samma scenario skilja sig en grad eller mer från varandra. Men den osäkerheten får allt mindre betydelse ju längre in i framtiden vi försöker se. Skillnaderna mellan olika bedömningar av temperaturen vid seklets slut beror mer på vad som skiljer scenarierna för vår fortsatta klimatpåverkan.

Även naturliga störningar kommer att kunna påverka jordens medeltemperatur framöver, precis som de har gjort förr. Exempelvis skulle ett kraftigt vulkanutbrott kunna åstadkomma en tillfällig global avkylning under loppet av ett eller ett par år. Sådana händelser är helt oförutsägbara utifrån de kunskaper vi har i dag, och



de har därför inte inkluderats i framtidsscenerierna.

Åtminstone under senare årtusenden tycks de naturliga klimatskiftningarna emellertid ha varit förhållandevis små. Det är därför knappast sannolikt att sådana skiftningar kommer att kunna mäta sig med den tilltagande uppvärmning som utsläppen av växthusgaser väntas orsaka under innevarande sekel. Snarare lär de framträda som krusningar på den stora våg av klimatförändringar som människan nu är på väg att driva fram.

### **Tre–fyra grader varmare i snitt innebär dramatiska förändringar**

En temperaturhöjning med några få grader på hundra år kan kanske ändå förefalla ganska måttlig. Här i Sverige har vi ju trots allt ett klimat där sommarens medeltemperatur är i runt tal tjugo grader högre än vinterns, och där värme- och köldrekord registrerade på en och samma plats kan skilja sig med sextio grader eller mer.

Men vi måste komma ihåg att *årsmedeltemperaturen* varken hos oss eller på andra platser i världen brukar skifta mer än ett par grader från det ena året till det andra. Medeltemperaturen i Sverige 1987, ett år som inrymde en av 1900-talets strängaste vintrar och dessutom en synnerligen sval sommar, var bara 3–4 grader lägre än den som har rått under de allra varmaste åren på senare tid, då flertalet vintrar varit milda och en del somrar tidvis varit heta.

Vi kan också jämföra den väntade uppvärmningen under återstoden av tjugohundratalet med den som har ägt rum fram till i dag. I Sverige är temperaturens långtidsmedelvärde nu bara drygt en grad högre än det var kring 1980, men ändå har detta fått följder som är uppenbara för de flesta. Exempelvis har de vita jularna blivit färre, traditionella vintersportevenemang har ofta fått ställas in på grund av brist på snö eller is, trädgårdsväxter har börjat blomma vid oväntade tider på året, och många flyttfåglar återvänder allt tidigare på våren (i den mån de alls bryr sig om att lämna landet under vintern).

Det här betyder att en fortsatt höjning av årsmedeltemperaturen med en eller två grader fram till år 2100 i själva verket skulle uppfattas som stor. En höjning med tre–fyra grader eller mer skulle upplevas som *dramatisk*.

Man kan visserligen invända att temperaturförändringar av liknande storleksordning har inträffat förr i tiden. Som vi tidigare har sett (s. 34) blev det exempelvis tillfälligt ett par grader kallare i Europa för ungefär 8 200 år sedan. Längre tillbaka, under istiderna, kunde klimatförändringarna vara ännu större – när den senaste istiden kulminerade var medeltemperaturen på jorden sannolikt 5–6 grader lägre än den är i dag. Vi har också konstaterat att klimatet kring Nordatlanten kunde skifta utomordentligt snabbt under istidsförhållanden (se s. 30), men dessa skiftningar tycks inte ha berört hela jorden. Den globala medeltemperaturen förefaller tvärtom ha förändrats relativt långsamt även under sådana förhållanden. Exempelvis har den i allmänhet behövt flera tusen år för att övergå från istidsnivå till interglacialnivå. Under 1900-talet steg temperaturen på jorden i omkring tio gånger högre takt än så, och ännu snabbare kan den komma att stiga under det innevarande seklet. Det kan rentav hända att det globala klimatet nu förändras i ett tempo som saknar motstycke många miljoner år bakåt i tiden.

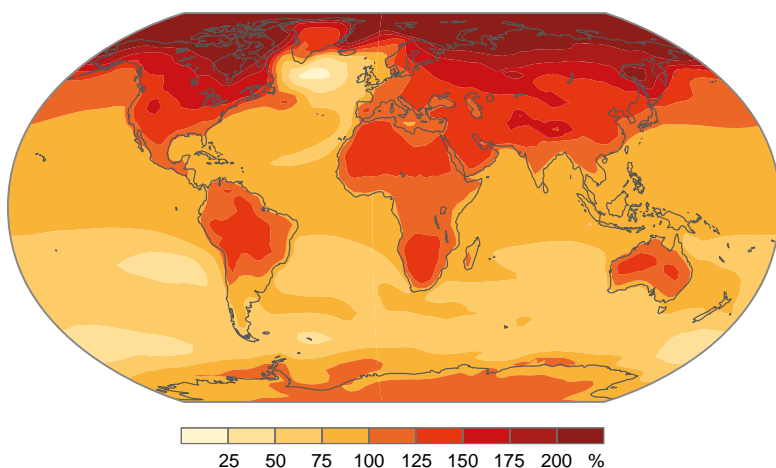
Också i ett annat avseende skiljer sig de nutida klimatförändringarna från vad som har förekommit tidigare. Både under nedisningarna och under den nuvarande interglacialens mer framträdande klimatskiftningar har ju temperaturen avvikit åt ett och samma håll från dagens genomsnitt, nämligen nedåt. Det som nu har inletts – en snabb och markant avvikelse *uppåt* från temperaturens normala interglacialnivå – har förmodligen inte inträffat på flera hundra tusen år; kanske inte under hela den två–tre miljoner år långa kvartärperioden.

Det här betyder att människan redan mot slutet av vårt sekel kan bli utsatt för ett klimat som hon aldrig tidigare har upplevt under hela sin existens som art.

### **Större uppvärmning på land än till havs**

Vad vi också måste ha i åtanke är att jordens landområden kommer att värmas betydligt snabbare än haven. Till seklets slut beräknas uppvärmningen i genomsnitt bli 40–70 procent större på land än till havs. Skillnaden beror främst på att markens temperatur reagerar utan nämnvärd fördröjning på förändringar av strål-

## Temperaturhöjning under tjugohundratalet i förhållande till det globala genomsnittet



Kartan visar hur stor uppvärmningen från 1986–2005 till 2081–2100 beräknas bli i olika delar av världen i förhållande till hur mycket den globala medeltemperaturen stiger (oavsett om medeltemperaturen ökar mycket eller litet). På land väntas temperaturen i allmänhet stiga mer än det globala genomsnittet, medan det omvända gäller till havs.

– Kartan bygger på beräkningar med flera olika globala klimatmodeller. Underlag från IPCC 2013, fig. 12.41.

ningsbalansen i atmosfären, medan oceanernas stora vattenvolymer behöver mycket lång tid för att helt anpassa sig till sådana förändringar.

I flertalet bebodda delar av världen kommer uppvärmningen av den här anledningen att överstiga det globala genomsnittet. Exempelvis kan en höjning av den globala medeltemperaturen med 3 grader innebära att temperaturen stiger med 4 grader eller mer i många tätbefolkade inlandsområden.

Allra kraftigast väntas uppvärmningen bli i Arktis och i de nordligaste delarna av Eurasien och Nordamerika, i synnerhet vintertid. Längst uppe i norr beräknas årsmedeltemperaturen fram till slutet av vårt sekel stiga mer än dubbelt så mycket som det globala genomsnittet. Den främsta orsaken är återkopplingen mellan

lufttemperaturen och förekomsterna av snö och is. När temperaturen stiger kommer havsisens och snötäckenans utbredning att krympa. Därmed ökar jordytans absorption av solljus, vilket förstärker uppvärmningen dagtid (se s. 19). Samtidigt minskar avkylningen nattetid om snön försvinner, eftersom barmark kyls betydligt långsammare än en snöyta. När havsis ersätts av öppet vatten ökar dessutom havets möjligheter att värma upp kall luft.

På södra halvklotet lär den här återkopplingen inte bli lika kraftig. Nere i söder finns bara begränsade arealer med havsis och snö som skulle kunna smälta bort och därigenom förstärka en uppvärmning. Den enda kontinenten i dessa trakter, Antarktis, är i stället täckt av en mäktig inlandsis som förhållandevis obetydligt låter sig påverkas av klimatets utveckling under så kort tid som ett sekel. Kring Antarktis blir temperaturhöjningen därför knappast större än i ständigt snö- och isfria områden såsom tropikerna.

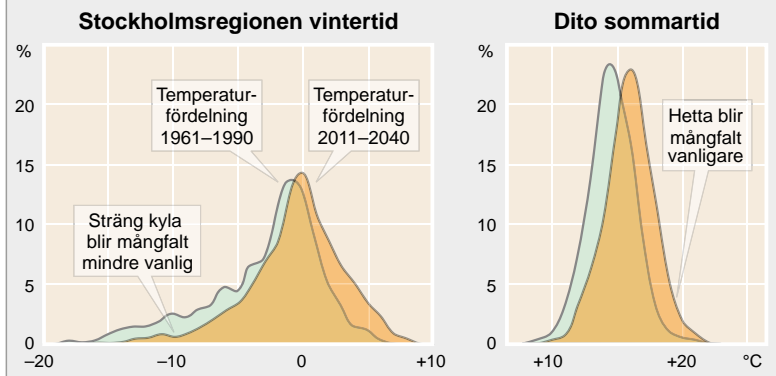
## Nya extremtemperaturer kan vålla största problemen

Det är knappast årsmedeltemperaturens uppgång i sig som i första hand kommer att sätta människan och hennes omgivning på prov när klimatet förändras. Alla växter, djur och samhällsfunktioner som klarar av en temperatur på exempelvis 8 plusgrader (våra dagars årsmedelnivå i sydligaste Sverige) överlever också om det under en begränsad tid blir några grader varmare. En temperatur på t.ex. 12 grader utgör ju inte någon nyhet för den sydsvenska miljön – den noteras där dagligen under stora delar av året.

Men klimatförändringar handlar inte bara om medelvärden utan också om extremvärden. Stiger medeltemperaturen måste man räkna med att även minimi- och maximitemperaturerna förändras. I dag kan temperaturen i Sydsverige under extremt varma sommardagar kortvarigt nå upp till nivåer kring 35 grader. I ett klimat som är flera grader varmare än det nutida kan man befara att temperaturen vid sådana tillfällen i stället kryper uppåt 40 grader. Det vore något alldeles nytt: Värmeböljor av den digniteten har hittills aldrig registrerats i Sverige.

En klimatförändring kan alltså ge upphov till vädersituationer som vi inte har någon tidi-

## Hur en uppvärmning kan inverka på fördelningen av dygnsmedeltemperaturer



Även ganska måttliga förändringar av medeltemperaturen kan påverka förekomsten av extremt låga och extremt höga temperaturer mycket kraftigt. Diagrammet visar hur fördelningen av dygnsmedeltemperaturer i Stockholmstrakten skulle kunna förändras inom loppet av ett halvsekel. Även om medeltemperaturen bara stiger någon grad får vi mycket färre vinterdagar med sträng kyla, medan de heta sommardagarna blir långt fler än hittills. – Efter Persson *et al.* 2007.

gare erfarenhet av. Den kan också medföra att väderförhållanden som hittills har varit mycket ovanliga (däribland eftermiddagstemperaturer kring 35 grader i Sydsverige) börjar uppträda betydligt oftare. Brännande sommarheta och andra slags extrema väderhändelser lär göra människans klimatpåverkan väl så märkbar för gemene man som temperaturmedelvärdenas mer diskreta förskjutningar. Sannolikt blir det framför allt i samband med sådana händelser som ett förändrat klimat skapar problem för samhället och naturmiljön.

Beräkningarna av klimatets framtida förändringar tyder på att årets maximitemperatur på de flesta håll kommer att stiga väl så mycket som sommarens medeltemperatur, i Europa möjligen ännu mer. Extremt höga temperaturer som i dag kanske bara återkommer med ett par decenniers mellanrum skulle mot slutet av seklet kunna uppträda vart och vartannat år, förutsatt att vår klimatpåverkan fortsätter att öka i lika snabb takt som hittills.

Vi kan dessutom vänta att årets minimitemperatur i allmänhet stiger mer än vinterns medeltemperatur, särskilt på höga breddgrader. När vintrarna generellt blir mildare lär de riktiga köldknäpparna med andra ord lindras i ännu högre grad. Det hänger samman med att sträng kyla normalt förutsätter snötäckt mark. Snöytans temperatur kan sjunka mycket kraftigt under klara och vindstilla vinternätter, och då blir det också rejält kallt i marknära luftlager. I en framtid med mildare och snöfattigare vint-rar kommer sådant att inträffa mer sällan än nu.

### **Begränsad temperaturhöjning på Nordatlanten**

Nordatlanten har under de senaste hundra åren värmts upp långsammare än de flesta andra delar av världen (se s. 37). Mycket talar för att den trenden kommer att fortsätta. Den främsta orsaken är den djupvattenbildning som äger rum utanför Grönland och Labrador (se s. 31). Om ytvattnet i dessa områden blir varmare och därigenom lättare kommer det i minskad omfattning att sjunka ned mot djuphavet. En minskning av ytvattnets salthalt – orsakad av ökad nederbörd eller ökad sötvattenstillförsel från land – får samma slags verkan. Djupvattenbildningen kring Grönland och Labrador är en viktig drivkraft för cirkulationen i hela världs-

havet. Om den försvagas kommer Golfströmmens och Nordatlantiska strömmens leveranser av värme från söder att minska, vilket begränsar temperaturhöjningen i Nordatlanten.

Vindarna från den närbelägna oceanen i väster innebär att vintrarna i Skandinavien och andra delar av Nordvästeuropa blir förhållandevis milda oavsett om havsvattnet är varmt eller ej – huvudsaken är att havet förblir isfritt. Ändå bidrar förstås de nyss nämnda varma havsströmmarna till att medeltemperaturen är betydligt högre i vår del av världen än i andra landområden som ligger ungefär lika långt åt norr, däribland Alaska, Labrador, Sydgrönland och de inre delarna av Sibirien.

Att varmvattentillförseln till Nordatlanten väntas minska under innevarande sekel – med ungefär en tiondel enligt beräkningar med scenario RCP2,6, med omkring en tredjedel enligt RCP8,5 – får därför vissa konsekvenser också för klimatet i Nordvästeuropa. Det blir sannolikt inte fullt lika varmt här som det skulle ha blivit om havsströmmarna inte hade påverkats.

Också den kraftiga uppvärmning som nu pågår uppe i Arktis kan få återverkningar i våra trakter. Den medför minskade temperaturkontraster mellan Arktis och sydligare breddgrader, något som kan leda till att västvindarna från Nordatlanten till Skandinavien försvagas. Vintertid skulle vi därigenom kunna få ett ökat inslag av kallluft från öster.

### **Kraftig lindring av vinterkylan i norra Sverige**

Allt tyder ändå på att också våra trakter får del av den globala uppvärmningen. Det kan visserligen hända att temperaturen stiger mindre här än i andra landområden på samma latitud, men enligt de regionala klimatanalyser som genomförts vid Rossby Centre (se s. 93) bör uppvärmningen likväl bli större i Sverige än den i medeltal blir i hela världen. Under innevarande sekel kan temperaturen väntas stiga grovt räknat en grad mer här än det globala genomsnittet.

Störst uppvärmning är att vänta i landets norra delar. Även om människans klimatpåverkan framöver skulle begränsas kraftigt kommer årsmedeltemperaturen i nordligaste Sverige att kunna ligga 3–4 grader högre vid seklets slut än den gjorde i slutet av 1900-talet. Om vår klimatpåverkan fortsätter att öka som hittills kommer

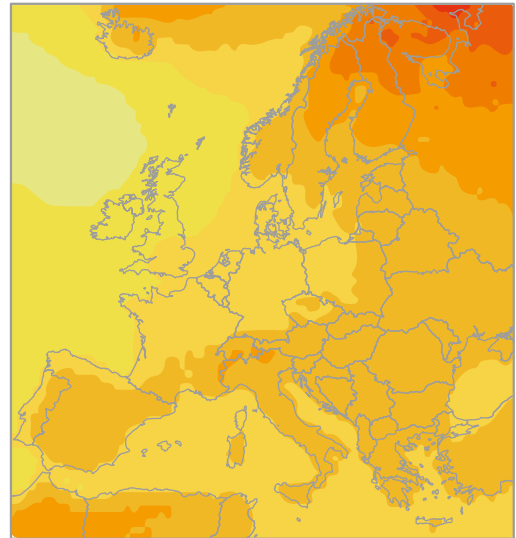
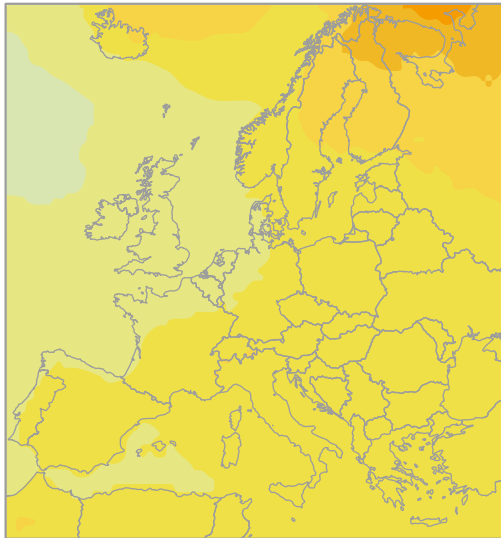
## Temperaturförändringar i Europa under tjugohundratalet

### Scenario RCP4,5

### Scenario RCP8,5

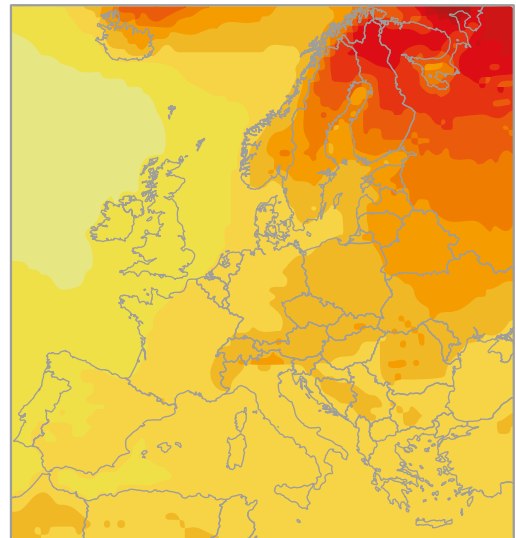
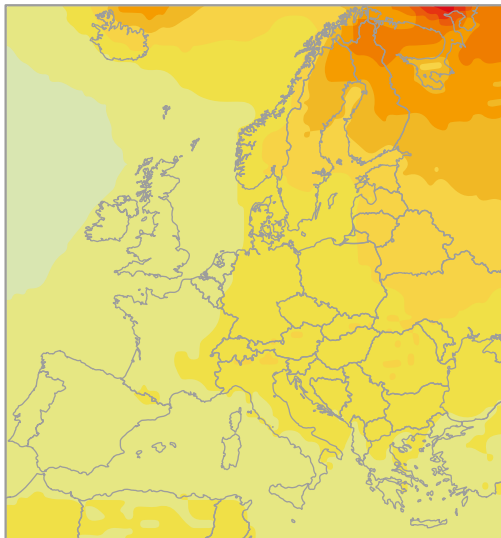
#### Årsmedelvärde

Här har Rossby Centre använt den regionala klimatmodellen RCA4 (se s. 93) för att ge en detaljerad bild av tänkbara temperaturhöjningar i Europa från åren 1971–2000 till 2071–2100. Varje karta visar genomsnittresultatet av beräkningar där den regionala modellen varit "inbyggd" i nio olika globala klimatmodeller.



#### Vinter (dec–feb)

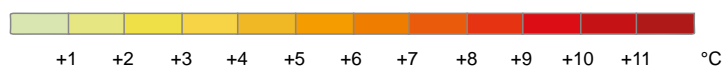
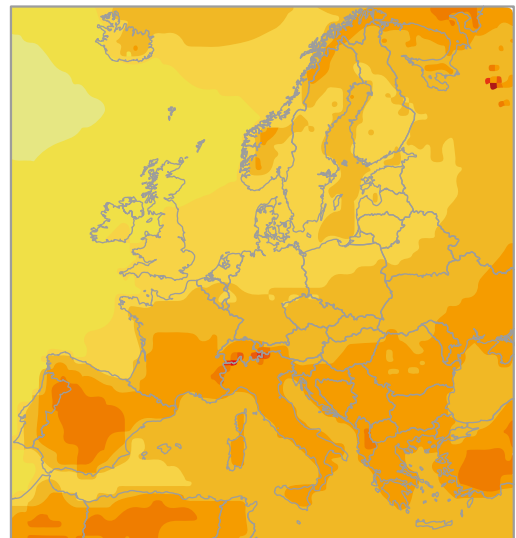
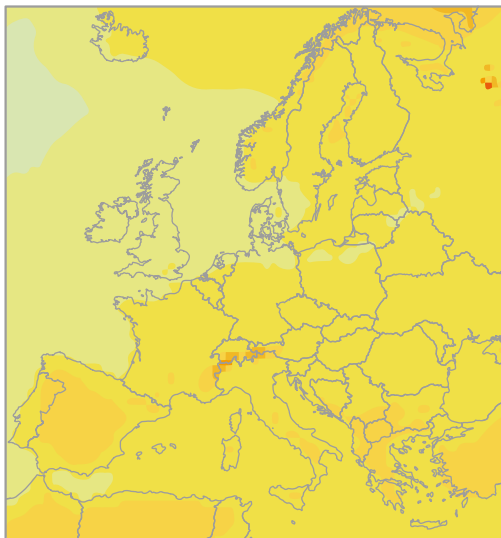
På grund av kraftigt minskad snöförekomst väntas vintertemperaturen stiga mycket mer i Nordosteuropa än i väster och söder. Om människans klimatpåverkan ökar i enlighet med scenario RCP8,5 kan vintrarna i Norrbotten mot seklets slut bli runt 8 grader mildare än de var i slutet av 1900-talet.



#### Sommar (jun–aug)

Under sommaren kan man befara särskilt kraftiga temperaturhöjningar i Sydeuropa. En viktig orsak är att nederbörden här väntas minska markant under den varmaste delen av året. Därigenom reduceras avdunstningen från marken och dess kylande verkan.

– Från Rossby Centre, SMHI.



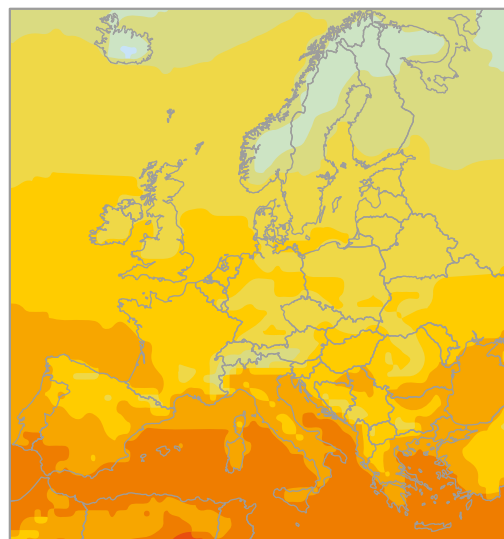
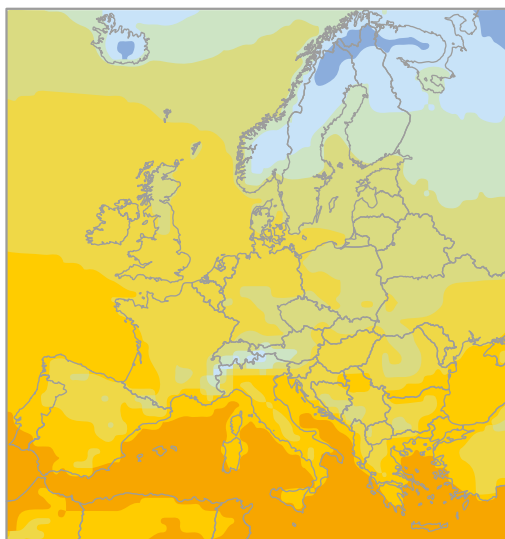
## Medeltemperatur i Europa

1971–2000

2071–2100 (scenariot RCP8,5)

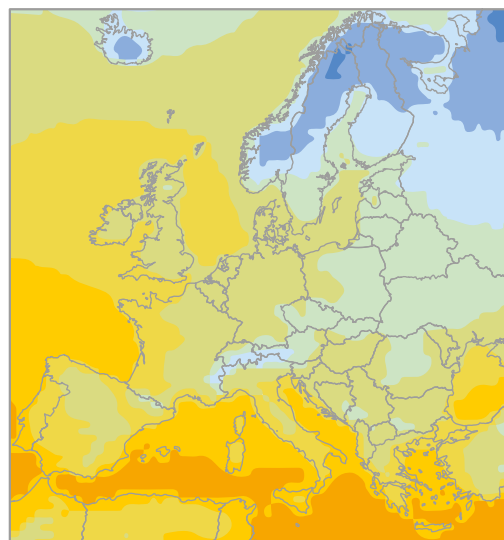
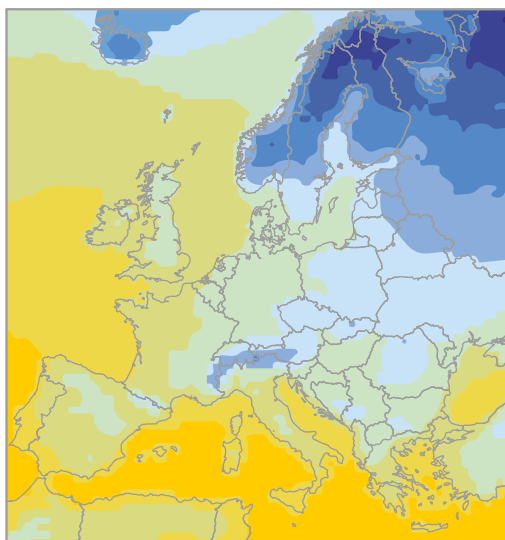
### Årsmedelvärde

De nutida årsmedeltemperaturerna i Europa varierar från några minusgrader längst i norr till drygt femton plusgrader längst i söder (se vänstra kartan). Om scenariot RCP8,5 blir verklighet skulle medeltemperaturen mot seklets slut i stället kunna variera från ungefär noll i norr till +20° i söder (se högra kartan).



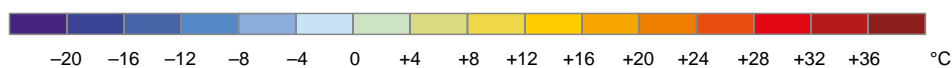
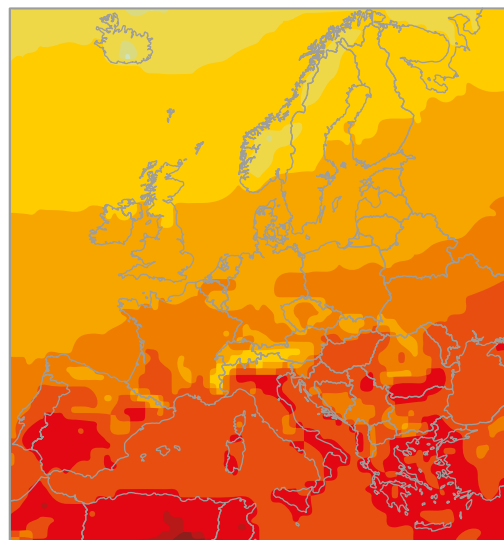
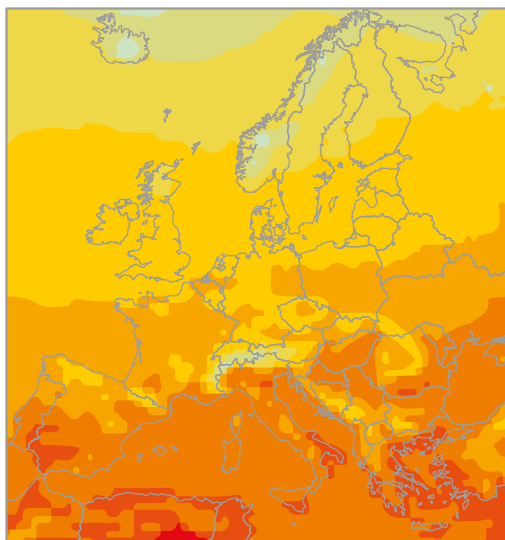
### Vinter (dec–feb)

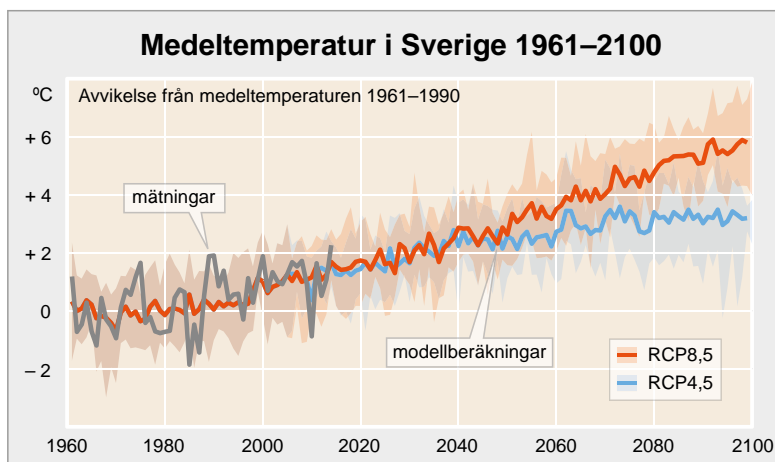
Med kartornas hjälp kan man se hur långt söderut man måste bege sig från en viss ort för att i dag påträffa det temperaturklimat som kan uppträda på orten ifråga om hundra år. För att vintertid finna den medeltemperatur kring +3° som vid seklets slut kan råda i sydligaste Sverige måste man ta sig ned till dagens England eller Frankrike.



### Sommar (jun–aug)

Sommarens medeltemperatur kan om hundra år ligga kring +30° i delar av Spanien, Italien och Grekland (enligt scenariot RCP8,5). Sådan hetta finner vi nu först nere i Afrika. De sommartemperaturer kring +35° som mot seklets slut skulle kunna råda i delar av Nordafrika förekommer i dag knappast någonstans på jorden. – Från Rossby Centre, SMHI.





Även om utsläppen av växthusgaser skulle börja minska inom några decennier (som i scenario RCP<sub>4,5</sub>) kan årsmedeltemperaturen i Sverige mot slutet av seklet ligga 3 grader högre än den gjorde hundra år tidigare. En fortsatt ökning av utsläppen (som i scenario RCP<sub>8,5</sub>) skulle kunna höja temperaturen med 5–6 grader under samma tid.

– Underlag från Eklund *et al.* 2015.

medeltemperaturen i norr att kunna stiga med 6–7 grader under innevarande sekel.

Vårens och höstens medeltemperatur kommer sannolikt att förändras i ungefär samma takt som årsmedeltemperaturen. Sommartid lär temperaturen inte stiga fullt lika mycket som årsmedelvärdet, men vintertid lär den stiga mer. Beräkningar enligt scenario RCP<sub>8,5</sub> pekar mot en ökning av vintertemperaturen med 6–7 grader i genomsnitt för Sverige och med 8 grader eller mer längst i norr. Särskilt slående är den beräknade förändringen av årets lägsta dygnsmedeltemperatur. I stora delar av landet kan årslägstannoteringen stiga med 5 grader eller mer under loppet av det här seklet, även i scenarier med kraftigt minskade utsläpp. En fortsatt ökning av utsläppen kan leda till att den lägsta

temperaturen stiger med 10–15 grader. Årets högsta dygnsmedeltemperatur skulle till seklets slut kunna stiga med 2–4 grader.

Sammantagna kan förändringarna inom hundra år ge nordligaste Sverige ett temperatorklimat liknande det som nu råder i Mellansverige, medan Mellansverige i så fall skulle få överta dagens danska eller nordtyska klimat. Sydsvenskan kan få temperaturer liknande dem som i dag förekommer i centrala Frankrike.

## Ökenhetta kring Medelhavet?

I Sydeuropa är det av allt att döma sommartid snarare än vintertid som man kan vänta sig den största uppvärmningen. Till seklets slut skulle sommartemperaturen i värsta fall kunna stiga med så mycket som 5–6 grader i Sydfrankrike, Spanien, Italien och på Balkan.

Till en del kan detta förklaras som ett resultat av en allmän förskjutning norrut av cirkulationsmönster och klimatzoner. Det subtropiska klimatet med höga temperaturer och mycket begränsad förekomst av moln och nederbörd som i våra dagar kännetecknar somrarna söder om Medelhavet kan framöver bli allt mer dominerande också norr därom.

Denna storskaliga klimatförändring skulle i Sydeuropa kunna förstärkas av mer lokala processer. Om nederbörden minskar där kommer

## Förändringar av extremtemperaturer under tjugohundratalet

### Höjning av årslägst dygnsstemperatur

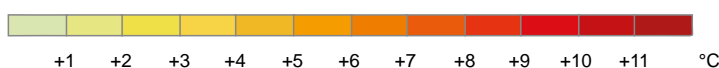
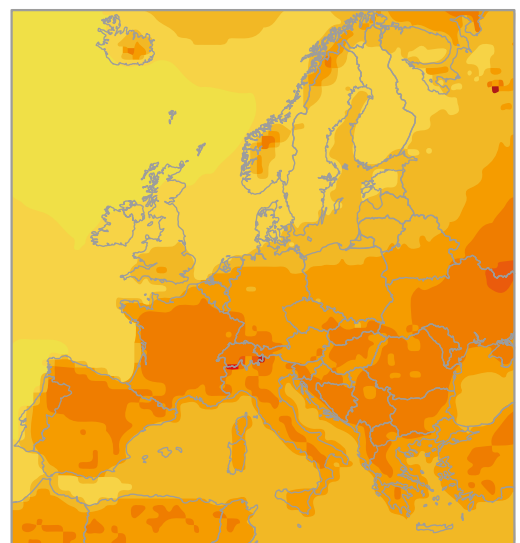
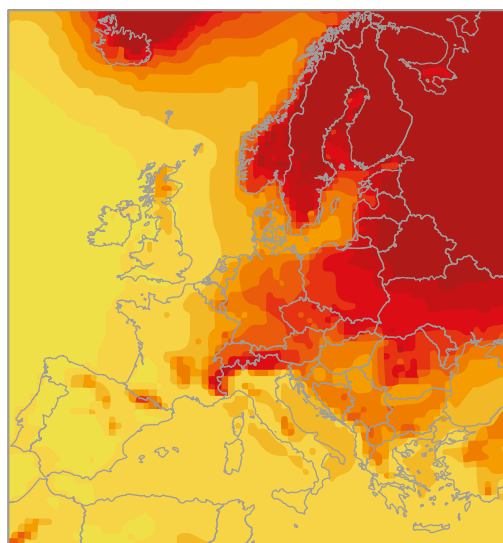
### Höjning av årshögsta dygnsstemperatur

Minskad snöförekomst kan till seklets slut bidra till en kraftig lindring av den strängaste vinterkylan i Europa. Undantag utgörs av de sydliga eller maritima områden som redan nu förblir snöfria året om.

I Central- och Sydeuropa kan även sommarens maximitemperaturer stiga mycket markant.

Kartorna visar beräknade höjningar av årets lägsta och högsta dygnsmedeltemperatur.

– Från Rossby Centre, SMHI.



Scenario RCP<sub>8,5</sub>  
(i båda fallen)



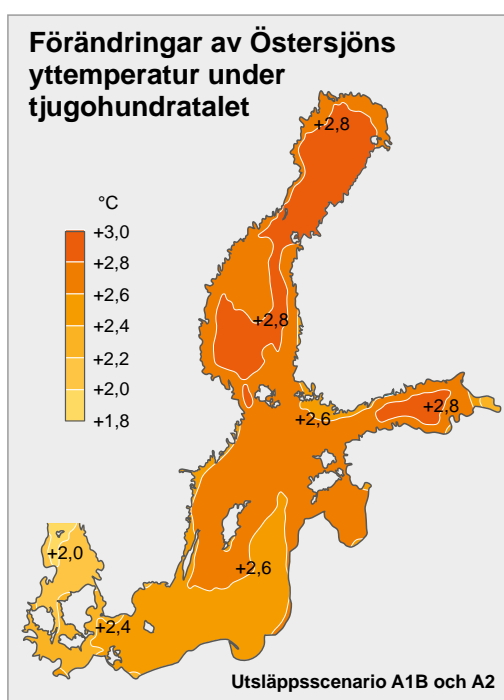


fryser marken ofrånkomligen om den inte skyddas av snö. Det här innebär att sannolikheten för tjäle under midvintern faktiskt skulle kunna öka i dessa delar av landet. På vägar och andra ytor som med eller utan människans hjälp förblir snöfria redan nu bör tjälen däremot bli allt mindre vanlig.

I områden med ständig tjäle (permafrost) påverkas isen i marken av såväl sommar- som vintervädret, och där innebär en uppvärmning utan tvekan ökade möjligheter för tjälen att tina. I Sverige har permafrosten begränsad ut-

sträckning, men i Sibirien och Kanada är den mycket utbredd. Sammanlagt råder i dagsläget permafrost inom ungefär en femtedel av norra halvklottets landyta, men redan vid seklets mitt kan arealerna med ständig tjäle nära markytan ha krympt med 30–40 procent jämfört med utbredningen i seklets början.

En påtaglig förändring är också att vänta när det gäller isen på Östersjön. Detta är förstas direkt följd av att vattentemperaturen kommer att stiga, om än inte fullt så mycket som lufttemperaturen i området. Norra Bottenviken

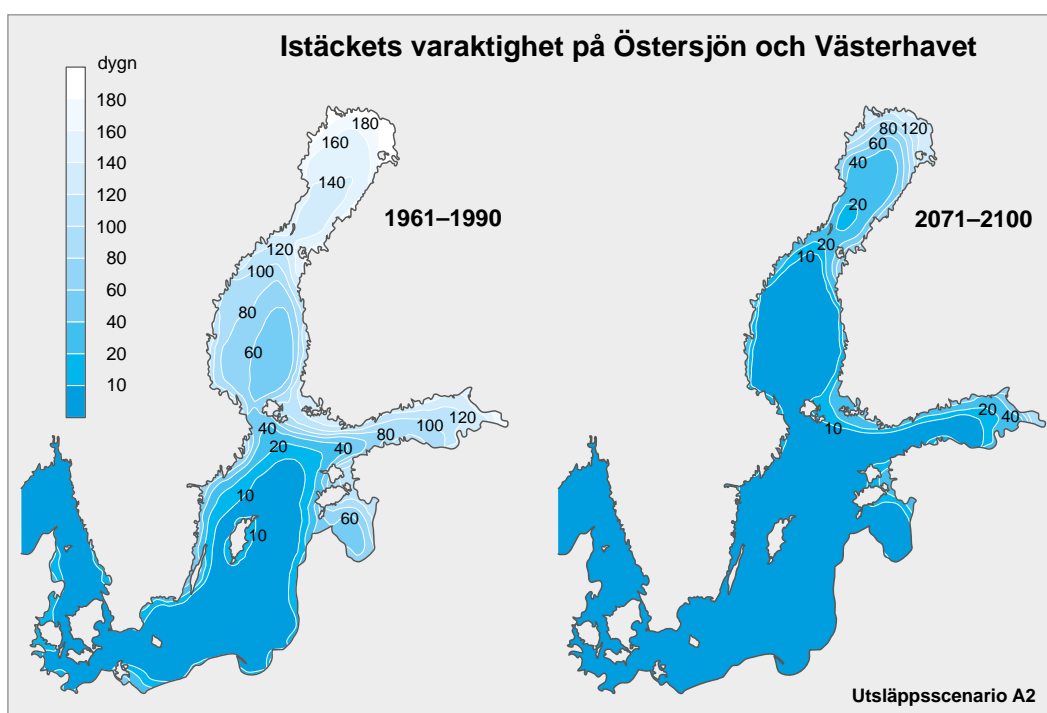


En höjning av lufttemperaturen i Östersjöområdet kommer att åtföljas av en något mindre uppvärmning av Östersjöns ytvatten. Kartan bygger på beräkningar med den regionala klimatmodell som utvecklats på Rossby Centre, kombinerad med en modell av vattenvolymerna i Östersjön. Beräkningarna utgick från två äldre scenarier (A1B och A2) som innefattade fortsatta ökning av de klimatpåverkande utsläppen och närmast motsvarade de nyare scenarierna RCP6,0 respektive RCP8,5.

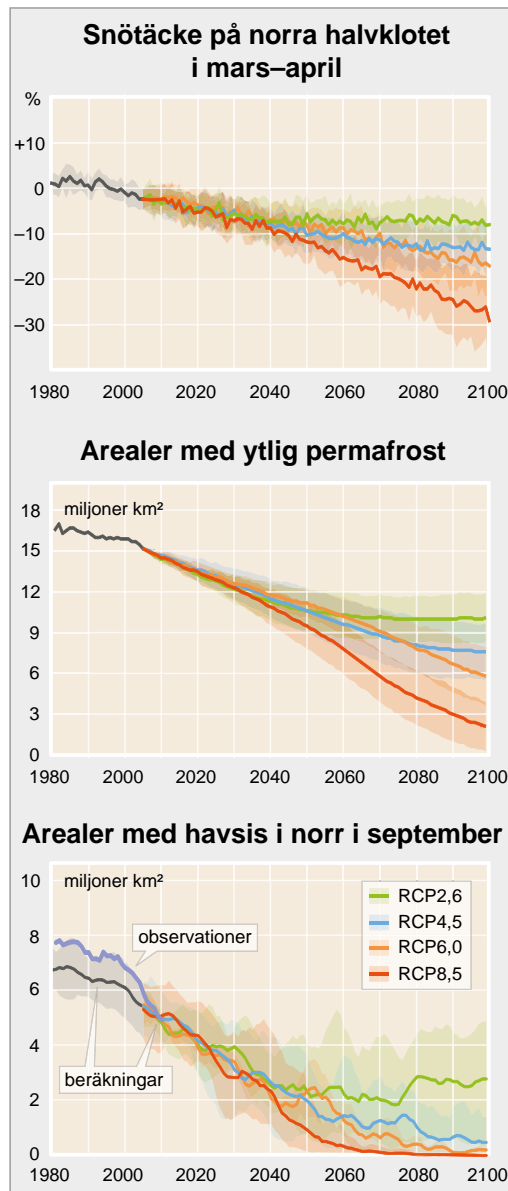
– Från Meier 2015.

Uppvärmningen av Östersjövattnet innebär i sin tur minskad förekomst av is under vintern. Fortsatta utsläpp av växthusgaser enligt scenario A2 skulle under loppet av det här seklet kunna medföra att Östersjön blir praktiskt taget isfri, med undantag för Bottenviken, Finska viken och en del kustnära områden.

– Från Meier *et al.* 2004.



Snöns utbredning i norr har redan minskat påtagligt under våren (se s. 44), och den utvecklingen väntas fortsätta. Kurvorna i diagrammet anger genomsnittresultat av beräkningar enligt RCP-scenarierna. De färgade fälten visar spridningen mellan enskilda beräkningar.



När det blir varmare lär förekomsten av ständig tjäle reduceras ännu mer än snötäckenas utbredning. Diagrammet visar beräknade förändringar på norra halvklotet.

Havsisen i Arktis genomgår nu en drastisk tillbakagång. Mot seklets slut kan Ishavet bli nästan isfritt under sensommaren.

– Underlag från IPCC 2013, fig. TS17 och TS18.

och det innersta av Finska viken kan bli de enda delarna av Östersjön som då fortfarande täcks av is praktiskt taget varje vinter.

I Arktis har havsisen redan minskat mycket markant i omfång (se s. 45). Sommartid kan Norra ishavet bli nästan helt isfritt under senare delen av det här seklet. Fortsätter utsläppen av växthusgaser att öka som hittills kan detta rentav bli verklighet före år 2050. Också vintertid kommer isen med all sannolikhet att krympa och bli tunnare än den är nu.

Även den avsmältning som de senaste hundra åren har kännetecknat glaciärerna i världens olika bergstrakter väntas fortsätta. Till år 2100 skulle glaciärernas återstående totalvolym kunna minska med allt från 15 till 85 procent, beroende på vilket scenario för människans klimatpåverkan beräkningarna utgår från.

Den grönländska inlandsisen väntas inte förlora mer än en eller ett par procent av sin volym under återstoden av seklet, men eftersom den är så omfattande kan nettoförlusterna av is ändå uppgå till hundratals kubikkilometer varje år. Avsmältningen kan dessutom komma att accelerera. I Antarktis lär isförlusterna genom avsmältning förbli ganska obetydliga inom överskådlig tid, men både där och på Grönland finns risk att allt mer is strömmar ut via de glaciärtungor som mynnar direkt i havet. Isutflödet har redan börjat äga rum i allt snabbare takt (se s. 45), men det är svårt att förutsäga den fortsatta utvecklingen.

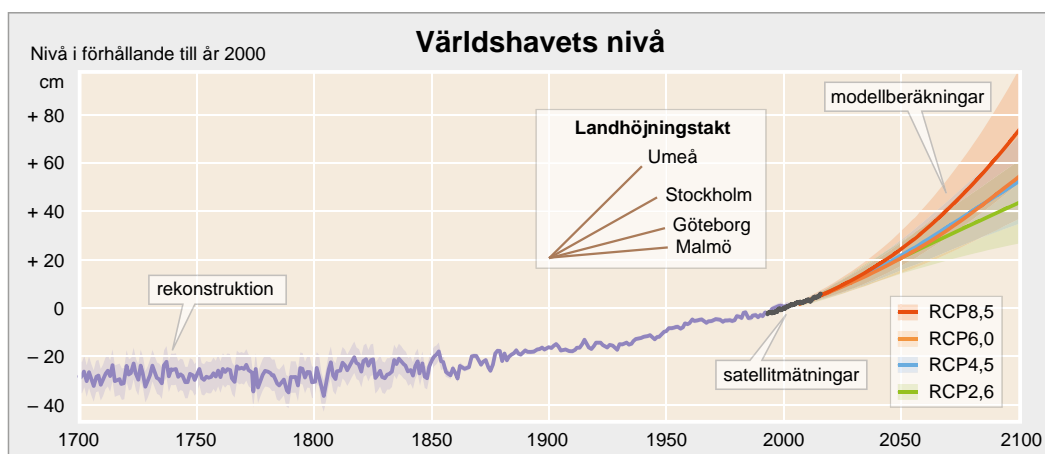
BROCKEN INAGLORY / CREATIVE COMMONS



Den grönländska inlandsisen har nu sakta men säkert börjat krympa, inte bara genom avsmältning utan också genom att glaciärtungor lämnar ifrån sig is direkt till havet. – Från Kap York på nordvästra Grönland.

Havets nivå kommer gradvis att stiga allt snabbare, nästan oavsett vad som händer med utsläppen av växthusgaser. Längs allt större delar av den svenska kusten kommer havsnivåhöjningen därigenom att hinna ifatt landhöjningen.

– Underlag från IPCC 2013, fig. 13.11 och 13.27, samt Nerem *et al.* 2010 (med uppdateringar).



## Allt snabbare höjning av havsnivån

Glaciärernas avsmältning är en viktig orsak till att världshavets nivå sedan en tid håller på att stiga. Deras bidrag till nivåhöjningen under innevarande sekel beräknas bli av storleksordningen 10–15 cm. Inlandsisarna på Grönland och i Antarktis skulle tillsammans kunna ge ytterligare ett bidrag av liknande storlek.

Havsvattnets termiska expansion (dvs. dess utvidgning med stigande temperatur – se s. 48) kommer också att få stor betydelse för havsnivåns förändringar under tjugohundratalet. Effekterna av den hittillsvarande temperaturhöjningen kommer gradvis att fortplanta sig nedåt i havsdjupen, samtidigt som ytvattnet påverkas av morgondagens ännu högre temperaturer. Därigenom kan havsvattnets expansion efterhand väntas accelerera.

Hur mycket havet sammanlagt kommer att stiga under det här århundradet är fortfarande osäkert. Enligt den sammanställning av olika modellberäkningar som IPCC publicerade 2013 kan vi vänta en nivåhöjning någonstans mellan 26 och 82 cm från slutet av 1900-talet till slutet av nuvarande sekel.

En del nyare forskningsresultat antyder att dessa siffror kan utgöra en underskattning – det finns tecken som tyder på att utflödet av is från Antarktis skulle kunna bli större än vad man tidigare räknat med.

Att bedömningarna av havets nivåhöjning fortfarande går så vitt isär beror främst på osäkerheter och olikheter hos modellerna. Skillnaderna mellan olika scenarier för människans klimatpåverkan spelar mindre roll, i synnerhet inom det närmaste halvseket. Ännu kring 2050 skiljer sig genomsnittresultaten av beräkningar med olika scenarier inte mer än 5 cm från varandra. Orsaken är djuphavets långsamma respons på klimatförändringar, som innebär att de kommande decenniernas termiska expansion främst styrs av den uppvärmning som redan nu har ägt rum.

De lokala vattenståndsförändringarna längs olika kustavsnitt i världen styrs inte bara av havsnivåns globala genomsnittshöjning utan även av vad som händer med lufttryck, vindar och havsströmmar. Vattenståndet kan också påverkas av landsänkning och landhöjning. I en del kusttrakter sjunker marknivån på grund av mänskliga ingrepp såsom grundvattenuttag eller odling på jordar med stort innehåll av organiskt material. På andra håll stiger eller sjunker berggrunden på grund av geologiska processer.

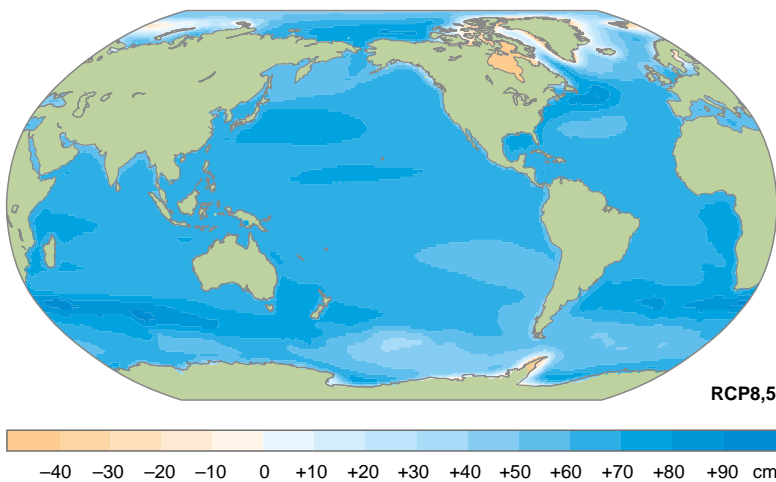
Ett exempel på det sistnämnda är den landhöjning som har pågått i våra trakter allt sedan



När havet stiger blir det möjligt för vågorna att äta sig allt längre in utmed erosionskänsliga kuststräckor. – Från Pembrokeshire i sydvästra Wales.

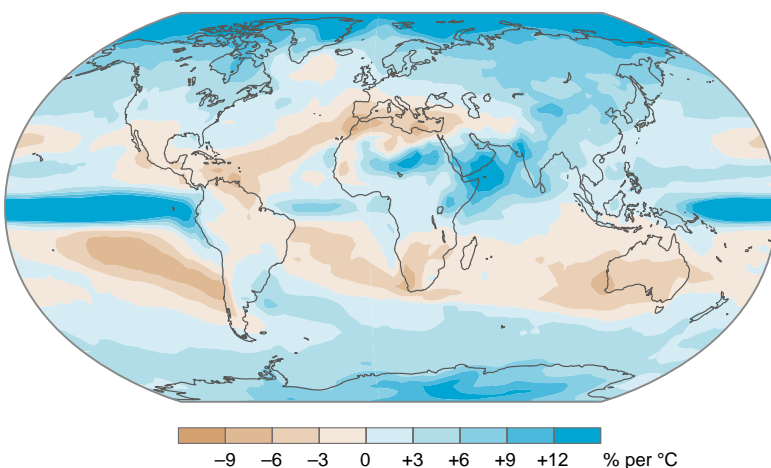
inlandsisen smälte bort efter den senaste istiden. Den svenska berggrunden kan fortsätta att stiga i nästan oförminskad takt långt in i framtiden, men genom att havets nivåhöjning väntas accelerera lär den under kommande decennier hinna ikapp landhöjningen längs en allt större del av våra kuster. Mot slutet av tjugohundratalet är det mycket möjligt att havsnivåns höjning och landhöjningen håller jämna steg så långt norrut som i Stockholmstrakten. Överallt söder därom skulle havet i så fall ha börjat återerövra förlorad terräng.

### Lokala havsnivåförändringar under tjugohundratalet



Genom att inlandsisarna nu krymper på Grönland och Antarktiska halvön kan berggrunden väntas börja stiga där, liksom den gjort i Skandinavien och norra Kanada ända sedan isarna här försvann. Lokalt kan vattenståndet på så sätt sjunka vid de berörda kusterna, trots att världshavets nivå generellt stiger. – Kartan visar beräknad förändring av lokal havsnivå från 1986–2005 till 2081–2100. Från IPCC 2013, fig. 13.20.

### Förändring av årsnederbörden när den globala medeltemperaturen stiger



En fortsatt förstärkning av växthuseffekten kan medföra ökad nederbörd i många områden som redan är nederbördsrika, medan områden som redan är torra kan bli ännu torrare. Kartan visar beräknade förändringar av årsnederbörden i förhållande till hur mycket den globala medeltemperaturen stiger från 1986–2005 till 2081–2100 (oavsett om temperaturen ökar mycket eller litet). – Underlag från IPCC 2013, fig. 12.41.

### Mer nederbörd, men inte överallt

Ökad temperatur medför normalt ökad avdunstning – atmosfären tillförs mer vattenånga ju varmare det blir, dels från hav, sjöar och andra vattenytor, dels också från mark och vegetation förutsatt att det inte blir alltför torrt. Luftfuktigheten kommer därför i allmänhet att stiga framöver. På många håll ökar även nederbörden – allt vatten som har avdunstat från jordytan återförs senare dit som regn eller snö. Den fortsatta uppvärmningen får med andra ord stora återverkningar på vattnets kretslopp mellan landmiljö, sjöar, hav och atmosfär.

De globala klimatmodellerna förutsäger i typiska fall att den genomsnittliga nederbörden ökar med 2 procent för varje grad temperaturen stiger. Nederbördstillskottet lär emellertid bli mycket ojämnt fördelat över jorden. Stora ökningar av årsnederbörden kan väntas kring ekvatorn i Stilla havet, i områden som berörs av monsunregn samt på höga nordliga och sydliga latituder, dvs. i Arktis, Antarktis och de nordligare delarna av Eurasien och Nordamerika. I många subtropiska delar av världen är det troligt att nederbörden i stället minskar. Till dem hör exempelvis Medelhavsområdet, Mexiko, södra Afrika och Australien, dvs. trakter som redan i dag är förhållandevis nederbördsfattiga.

De regionala klimatberäkningar som utförts vid Rossby Centre förutsäger något rikligare nederbörd i Europa än de globala modellerna, men skillnaderna mellan kontinentens norra och södra delar är ungefär desamma: Årsnederbörden beräknas stiga i norr, samtidigt som den lär minska i de sydeuropeiska länderna. Genomsnittsnederbörden i Sverige skulle enligt de regionala beräkningarna kunna tillta med så mycket som 15–25 procent till seklets slut.

Vintertid tycks vi kunna räkna med ökad nederbörd i nästan hela Europa, utom längst i söder. Regnmängderna sommartid kan däremot minska över större delen av kontinenten. På många håll i södra och sydvästra Europa skulle sommarmånadernas nederbörd kunna avta med 20 procent eller mer under återstoden av seklet. En viss nederbördsminskning sommartid tycks vara att vänta även så långt upp som i norra Tyskland och på de brittiska öarna. De nordiska länderna hör till de få regioner i Europa som förefaller kunna räkna med en ökning av nederbörden också på sommaren.

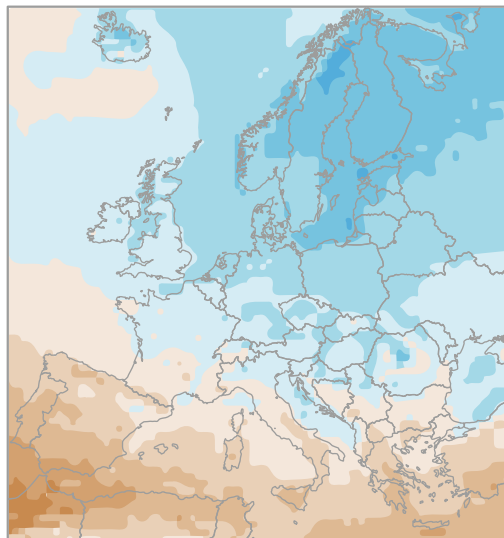
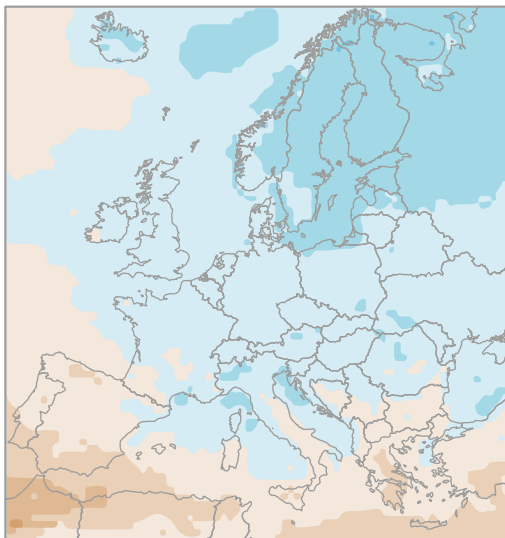
## Nederbördsförändringar i Europa under tjugohundratalet

### Scenario RCP4,5

### Scenario RCP8,5

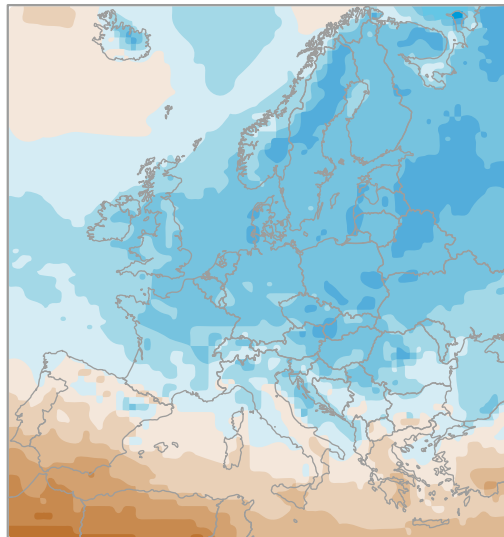
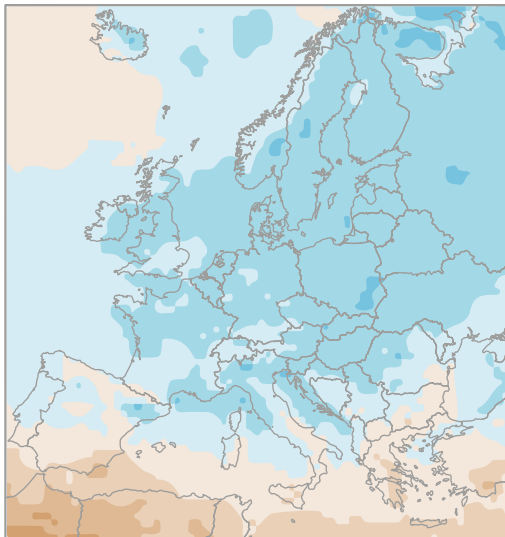
#### Årsnederbörd

Rosby Centre har här använt den regionala klimatmodellen RCA4 (se s. 93) för att ge en detaljerad bild av tänkbara nederbördsförändringar i Europa från åren 1971–2000 till 2071–2100. Varje karta visar genomsnittresultatet av beräkningar där den regionala modellen varit "inbyggd" i nio olika globala klimatmodeller.



#### Vinter (dec–feb)

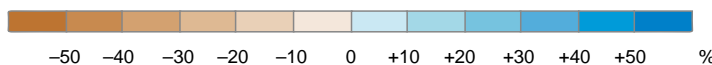
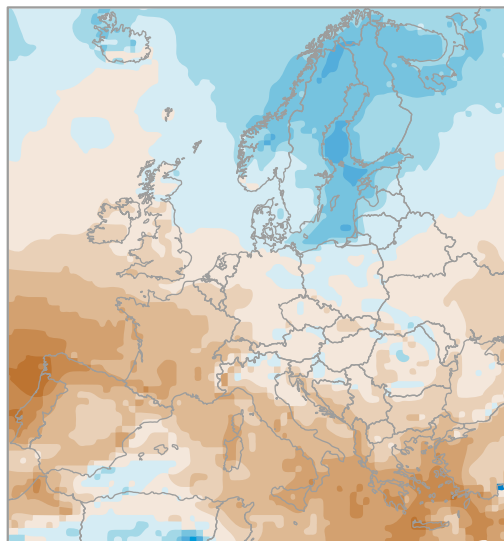
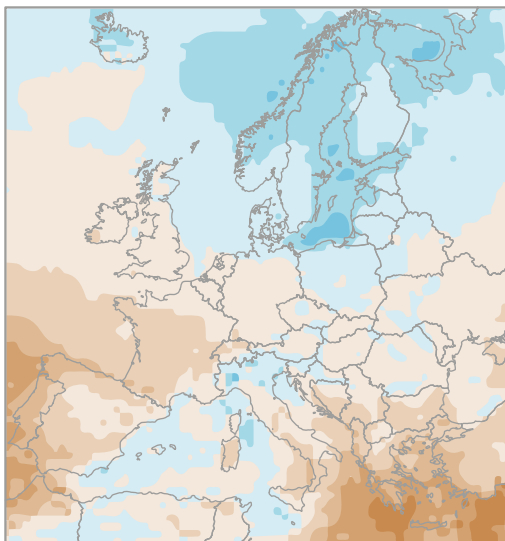
Under vintern kan nederbörden väntas öka i större delen av Europa. I Sverige skulle den i genomsnitt kunna tillta med 15–30 procent under innevarande sekel. I Medelhavsområdet kan vintrarna däremot bli torrare.



#### Sommar (jun–aug)

På somrarna lär nederbörden minska på de flesta håll i Europa. Den påtagliga minskning som förutses i Sydeuropa kan medverka till svår sommarhetta (se s. 100). I Sverige tycks vi dock kunna räkna med att sommarnederbörden ökar med 15–30 procent, åtminstone i landets nordligare delar.

– Från Rosby Centre, SMHI.



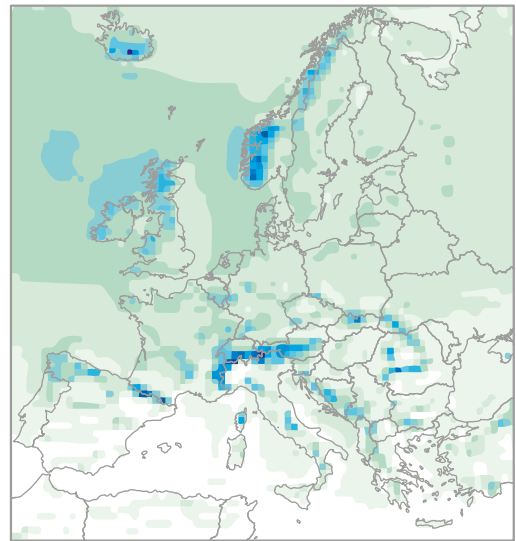
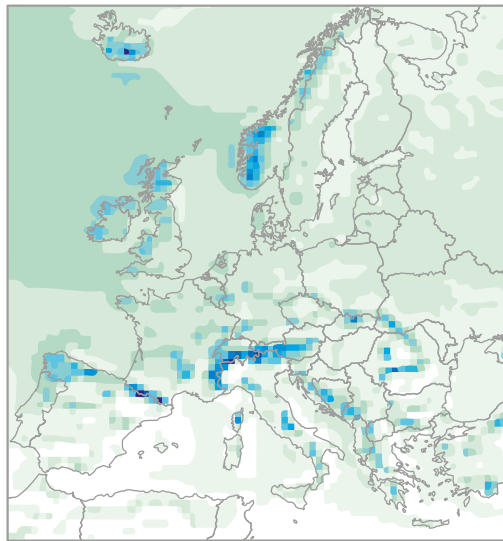
## Nederbörd i Europa

1971–2000

2071–2100 (scenariot RCP8,5)

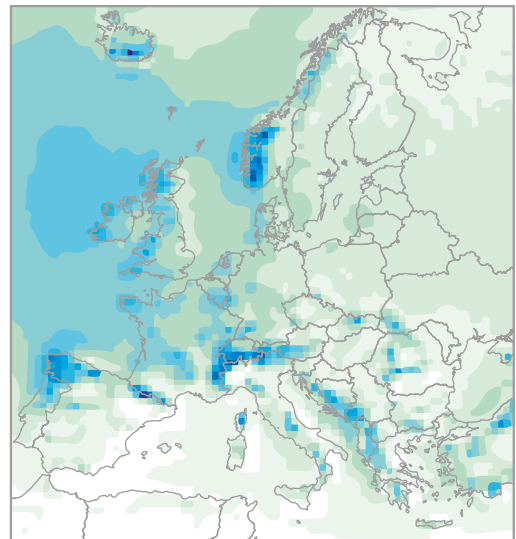
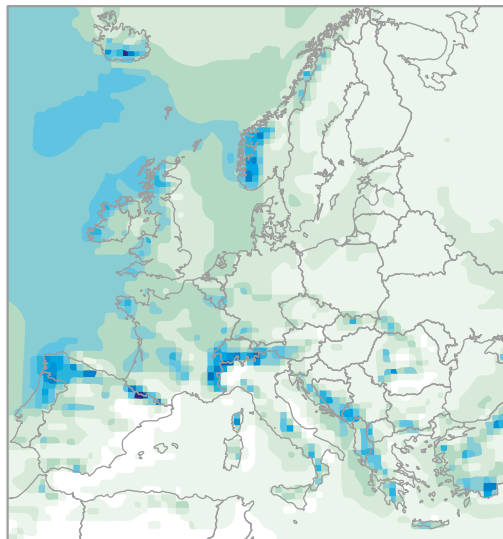
### Årsnederbörd

Här återges dels de senaste decenniernas nederbördsmönster, dels vad vi kan vänta mot seklets slut (om utsläppen följer scenario RCP8,5). Med kartornas hjälp kan man se vart man måste bege sig från en viss ort för att i dag påträffa det nederbördsklimat som kan uppträda på orten ifråga om hundra år.



### Vinter (dec–feb)

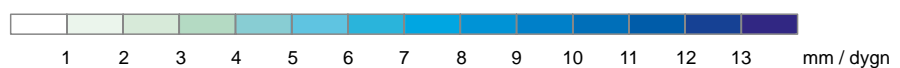
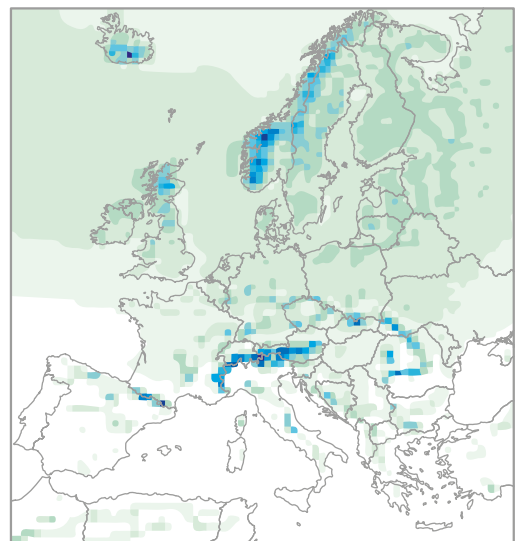
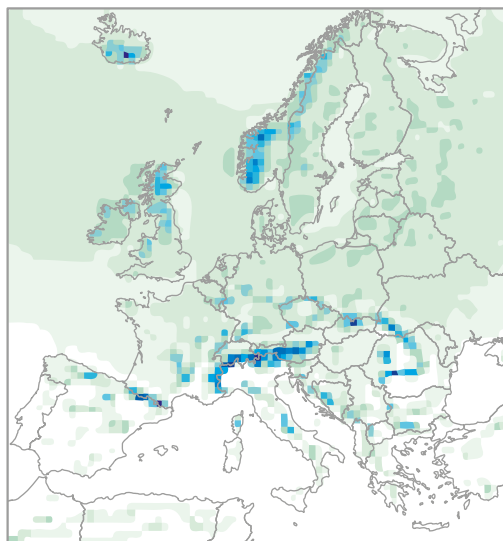
I östra Sverige är vinternederbörden jämförelsevis måttlig i våra dagar, men mot slutet av seklet kan den ha ökat till nivåer som vi i dag ser i exempelvis östra England. En avsevärd del av nederbörden kan vid det laget komma som regn i stället för snö.



### Sommar (jun–aug)

I Nordeuropa är sommaren normalt nederbördsr rikare än vintern, medan det är tvärtom i Sydeuropa. Skillnaderna i sommarnederbörd mellan norr och söder kommer av allt att döma att förstärkas framöver.

– Från Rossby Centre, SMHI.

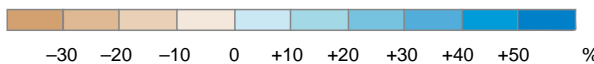
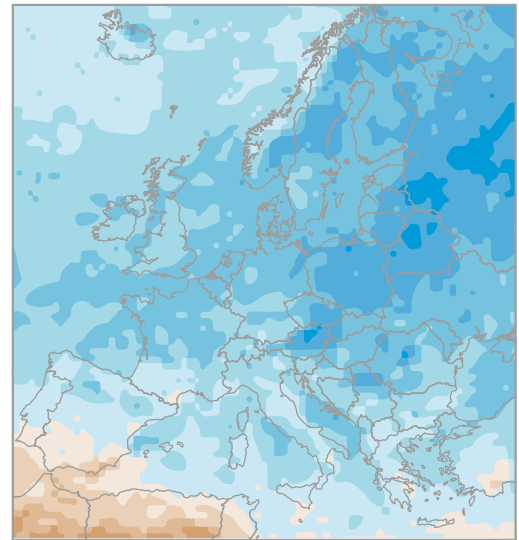
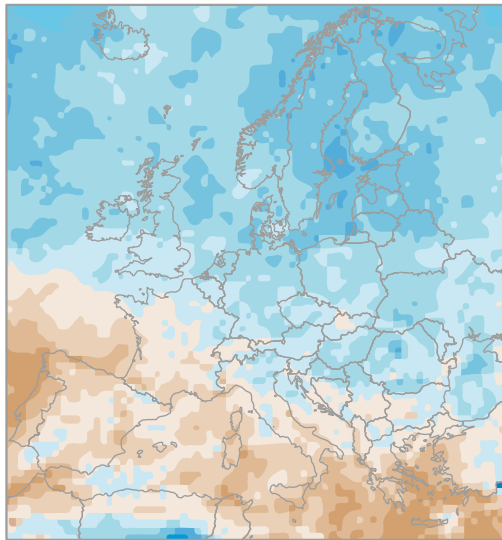


## Förändring av största dygnsnederbörd under tjugohundratalet

Sommar

Vinter

Förekomsten av extremt kraftig nederbörd lär tillta i stora delar av Europa, inte minst i norr. Procentuellt sett kan vi vänta särskilt stora ökningar vintertid.  
– Från Rossby Centre, SMHI.



Scenario RCP8,5  
(i båda fallen)

### Fler tillfällen med extrema nederbördsmängder

Den värmeenergi som förbrukas när vatten avdunstar från jordytan frigörs sedan åter när vattenången kondenseras uppe i atmosfären och bildar moln. Den frigjorda värmen driver på luftens rörelser i höjdled och gör det ibland möjligt för stackmoln (cumulus) att torna upp sig och omvandlas till bymoln (cumulonimbus).

Moln av det sistnämnda slaget ger upphov till regnskurar, hagelbyar eller snöbyar, dvs.

nederbörd som oftast är relativt kortvarig men som kan vara mycket intensiv. Den ökade avdunstning och ökade vattenåmgenhalt som på de flesta håll följer i växthusuppvärmningens spår medför sannolikt att en allt större andel av årsnederbörden blir av sådan karaktär.

Att årsnederbörden ökar över större delen av jorden lär därför främst visa sig genom att det börjar regna eller snöa kraftigare än nu, snarare än genom att nederbördstillfällena blir mer långvariga. Av den anledningen tilltar risken att det under begränsade tidsperioder faller extrema nederbördsmängder.

Förekomsten av extremt kraftiga regn och snöfall kan av allt att döma väntas öka mer än den totala årsnederbörden, i snitt kanske med 5–10 procent för varje grad temperaturen stiger. Även där de sammanlagda nederbördsmängderna minskar kan regnen bli intensivare när de väl faller. På så sätt skulle ett och samma område kunna drabbas både av förvärrade problem med torka och av ökad risk för tillfälliga översvämningar.

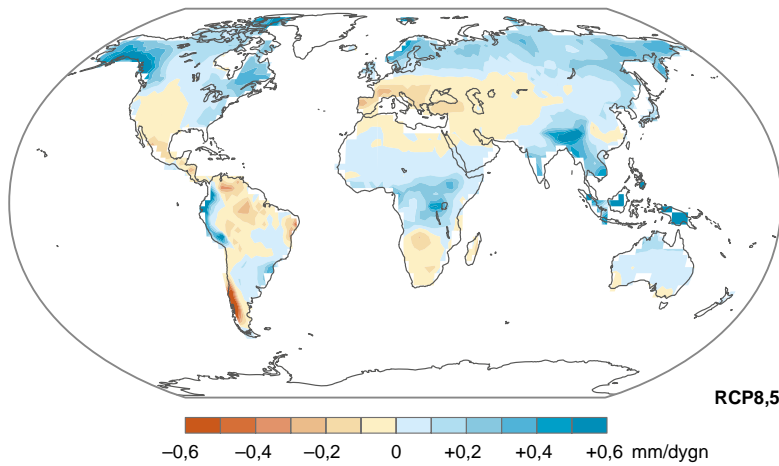
I Sverige skulle årets största dygnsnederbörd kunna öka med så mycket som 20–30 procent under loppet av det här seklet, åtminstone om människans klimatpåverkan fortsätter att förstärkas som hittills. Den nederbörd som faller i form av kortvariga men extremt intensiva skyfall ser ut att kunna öka ännu mer.

I norra Europa faller de allra intensivaste regnen normalt sommartid, och så förblir det sannolikt även i fortsättningen.

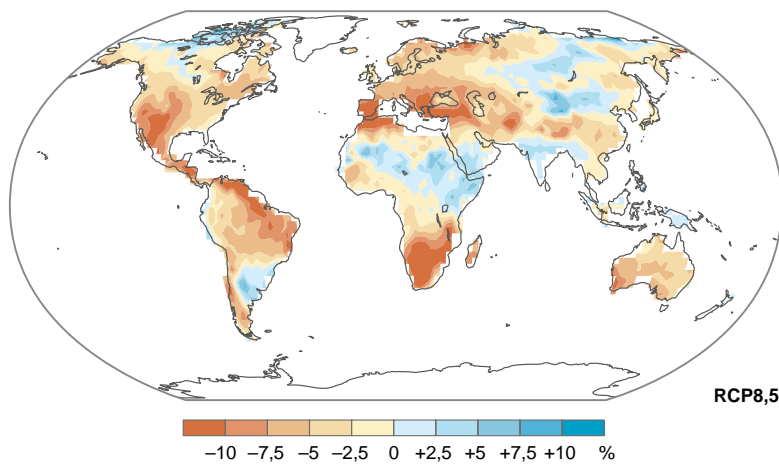




## Förändring av årsavrinningen under tjugohundratalet



## Förändring av markfuktigheten under tjugohundratalet



Liksom årsnederbörden väntas också den totala årsavrinningen via vattendragen öka på många håll, inte minst i norr (jfr kartan på s. 107). I åtskilliga trakter med torrt klimat lär avrinningen dock minska. Genom ökad avdunstning i samband med sommarhetta kan markens genomsnittliga fuktighet minska även i områden där årsnederbörd och årsavrinning tilltar. – Kartorna visar beräknade förändringar från 1986–2005 till 2081–2100. Underlag från IPCC 2013, fig. 12.23 och 12.24.

## Sommartorka på många håll, ökad avrinning på andra

Fuktigheten i marken bestäms av skillnaden mellan nederbörd och avdunstning. Av den anledningen är det inte säkert att marken blir fuktigare i regioner där nederbörden ökar, eftersom uppvärmningen innebär att också avdunstningen i allmänhet kommer att öka där. Tvärtom kan markfuktigheten väntas avta i stora delar av världen, i synnerhet sommartid. På flertalet platser som redan nu är mer eller mindre torra lär torkan bli än mer utpräglad. Detta kan bli ett snabbt växande problem framöver, inte minst i södra Europa.

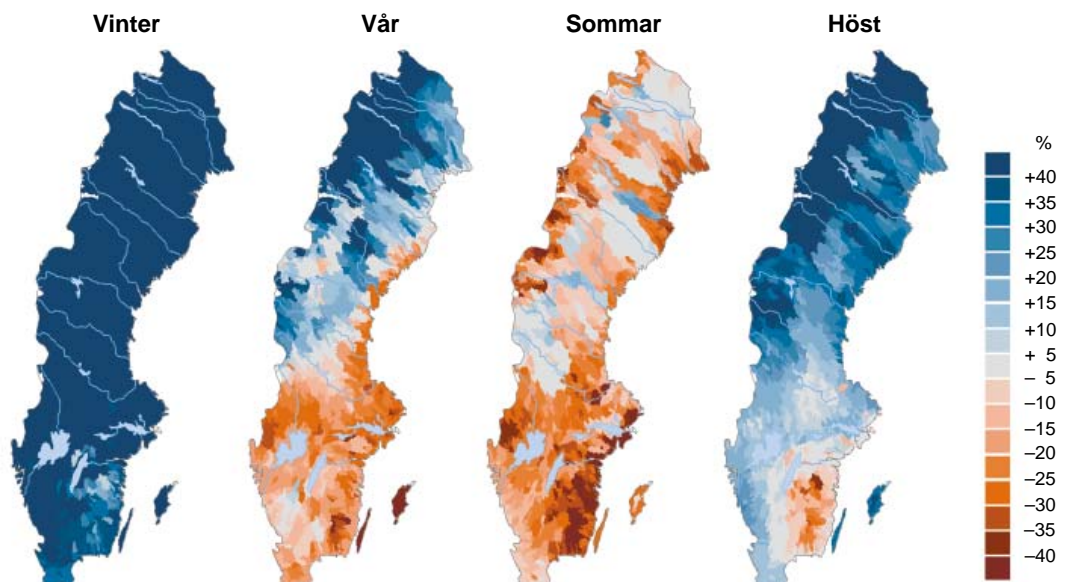
Även i Sverige kan det bli vanligare med låg markfuktighet under sommarhalvåret, trots att nederbörden väntas öka här. I våra trakter leder en uppvärmning inte bara till ökad avdunstning från markytan utan också till att vegetationssäsongen förlängs och att växtligheten därför hinner avge mer vattenånga till atmosfären. Torkan kan bli särskilt kännbar i landets sydöstra delar, där markfuktigheten ofta är låg även i dag.

På många håll i landet är det av samma skäl troligt att avrinningen via vattendragen kommer att minska under vår och sommar. I sydöstra Sverige är risken stor att torkans inverkan på avrinningen håller i sig långt in på hösten. Den tendensen kan väntas bli än mer markant längre söderut i Europa.

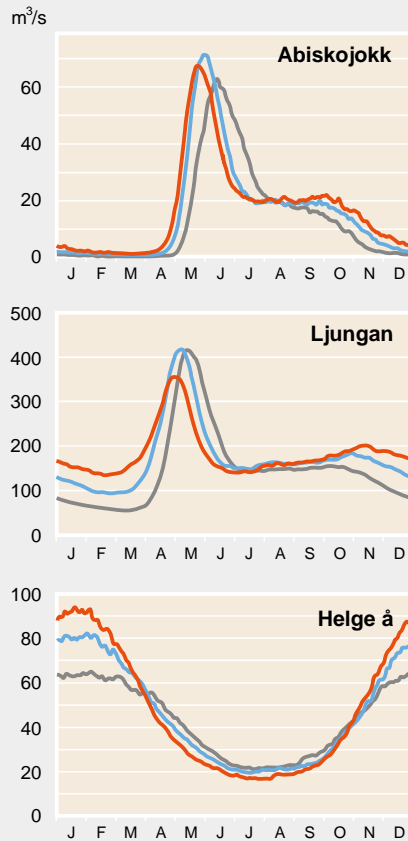
Vintertid kan vi å andra sidan räkna med rejält ökad vattenföring i svenska åar och älvar, både genom att vinternederbörden blir rikligare

## Avrinningsförändringar under olika årstider

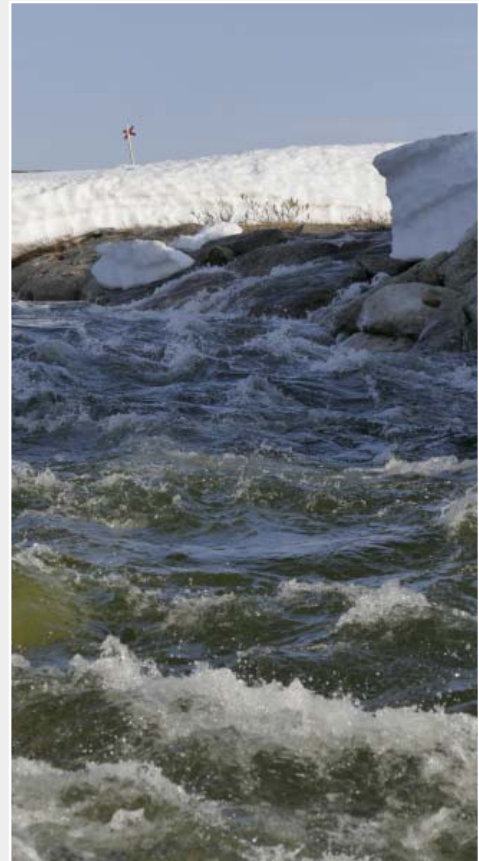
I Sverige kan vi räkna med att flödena i vattendragen ökar på vintern men minskar på sommaren. Kartorna visar beräknade förändringar från 1963–1992 till 2069–2098. Liksom kartorna ovan bygger de på ett scenario med fortsatt ökande utsläpp (RCP8,5). Med måttligare utsläpp blir också avrinningsförändringarna måttligare, men deras fördelning över tid och rum lär bli ungefär densamma. – Från Eklund *et al.* 2015.



### Vattenföringens årstidsvariationer nu och i framtiden



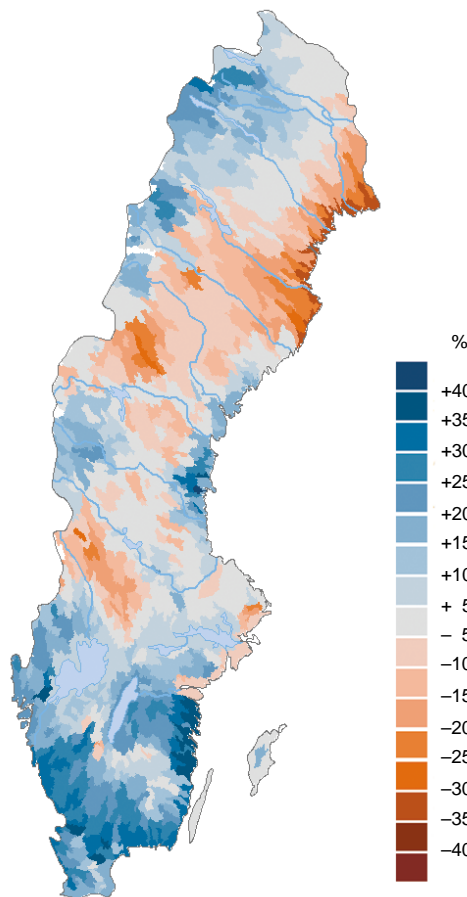
Om temperatur och nederbörd förändras i enlighet med klimatmodellerna kan vi vänta en allt tidigare vårflod i år och älvar. Här återges flödesberäkningar för tre vattendrag i norra, mellersta och södra Sverige. – Från Berglöv *et al.* 2015, Nylén *et al.* 2015 och Ohlson *et al.* 2015. Fotot visar vårfloden i Stekenjokk.



LE CARLSSON / AZOTIE

### Förändring av extrema flödesnivåer i vattendragen

I många svenska vattendrag skulle de mest extrema flödestopparna kunna bli allt högre framöver, främst genom ökad förekomst av intensiv nederbörd höst och vinter. I delar av mellersta och norra Sverige kan extremflödena däremot avta på grund av minskad snömängd och dämpad vårflod. Kartan visar beräknade förändringar från 1963–1992 till 2069–2098 av de s.k. 100-årsflödena, dvs. flödesnivåer som i genomsnitt bara nås en gång per sekel. – Från Eklund *et al.* 2015.



och genom att den i ökad omfattning faller som regn i stället för snö. Därför kommer sannolikt också den totala avrinningen under året att öka i nästan hela landet, trots reducerad vattenföring och markfuktighet under sommaren. En liknande utveckling är att vänta på andra håll i norra Eurasien och Nordamerika, medan exempelvis Sydeuropa och Mellanöstern riskerar minskad vattentillgång året om.

Klimatförändringarna under tjugohundra-talet kommer alltså att inverka inte bara på den totala avrinningen utan också på vattenföringens årstidsvariationer. De högsta flödena i svenska vattendrag noteras vanligen i samband med snösmältningen på våren. I ett varmare klimat kommer denna vårflod att inträffa tidigare än nu, eftersom snön då smälter tidigare på året.

Frekvensen av ovanligt höga flödestoppar lär förändras på ett likartat sätt. Extrema vårflöden bör sålunda bli mer sällsynta i fortsättningen. I stället kan extremt kraftiga höst- och vinterflöden bli betydligt vanligare. Vattenföringar som hittills bara registrerats någon gång per sekel under dessa årstider skulle kunna börja uppträda vart och vartannat decennium.

## Minskad salthalt i Östersjön

Större delen av det nederbördsvatten som rinner av från svenska landområden hamnar förr eller senare i Östersjön. Vattnet i Östersjön är bräckt – det har lägre salthalt än världshavet i stort. I söder uppgår ytvattnets salthalt till en fjärdedel eller femtedel av den nivå som råder i öppnare havsområden, medan vattnet uppe i Bottenviken bara är en tiondel så salt som vattnet ute i oceanerna. Salthalten bestäms av balansen mellan å ena sidan tillförseln av sötvatten via nederbörd och älvar, å andra sidan inflödet av mer eller mindre salt vatten från Kattegatt via de trånga och grunda danska sunden (Öresund och Bälten).

Det här betyder att de väntade förändringarna av nederbörd och avrinning kan få en avsevärd inverkan på Östersjöns egenskaper. På grund av ökad nederbörd i Sverige och Finland lär framför allt Bottenviken och Bottenhavet framöver tillföras mer sötvatten än hittills (tillförseln blir dessutom jämnare fördelad över året än den är i dag). Enligt vissa beräkningar av klimatutvecklingen i Nordeuropa skulle netto-

tillförseln av sötvatten till Östersjön kunna stiga med uppåt 20 procent under återstoden av det här seklet. I så fall kan vi räkna med en betydande minskning av salthalten i Östersjövattnet och därmed också i Kattegatt, vars vatten delvis härrör från Östersjön. Kring Gotland och i andra sydliga delar av Östersjön skulle ytvattnets salthalt kunna sjunka från dagens ca 7 promille till 5,5 promille eller därunder. Salthalten i området skulle då bli lika låg som den nu är uppe i norra Bottenhavet.

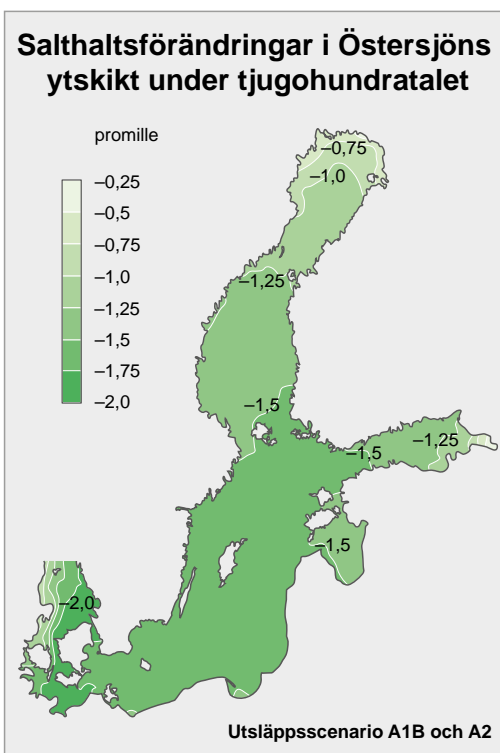
## Måttlig förändring av vindarna, men undantag kan förekomma

Eftersom de kommande decenniernas uppvärmning av jorden väntas bli kraftigast längst i norr bör temperaturskillnaderna mellan Arktis och sydligare trakter minska. Temperaturkontraster är en viktig drivkraft för uppkomsten av lågtryck och stormar, och åtminstone på norra halvklotet lär den drivkraften alltså generellt bli försvagad. Det förefaller ändå intressant att den totala förekomsten av lågtryck i lufthavet minskar mer än några få procent under innevarande sekel.

De största temperaturskillnaderna uppträder ofta längs gränserna mellan havsis och öppet vatten eller mellan snötäckt mark och barmark. Om havsisen och snöfälten efterhand drar sig tillbaka i takt med den allmänna uppvärmningen kommer temperaturkontrasterna därför att öka på vissa håll samtidigt som de minskar på andra håll. På så sätt kan vindklimatet genomgå lokala förändringar även om det inte skulle påverkas nämnvärt sett i större skala.

Exempelvis kan den genomsnittliga vindhastigheten på Bottniska viken framöver öka något vintertid. Det beror i så fall främst på att isen lägger sig i allt mindre utsträckning där, medan omgivande landområden inom överskådlig tid lär förbli snötäckta under vintern.

Relativt begränsade förändringar av vindklimatet är också att vänta på sydligare breddgrader. Åtskilliga klimatmodeller förutsäger att det totala antalet tropiska cykloner kommer att förbli oförändrat eller minska under återstoden av vårt sekel. Å andra sidan skulle de mest intensiva cyklonerna kunna bli vanligare. Genomsnittscyklonen kan därigenom komma att kännetecknas av såväl ökad vindstyrka som rikligare regn.



Räknat i promilleenheter väntas salthalten minska mer i Östersjöns sydligare delar än längre norrut. Uppe i Bottenviken är salthalten redan i dag mycket låg. Kartan visar beräkningarna utgående från två äldre scenarier (A1B och A2) som närmast motsvarar de nyare scenarierna RCP6,0 respektive RCP8,5. – Från Meier 2015.



# 9 Klimatförändringarna och naturmiljön

MÄNNISKANS PÅVERKAN PÅ klimatet kan få stora återverkningar på växter, djur och ekosystem. Redan 1900-talets ganska måttliga uppvärmning fick fullt märkbara följder för växt- och djurliv över hela jorden. Under kommande decennier lär klimatförändringarnas biologiska effekter bli allt fler och allt mer markanta. För en del arter kan förändringarna bli positiva; för andra blir de negativa. Åtskilliga arter riskerar att bli utslagna för gott.

## Uppvärmningen förlänger växters och djurs aktiva säsong

I Sverige och andra förhållandevis kyliga trakter regleras vegetationens tillväxt till stor del av temperaturen. Under vintersäsongen går både fotosyntes och andra biokemiska processer hos växterna ned på sparlåga. Produktionen av ny biomassa upphör nästan helt, och den kommer i gång igen först när dygnsmedeltemperaturen åter stiger några grader över noll.

Både fjällrävens och isbjörnens livsmiljöer, kalfjäll respektive havsis, trängs nu undan i takt med att temperaturen stiger.

*Vegetationsperioden* brukar definieras som den del av året då dygnets medeltemperatur någorlunda stadigt överskrider en viss nivå, exempelvis 5 plusgrader. Periodens längd är normalt avgörande för hur mycket vegetationen hinner växa till under ett år.

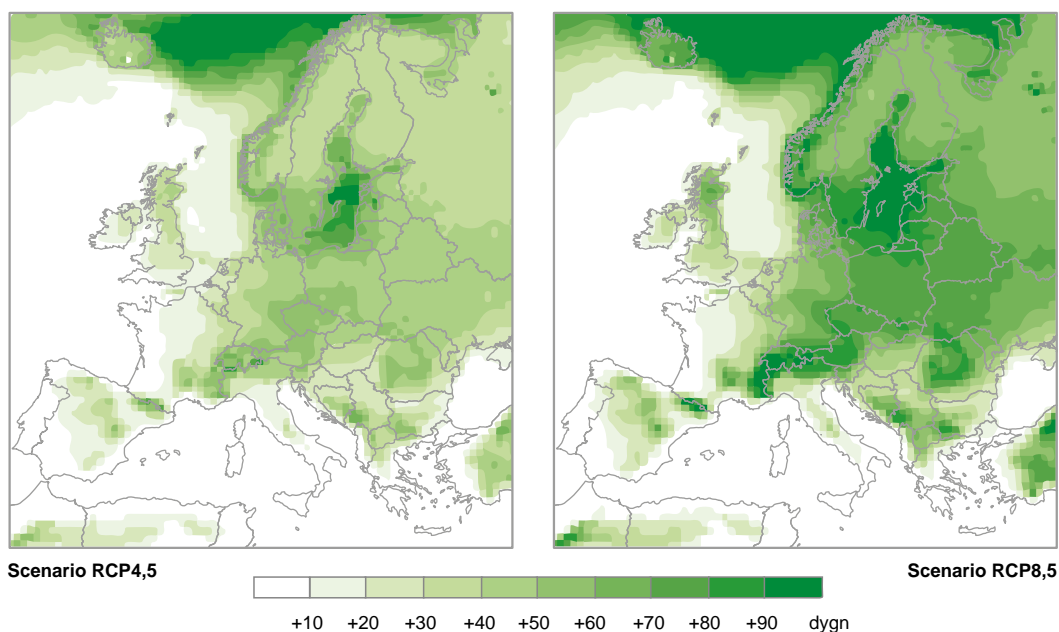
De senaste decenniernas temperaturhöjning har inneburit att vegetationsperioden blivit märkbart förlängd i de delar av världen som har ett relativt svalt klimat. Där kan en grads uppvärmning räcka för att groningen, lövsprickning, blomning etc. ska inledas mer än en vecka tidigare på våren; i en del fall börjar därtill höstens lövfällning senare. I nordliga landområden (norr om latitud 45° N) förlängdes perioden med temperaturer över 5 plusgrader i snitt med drygt 10 dygn under åren 1982–2011. Den period då vegetationen enligt satellitobservationer faktiskt växte till blev därigenom också förlängd, om än inte fullt lika mycket.

De här trenderna kan väntas fortsätta. Eftersom medeltemperaturen i Sverige skulle kunna

## Förändring av vegetationsperiodens längd under tjugohundratalet

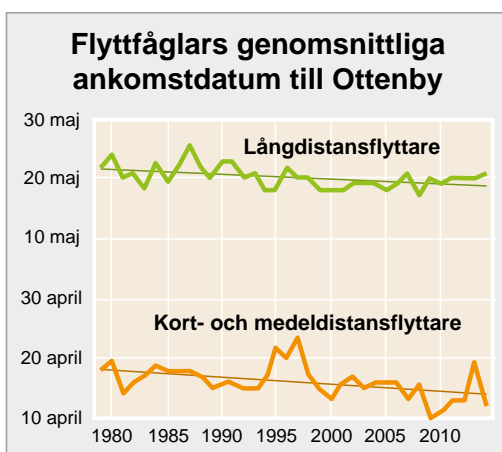
Vegetationsperioden, här definierad som den del av året då medeltemperaturen överstiger 5 plusgrader, kan bli kraftigt förlängd i områden som i dag har ett svalt klimat. Kartorna visar beräknade förändringar i Europa från åren 1971–2000 till 2071–2100. I Sverige är den största förlängningen av vegetationsperioden att vänta i landets södra delar.

– Från Rossby Centre, SMHI.



Eftersom våren har börjat komma tidigare anländer också flyttfåg-larna tidigare på året än förr. Här återges ett antal arters genomsnittliga ankomsttider till Ottenby fågelstation på Öland.

– Från Hellström *et al.* 2015.



stiga med flera grader under innevarande sekel kan vegetationsperioden här bli 1–3 månader längre under samma tid. Genom att fotosyntesen på så sätt förblir aktiv under en allt större del av året bör växternas produktivitet gradvis kunna öka. Förändringen kan bli väl så märkbar i vatten som på land – vi kan räkna med tilltagande algproduktion i många sjöar, till stor del genom att stigande temperatur medför minskad isläggning och därmed bättre ljusförhållanden i vattnet.

Direkt eller indirekt gör uppvärmningen det också möjligt för många djurarter att förlänga sin aktiva säsong i nordliga trakter. Åtskilliga flyttfågelarter har de senaste årtiondena börjat anlända allt tidigare på våren till Nordeuropa.

Till Ottenby fågelstation på södra Öland kom de 33 arter som studerats i genomsnitt 3 dygn tidigare i början av 2010-talet än de gjorde i början av 1980-talet. De största förändringarna har i allmänhet konstaterats hos arter som flyttar relativt korta sträckor. Dessa arter har börjat övervintra allt längre norrut i Europa, och i en del fall stannar de numera rentav kvar inom Sverige vintern igenom. Att de noterats allt tidigare på året i landets södra delar kan i sådana fall bero mer på förskjutningen av övervintringsområdet än på tidigarelagd flyttning.

Många växter och djur visar en ännu tydligare respons på vårens allt tidigare ankomst, antingen det gäller flyttning, tillväxt, fortplantning eller något annat. Enligt en sammanfattning av data om 203 olika arter på norra halvklotet – främst gräs, örter, träd, fåglar, groddjur och fjärilar – har dessa tidigarelagt inledningen av sin aktiva säsong med i genomsnitt 2,8 dygn per decennium.

Men alla arter reagerar inte på samma sätt när klimatet blir annorlunda, och dagens snabba klimatförändringar innebär därför risk att de hamnar i otakt med varandra. Det skulle exempelvis kunna uppkomma ett glapp mellan pollinerande insekters aktivitet och växternas blomning, eller mellan fåglars häckningssäsong och tillgången på lämplig föda åt ungarna.



## Torka kan medföra stora vegetationsförändringar i söder

I många sydligare trakter, exempelvis Medelhavsområdet, är det inte i första hand temperaturen som sätter gränsen för växters och djurs utbredning och aktivitet. Där är det redan nu så varmt att fotosyntesen kan fortgå praktiskt taget året om. I stället är det oftast vatten som utgör en bristvara i dessa regioner. Framför allt sommartid blir det vanligen så torrt att vegetationens tillväxt då stagnerar trots ett överflöd av ljus och värme.

Klimatmodellerna förutsäger minskad årsnederbörd i flertalet områden med Medelhavsklimat, och det är därför fara värt att växternas produktivitet här börjar begränsas av torka även under andra årstider än sommaren. Risker finns att delar av dessa områden efterhand omvandlas till halvöken, lokalt rentav öken. De omfattande ökenområdena – däribland Sahara – som nu utbreder sig kring vändkretsarna kan på så sätt börja expandera mot högre latituder.

Beräkningarna av det framtida klimatet i Europa tyder på att vegetationen kan bli starkt påverkad av torka också i områden som i dag har ett mer tempererat klimat, däribland Frankrike och Balkan. Där skulle kraftigt minskad nederbörd i kombination med kraftigt ökad temperatur kunna reducera markfuktigheten så drastiskt sommartid att en stor del av den nuvarande växtligheten får svårigheter att överleva.

I en del tempererade skogsområden, främst i västra Nordamerika men också på sina håll i Västeuropa, syns redan nu tendenser till att träden börjat växa långsammare och att de i ökad utsträckning dör i förtid. Den utlösande orsaken tycks i allmänhet vara torka i samband med sommarhetta, men torkan åtföljs ofta av insektsangrepp och bränder.

Även i Sverige – särskilt i landets sydöstra delar – kan vegetationens tillväxt och vitalitet framöver bli nedsatt på grund av sommartorka, om än inte i samma utsträckning som längre söderut i Europa. Att vattentillgången under vinterhalvåret väntas öka i vårt land får däremot liten betydelse för växtligheten, som redan i dag brukar vara väl försedd med vatten under den delen av året. Med tiden skulle vätan vintertid dock kunna åstadkomma tilltagande försurning här och var i Norrland, med lokala minskningar av vegetationens produktivitet som följd.

## Snabb näringsomsättning och hög koldioxidhalt påskyndar tillväxten

Förutom av temperatur och vattentillgång regleras växternas produktivitet också av tillgången på näringsämnen såsom kväve och fosfor. En stor del av den näring som vegetationen tar upp har frigjorts genom nedbrytning av humus och andra kvarlevor från tidigare växtgenerationer. Näringen ingår på så sätt i ett ständigt kretslopp mellan levande och dött organiskt material.

Nedbrytningen av humusämnen är temperaturberoende. I ett kyligt klimat går den långsamt, men den ökar takten om det blir varmare. I så fall tilltar frigörelsen av näring, vilket kan bidra till en förhöjning av växtproduktionen. Högre tillväxt brukar i sin tur innebära att vegetationen får kortare livslängd. Sammantaget betyder detta att en uppvärmning påskyndar näringsämnenas kretslopp.

Vegetationen försörjs med kväve inte bara från marken utan också via luft och nederbörd. Under senare delen av 1900-talet tilltog det atmosfäriska kvävenedfallet markant på grund av utsläpp av kväveföreningar från trafik, förbränningsanläggningar och jordbruksmark. Därefter har kväveutsläppen åter minskat i vår del av världen, men de har varit en viktig orsak till den svenska skogens kraftiga tillväxtökning under det gångna halvsekle.

Även koldioxidhaltens uppgång i atmosfären bör ha gynnat vegetationens tillväxt, eftersom den i allmänhet har möjliggjort ökad fotosyntes. Mängder av laboratorie- och fältförsök har bekräftat att växternas produktivitet vanligen tilltar när koldioxidhalten i luften stiger, åtminstone upp till nivåer kring 600 ppm. Samtidigt förbättras växternas möjligheter att hushålla med vatten. De tar upp koldioxiden genom mikroskopiska hål – klyvöppningar – i bladen, men genom samma öppningar blir de också av med vattenånga. Blir luftens halt av koldioxid förhöjd kan växterna tillgodose sitt behov av ämnet utan att behöva hålla klyvöppningarna öppna lika länge, och då minskar bladens förluster av vatten till atmosfären.

På många håll i världen bör växternas produktivitet därigenom kunna fortsätta att öka under kommande decennier. För den biologiska mångfalden kan en sådan utveckling å andra sidan vara till såväl skada som nytta. Om vege-

## Hur ett varmare klimat kan inverka på arters utbredningsområden

Fågelarv är en nejlikväxt som i dag bara förekommer i Sveriges sydligaste delar. I ett framtida varmare klimat skulle arten också kunna trivas längre norrut.

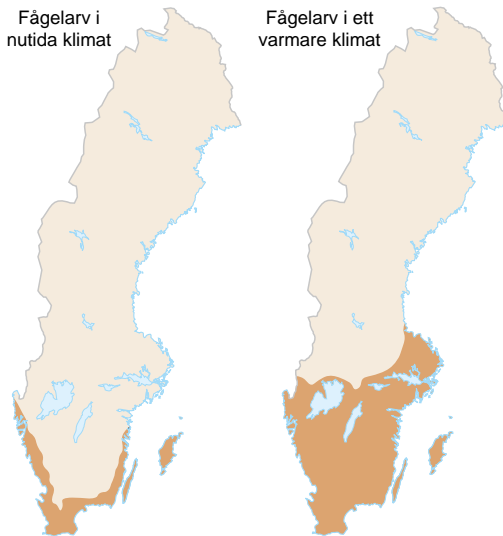
Kartorna på den här sidan återger tre växters *potentiella* utbredning – de visar var klimatet är så gynnsamt att arterna kan överleva. Arternas faktiska utbredning är betydligt mer begränsad, eftersom den också är beroende av faktorer såsom markegenskaper och markanvändning.

Mosippan förekommer i dag här och var i södra och mellersta Sverige. Klimatförändringarna kan göra det möjligt för arten att expandera norrut, men den kan samtidigt få det svårare att klara sig i landets sydligare delar. Inom loppet av något sekel skulle utbredningsområdet på så sätt kunna förskjutas flera hundra kilometer norrut – förutsatt att arten förmår sprida sig tillräckligt snabbt.

Fjällvallmon hör till de alpina växter vars utbredningsområden riskerar att krympa när temperaturen stiger. I en varmare framtid kan arten ha trängts undan från all lägre terräng och bara finnas kvar uppe i högfjällen. I likhet med fågelarv och mosippa har fjällvallmon specifika krav på sin livsmiljö. Redan i dag är den därför mycket sällsynt.

– Underlag från Wittver *et al.* 2010.

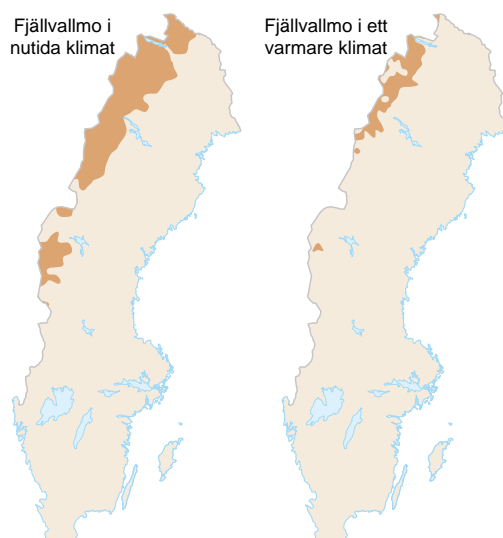
### Expansion



### Förskjutning



### Undanträngning



tationen blir alltför frodig riskerar exempelvis långsamväxande arter som är beroende av god tillgång på ljus att trängas undan. I marker som växer igen kan artrikedomen därigenom avta.

Förr eller senare begränsas ”koldioxidgödningens” gynnsamma direktverkan på vegetations tillväxt dock av andra faktorer, såsom brist på kväve. Efterhand kan den också få det svårt att uppväga koldioxidutsläppens ogynnsamma klimataffekter, såsom tilltagande hetta och torra. På längre sikt skulle tillväxtökningen på så sätt kunna avlösas av en minskning.

## Klimatförändring kan kräva anpassning eller förflyttning

Att dagens flora och fauna kan vara helt olika beskaffad i olika delar av världen är till betydande del en följd av klimatskillnader. De förändringar av klimatet som ligger framför oss kan därför åstadkomma avsevärda rubbningar i ekosystemen och deras artsammansättning. Otoliga arter kan i framtiden finna sig utsatta för klimatförhållanden som de har svårt att klara av.

En art som hamnar i en sådan situation har åtminstone teoretiskt två vägar ur knipan. Den ena är *anpassning*, tänkbar genom att det i allmänhet förekommer en viss genetisk variation inom beståndet. De varianter av arten som är sämst rustade att möta ett nytt klimat riskerar att slås ut, medan bättre rustade varianter kan få ökade möjligheter att överleva och föra sina anlag vidare till nästa generation. Genom detta naturliga urval skulle artens genomsnittliga egenskaper gradvis kunna modifieras i riktning mot ökad tålighet för det nya klimatet.

Alternativet till anpassning är *förflyttning*. Klimatförändringarna skulle kunna innebära att det klimat som tidigare har rått inom en arts utbredningsområde i stället börjar uppträda någon annanstans. I så fall skulle arten kunna överleva genom att förskjuta sitt utbredningsområde dit.

I det föregångna finner vi otaliga exempel på såväl anpassningar som förflyttningar i naturliga klimatförändringars spår. Kvartärtidens upprepade nedisningar har drivit fram mängder av genetiska anpassningar till ett kallt klimat. I en del fall har helt nya arter uppkommit – isbjörnen är en sådan. Samtidigt har också växter, djur och hela ekosystem tvingats vandra i riktning mot ekvatorn under varje nedisning, för





ULF MANHAMMAR / AZÖTE

Boken behövde lång tid för att återvända till Sverige efter istiden. Den fick ingen större utbredning här förrän under tidig järnålder, dvs. några få århundraden f.Kr., trots att klimatet förmodligen var minst lika gynnsamt för arten under den postglaciala värmetiden för 5–8 000 år sedan.

Om det framöver blir allt varmare får boken möjlighet att expandera vidare norrut i landet, men den kommer inte att kunna förflytta sig lika snabbt som klimatzonerna själva.

– Från Skärva i Blekinge.

att under efterföljande interglacial åter kunna expandera mot polerna. Även de förhållandevis måttliga temperaturförändringar som ägt rum under loppet av nuvarande interglacial har förskjutit många arters utbredningsgränser flera hundra kilometer i nord-sydlig riktning.

Förskjutningar av enskilda arters utbredningsområden har i många fall noterats också i vår tid. I Sverige har exempelvis älg, rådjur och grävling avancerat upp mot fjällen sedan början av 1900-talet, vilket åtminstone delvis kan vara en respons på uppvärmningen under samma tid. Hassel och ek har nyligen börjat sprida sig uppåt Norrlandskusten, och i Sydsverige görs allt fler fynd av fåglar och fjärilar som aldrig tidigare observerats i vårt land.

En nyligen genomförd internationell översikt över en rad växt- och djurarters respons på klimatförändringarna pekar i samma riktning. De undersökta arternas utbredningsgränser har under senare tid närmast sig polerna med i genomsnitt 17 km per decennium, vilket stämmer väl överens med den temperaturhöjning som samtidigt ägt rum. Skillnaderna är dock stora mellan olika arter, och det finns artgrupper som över huvud taget inte har lyckats expandera mot högre latituder.

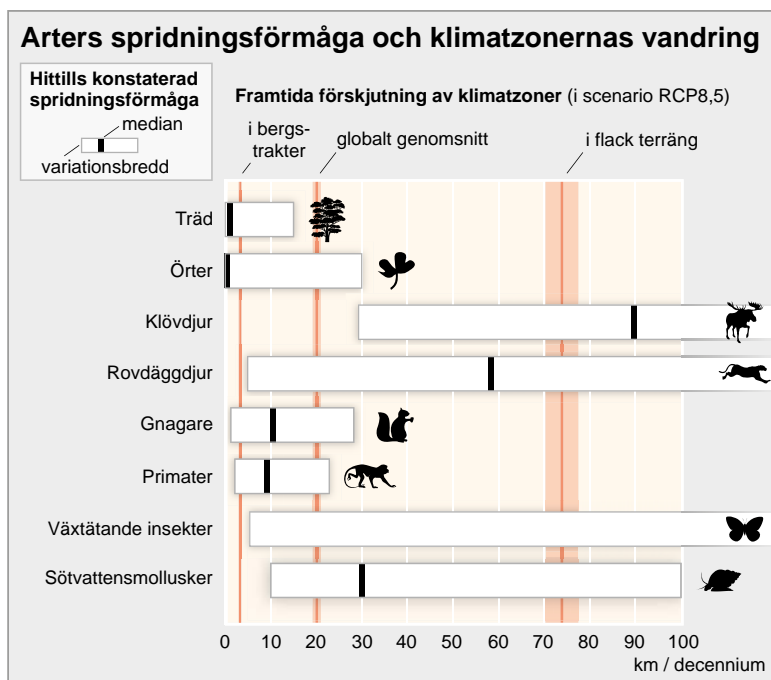
## Få arter hinner hålla takten med den väntade uppvärmningen

Under tjugohundratalet kommer klimatet med stor sannolikhet att förändras betydligt fortare än under 1900-talet. I Sverige skulle årsmedeltemperaturen mycket väl kunna stiga med 3–4 grader till seklets slut (se s. 102).

För många växter och djur ger en så hastig uppvärmning inte på långt när tillräcklig tid för genetisk anpassning. Den möjligheten står kanske bara öppen för arter som frambringar en eller flera nya generationer varje år.

Förändringen är också alldeles för snabb för att hela ekosystem ska kunna förflytta sig i takt med den. Den kan innebära att klimatzonerna i Sverige vandrar mer än 50 km norrut på ett enda decennium, vilket motsvarar en dryg halvmeter i timmen. På andra håll i världen, särskilt i tropikerna och i flack terräng, kan klimatzonerna komma att förskjutas ännu snabbare.

Åtskilliga djurarter, däribland fåglar, större däggdjur och många flygande insekter, kan utan problem förflytta sig själva i sådan takt, men det behöver inte betyda att de faktiskt ändrar vistelseort lika snabbt som klimatzonerna vandrar. Studier av fågel- och fjärilsfaunan i olika euro-



Om människans klimatpåverkan fortsätter att förstärkas (som i scenario RCP8,5) beräknas klimatzonerna vandra mot polerna med i genomsnitt ett par mil per decennium, på en del håll ännu mer. Studier av olika växters och djurs spridning nu och i det förgångna tyder på att långt ifrån alla arter hinner förskjuta sina utbredningsområden i den takten. – Underlag från IPCC 2014, fig. 4.5.

peiska länder har visserligen kunnat slå fast att artsammansättningen påverkats av de senaste decenniernas uppvärmning – på en given plats har arter som brukar uppträda i varmt klimat blivit vanligare, medan arter som är typiska för svalt klimat har blivit mindre vanliga eller helt försvunnit. Likväl har de förändringarna halkat en bra bit efter temperaturens uppgång under samma tid.

En av de sannolikt viktigaste orsakerna till eftersläpningen är att fåglar och fjärilar lika litet som andra djur kan frigöra sig från sina invanda livsmiljöer och klara sig på egen hand. Direkt eller indirekt är de alla beroende av växter för föda eller skydd, och växtligheten har begränsade möjligheter att hålla takten med klimatzonernas nutida och framtida förflyttningar. Studier av fossil har avslöjat få exempel på växtarter som lyckats förskjuta sina utbredningsområden snabbare än 10 km per decennium under gångna tiders klimatförändringar. För trädens del har förskjutningarna ofta bara uppgått till någon enda kilometer per decennium.

I själva verket har vissa arter av både djur och växter så begränsad spridningsförmåga att de fortfarande sakta expanderar norrut i Europa som svar på övergången från istid till interglacial för drygt tiotusen år sedan. Med andra ord är

återkoloniseringsen av Sverige efter den senaste nedisningen ännu inte avslutad.

Till de djur som sprider sig förhållandevis långsamt hör exempelvis grod- och kräldjuren. Flera av de svenska arterna inom dessa grupper uppträder i dag bara i landets södra delar. En fortsatt uppvärmning kommer att skapa ett klimat som är gynnsamt för grod- och kräldjur inom betydligt större delar av Sverige än hittills, men djurens begränsade spridningsförmåga gör det i praktiken svårt för dem att utnyttja expansionsutrymmet fullt ut.

Längst norrut i Europa finns alltjämt trädlösa tundraområden. Där kan temperaturklimatet om hundra år ha blivit gynnsamt för björk, kanske rentav för barrträd. Ändå lär det i så fall dröja minst ett par sekler ytterligare innan dessa områden har hunnit täckas av skog. Och innan skogen finns på plats anländer inte heller skogsfåglar eller andra skogslevande arter, oavsett hur lätt de själva har att förflytta sig. Det kommer också att ta tid för träden att omvandla den ursprungliga tundrajordmånen till en jordmån som är bättre lämpad för dem själva och för skogarnas normala undervegetation och markfauna.

## Vandringshinder och fragmentering av livsmiljöer innebär utrotningsrisk

Arternas återinvandring till Sverige efter istiden har i många fall försenats av naturliga barriärer såsom Alperna och Östersjön. Under senare tid har människan genom sin omvandling av landskapet åstadkommit ytterligare vandringshinder, exempelvis i form av stora, sammanhängande jordbruksområden som kan vara mycket svåra att passera för skogslevande växter och djur. Arter som har blivit fast bakom sådana hinder löper allt större risk för utslagning ju längre den nuvarande uppvärmningen framskrider.

För arter vars utbredningsområden har blivit fragmenterade utgör förändringar av klimatet en särskilt stor fara. Som exempel kan nämnas de växt- och djurarter som är beroende av praktiskt taget orörd skog. I större delen av Nord-europa lever sådana arter i dag isolerade i ett begränsat antal gammelskogsreservat. Många av dem har mycket små möjligheter att korsa de ”hav” av jordbruksmark och brukad skog som skiljer reservaten från varandra. Framöver skulle

det kunna bli så varmt eller torrt att en del gammelskogsarter inte längre kan överleva på sina nutida tillflyktsorter. Risken är stor att de då försvinner från dessa platser utan att ha lyckats etablera nya bestånd längre norrut. Av motsvarande skäl har också arter knutna till exempelvis insjöar, branter eller kalkrik mark svårt att förskjuta sina utbredningsområden, som ju även i opåverkad miljö är uppstyckade i en mängd skilda delar.

Enligt en bedömning riskerar ungefär 60 procent av alla arter av växter och ryggradsdjur i Europas skyddade områden att utsättas för ett ogynnsamt klimat mot slutet av det här seklet. Sannolikheten att arter faktiskt utrotas till följd av klimatets nutida eller framtida förändringar är emellertid mycket svår att uppskatta. Hitills har ytterst få fall av det slaget påvisats. Av över 800 dokumenterade utrotningar under senare tid har på sin höjd ett tjugotal knutits till klimatet, ofta på osäkra grunder. Den alltjämt dominerande orsaken till att arter försvinner är i stället förändringar av människans markanvändning och liknande fysiska ingrepp i växters och djurs livsmiljöer.

Det råder allmän enighet om att klimatets fortsatta förändringar utgör ett ökande hot mot många arters existens, åtminstone långsiktigt, men bedömningarna av utrotningsrisken går vitt isär. Inom vissa grupper av organismer har andelen "klimathotade" arter uppskattats till mindre än 1 procent, inom andra till mer än 50 procent.

## Invandring, konkurrens, utslagning skapar nya artkombinationer

De ekosystem som omger oss i dag kommer aldrig att kunna behålla sina egenskaper helt intakta om klimatet tvingar dem att flytta på sig, oavsett i vilken takt denna förflyttning äger rum. Att det sydsvenska temperaturklimatet om hundra år kanske överensstämmer med dagens franska temperaturnivåer (se s. 102) betyder sålunda inte att Sydsverige ens på längre sikt kommer att överta Frankrikes växt- och djurvärld i dess nuvarande skick.

Det här beror delvis på att de arter som ekosystemen är uppbyggda av har vitt skilda möjligheter att sprida sig, men också på att olika växter och djur har olika förmåga att uthärda ett förändrat klimat. Många arter slås ut om de inte lyckas flytta sig i tid, men andra kan utan problem stanna kvar.

Att en art *tål* ett förändrat klimat är likväl ingen garanti för att den kan leva kvar i samma omfattning som tidigare. Klimatförändringar har nämligen stora möjligheter att rubba konkurrensförhållandena mellan olika arter. Snarare än direkt värmekänslighet lär det bli indirekt påverkan av det slaget som medför att en del arter försvinner när temperaturen stiger.

I ett varmare Sydsverige skulle tallen sålunda kunna trängas undan av lövträd, eftersom värmen gynnar dessa mer än den gynnar barrträden. De tallar som har hunnit uppnå vuxen ålder blir knappast hotade för egen del, men där

JERKER LOKRANTZ / AZOTE



I våra dagars Sverige ligger kvarvarande artrika miljöer ofta som isolerade öar i ett "hav" av intensivt brukade och därför artfattigare åkrar eller skogar. Denna fragmentering av många arters livsmiljöer gör det svårare för dem att förflytta sig i takt med klimatzonernas vandring.

det uppkommer luckor i tallbestånden kan nya tallplantor i ökande omfattning bli utkonkurrerade av lövträdsplantor.

Men oavsett vad som händer med den naturliga balansen mellan olika växter lär människan även i fortsättningen begagna sina möjligheter att bestämma vilka arter som ska få växa var. Själva grundidén med vårt jord- och skogsbruk är ju att vi avdelar mark åt sådd eller plantering av de arter som vi vill utnyttja, medan andra arter hålls undan därifrån.

Det här betyder exempelvis att trädslagsfördelningen i de svenska skogarna i praktiken blir vad vi gör den till. Fördelningen mellan tall, gran och lövträd kommer vi också framöver att kunna styra genom plantering och röjning. Likaledes kan vi i stor utsträckning själva avgöra huruvida vi vill ha in nya trädslag från kontinenten. Även om det svenska klimatet blir gynnsammare för sådana trädslag kan de knappast korsa Östersjön och slå sig in i våra skogar utan aktiv hjälp, åtminstone inte inom det närmaste seklet. Därför kan vi också i viss mån välja hur klimatförändringen ska påverka skogarnas biologiska mångfald – satsningar på inhemska lövträd skulle ge oss avsevärt artrikare skogar än satsningar på främmande barrträd.

En markant uppvärmning kommer likväl att göra det möjligt för åtskilliga främmande arter av både djur och växter att ta sig in i Sverige, antingen vi vill det eller ej. Också inplanterade arter som är anpassade till ett varmare klimat än det vi hittills haft i Sverige och som hittills haft begränsad utbredning i landet kan börja sprida sig när temperaturen stiger. Ett exempel är att karpnen, som länge odlats eller satts ut i sydsvenska vatten, nu i ökad omfattning reproducerar sig i det fria.

Det är högst sannolikt att Sydsveriges framtida fauna och flora kommer att uppvisa inslag från både kontinentala och svenska ekosystem av i dag. På motsvarande sätt kan vi i Norrland vänta oss att med tiden finna kombinationer av kvardröjande nordliga och nytillkomna mellansvenska arter.

De norrländska ekosystemen har hittills varit tämligen artfattiga på grund av områdets kalla klimat, men efter en uppvärmning borde invandringen av nya växter och djur från de artrikare trakterna i Mellansverige leda till ökad artmångfald i norr. I Sydsverige är det mer oklart vad som i längden skulle hända med artantalet

efter en sådan klimatförändring. Invandringen dit av växter och djur från kontinenten försvåras av naturliga och människoskapade vandringshinder, och det är osäkert om den långsiktigt kan uppväga utslagningen av inhemska arter som inte tål det nya klimatet.

I södra Europa är risken uppenbar att kommande klimatförändringar reducerar den biologiska mångfalden högst avsevärt. Hetta och torka kan befaras eliminera en betydande del av dagens fauna och flora, och de mer tåliga arter som förekommer i angränsande ökenartade områden är så fåtaliga att tillskotten därifrån knappast kan bli många.

## Krympande kalfjällsarealer i Sverige

Oavsett hur klimatförändringarna inverkar på artrikedomen kan de leda till att en del av dagens ekosystem förvandlas till oigenkännlighet eller helt försvinner. Detta utgör ett väl så allvarligt hot mot den biologiska mångfalden som faran att enskilda arter slås ut.

Trots att antalet växt- och djurarter i Sverige mycket väl kan stiga som ett resultat av vad som händer med klimatet kan vi därför inte slå oss till ro vad den svenska naturmiljön beträffar. Här finns nämligen flera ekosystem som löper stor risk att förändras i grunden även efter förhållandevis måttliga ändringar av temperatur eller nederbördsmängd.

Ett av de mest hotade ekosystemen i Sverige utgörs av kalfjällsområdena, vars areal nu har börjat krympa märkbart. Som svar på en lokal temperaturhöjning med omkring en grad försköts trädgränsen i de sydligare delarna av fjällkedjan uppåt redan under 1900-talets första hälft, i typiska fall med närmare 50 m. En tillfällig avkylning hejdade därefter trädens uppmarsch mot fjälltopparna, men sedan värmen återkom i slutet av det gångna seklet har trädgränsen stigit på nytt.

Trädgränsen brukar definieras som gränsen för träd av minst två meters höjd. Fjällbjörkar och tallar av den storleken uppträder i dag i genomsnitt 70 m högre upp i de södra fjällen än för hundra år sedan, medan granens trädgräns under samma tid har stigit med ca 90 m. Skillnaderna är dock stora från plats – i vindskyddade lägen med god vattentillgång kan trädgränsen nu ligga så mycket som 200 m högre än i början



Sötvattensmaneten *Craspedacusta sowerbii* har under senare års varma somrar uppträtt i stora mängder i flera syd- och mellansvenska sjöar. Arten, som härstammar från Kina och sannolikt är oavsiktligt införd i Sverige, hade dessförinnan bara setts här vid ett par tillfällen.

## Svenska fjäll i dag ...

De svenska kalfjällsområdena utgör i dag närmare tio procent av landets areal. Skogsgränsen, dvs. gränsen mellan fjällens gläsa eller obefintliga trädvegetation och de sammanhängande skogsbestånden längre ned, går nu på ca 900 meters höjd över havet i de sydligaste fjällområdena men bara ca 500 m över havet längst i norr.



av 1900-talet. Nedanför gränsen har träden i allmänhet tätat, och även skogsgränsen (gränsen för sammanhängande trädbestånd) har därigenom tenderat att stiga, om än inte lika snabbt som trädgränsen.

Båda gränsernas lägen bestäms i första hand av temperaturen, som brukar avta mot höjden med 0,6–0,7 grader per 100 m. Det betyder att en generell uppvärmning kan väntas leda till att

gränserna ifråga stiger med ungefär 150 m per grad. Om människans påverkan på klimatet fortsätter att förstärkas skulle skogen därigenom kunna avancera flera hundra meter uppåt fjälltopparna redan under innevarande sekel.

Dagens svenska kalfjällsareal skulle i så fall kunna reduceras med tre fjärdedelar eller mer, samtidigt som den skulle splittras i mängder av små och isolerade fragment. Merparten av kvar-

varande områden ovan trädgränsen skulle utgöras av blockterräng eller rasbranter med mycket sparsam vegetation. Samtliga Dalafjäll och den allra största delen av Härjedals-, Jämtlands- och södra Lapplandsfjällen skulle vara skogbevuxna eller på väg att bli det. I nordliga högfjällsmassiv såsom Kebnekaise och Sarek skulle bergen fortfarande stå kala, men i dalgångarna skulle skogen kunna växa tät.

Redan i dag kan man finna en och annan decimeterhög trädplanta gott och väl 500 m ovan nuvarande trädgräns. De träd som etablerar sig på vad som hittills varit kalfjäll åtföljs också av örter och annan växtlighet som hör till skogen snarare än fjällheden. Uppvandringen av växter och djur från låglandet tycks redan ha medfört ökad artrikedom i fjälltrakterna, och den utvecklingen kan väntas fortsätta.

Samtidigt innebär förändringarna risk för oåterkallelig utslagning av genuint alpina arter, däribland ett antal små och konkurrenssvaga växter. Enbart bland mossorna i svensk fjällmiljö finns över 70 arter som bedöms vara mycket känsliga för klimatförändringar. Sådana arter kan gradvis trängas undan av konkurrenskraftigare låglandsvegetation såsom gräs och buskar, och alla flyktvägar utgör i praktiken återvändsgränder. När arterna ifråga retirerat ända upp till fjälltopparna har de inte längre någonstans att ta vägen för att rädda sig undan följderna av en fortsatt temperaturstegring.

## Klimatförändringen kan omvandla Östersjömiljön i grunden

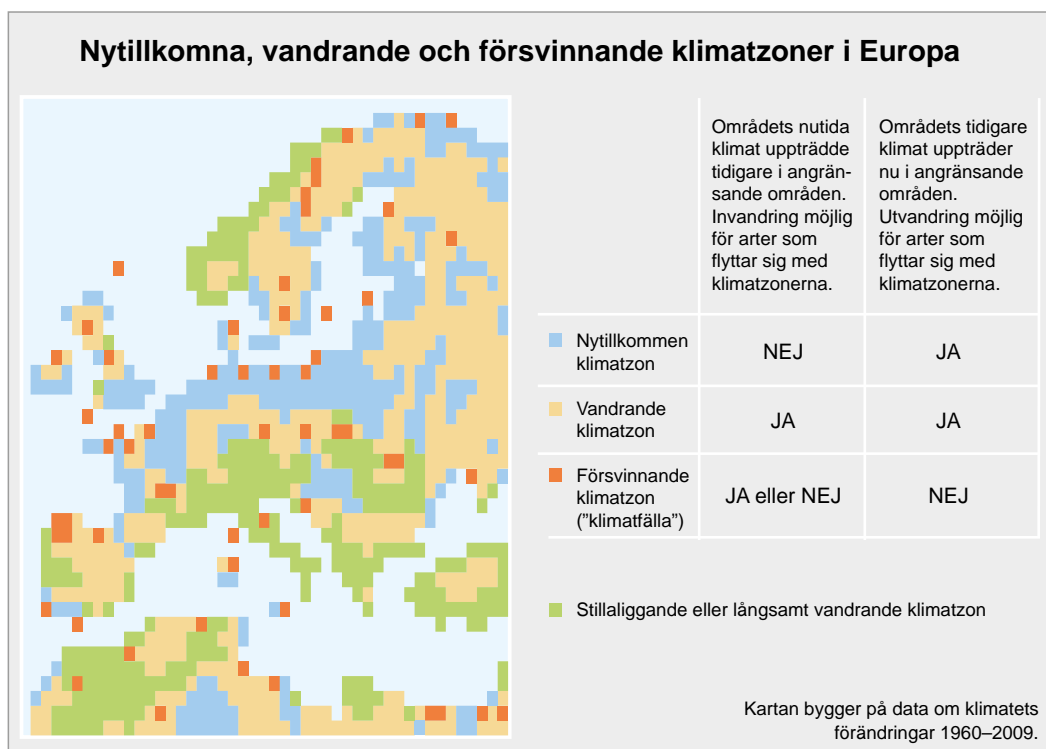
Östersjön är jordens näst största brackvattenhav, vilket innebär att Sverige har del i ett ekosystem med få motsvarigheter i världen i övrigt. Knappast några arter är specialiserade på den låga salthalten i Östersjön, vars ekosystem i stället är uppbyggt av söt- och saltvattensarter som råkar tåla det bräckta vattnet. Dessa arter är inte särskilt många, och artantalet är därför avsevärt lägre i södra Östersjön än i det saltare Västerhavet. Ännu lägre är det i Bottniska viken.

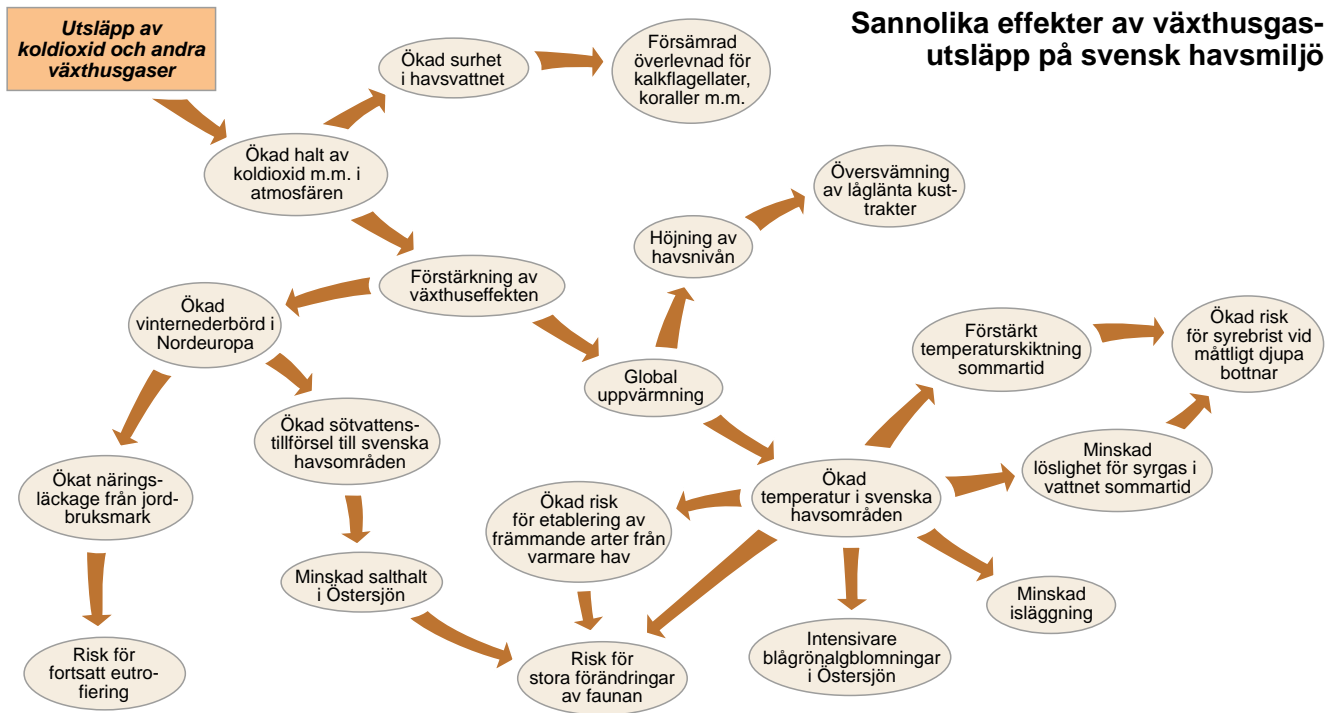
Vi har tidigare sett att framtida nederbördsförändringar i Nordeuropa kan åstadkomma en minskning av Östersjöns salthalt (se s. 113). En sådan minskning skulle ytterligare kunna reducera områdets redan begränsade artantal. Åtskilliga saltvattensarter som nått och jämnt uthärdar dagens salthalter i Östersjön kan försvinna därifrån, medan genuina sötvattensarter som nu saknas där skulle finna även den framtida salthalten alltför hög.

Flera av de saltvattensarter som kan bli undanträngda från Östersjön om salthalten sjunker innehar nyckelpositioner i områdets nutida ekosystem, som därför riskerar att bli förändrat i grunden. Till dessa arter hör exempelvis blåstång, blåmussla och torsk samt marina planktondjur som utgör viktig fiskföda. Blåmusslan, som livnär sig på att filtrera organiskt material ur

Den uppvärmning som nu äger rum i Europa innebär att klimatzonerna i området förskjuts. Arter som är beroende av ett specifikt klimat kan därför behöva flytta sig. En del bergstrakter och kuster utgör dock återvändsgränder eller "fällor" för sådana arter – där har de ingenstans att ta vägen när klimatet blir varmare. På andra håll, framför allt i kustnära trakter, uppkommer klimatförhållanden som tidigare inte rått i angränsande landområden. Klimatkänsliga arter kan flytta därifrån, men nya arter kan ha svårt att ta sig dit.

– Underlag från Burrows *et al.* 2014.





Via sin inverkan på temperatur- och nederbörds klimatet kan en förstärkning av växthuseffekten få vittgående följder för havsmiljön. Koldioxidutsläppen påverkar också livsbetingelserna i havet genom att öka vattnets surhet (se s. 129), en effekt som är helt oberoende av utsläppens inverkan på klimatet.

– Från Bernes 2005.

bottenvattnet, är Östersjöns helt dominerande djurart och spelar därigenom en avgörande roll i näringsvävarna. Uppe i Bottenviken är salthalten emellertid lägre än vad blåmusslan tål, och ingen annan art har där lyckats överta dess roll i ekosystemet. Fiskfaunan i Bottenviken saknar därför en viktig födoresurs, vilket bidrar till att den är mycket lågproduktiv. Om blåmusslan på grund av minskad salthalt försvann också från Bottenhavet skulle fiskproduktionen sannolikt minska markant även där. Också ejdern, Bottenhavets vanligaste sjöfågel, livnär sig huvudsakligen på blåmusslor, och om dessa försvinner lär även ejdern lämna området.

Vad torskens försvinnande skulle betyda för den övriga fiskfaunan i Östersjön är en öppen fråga – det är osäkert om någon annan art skulle kunna inta torskens nuvarande ställning som dominerande rovfisk i området. Också för rödspätta och piggvar skulle salthalten kunna bli alltför låg i Östersjön. Om salthalten minskar i Östersjövattnet kommer den att minska även i Kattegatt, kanske så mycket att utpräglade saltvattensarter trängs undan därifrån mot Västerhavets nordligare delar.

I viss omfattning kan fauna och flora i Östersjön också påverkas av vattentemperaturens väntade förhöjning. Sik, siklöja, lax, öring och plattfisk är anpassade till förhållandevis kallt vatten och missgynnas när det blir varmare. Av samma anledning skapar en uppvärmning

ytterligare svårigheter för torsken, såväl i Kattegatt som i Östersjön. En annan kallvattenberoende torskfisk, laken, är numera rödlistad eftersom bestånden minskar påtagligt, både i Bottniska viken och i många sydsvenska insjöar. Senare års uppvärmning är sannolikt en viktig orsak till tillbakagången.

Arter såsom abborre, gädda, gös och skarpsill kan i stället betecknas som varmvattensfiskar – deras möjligheter till konkurrens och tillväxt förbättras när Östersjön blir varmare. Uppvärmningen minskar också risken för skador av is på de grunda bottenarnas tångbälten och den fauna som är knuten till dem.

När temperaturen stiger ökar å andra sidan risken att oönskade arter från varmare delar av världen etablerar sig i Östersjön. Allt fler främmande arter, däribland kräftdjur, musslor och andra ryggradslösa djur, har påträffats i området under senare decennier. I allmänhet har de nått dit som fripassagerare på fartyg, bl.a. från Svarta havet, Kaspiska havet och omgivande flodsystem, men dagens klimatförändringar kan ha underlättat för dem att överleva och föröka sig i svenska vatten.

Temperaturens årstidsväxlingar i Östersjön berör i första hand vattenmassan ned till omkring 30 meters djup. På det djupet bildas under sommarhalvåret ett språngskikt – en *termoklin* – som skiljer det uppvärmda ytvattnet från det ständigt kalla vattnet längre ned. Skiktningen







SUSANNE BÄCKE

I våtmarkskomplexet Tavvavuoma i nordligaste Sverige kan man ännu finna palsar, låga kullar som består av torv och en iskärna som inte smälter ens på sommaren. De kvarvarande svenska palsmyrarna hotas emellertid av den pågående uppvärmningen. Palsarna faller samman om deras iskärnor försvinner, och då förändras myrens hela struktur. Mycket talar för att det knappt finns några palsmyrar kvar i Fennoskandien om ett halvsekel – i södra Lapplandsfjällen tycks de redan vara borta.

## Hotade ekosystem världen över

Sett i global skala är kalfjällsområdena och Östersjömiljön bara ett par exempel på alla de ekosystem som hotas av undanträngning eller radikal omvandling om klimatet förändras. Riktiga blickarna utanför Sveriges gränser kan exemplen mångfaldigas.

Ekosystemen i Arktis hör till de mest utsatta, eftersom uppvärmningen där väntas bli kraftigare än i någon annan del av världen. Som tidigare nämnts kan temperaturhöjningen med tiden leda till omfattande beslagning av den arktiska tundran, en naturtyp som förekommer i begränsad utsträckning i vårt land men som är desto mer utbredd i Ryssland och Kanada. Utvecklingen kan förstärka sig själv, eftersom skog är mörkare än tundra och därigenom absorberar mer solljus. Redan i dag utbreder sig buskvegetation över allt större tundraarealer i norr, och växtlighetens produktivitet har ökat markant i området. Även på tundra som förblir trädlös kan växt- och djurliv genomgå stora förändringar om permafrosten tinar (se s. 104), eftersom marken då får helt andra egenskaper.

Det säger sig också självt att en temperaturhöjning kan bli ödesdiger för den fauna och flora som är knuten till havsisen kring polerna. Dit hör arter såsom isbjörn och vikarsäl. Den sistnämnda förekommer även i Bottenviken och Finska viken men riskerar av samma skäl att försvinna därifrån på längre sikt.

I tätbefolkade delar av världen har människan sedan länge utsatt de naturliga ekosystemen för ett allt större tryck genom odling, betesdrift, bebyggelse och annan exploatering. Detta tryck kan väntas öka i takt med den fortsatta folkökningen. När därtill klimatet förändras kan följden bli att vissa tillbakaträngda naturtyper näst intill elimineras. Tropiska ekosystem kan visa sig särskilt känsliga, eftersom de i allmänhet inte är anpassade till ett skiftande klimat. En del av dem befinner sig nära gränsen för hur höga temperaturer växter och djur tål.

Minskad nederbörd kan få väl så genomgripande effekter på naturmiljön som ökad temperatur. I exempelvis östra Amazonas skulle torka i kombination med avverkning och bränder kunna omvandla kvarvarande tropisk regnskog till betydligt glesare och mer lågvuxen träd- och

buskvegetation. Om detta händer kan regnsko- gen bli svår att återfå även om nederbördsmäng- derna senare skulle öka igen.

Ett annat exempel är att bergstrakternas art- rikedom befaras minska i Sydeuropa samtidigt som den väntas öka i Central- och Nordeuropa – tendenser i de riktningarna har redan iakt- tagits. Skillnaden beror främst på att klimatet i Sydeuropa inte bara är på väg att bli varmare utan också torrare.

### **Flera slags påverkan på kuster och hav – korallreven särskilt illa ute**

Ute till havs kan klimatförändringarna med- föra minskad produktion av planktonalger och därmed också av organismer högre upp i nä- ringskedjorna. Orsaken är att uppvärmningen av ytvattnet förstärker vattenmassans skiktning och därigenom försvårar vattenomsättningen i djupled. På så sätt minskar tillförseln av närings- rikt djupvatten till algerna i ytskiktet. Liksom i Östersjön (se s. 126) kan skiktningen också leda till syrebrist ett stycke under ytan. Risken för minskad produktivitet är störst i varma och tempererade hav, medan arktiska vatten i stället väntas bli mer produktiva till följd av minskad isläggning.

Genom att många havslevande arters ut- bredningsområden förskjuts i riktning mot polerna när vattnet blir varmare kan tropiska havsområden därtill bli artfattigare, medan art- mångfalden lär öka på högre latituder.

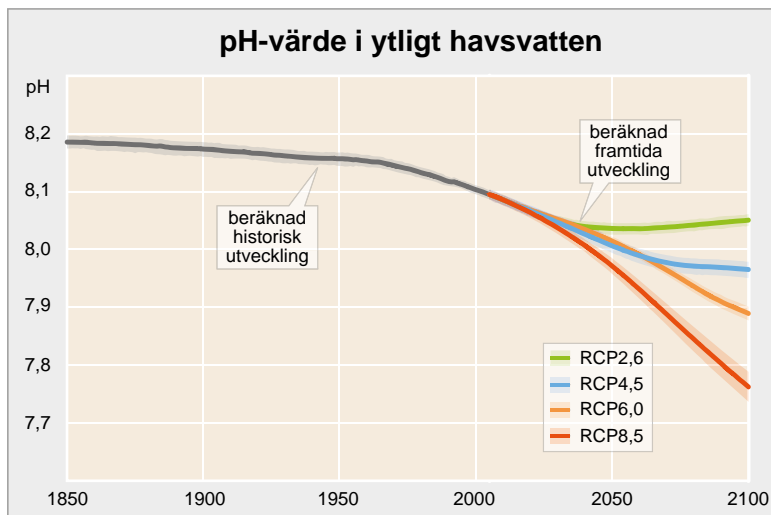
Kustekosystem av olika slag hotas framför allt av den väntade höjningen av havsnivån. Ha- vet skulle här och var kunna erodera bort myck- et breda strandremsor, inte minst i Arktis, där vågorna får ökat spelrum när havsisen smälter och där uppvärmningen också kan innebära att strandbrinkarna förlorar den ”armering” som tjälen hittills har försett dem med.

I många fall bör strändernas flora och fauna utan större problem kunna förflytta sig inåt land i takt med att havet stiger. Längs bebodda kuststräckor innebär nivåhöjningen emellertid att de naturliga kustekosystemen i ökande om- fattning hamnar ”i kläm” mellan å ena sidan havet, å andra sidan mark som människan på ett eller annat sätt har tagit i bruk, exempel- vis för infrastruktur, bebyggelse eller jordbruk. Kustnära våtmarker är redan på väg att trängas undan i rask takt genom direkt exploatering, och havsnivåns höjning kan medföra att de bör- jar försvinna ännu snabbare. Farhågor har också väckts om att atoller och liknande korallrev kan dränkas och brytas ned genom att korallerna inte hinner växa till i takt med havsnivåns höj- ning.

Korallreven är mycket känsliga även för an- dra slags påverkan, och numera visar de ofta tecken på skador i form av blekning. Denna blekning beror på att koralldjuren i samband med stress gör sig av med algerna som de nor- malt lever i symbios med. Utan hjälp av algernas fotosyntes slutar korallerna växa, och till sist dör de om algerna inte återkommer. Den pågående

De tropiska havens korallrev har i ökande omfattning tagit skada av de senaste decennierna höga vattentempe- raturer. Korallerna har blekts, och på många håll har de också dött.  
– Från Amerikanska Samoa 2015.





Som en direkt följd av koldioxidhaltens ökning i atmosfären blir havsvattnet allt surare. Figuren visar hur det ytliga havsvattnets globala genomsnitts-pH kommer att förändras i fortsättningen om koldioxidhalten i luften förändras i enlighet med något av RCP-scenarierna (se s. 86). – Underlag från IPCC 2013, fig. TS20a.

uppvärmningen är ett av de allvarligaste hoten mot tropikernas korallrev – redan en höjning av vattentemperaturen med 1–2 grader tycks vara nog för att de ska ta skada. Sedan 1980-talet har de drabbats av massdöd vid en rad tillfällen, i allmänhet efter tillfälliga temperaturtoppar i samband med väderfenomenet El Niño. Under de ovanligt varma åren 2015 och 2016 förekom korallblekning under längre tid och inom större områden än vad som någonsin tidigare noterats. Kommande decenniers uppvärmning befaras leda till än mer omfattande skador på de tropiska korallreven och deras ekosystem.

Koralldöden kan tjäna som en illustration av vad extrema vädersituationer kan betyda för fauna och flora. Vi kan långt ifrån alltid räkna med att ekosystemens egenskaper och utbredning stillsamt och gradvis kommer att ändras i takt med genomsnittsklimatets långsiktiga förändringar. I många fall kommer naturmiljön snarare att genomgå snabba och dramatiska omvälvningar orsakade av begränsade perioder med svår hetta, extrem torka, exceptionella vattenflöden eller intensiva oväder. När vädret sedan återgår till mer normala förhållanden kan motståndskraftiga ekosystem åtminstone delvis återta sina ursprungliga egenskaper. Hos känsligare ekosystem kan en enda extrem vädersituation däremot orsaka bestående skador. Extremt väder inträffar per definition mer eller mindre sällan, men en klimatförändring kan innebära att det börjar återkomma oftare – eller att det blir än mer extremt.

## Koldioxidutsläppen försurar havet oavsett hur de förändrar klimatet

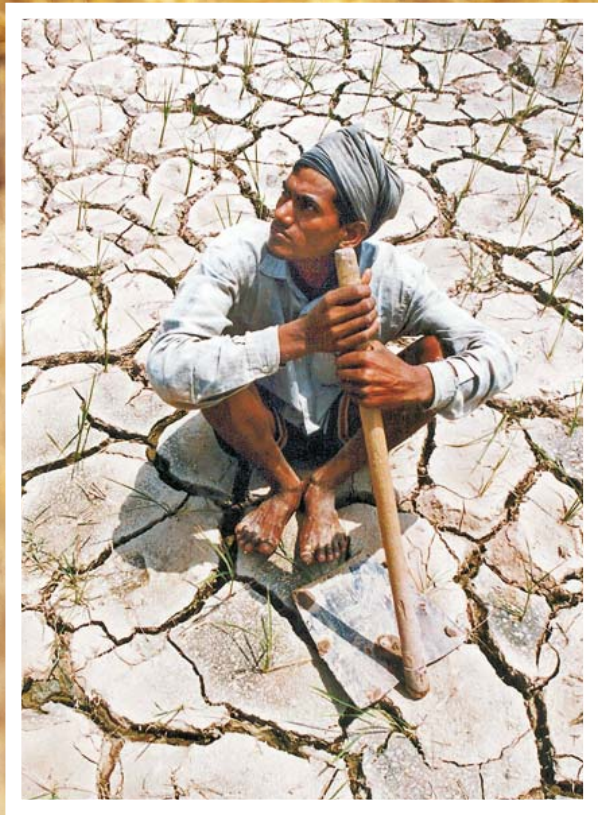
Vid sidan om sin inverkan på växthuseffekten och klimatet har människans utsläpp av koldioxid också en annan effekt som kan få mycket omfattande konsekvenser för havsmiljön. En del av den koldioxid som tas upp av havsvattnet omvandlas nämligen till kolsyra, vilket innebär att havet nu *försuras*. Ytvattnets pH-värde har hittills sjunkit med 0,1 enhet sedan förindustriell tid, från ca 8,2 till 8,1. Om utsläppen av koldioxid fortsätter att öka som hittills kommer pH-värdet att sjunka med ytterligare 0,3 enheter fram till år 2100, oavsett hur utsläppen inverkar på klimatet. I så fall kommer havet att bli surare än det sannolikt har varit på mer än 50 miljoner år.

Utvecklingen är till nackdel för alla havsorganismer med skelett eller skal uppbyggda av kalk. Till dem hör främst koralldjur och vissa planktonarter men även mollusker, tagghudingar och flera andra artgrupper. Blir vattnet för surt kommer dessa organismers kalkbildning att försvåras eller rentav omöjliggöras.

Få sådana effekter har hittills påvisats annat än i laboratoriemiljö, men det finns iakttagelser i fält av skalförtunning hos mollusker och foraminiferer (en grupp encelliga planktondjur) som har satts i samband med försurning. Åtskilligt talar också för att försurningen har bidragit till den nutida korallblekningen.

I takt med att havsvattnets pH-värde sjunker kan skadeverkningarna framöver bli betydligt mer omfattande. Redan inom något decennium kan vattnet på en del håll längs kusterna och i polartrakterna tidvis bli så surt att det börjar lösa upp vissa typer av kalkskelett. Om atmosfärens koldioxidhalt längre fram når nivåer kring 500–600 ppm eller däröver kommer sådana effekter att börja uppträda mer allmänt.

Medan åtskilliga havslevande organismer på så sätt riskerar utslagning är den ökade koldioxidtillförseln till fördel för somliga andra arter, främst en del växtplankton och vattenlevande blomväxter. Förändringarna av havsvattnets kemiska egenskaper kan därigenom orsaka rubbningar i havsekosystemen som är mycket svåra att förutse i detalj.



# IO Klimatförändringarna och samhället

Under de gångna årtusendena har människan tagit nästan hela jorden i besittning. Hon har lyckats anpassa sin livsföring och sitt näringsfång till de mest skilda klimatförhållanden, från kylan i Sibirien och Arktis till hettan i subtropiska halvöknar och tropiska regnskogar. På olika sätt kan mänskligheten säkert också anpassa sig till ett framtida klimat där jordens medeltemperatur har stabiliserat sig några grader ovanför nuvarande nivå. Men själva förändringen kommer att vara förenad med stora problem och stora kostnader, kanske också stort lidande.

Samhällets anpassning till ett nytt klimat försvåras framför allt av att de väntade klimatförändringarna lär bli snabbare än allt annat i den vägen som människan har upplevt, åtminstone under de senaste tiotusen åren.

I många områden som har varit befolkade sedan urminnes tider skulle klimatet inom loppet av några få decennier kunna bli så ogynnsamt att traditionella näringar kraftigt försvagas eller helt slås ut. På en del andra håll skulle det nya klimatet kunna vidga försörjningsmöjligheterna och därigenom skapa livsrum för ett ökat antal människor. Men alla plötsliga förändringar av levnadsvillkoren – såväl positiva som negativa – tvingar fram resurskrävande omställningar i samhället och skapar risk för instabilitet och konflikter.

## Klimatförändringarna hotar den globala livsmedelsförsörjningen

Jordbruket, den mest grundläggande och livsnödvändiga av människans näringar, hör också till dem som är mest väderkänsliga. I alla tider har främst nederbördens men även temperaturens variationer åstadkommit kraftiga svängningar i skörderesultaten från ena året till

det andra. Torka, frost eller andra ogynnsamma väderförhållanden har vid otaliga tillfällen i det förgångna medfört missväxt, ofta följd av hungersnöd och ekonomisk kris.

Under 1900-talets andra hälft genomgick jordbruket en dramatisk utveckling, framför allt i höginkomstländerna men efterhand också i många fattigare länder. Mekanisering, växtförädling, kemisk bekämpning av skadliga organismer, konstbevattning och riklig användning av handelsgödsel drev raskt upp den genomsnittliga avkastningen, ofta till flerfald högre nivåer än tidigare. Den globala livsmedelsproduktionen ökade därigenom ännu snabbare än jordens befolkning, och livsmedelspriserna blev för det mesta allt lägre. Vädret orsakade fortfarande skiftningar i skörderesultaten från år till år, men i synnerhet bevattningen minskade risken för total missväxt.

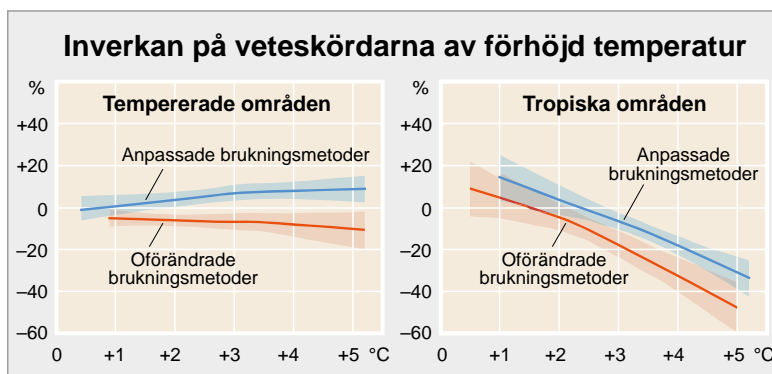
På senare år förefaller den här positiva utvecklingen ha brutits, åtminstone delvis som ett resultat av vad som hänt med klimatet. Särskilt i de varmare länderna har klimatförändringarna i många fall tenderat att reducera växtodlingens avkastning. Skördarna av vete och majs tycks ha påverkats negativt även sett i global skala. Livsmedelsprisernas långsiktiga nedgång ser ut att ha upphört, och vid åtskilliga tillfällen har extrema väderförhållanden i viktiga producentländer följts av snabba prishöjningar.

Jordbruket har en beprövad förmåga att anpassa sig till varierande yttre omständigheter, och det finns flera sätt att begränsa klimatförändringarnas ogynnsamma inverkan på skörderesultaten. Till anpassningsmöjligheterna hör byte av gröda, förändrad tidpunkt för sådd samt optimering av gödsling och bevattning.

Den pågående ökningen av koldioxidhalten i luften har dessutom en gynnsam direktverkan på grödorna som kan motverka haltökningens negativa klimateffekter. Denna ”koldioxidgöds-

Kommande decenniernas klimatpåverkan kan möjliggöra ökade skördar i många höginkomstländer, men de väntas samtidigt medföra tilltagande problem för jordbruket i fattigare länder.

– Spannmålsskörd i Skåne. Infällda bilden: Indisk lantarbetare, sysslös eftersom grödan har torkat bort.



I tempererade områden får en uppvärmning relativt måttlig inverkan på veteskördarna, men i tropikerna minskar avkastningen kraftigt med stigande temperatur.

I viss mån kan värmens negativa effekter på veteproduktionen motverkas genom bevattning, sortbyten eller liknande anpassningar av odlingen. Diagrammen ovan sammanfattar resultat från ett stort antal studier på olika håll i världen.

– Underlag från IPCC 2014, fig. 7-4.

ling” ger vegetationen möjlighet till ökad fotosyntes och därmed ökad tillväxt (se s. 117). Eftersom hög koldioxidhalt också förbättrar växternas vattenhushållning kan haltuppgången bli särskilt gynnsam i jordbruksområden med brist på vatten. Den gynnar å andra sidan inte bara grödor utan också ogräs, och den kan därtill försämra skördarnas kvalitet. I ris, vete och vallgrödor sjunker exempelvis halterna av protein och spårämnen såsom järn och zink när luftens innehåll av koldioxid ökar.

Trots koldioxidgödslingen och anpassningsmöjligheterna väntas en fortsatt uppvärmning göra det allt svårare att upprätthålla växtodlingens produktivitet. Enligt åtskilliga studier missgynnas en rad olika grödor när dagstemperaturen överstiger 30 grader. Åtminstone i tropikerna lär avkastningen av vete, ris och majs minska påtagligt om medeltemperaturen når 2 grader eller mer över de nivåer som rådde mot slutet av 1900-talet. Kring ekvatorn är det redan nu i varmaste laget för en del grödor.

På tempererade och höga breddgrader har uppvärmningen hittills i många fall bidragit till ökad produktivitet i jordbruket, även om det också finns en rad exempel på motsatsen. I dessa trakter skulle en fortsatt temperaturhöjning på kort sikt kunna förbättra skörderesultaten ytterligare. På längre sikt är risken likväl stor att uppvärmningen får negativa följder för avkastningen även här.

Därför är det osäkert om jordbruket under fortsatt klimatförändring kommer att kunna höja sin produktion i takt med världsbefolkningens tillväxt och ökande behov av livsmedel. Enligt en bedömning av FN:s klimatpanel skulle en förhöjning av den globala medeltemperaturen med 4 grader eller mer utgöra ett allvarligt hot mot livsmedelsförsörjningen världen över.

Liksom förr kommer skördarna även framöver att vara minst lika avhängiga av nederbör-

dens förändringar som av temperaturen. I de varmare länderna har odlingen blivit allt mer beroende av konstbevattning, och jordbruket svarar i dag för merparten av människans totala färskvattenförbrukning. Vattenreserverna har på många håll i världen börjat bli ansträngda, och sannolikt är det just färskvattentillgången som mer än någon annan faktor sätter gränsen för hur många munnar den framtida jordbruksproduktionen kommer att kunna mätta. I Syd-europa och andra områden som kan vänta en markant nederbördsminskning lär behovet av bevattning öka kraftigt under kommande decennier. Det är oklart hur länge de tillgängliga vattenresurserna kan tillgodose det behovet till fullo.

I kombination med hetta skulle en ökande brist på färskvatten kunna medföra drastiskt försämrade förutsättningar för jordbruk i många områden, inte bara på tropiska och subtropiska breddgrader utan också på högre latituder. Resursstarka jordägare i de rika länderna kan ha vissa möjligheter att hantera även sådana omständigheter, men för fattiga småbrukare i utvecklingsländerna är utrymmet för klimatanpassningar långt mer begränsat.

De förändringar av jordbrukets villkor som utsläppen av växthusgaser åstadkommer kan därigenom medverka till att inkomstklyftorna mellan olika delar av världen vidgas, kanske med tilltagande konflikter mellan rika och fattiga länder som följd.

## Det svenska jordbruket kan bli förhållandevis gynnat ...

Sverige har alltid befunnit sig i utkanten av den del av världen som lämpar sig för jordbruk. Att skördarna generellt blir mindre här än i exempelvis Tyskland beror i huvudsak på vårt svala klimat. Det är framför allt den relativt korta vegetationsperioden som sätter ett tak för det svenska jordbrukets produktivitet – endast under en ganska begränsad del av året är temperaturen här tillräckligt hög för att grödorna ska kunna växa till. Vissa år kan även frostsador under vår eller sensommar försämra skörderesultaten.

Det här innebär att den globala uppvärmningen bör kunna gynna jordbruket mer i Sverige än på de flesta andra håll i världen. I landets sydligare delar skulle vegetationsperioden



PER-OLOV ERIKSSON / N / IBL

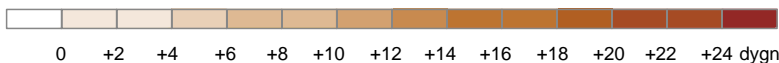
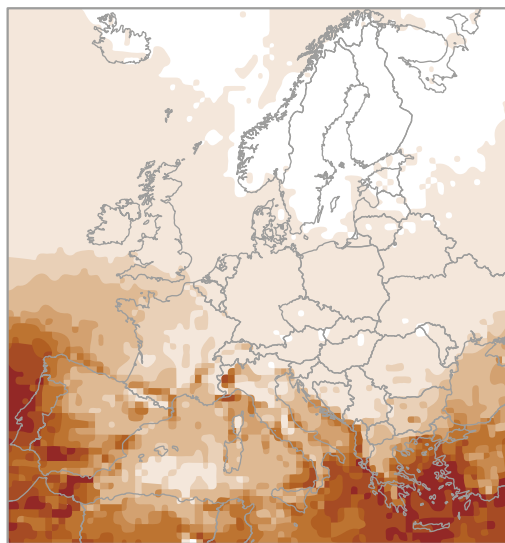
I takt med att temperaturen stiger kan solros och majs komma att ersätta stråsäden på allt fler åkrar i Syd- och Mellansverige.

kunna förlängas med ett par månader under de kommande hundra åren (se s. 115), och där kan det på sikt bli möjligt att bärga två skördar varje år. Vegetationsperioden förlängs även i landets nordligare delar, men där skulle bristen på solljus under hösten kunna begränsa jordbrukets möjligheter att dra nytta av ett mildare klimat.

### Längsta sommartorka, förändring under tjugohundratalet

Under en nutida genomsnittssommar brukar de längsta sammanhängande perioderna utan nämnvärd nederbörd uppgå till 8–14 dygn i större delen av Nordeuropa, men tre veckor eller mer kring Medelhavet. I södra Europa kommer dessa torrperioder sannolikt att förlängas under loppet av nuvarande sekel.

– Från Rossby Centre, SMHI.



Uppvärmningens inverkan på skörderesultaten lär komma att skilja sig mycket mellan olika grödor. Värmen befrämjar i särskilt hög grad produktionen av rotfrukter såsom sockerbeter och potatis, eftersom dessa kan fortsätta att växa så länge vegetationsperioden varar. Hos spannmål upphör tillväxten däremot så snart säden har mognat, och mognaden tenderar att inträffa tidigare på året ju varmare det är. För sådana grödor får uppvärmningen därför relativt små effekter på avkastningen. Ändå kan man vänta ett ökat intresse för odling av exempelvis höstvetete, eftersom höstsådda grödor gynnas mer av det nya klimatet än motsvarande vårgrödor. De har större förmåga att utnyttja vegetationssäsongens förlängning, och temperaturhöjningen ger dem ökade möjligheter att överleva vintern också uppe i norr.

Klimatförändringen öppnar därtill möjligheter för införande av nya, mer värmekrävande grödor i Sverige. I landets sydligaste delar odlas redan en hel del majs och i liten skala även solros och sojaböna. De grödorna kan efterhand få ökad utbredning. Med tiden skulle också storskalig vinodling kunna bli genomförbar i Sydsverige. Skåne skulle redan i mitten av det här seklet kunna ha samma temperaturförutsättningar för sådan odling som Tyskland har i dag. Men klimatet anger bara teoretiska ramar för jordbrukets inriktning – det är efterfrågan och lönsamhet som sedan avgör vad som faktiskt blir odlat. Åtminstone på kort sikt lär det svenska jordbrukets produktivitet påverkas mer av bruksmetoder och val av grödor än av vad som händer med klimatet och luftens koldioxidinnehåll.

### ... men värmens positiva verkan kan ibland bli svår att utnyttja

Även om uppvärmningen i sig möjliggör större genomsnittsskördar i Sverige kan den få bieffekter som gör det svårt att förverkliga avkastningsökningen. Hit hör att landets sydöstra delar allt oftare kan få problem med sommartorka (se s. 111). Vissa år skulle där kunna bli så torra att det leder till ren missväxt, och avkastningens variationer från år till år kan därför bli större än de är nu.

Men också den nederbördsökning som är att vänta i hela landet under vinterhalvåret kan bli bekymmersam för jordbruket. I vår del av värl-



Koloradoskalbaggar kommer då och då till Sverige med grönsaks-transporter eller burna av vindar från kontinenten. Hittills har de svenska vintrarna omöjliggjort en varaktig etablering här, men i ett förändrat klimat skulle arten kunna bli bofast i Sverige.

– Larv av koloradoskalbagge på potatisblast.



Mögelsvampar av släktet *Fusarium* kan angripa all slags spannmål. Svamparna gynnas av värme i kombination med fukt. De har tidigare främst förekommit i områden med varmare klimat än Sverige, men sedan början av 2000-talet har de fått ökat fäste även hos oss. Påverkade sädesax får ofta en laxrosa färg. Den allvarligaste effekten är att svamparna kan bilda giftiga ämnen.

den har åkrarna för det mesta större behov av dränering än av bevattning. Oavsett hur tidigt våren anländer kan vårbruket inte inledas förrän jorden hunnit torka upp efter vinterregn och snösmältning. Om vintrarna blir blötare ökar risken att diken och dräneringsrör inte förmår leda bort överskottsvattnet tillräckligt snabbt. Särskilt i västra Götaland kan befintliga dräneringssystem redan inom en snar framtid visa sig otillräckliga.

Klimatförändringarna medför därtill ökad risk för angrepp av skadeorganismer på våra jordbruksgrödor. Flera av de skadeinsekter som härjar nere på kontinenten uppträder ännu bara i begränsad omfattning i Sverige, eftersom vinterkylan här gör det svårt för dem att övervintra. En temperaturhöjning skulle ge den svenska växtodlingen tilltagande problem med angrepp inte minst av bladlöss och av de virusjukdomar som bladlössen sprider. Uppvärmningen kan också möjliggöra etablering av koloradoskalbagge, en art som orsakar svåra skador på potatis men som hittills bara har förekommit tillfälligt i landet.

Svampangrepp på grödorna – exempelvis av mjöldagg, mjöldryga, bladmögel och rostsvampar – underlättas i allmänhet av såväl väta som värme. Många skadesvampar kan få ökad utbredning i Sveriges nordligare delar om det blir både fuktigare och varmare där på sommaren. Svampangreppen påverkar inte bara avkastningens storlek utan kan också försämra grödornas kvalitet till den grad att de blir obrukbara. En del av dem kan ge upphov till höga halter av mykotoxiner (svampgifter) i spannmål, och potatisbladmögel medför inte sällan omfattande angrepp av brunröta hos potatis.

Även ogrästtillväxten kan bli mer besvärande när luftens temperatur och koldioxidhalt stiger. Liksom den befarade ökningen av insekts- och svampangrepp skulle en sådan utveckling kunna motverkas genom intensivare kemisk bekämpning. Sett ur hälso- och miljösynvinkel vore den strategin allt annat än välkommen, men att helt avstå från kemiska bekämpningsmedel kan bli problematiskt i det nya klimatet. Den ekologiska odlingen kan därför få ökande svårigheter att åstadkomma skördar av önskvärd kvantitet och kvalitet.

I stort sett bör utsläppen av växthusgaser ändå innebära större fördelar än nackdelar för de kommande hundra årens jordbruk i Sverige

och andra nordliga trakter. Sannolikt kommer den globala jordbruksproduktionens tyngdpunkt i viss mån att förskjutas norrut. En ökad avkastning på höga breddgrader skulle åtminstone inledningsvis kunna uppväga eventuella försämringar av skördarna i sydligare områden.

En annan sak är i vad mån det sistnämnda kan bli till glädje för befolkningen i tropiska och subtropiska länder. Av både politiska och ekonomiska skäl kan det vara svårt för en fattig nation att kompensera utebliven jordbruksproduktion med ökad import från en annan del av världen. Dessutom kan minskad avkastning för jordbruket i andra länder vålla bekymmer även i Sverige – vi har gradvis gjort oss allt mindre självförsörjande, och vår nutida livsmedelskonsumtion är till mer än hälften beroende av import från omvärlden.

Att jordbruksområdena som sådana inom överskådlig tid skulle vandra norrut är knappast att vänta. Skogarna i Norrlands inland lär inte ersättas av åker i första taget, och inte heller barrskogsbältena i Ryssland och Kanada. Även om temperaturklimatet där skulle möjliggöra odling i framtiden kommer jordmånen i större delen av regionen att förbli mager och ofruktbar under lång tid.

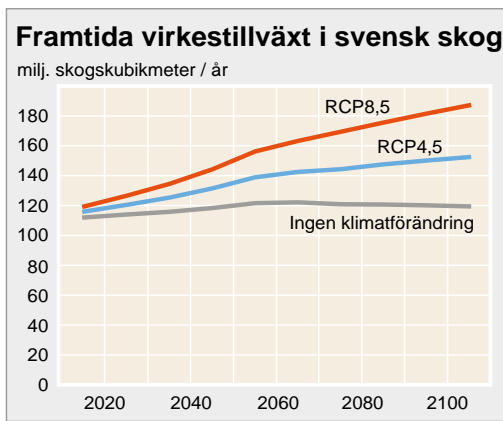
## Goda utsikter för skogsbruket, men orosmoln finns med i bilden

På våra breddgrader bör stigande temperatur och koldioxidhalt kunna få gynnsamma effekter också för skogsbruket. Enbart genom att förlänga vegetationsperioden skulle uppvärmningen märkbart kunna öka skogstillväxten i Sverige under innevarande sekel. Värmen påskyndar dessutom nedbrytningen av dött organiskt material i markens humusskikt, vilket ökar frigörelsen av kväve och andra näringsämnen (se s. 117). Detta kan få en avsevärd betydelse för de svenska skogarnas tillväxt, som i dagsläget till stor del begränsas av näringsbrist.

Å andra sidan begränsas trädens tillväxt tidvis också av brist på vatten, särskilt i södra Sverige. Torra år kan virkestillväxten där sjunka nedåt hälften av den normala. Sommartorka lär framöver bli ett tilltagande bekymmer för skogsbruket. Granen är särskilt känslig, medan tallen brukar klara sig bättre.

Enligt en samlad bedömning skulle klimatförändringarna till slutet av det här århundradet





För virkestillväxten i Sverige är koldioxidutsläppen och deras klimateffekter övervägande gynnsamma. Diagrammet bygger på simuleringar av såväl skogsbrukets som klimatets förändringar (de sistnämnda enligt klimatscenarioerna RCP4,5 och RCP8,5). Den beräknade tillväxtökningen beror främst på klimatet, men också på att virkesproduktionen även i fortsättningen väntas överstiga avverkningen (jämför med diagrammet på s. 72), vilket innebär att skogen växer ”med ränta på ränta”.

– Data från SKA 15, Skogsstyrelsen.

ändå kunna höja den svenska skogens produktivitet med drygt 20 procent, även i ett scenario där utsläppen av växthusgaser efterhand börjar minska igen. Om utsläppen fortsätter att öka skulle skogen kunna växa ännu snabbare, åtminstone inom det närmaste seklet. Den största procentuella uppgången är att vänta i landets nordligare delar, men räknad i absoluta mått lär virkestillväxten öka mest i söder.

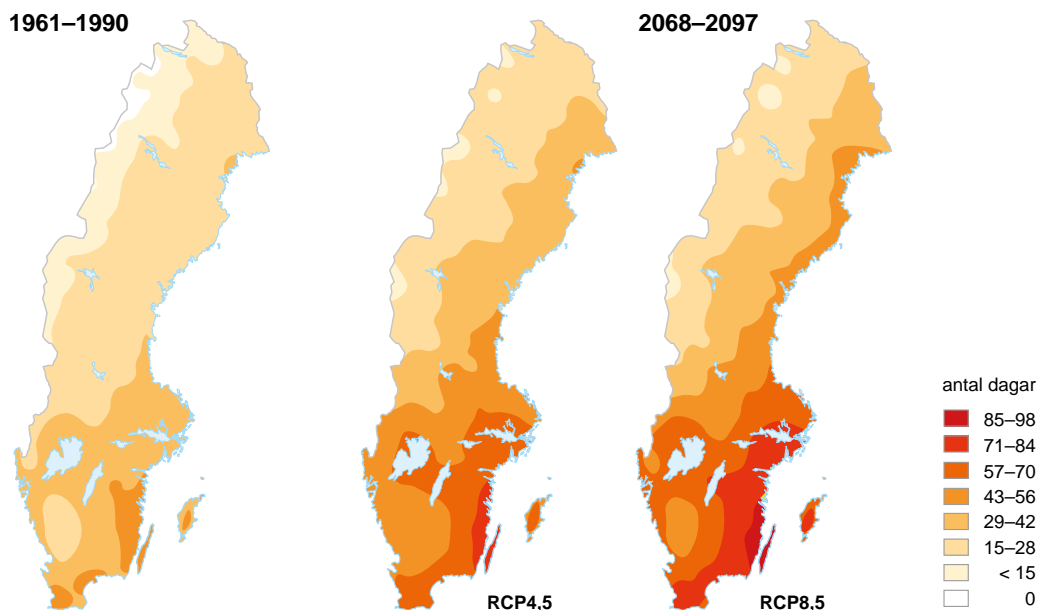
Risken finns å andra sidan att tillväxtökningen åtföljs av vissa försämringar av virkets kvalitet. I likhet med jordbruksgrödorna kan skogen också i tilltagande omfattning drabbas av skadeorganismer som hittills har haft svårt att klara kylan i norr. Angrepp av exempelvis snytbagge, tallstekel och svampar såsom rotticka och tallskyttesvamp förekommer fortfarande främst i södra Sverige, men en temperaturhöjning kan innebära att problemen sprider sig norrut.

I söder kan samtidigt granbarkborrens härjningar förvärras genom att värmen gör det möj-

ligt för den att frambringa två nya generationer per år i stället för bara en. Mot slutet av seklet skulle barkborreangreppen på så sätt kunna bli mångfald svårare än de har varit hittills. I Syd-sverige har också flera för landet nya skadeinsekter påträffats de senaste åren. Ett exempel är den ungerska gransköldlusen, som 2010 åstadkom omfattande skador på granskog i Skåne efter att tidigare bara ha varit känd från Central- och Sydosteuropa.

Skogsbränder är i våra dagar betydligt mindre vanliga i Sverige än förr (se s. 11), dels tack vare effektiv brandbekämpning, dels genom att skogsbruket har reducerat förekomsten av ”bränsle” i form av döda torrträd i skogarna. Mycket talar emellertid för att brandfrekvensen börjar stiga igen om somrarna blir allt varmare, torrare och kanske även åskrikare. Brandrisken tilltar sannolikt mest i Östersjöländskapen, den del av landet som redan nu är mest utsatt för bränder.

### Brandrisksäsongens längd

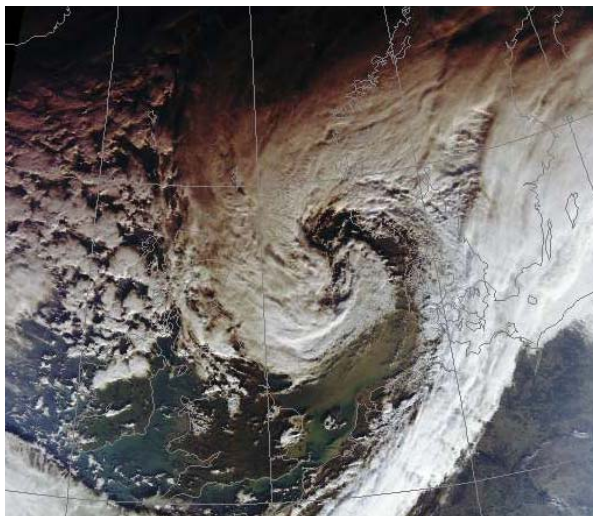


Även om vår klimatpåverkan mot slutet av seklet blir mindre än den är i dag (som i scenario RCP4,5) måste vi räkna med att risken för skogsbrand ökar i Sverige, särskilt i landets östra delar.

– Från Sjøkvist *et al.* 2016.

## STORMEN GUDRUN – SVERIGES SVÄRASTE NATURKATASTROF

MODIS / DUNDEE SATELLITE RECEIVING STATION



När stormen Gudrun på kvällen den 8 januari 2005 drog in över Sydsverige uppmättes orkanvindar vid Hanö – 33 m/s i genomsnitt och hela 42 m/s i byarna. Vid Hallandskusten drev blåsten upp vattenståndet halvannan meter över det normala. Färje- och flygförbindelser stoppades, liksom all trafik på Öresundsbron. Kärnkraftverken i Ringhals och Barsebäck fick stängas, eftersom saltvattnet som piskades upp från havet och blåste in över land skapade risk för kortslutningar och överslag.

Elavbrott kan ändå vara svåra att undvika när det stormar, och ingen blev därför förvånad när lamporna började slockna i gårdar, byar och samhällen inne i Götalands skogsbygder. Vinden avtog framåt morgonen, men det förblev mörkt och kallt i husen. När gryningen kom och folk började se sig om i grannskapet hade många svårt att känna igen sig. Där träden förut vuxit höga syntes nu bara ett oöverskådligt virrvarr av knäckta eller kullfallna stammar. Stormen hade fällt skog i en omfattning som aldrig tidigare noterats i Sverige.

På några få timmar hade ovädret vräkt omkull minst tvåhundra miljoner träd, nästan lika mycket som skogsbruket normalt avverkar i hela landet under loppet av ett år. I Kronobergs län, som var värst drabbat, hade så många träd fallit att det motsvarade närmare sex års avverkning. Att skadorna blev så svåra var delvis en följd av att vindbyarna hade snuddat vid orkanstyrka även i inlandet, något som är mycket ovanligt. Eftersom vintern var mild och nederbördsrik var marken dessutom otjälad, blöt och mjuk, vilket gav träden dåligt fäste.

Av Sydsveriges alla elledningar var 80 procent utslagna genom att träd hade blåst ned över dem. På morgonen den 9 januari var 415 000 hushåll utan ström, och 300 000 saknade dessutom teleförbindelse. Snarare än

Några dagar in i januari 2005 antydde meteorologernas prognosmodeller att ett djupt lågtryck snart skulle kunna bildas över Nordatlanten. På eftermiddagen den 7 januari varnade SMHI för att det kommande dygnet kunde bjuda på storm. Lågtrycket fanns då ännu inte i sinnevärlden, men på kvällen uppkom utanför Irland en liten virvel längs gränsen mellan kalluften i norr och den milda och fuktiga luften längre söderut.

Rakt ovanför det nybildade lågtrycket, närmare en mil upp i luften, fanns ett vindbälte där det blåste mer än 80 m per sekund. Denna ”jetström” bidrog till att lågtrycket fördjupades extremt snabbt och kraftigt. När det på morgonen den 8 januari drog fram över Storbritannien hade det redan utvecklats till ett intensivt oväder. På bara några timmar korsade lågtrycket sedan Nordsjön under fortsatt fördjupning. Under eftermiddagen, då satellitbilden här intill togs, sänkte sig en del av jetströmmen gradvis ned mot jordytan. Detta skulle visa sig få förödande följder när ovädet kort därefter svepte in över Götaland.

att reparera elnätet gällde det nu på många håll att helt göra om den elektrifiering av landsbygden som hade genomförts i början av 1900-talet. Några dagar efter ovädet var femtusen man sysselsatta med sådant arbete, många av dem influgna från andra länder. Ändå dröjde det fyrtio dagar tills elförsörjningen var återställd hos samtliga fastboende i området. Nästan lika lång tid tog det att åter få i gång all järnvägstrafik – träden hade inte bara fallit över spåren utan också demolerat kontaktledningarna. Uppröjningen av vindfällena ute i skogarna tog mer än ett år i anspråk. Den virkesmängd som behövde tas om hand motsvarade 1,4 miljoner billaster.

Stormen Gudrun räknas som den sväraste naturkatastrofen i Sverige i modern tid. Ovädet lämnade efter sig en nota på drygt tjugo miljarder kronor. Enbart skogsägarnas förluster värderades till tolv miljarder. Arton människor miste livet, sju av dem under själva stormnatten, de andra under uppröjningsarbetet.



GÖRANSSONS ÅKERI AB

Efter stormen travades omhändertaget virke på ett nedlagt flygfält i sydvästra Småland. Timmerlaget var snart störst i sitt slag i världen – det blev 13 m högt, 50 m brett och 2 km långt. Ändå rymdes där bara någon procent av allt virke som stormen hade fällt.

På en del andra håll i världen har skogsbrand-frekvensen redan ökat påtagligt. I många fall anläggs bränderna avsiktligt eller oavsiktligt av människan, men i exempelvis Medelhavsområdet och subarktiska delar av Nordamerika tycks klimatets förändringar vara en väl så viktig orsak till att skogarna nu har börjat brinna oftare.

I Europa har skogarna också drabbats av omfattande stormskador under senare decennier. I januari 2005 fällde exempelvis stormen Gudrun 75 miljoner kubikmeter virke enbart i vårt land. Att stormfällningarna har tilltagit beror mest på att skogen och skogsbruket gradvis har ändrat karaktär, men genom att vintrarna blivit allt mildare och blötare har träden dessutom sämre fäste i marken under den stormigaste årtiden än förr. Det sistnämnda innebär att fortsatt uppvärmning och nederbördsökning kan möjliggöra än mer omfattande stormfällningar i Sverige framöver, trots att själva stormfrekvensen inte väntas tillta nämnvärt. Risken att träden blåser omkull ökar också om de till följd av klimatförändringarna växer sig allt högre.

Skogsägarna har liksom lantbrukarna vissa möjligheter att anpassa sin odling till ett nytt klimat, i första hand genom byte av trädslag. Trädens långsamma tillväxt innebär emellertid att anpassningar av det slaget drar ut på tiden. Innan träden blivit avverkningsmogna kan klimatet ha hunnit bli ett helt annat än när de planterades.



Att senare års stormar har fällt ovanligt mycket skog i Sverige kan knappast förklaras med att det skulle blåsa mer nu än tidigare. Snarare handlar det om att skogsbruket har ökat skogens stormkänslighet. De luckor i skogslandskapet som skapas av dagens hyggesbruk gör det lättare för stormbyarna att få grepp om träden som står kvar längs hyggeskanterna. Därtill har skogsägarnas satsningar på gran fått detta förhållandevis vindkänsliga trädslag att dominera allt mer i Syd- och Mellansverige. Den ökade virkestillväxten innebär också att det nu finns fler och större träd som kan blåsa ned än förr, då skogarna var glesare. Men även klimatförändringar kan ha spelat in – genom att förekomsten av tjäle minskat har trädens fäste i marken försämrats vintertid.

– Från MSB 2013, med kompletteringar från SkogsSverige.

## Fisket måste räkna med stora förändringar

Fisket längs kusterna och ute till havs har ständigt fått leva med att fångstvolymerna skiftat. Perioder med ett överflöd av fisk har avlösts av dåliga tider och vice versa, ofta i en tidsskala på flera decennier. Av allt att döma har dessa svängningar i många fall orsakats av naturliga klimatvariationer.

Samtidigt är det helt uppenbart att havsfiskbestånden i våra dagar påverkas mer av det intensiva fisket än av klimatets fluktuationer. En stor del av de kommersiellt viktigaste bestånden måste numera betecknas som överexploaterade. Världens totala fångster av havsfisk stagnerade på 1990-talet, och möjligheterna till en framtida fångstökning förefaller mycket begränsade.

De klimatförändringar som människan nu åstadkommer kan likafullt få stor inverkan på bestånden av havsfisk och därmed också på fisket till havs. Beståndens utbredningsområden förskjuts när temperaturen stiger, och vi ser redan tendenser till att varmetåliga fiskarter står för en ökande andel av fångsterna. Det mesta talar för att produktionen av fisk efterhand kommer att öka på nordliga breddgrader, men att den minskar i tropiska vatten. Liksom när det gäller jordbruket kan de väntade produktionsförändringarna därigenom gynna rika nationer på fattigare länders bekostnad. Vad uppvärmningen betyder för den totala produktionen av havsfisk i världen är mer osäkert, men enligt en bedömning skulle de globala fångsternas ekonomiska värde kunna minska redan efter en temperaturhöjning med 2 grader.

Östersjöns fiskbestånd skulle som redan nämnts kunna stå inför drastiska förändringar (se s. 125). I kombination med uppvärmningen skulle en eventuell minskning av vattnets saltinnehåll kunna tränga undan både torsk och vissa andra saltvattensarter, vilket skulle förändra fiskets förutsättningar i grunden. Det är i praktiken omöjligt att i dag avgöra vilken eller vilka arter som kommer att utgöra basen för Östersjöfisket mot slutet av innevarande sekel.

Uppvärmningen kan också medföra att eftertraktade fiskarter trängs undan från sjöar och vattendrag. I de sydsvenska åarna kan temperaturen sommartid bli alltför hög och vattenföringen alltför låg för att lax och öring ska kunna överleva och fortplanta sig. Värmen

hotar därtill de få kvarvarande sydsvenska bestånden av kallvattenberoende insjöfiskar såsom röding och siklöja. Å andra sidan gynnas naturligtvis de fiskarter som är beroende av relativt hög temperatur för att kunna vara aktiva och söka föda. Hit hör exempelvis abborre och gädda – för dem bör uppvärmningen medföra snabbare tillväxt.

Även för fiskodlingen möjliggör temperaturhöjningen en ökning av produktionstakten i nordliga trakter, men i varmare länder är utsikterna sämre. Det kan bli svårt att åstadkomma den globala ökning av mängden odlad fisk som kommer att behövas om den växande världsbefolkningen framöver ska kunna äta lika mycket fisk per capita som i dag.

## Uppåt för svensk sommarturism, dystert för vintersporterna

Turistnäringens beroende av väder och klimat kan mäta sig med jordbrukets. Några veckor med ihållande sol eller regn i något hörn av Europa kan vara nog för att turistströmmarna ska ändra riktning över hela kontinenten.

För sommarturismen i Sverige och andra nordliga trakter lär de kommande klimatförändringarna i huvudsak innebära goda nyheter. Den väntade uppvärmningen borde inte minst kunna förlänga den korta badsäsongen och höja badtemperaturerna ett stycke ovanför dagens marginellt njutbara nivåer. Under framtida högsomrar skulle de sydligare delarna av

I dag är det till nackdel för badturismen vid Skånes östkust (t.h.) att det brukar vara betydligt svalare där än vid exempelvis Costa Brava i Spanien (nedtill).

Om hundra år kan temperaturskillnaden i stället vara till Skånes fördel – vid det laget kan sommarhettan ha blivit allt mer besvärande vid Medelhavet. Hur kommer det då att se ut längs Österlens stränder?



STAFFAN ANDERSSON / IBL



LOOK / IBL



Nutida midvinter i Stockholm. Skidspår på Gärdet i februari 2016. Tre veckor kvar till Vasaloppet.

Östersjökusten rentav kunna konkurrera med Medelhavskusten som centrum för europeisk badturism – i Sydeuropa kan hettan vid den årstiden ha blivit svåruthärdlig. Besökstrycket i attraktiva svenska kusttrakter skulle på så sätt kunna mångfaldigas. Det räcker med att en procent av dagens Medelhavsturism överförs till Sverige för att antalet turister här ska fördubblas. Uppvärmningen av Östersjön skulle å andra sidan också kunna få negativ inverkan på badturismen genom att den kan medföra ökad förekomst av algblomningar under högsommaren.

I nordligaste Sverige skulle regnmängderna sommartid kunna öka så mycket att det upplevs som besvärande. Dessutom kan fjällen förlora en hel del av sin dragningskraft om de till följd av uppvärmningen efterhand beskogas. Turer längs exempelvis Kungsleden blir inte vad de en gång har varit om de får karaktär av skogs promenader snarare än fjällvandringar (se s. 123). De befarade förändringarna i fjällskapet ger också anledning till oro för rennäringens och den traditionella samiska kulturens framtid.

För vintersporter och den turistnäring som är knuten till dem är utsikterna övervägande dystra. I Syd- och Mellansverige kommer åkbara snötäcken och hållbara sjöisar efterhand att uppträda allt mer sporadiskt, och inte heller de sydligare fjällen kommer framöver att kunna erbjuda lika säker snötillgång som i dag. Där, liksom även i delar av Alperna, kan vintersäsongen med tiden bli så kort och opålitlig att skidturismen knappast längre är att räkna med som inkomstkälla.

### Trafik och energibalans gynnas av värme – men kanske bara här i norr

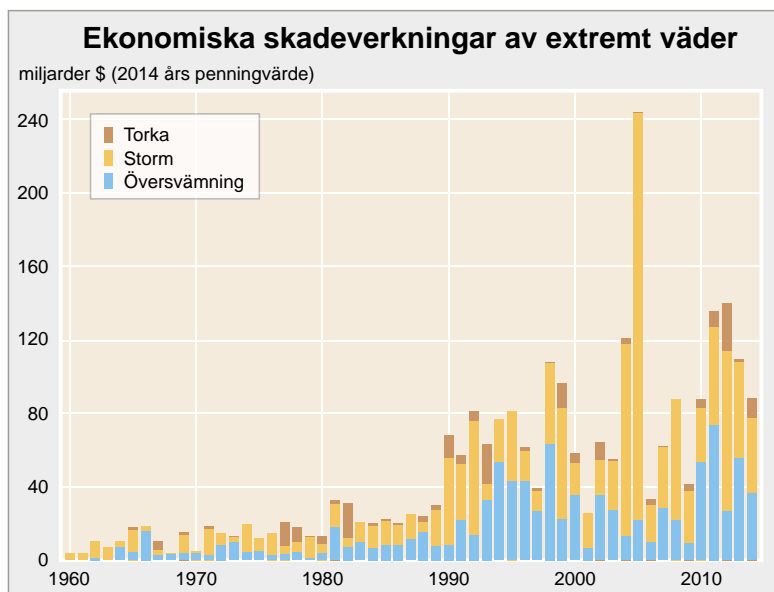
I de flesta sammanhang utom skid- och skridskoåkning, pimpelfiske och liknande fritidssysslor är snö och is mest till besvär för det moderna samhället. För Sveriges del kommer mildare vintrar att underlätta tillvaron på många sätt, inte minst i trafiken. Särskilt i landets sydligare delar minskar behovet av snöröjning, tjälskadorna blir färre, tiden med vinterväglag förkortas (även om frosthalka vid barmark kan bli vanligare), och ishindren för sjöfarten försvinner nästan helt.

Temperaturhöjningen reducerar också behovet av energi för uppvärmning av bostäder och andra lokaler, i Sverige kanske med så mycket som en tredjedel till slutet av det här seklet. Särskilt gynnsamt sett ur den synvinkeln är att årets och dygnets minimitemperaturer kan väntas stiga betydligt mer än medeltemperaturen (se s. 102). Detta bör möjliggöra en rejäl minskning av de kostnadskrävande effektreserver som vi sällan behöver utnyttja men likafullt måste ha i beredskap för att kunna sätta in under de svåraste köldknäpparna. I dagsläget måste hela det svenska energiförsörjningssystemet vara dimensionerat så att vi kan hålla en anständig inomhustemperatur även när det är tjugo grader kallt i söder och ännu mycket kallare i norr. Framöver skulle kraven på energiförsörjningen kunna sänkas påtagligt i det avseendet. Redan en lindring av den strängaste vinterkylan med fyra grader kan reducera Sveriges maximi-förbrukning av el med ca 1 500 megawatt, vilket

motsvarar vad två mindre kärnreaktorer producerar.

Något som däremot lär öka energiåtgången är att vi får ett allt större behov av kylning och luftkonditionering under varma sommardagar. I vårt land skulle det behovet kunna femfaldigas under loppet av det här seklet. I såväl glesbygd som tätorter finns exempelvis mängder av elektronisk utrustning för signalsystem, telekommunikationer och elanläggningar som saknar aktiv kylning och riskerar överhettning om det blir för varmt ute. Höginkomstländer i varmare delar av världen utnyttjar redan i dag mer energi för kylning än för uppvärmning, och bruket av luftkonditionering är raskt på väg att sprida sig också i utvecklingsländerna. Det är därför ingalunda säkert att den globala energiåtgången för uppvärmning plus kylning kommer att minska när lufttemperaturen stiger.

Förändringar av klimatet inverkar också på förutsättningarna för att *producera* energi. Under tjugohundralet kan vi räkna med en påtaglig flödesökning i Norrlandsälvarna, där merparten av Sveriges större vattenkraftverk är belägna. Utvecklingen bör kunna möjliggöra märkbart högre vattenkraftproduktion än i dag. Den ökning av virkestillväxten som förväntas i svenska skogar kan därtill ge utrymme för en mer omfattande användning av biomassa som bränsle.



Extrema väderförhållanden har under senare år fått allt kostsammare skadeverkningar. Enbart den tropiska orkanen Katrina åstadkom skador för över 100 miljarder dollar när den drog in över New Orleans år 2005. Kostnadsökningen beror emellertid inte i första hand på väderutvecklingen i sig. Främst avspeglar den i stället förändringar i samhället och bristande klimatanpassning.

– Data från EM-DAT (OFTA/CRED International Disaster Database).

Men inte heller på det här området är framtidsutsikterna för världen som helhet lika lovande som de svenska. Redan på så nära håll som i Central- och Sydeuropa lär vattenföringen i floderna och därmed även vattenkraftproduktionen komma att minska under loppet av det här seklet. Klimatförändringarna kan skapa problem också för den termiska elproduktionen, dvs. den som bygger på kärnkraft eller eldning av olika slags bränslen. All sådan produktion kräver tillgång till kylvatten, men i en framtid med allt hetare och torrare somrar kan det ibland uppstå brist på vatten av tillräckligt låg temperatur.

## Samhället är sårbart för extrema vädersituationer

En del sannolika eller åtminstone tänkbara konsekvenser av människans klimatpåverkan är uteslutande till skada för samhället, i Sverige såväl som på andra håll. Många av dessa skaderisker är förknippade med ovanliga vädersituationer – de är mer beroende av vad som händer med klimatets extremvärden än av hur genomsnittet förändras.

Svåra stormar hör till de extrema väderfenomen som kan bli särskilt förödande för samhället. Vi har redan varit inne på deras följder för skogsbruket, men deras inverkan på infrastruktur och bebyggda områden är ofta än mer kännbar. Stormskadorna har genom åren tenderat att bli allt mer kostsamma, vilket dock inte i första hand beror på att ovädren skulle ha blivit fler eller svårare än tidigare. Exempelvis har tropiska cykloner under det senaste halvseklellat allt större ekonomiska avbräck i USA, trots att de under den tiden inte har ökat i antal.

Uppenbarligen avspeglar kostnadsutvecklingen i första hand förändringar i samhället. Delvis handlar det om att en stor del av världen har blivit allt rikare. Våra tillgångar har med tiden blivit allt fler och allt värdefullare, och vi har därigenom mer att förlora nu än vi hade förr. I fattigare delar av världen kan folkökningen vara en väl så viktig förklaring. Där har den ökande konkurrensen om mark för odling och bostäder tvingat allt fler att slå sig ned i områden som ofta utsätts för översvämning eller andra skador när det blir oväder.

En annan orsak till att extremt väder kan få tilltagande ekonomiska effekter är att samhälls-

I oktober 2012 drog den tropiska orkanen Sandy fram över Västindien och den amerikanska östkusten. Orkanen blev ett av de mest förödande oväder som förekommit under senare år. Den kostade drygt 200 människor livet och vållade skador för ca 75 miljarder dollar. Antalet dödsolyckor var ganska lika fördelat mellan USA och Västindien, men de ekonomiska skadeverkningsarna blev nästan tjugo gånger mer omfattande i USA än i övriga drabbade områden.

Bilderna visar en gata i Santiago de Cuba samt nedre Manhattan under ett omfattande strömvabrott i ovädrets spår.



DESMOND BOYLAN / TT NYHETSBYRÅN



BEBETO MATTHEWS / TT NYHETSBYRÅN

funktionerna har blivit allt mer komplexa, sammanvävda med varandra och beroende av avancerad teknik. I praktiken har detta medfört ökad sårbarhet – även förhållandevis begränsade skador kan få utomordentligt omfattande följderna om de slår ut nyckelfunktioner i samhället.

Störningar som drabbar elförsörjningen får konsekvenser inte bara för uppvärmning och belysning utan också för livsmedelsproduktion, vattenförsörjning, transportsystem, telekommunikationer, betalningssystem och åtskilligt annat. Och arbetet med att få i gång elförsörjningen igen efter en sådan störning kan bli besvärligt, eftersom det i allmänhet förutsätter att teleförbindelser och datorer fungerar.

Det moderna samhällets sårbarhet är också ett resultat av senare års långt drivna rationaliseringar. För att uppnå ökad konkurrenskraft och minskade driftskostnader har både näringsliv och offentliga institutioner trimmat sina orga-

nisationer och skalat bort reservkapacitet som ansetts vara onödig. Detta kan fungera bra så länge alla yttre omständigheter håller sig inom invanda gränser – eller ännu hellre förblir helt konstanta – men så är dessvärre inte alltid fallet, minst av allt när det gäller vädret. Dagens samhällsfunktioner är vanligen väl avpassade för att hantera någorlunda normala snömängder, vindhastigheter, vattenflöden, temperaturnivåer etc., men de har i många fall berövats extraresurser som de skulle ha behövt för att också kunna klara mer extrema vädersituationer.

Förmodligen förblir de ekonomiska skadeverkningsarna av stormar och andra oväder även i fortsättningen minst lika beroende av samhällsutvecklingen som av klimatets förändringar. Inte desto mindre är det oroande att exempelvis de tropiska cyklonerna skulle kunna bli intensivare i ett varmare klimat (se s. 113).

## Antal boende som kan beröras av översvämning längs vattendrag



En hel del bebyggelse i Sverige är belägen på ett sådant sätt att den riskerar att sättas under vatten vid extremt höga flöden i angränsande vattendrag. Kartan visar tätorter där minst 500 boende kan utsättas för översvämning vid "högsta flöde", en vattenföring som bedöms förekomma på sin höjd en gång på 10 000 år. Kartan anger också hur många boende som kan drabbas i samband med 100-årsflöden, dvs. flöden som i genomsnitt uppträder en gång per sekel.

– Data från MSB 2011.

## Översvämningar orsakade av riklig nederbörd kan bli allt vanligare

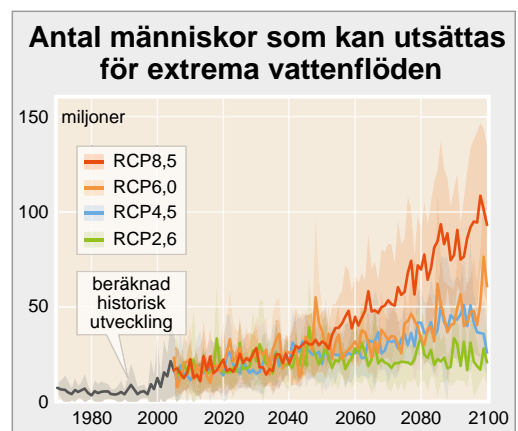
I Europa har många av de senare årens mest förödande naturkatastrofer utgjorts av översvämningar. Åar och floder har efter perioder med extremt riklig nederbörd stigit över sina bräddar och satt vidsträckt landområden under vatten. Sedan 1998 har översvämningar inom EU orsakat runt 700 dödsfall och tvingat omkring en halv miljon människor att flytta.

De dalgångar och slätter där de större vattendragen rinner fram är ofta exploaterade i mycket stor utsträckning. Bostäder och arbetsplatser konkurrerar om utrymmet med vägar, ledningsnät och odlingsmark. På många håll har bebyggelsen gradvis avancerat till vattendra-

gens omedelbara närhet, vilket återigen visar att samhället gärna anpassar sig till genomsnittliga klimatförhållanden och försummar riskerna för ovanliga vädersituationer – exempelvis sådana som leder till extremt höga vattenflöden. I Sverige blev många invaggade i en falsk trygghet under 1960- och 1970-talen, då nederbörden var relativt måttlig och höga flöden därför var sällsynta. Detta bidrog till att de materiella skadorna ofta blev mycket omfattande när regnen senare intensifierades och översvämningar började uppträda kring allt fler av landets sjöar och vattendrag.

Händelser av det här slaget kan efterhand bli ännu vanligare inom stora delar av Europa, framför allt vintertid. Det beror på att senhöst- och vinterregnen befaras bli allt kraftigare, även i Centraleuropa trots att somrarna där sannolikt blir torrare. Också längs många svenska vattendrag och insjöar kan översvämningarna bli fler under vinterhalvåret, inte minst genom att den nederbörd som i dag faller som snö alltmer lär övergå i regn under kommande år (se s. 112).

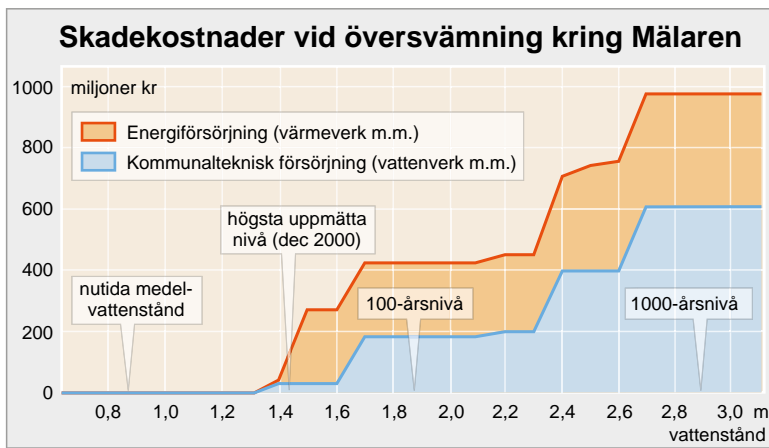
Flertalet större svenska vattensystem är visserligen reglerade, framför allt för utvinning av vattenkraft, vilket vanligen begränsar vattenföringens variationer under året. Under perioder med höga flöden samlas merparten av vattnet upp i regleringsmagasin, som sedan töms under årstider då vattenföringen normalt skulle ha varit låg. Flödestopparna vid snösmältningen, som längs ett oreglerat vattendrag kan medföra översvämning varenda vår, brukar därigenom utebli nästan helt i ett reglerat älvsystem. Detta



I år och floder kan vattenflöden som hittills varit sällsynta bli allt vanligare i takt med att klimatet förändras. Här återges modellberäkningar av hur många människor per år som kan utsättas för översvämning på grund av flödesnivåer motsvarande 1900-talets 100-årsflöden.

– Underlag från IPCC 2014, fig. TS.6c.





Stränderna kring Mälaren löper betydande risk för översvämning genom att tillrinningen till sjön ibland överstiger utloppens förmåga att leda ut vatten i havet. Redan om sjöns nivå når en halv meter över medelvattenståndet kan viktiga anläggningar börja slås ut. Diagrammet visar beräknade direkta kostnader inom ett par samhällssektorer av en 2–4 veckor lång översvämning. Totalkostnaderna för samhället skulle bli mångfalt högre. Skadekostnaderna inom andra sektorer har inte gått att uppskatta, och indirekta följder för allmänheten är inte medräknade. – Data från MSB 2012.

kan skapa en illusion av att älven ifråga har bringats helt under kontroll.

Men reglerade vattensystem kan bjuda på obehagliga överraskningar. Vid sällsynta tillfällen kan de tillföras så stora mängder nederbörd eller smältvatten att regleringsmagasinens kapacitet inte räcker till. När ett magasin fylls till brädden förlorar det genast sin förmåga att dämpa en flödestopp. Dammluckorna måste öppnas på vid gavel för att fördämningen inte ska brista. Flödet längs älvens nedre lopp kan då plötsligt stiga till minst lika höga nivåer som om vattensystemet hade varit oreglerat, och markområden som länge varit förskonade från översvämning blir obönhörligen dränkta.

På hösten år 2000 drabbades delar av Väst-sverige av långvariga och intensiva regn. Fler-talet sjösystem i området är reglerade, men det kunde inte hindra att bl.a. delar av Arvika blev översvämmade. Vattnet strömmade sedan vidare mot Vänern. Även denna är reglerad, men på grund av risken för erosions-skador och översvämningar längs Göta älv finns en gräns för hur mycket vatten som får tappas av från sjön via älven. Vid kraftig tillrinning kan det därför knappast undvikas att Vänerns vattenstånd gradvis stiger allt högre. Ett par månader efter översvämningen i Arvika stod sjön 4 dm högre än den gjort sedan 1920-talet, med betydande skador längs stränderna som resultat. Än mer extrema händelser av sådant slag skulle kunna inträffa i en nederbördsrikare framtid. För att översvämningens risk i någon mån ska begränsas har regleringen av Vänern ändrats så att sjöns medelnivå sedan 2008 hålls 15 cm lägre än tidigare.

Riklig nederbörd kan inte bara ge upphov till översvämningar utan också till osedvanligt höga grundvattennivåer, på en del håll med minskad markstabilitet och ökad risk för skred som följd. Stora delar av de svenska väg- och järnvägsnäten ligger på finkorniga jordar som kan bli instabila om de mättas med vatten. I flera älvdalar finns ”kvicklera”, marina ler-avlagringar som efter långvariga regn nästan kan bli flytande och då lätt kommer i rörelse.

Skyfall kan lokalt orsaka extremt höga flöden, översvämning, skred och ras även längs vattendrag som normalt är mycket små. Sådant

Lokala skyfall kan medföra ras nästan var som helst i landet. Utanför Ånn i västra Jämtland föll den 30 juli 2006 uppåt 100 mm regn inom någon timme, vilket åstadkom en våldsam ökning av flödet i den bäck som avvattnar området. Trummorna som ledde bäcken under Europaväg 14 och järnvägen till Storlien kunde inte svälja vattenmassorna, som därför dämades upp och sedan skar rakt igenom väg- och järnvägsbankarna.



sker framför allt sommartid, och skadorna kan uppkomma nästan överallt i Sverige oavsett jordlagrens egenskaper.

Eftersom en tilltagande andel av nederbörden väntas falla i form av kortvariga men intensiva regn (se s. 110) kan tillfälliga extremflöden dessutom bli allt vanligare i hela landet, även i områden där förekomsten av långvarigare och mer omfattande översvämningar bedöms minska.

Tätorter löper ofta särskilt stor risk för tillfällig översvämning i samband med skyfall, oavsett om de ligger nära vattendrag eller ej. Orsaken är att en stor del av nederbörden där hamnar på asfalt, betong, hustak och andra ytor som helt saknar förmåga att suga upp vatten. Regnvattnet leds i stället till dagvattenssystemen, som sällan är dimensionerade för att kunna ta hand om extrema nederbördsmängder.

## Havsnivåhöjningen sätter stora värden på spel

I stora delar av världen är kustzonen minst lika eftertraktad och utnyttjad för bebyggelse, jordbruk och infrastruktur som floddalar och sjöstränder. Över en miljard människor är i dag bosatta inom 30 km från havet, och här växer befolkningen i genomsnitt dubbelt så snabbt som i världen som helhet. Av Sveriges befolkning bor nästan 40 procent inom 5 km från kusten, och dagens folkökning är till mycket stor del koncentrerad till denna zon.

Att havsnivån kommer att stiga allt högre som följd av den pågående uppvärmningen kan därför åtminstone på sikt visa sig bli den för samhället mest kostsamma av klimatförändringarnas alla effekter. Enbart vid den skånska kusten finns ca 3 000 bostadshus som är belägna mindre än 1,5 m över dagens genomsnittliga havsnivå och som därför redan nu hamnar i farozonen i högvattensituationer. Ytterligare ca 20 000 bostadshus i Skåne ligger mellan 1,5 och 3 m över nutida havsnivå och skulle därigenom kunna råka illa ut vid framtida situationer av det slaget. Att flytta alla dessa bostäder till säkrare mark skulle förmodligen kosta mer än 200 miljarder kronor.

Återigen är det extrema omständigheter snarare än vardagsförhållanden som skapar de största skaderiskerna. Det är framför allt i samband med svåra stormar som havet vållar förödelse längs stränderna – då kan vattenståndet längs en del kuster stiga flera meter över det normala. I det läget kan en extra höjning av vattennivån med några enstaka decimeter få mycket stor betydelse. Den kan vara allt som behövs för att en skyddsbarriär ska ge vika, och den kan innebära att tiotals eller rentav hundratals kvadratkilometer mark sätts under vatten längs ett låglänt kustavsnitt.



Den 2 juli 2011 föll under loppet av några timmar över 100 mm regn över de centrala delarna av Köpenhamn. Som mest uppmättes drygt 3 mm nederbörd per minut. De översvämningar som blev följden orsakade skador för närmare 6 miljarder danska kronor. Gator, motorleder och järnvägar sattes under vatten, och många invånare blev utan el och fjärrvärme. Strömavbrotten slog bl.a. ut polisens telefonförbindelser, tågtrafikens informationssystem och vädertjänstens prognosdator. Tiotusentals drunknade rättor spolades ut via dagvattenledningar och avloppsrör, vilket kan ha bidragit till att flera personer drabbades av bakteriesjukdomen leptospiros, i ett fall med dödlig utgång.

## Översvämningsskador i kuststäder. Beräknade årliga genomsnittskostnader kring 2050



De skador som vållas av nutida översvämningar i världens större kuststäder kostar enligt en nyligen genomförd beräkning i genomsnitt ca 6 miljarder dollar per år. Till år 2050 skulle folkökningen och den ekonomiska utvecklingen kunna medföra att den siffran nästan tiofaldigades även om havets medelnivå förblev konstant. Med havsnivåhöjningens effekter inkluderade beräknas de totala skadekostnaderna i de stora kuststäderna under samma tid kunna öka till åtminstone 1 000 miljarder

dollar årligen. De röda symbolerna på kartan ovan anger städer där översvämningarna i genomsnitt bedöms kunna kosta minst 1 miljard dollar per år kring 2050 även om havet till dess bara stiger med 20 cm. De uppskattningarna utgår emellertid från att skyddet mot översvämningar inte förbättras. Med effektiva åtgärder såsom skyddsvallar borde skadorna åtminstone tills vidare kunna begränsas mycket påtagligt (se de svarta symbolerna på kartan). – Data från Hallegatte *et al.* 2013.

För närvarande drabbas årligen ungefär 10 miljoner människor längs världens kuster av översvämning. Mer omfattande översvämningar är ovanliga, men när de väl inträffar kan de beröra ett mycket stort antal människor.

I dag är ca 270 miljoner personer bosatta i områden som under nuvarande omständigheter skulle kunna översvämmas av havet åtminstone en gång på hundra år. Framöver kan dessa områden hamna under vatten allt oftare – längs en del kuster skulle extrema högvattennivåer kunna bli minst tio gånger vanligare under loppet av det här seklet.

Större delen av den översvämningshotade bebyggelsen är koncentrerad till vissa kust-

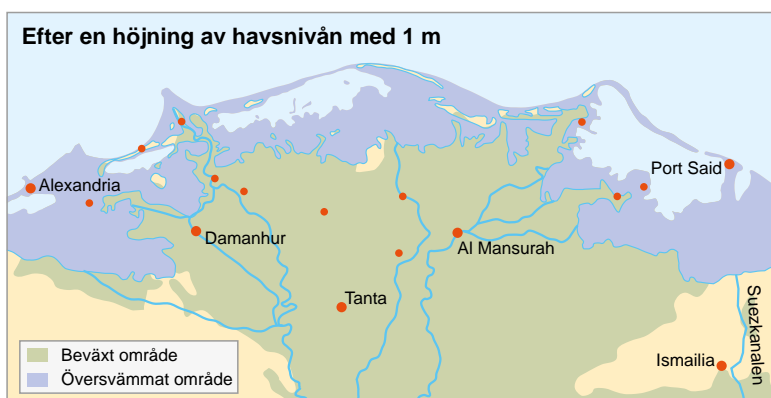
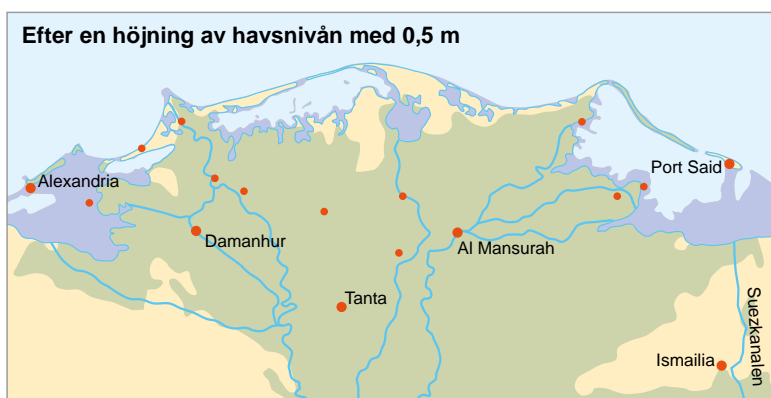
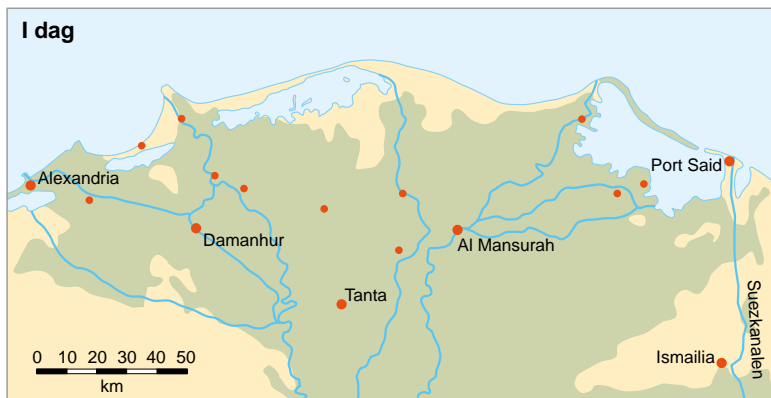
sträckor i utvecklingsländerna, inte minst i Syd- och Sydostasien. Särskilt utsatta är större floddeltan, inte bara på grund av att de är låglänta och tätbefolkade utan också för att marknivån i flera sådana områden är på väg att sjunka. Det sistnämnda beror i några fall på att floderna har dämats upp eller vallats in och att sedimenttillförseln från inlandet därigenom har minskat. I andra fall är orsaken att dränering eller bevattning och annan färskvattenförbrukning har sänkt deltaområdenas grundvattennivåer. Sjunkande marknivå till följd av stora grundvattenuttag har exempelvis konstaterats i storstäder såsom Tokyo, Shanghai, Bangkok, Jakarta och Alexandria.



De proportionellt sett allvarigaste effekterna av en havsnivåhöjning är att vänta på ett antal öar i Stilla havet, Indiska oceanen och Västindien. En del av dem reser sig knappt mer än 3–4 meter över havets nuvarande genomsnittsnivå. Redan några få decimeters höjning av havsnivån skulle kunna ödelägga en avsevärd del av deras landareal.

Bilden visar Atafu, en atoll som tillhör de polynesiska Tokelauöarna. Ön är befolkad av ca 500 personer, bosatta i en by som ligger nere till vänster på bilden. Större delen av ön når bara 2 m över den nuvarande högvattennivån.

## Nildeltat och havets nivåhöjning



I Nildeltat vore en höjning av havsnivån med några decimeter nog för att vidsträckt arealer med bördig jord skulle gå förlorade.

– Från UNEP.

### Kustbebyggelsen tvingas till reträtt

Översvämningar som orsakas av att stormar driver upp vattenståndet utmed kusterna långt över det normala blir sällan långvariga. Inom något eller några dygn brukar vattnet dra sig tillbaka från de dränkta landområdena. I princip blir det då möjligt för invånarna att börja reparera skadad egendom och efterhand återuppta jordbruk och annan markanvändning. Men genom att låglänta kusttrakter framöver allt oftare kan hamna under vatten riskerar de med tiden att bli oanvändbara för boende och odling. En tilltagande försaltning av mark och grundvatten ställer redan nu till stora bekymmer för befolkningen i översvämningsdrabbade kustområden.

Havets tillfälliga erövringar kommer alltså obönhörligen att bli allt mer permanenta. Höjningen av medelvattenståndet gör det med tiden möjligt för vågorna att förflytta strandlinjer och naturliga strandvallar inåt land. Marker som har brukats av människan i årtusenden kommer därigenom att sjunka i havet. En långsiktig havsnivåhöjning med en meter är nog för att mer än en tiondel av landarealen i exempelvis Bangladesh, Vietnam och Nildeltat varaktigt ska hamna under vatten.

Sverige kommer inom överskådlig tid lindrigt undan i det här avseendet, inte minst tack vare landhöjningen. I södra Götaland finns likafullt kustområden som måste räkna med ökande översvämning- eller erosionsrisk och tilltagande förluster av landareal. Vid exempelvis Löderup i sydöstra Skåne flyttar sig strandlinjen redan nu i rask takt inåt land – där har den under de senaste trettio åren förskjutits mer än 150 m.

Tätbefolkade kustländer såsom Nederländerna och Storbritannien har sedan gammalt försökt hålla havet stången med hjälp av vallar och andra skydd mot översvämning och kusterosion. Åtminstone för resursstarka nationer kan den taktiken mycket väl förbli användbar också under vårt sekel, även om den sannolikt kommer att möta ökande svårigheter och kräva allt större kostnader.

Men havsnivåns höjning kommer förmodligen att accelerera, och med all sannolikhet fortgår den också långt bortom år 2100 (se s. 157). På längre sikt lär många kustsamhällen därför tvingas till reträtt. Även den utvägen blir både mödosam och dyrbar, med tanke på de enorma värden som nu finns bundna i bebyggelse och infrastruktur i strändernas närhet. De största investeringarna av det slaget har gjorts i höginkomstländerna, som därmed åtminstone i kronor räknat har mest att förlora på havets expansion. Där finns å andra sidan också de bästa resurserna för en anpassning till de nya omständigheterna.

Den egendom som hotas längs kusterna i låginkomstländer har i allmänhet ett mer begränsat materiellt värde, men för den berörda befolkningen kan den likafullt vara oersättlig. För den fattige kustbon kan det vara livsuppehållet som sätts på spel när havet stiger; kanske rentav livet självt.

## Väta och värme ökar risken för smittspridning

Naturkatastrofer såsom stormar och översvämningar orsakar fara för liv och hälsa inte bara när det blåser som hårdast eller vattnet står som högst. Hälsoriskerna förblir ofta kraftigt förhöjda även flera dygn eller rentav veckor efter den akuta fasen, inte minst genom att färskvattnet i de drabbade områdena kan bli förorenat.

I åar och floder kan vattenkvaliteten sålunda bli starkt försämrad i samband med extremt höga flöden. Vattnet fylls av slam som rivits loss från botten, stränder och översvämmade markområden, och risken är stor att det också förorenas med smittämnen från avfallsupplag, gödsel eller latriner uppe på land. I reningsverk leder alltför stor vattentillströmning till bräddning, vilket innebär att en del av avloppsvattnet passerar ut i angränsande vattenområden utan att ha behandlats.

Sjöar och vattendrag där man i vanliga fall hämtar dricksvatten av god kvalitet kan på det här sättet omvandlas till smittkällor. Tydliga samband mellan kraftig nederbörd och förhöjda halter av bl.a. kolibakterier har exempelvis påvisats i Göta älv, som utgör dricksvattentäkt för 700 000 personer. Översvämningar kan också medföra att smittbärande råttor och andra skadedjur blir husvillor och kommer i kontakt med människor i större omfattning än vanligt.

Om en sjukdom sprids av levande organismer betecknas den som *vektorburen*. Dess förekomst och utbredning kan förändras om smittbäraren (vektorn) byter vistelseort. En övergång till ett varmare klimat kan medföra att vissa typer av smittbärare expanderar till områden där det tidigare har varit för kallt för dem.

Ett exempel är att senare decenniernas milda vintrar har gjort det möjligt för fästingarten *Ixodes ricinus* – som bl.a. sprider borreljos och fästingburen hjärninflammation (TBE) – att utbreda sig norrut i Sverige. Klimatförändring-

en har inte bara gynnat fästingarna själva utan också rådjuren, som är deras viktigaste värdjur.

Ett annat exempel gäller en ännu allvarigare sjukdom, visceral leishmaniasis eller kala-azar, som obehandlad oftast leder till döden. Sjukdomen överförs av sandmyggor och finns nu bl.a. kring Medelhavet, men eftersom dess utbredning är starkt kopplad till temperaturen skulle den i ett varmare klimat kunna uppträda även i vårt land. Sandmyggor har redan nu börjat förekomma i Tyskland.

Också malaria och denguefeber överförs av myggor och befaras få ökad spridning utanför tropikerna, som alltid har varit dessa sjukdomars kärnområde. Stickmyggan *Aedes albopictus*, som har orsakat fall av denguefeber i Syd-europa, skulle inom ett par decennier kunna uppträda ända upp till Mälardalen.

Men förekomsten av vektorburna sjukdomar styrs inte bara av vektororganismernas utbredning – den är i väl så hög grad beroende av sociala faktorer. Malaria var långt in på 1800-talet en vanlig sjukdom även i så nordliga trakter som Sverige, och de myggarter som bar på smittämnet finns fortfarande kvar här. Det var förbättringar av boendestandard, sanitära förhållanden och sjukvård som medförde att malarian efterhand försvann praktiskt taget helt härifrån. Så länge vi kan upprätthålla vårt nuvarande välstånd är sannolikheten liten att sjukdomen åter etablerar sig här, oavsett om det blir varmare eller ej. Det händer emellertid att svenskar som besöker utlandet blir smittade där och för med sig malaria eller andra tropiska sjukdomar tillbaka hem, och detta skulle efter en global uppvärmning kunna bli vanligare.

En temperaturhöjning kan också öka risken för matförgiftning – inklusive förgiftning orsakad av alggifter i musslor – liksom för att sjukdomsframkallande mikroorganismer uppträder i dricksvattnet.

De senaste åren har flera svenskar därtill insjuknat i badsårsfeber. Smittan ifråga kan överföras från badvatten via öppna sår och i olyckliga fall ge upphov till blodförgiftning. De bakterier som orsakar sjukdomen finns sedan tidigare i Östersjön, men det är först när vattentemperaturen överstiger 20 grader som de kan börja uppträda rikligt. Den varma sommaren 2006 avled tre personer i badsårsfeber i Sverige, och det mesta talar för att sjukdomen framöver får ökad utbredning här.

NICKLAS WUJMARK / AZOTE



Smittbärande fästingar har fått ökad utbredning i Sverige till följd av milda vintrar.

## Livsfarlig hetta

Temperaturen inverkar självklart även på direkt väg på människans hälsa och välbefinnande. Ett exempel är att en lindring av vinterkylan reducerar risken inte bara för köldskador utan även för kärllkramp och vissa andra åkommor. På de flesta håll ger emellertid hetta tydligare utslag än kyla i sjukdoms- och dödsfallsstatistiken. Under en sommar som är varmare än normalt kan det totala antalet dödsfall i Sverige stiga med flera hundra i förhållande till långtidsgenomsnittet.

I samband med värmeböljor är det framför allt gamla och sjuka människor som löper större risk än annars att avlida. De vanligaste dödsorsakerna i dessa sammanhang är hjärt-, kärl- och lungsjukdomar. Bland svenska storstadsbor äldre än 64 år stiger antalet dödsfall per dag med ca 5 procent för varje grad som dygnsmedeltemperaturen överskrider 20–21 °C. Personer med nedsatt lungfunktion, diabetes eller psykisk sjukdom såsom demens är särskilt utsatta, i synnerhet om de vistas hemma med begränsad tillsyn. Inom sådana grupper ökar dödligheten redan efter något dygn med hög temperatur. Om värmeböljan fortsätter ytterligare några dagar blir en viss överdödlighet också märkbar inom befolkningen som helhet.

Något som kan förstärka en värmeböljas hälsoeffekter är att den ofta åtföljs av förhöjda halter av luftföroreningar. Sol och hög temperatur kan exempelvis åstadkomma ökad bildning av ozon i marknära luftlager, åtminstone i områden med stora utsläpp från trafik eller

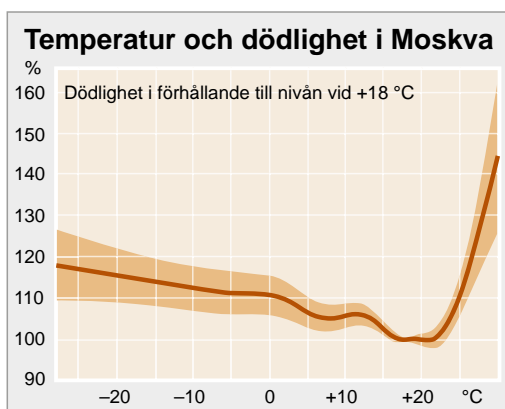
förbränningsanläggningar. I likhet med värmen i sig kan förhöjd ozonhalt leda till markant ökad dödlighet, inte minst bland personer med astma eller andra luftvägsbesvär. I Sverige väntas ingen ytterligare ökning av ozonförekomsterna under kommande decennier, men i Väst- och Syd-europas mer förorenade luft skulle en temperaturhöjning kunna innebära att ozonhalten allt oftare når hälsovådliga nivåer.

Såväl koldioxidhaltens uppgång som den pågående uppvärmningen kan dessutom medföra att växterna producerar allt mer pollen och att besvären för allergiker därigenom försvåras. Kombinerad med hög luftfuktighet kan temperaturhöjningen även gynna förekomsten av allergiframkallande mögelsporer och kvalster inomhus.

För unga och friska människor utgör stark hetta sällan något allvarligt hot mot livet och hälsan, vilket inte hindrar att den även av dem kan upplevas som synnerligen obehaglig. Särskilt svår att utärda kan den bli om inte ens nätterna bjuder på svalka. Bebyggelsens inverkan på lokalklimatet (se s. 40) innebär att vi kan befara särskilt höga temperaturer i storstäderna, en miljö där en allt större andel av jordens befolkning är bosatt.

I våra trakter är många bostäder och arbetsplatser dessutom illa rustade för höga sommartemperaturer. Husen är byggda för att skydda mot kyla snarare än värme, och när det är hett ute kan det i en del fall bli minst lika hett inomhus. I sydligare länder är både bebyggelse och befolkning oftast bättre anpassade till värme, och temperaturtoppar som i Sverige vållar hälsoproblem och överdödlighet kan i områden med ett varmare klimat passera helt obemärkta.

Men givetvis kan den pågående temperaturhöjningen bli ett hot mot människors hälsa även i de delar av världen där det redan nu är varmt. Särskilt om värmen åtföljs av hög luftfuktighet kan den i sådana trakter allt oftare nå nivåer som försvårar utomhusarbete och annan daglig mänsklig verksamhet. Om vår klimatpåverkan fortsätter att förstärkas i samma takt som under gångna decennier skulle utomhusförhållandena mot slutet av seklet kunna bli direkt livsfarliga här och var på jorden. Till dessa områden hör kusterna kring Persiska viken, där närheten till havet innebär att luften kan förbli fuktig även om temperaturen under extrema värmeböljor börjar närma sig 60 grader.



Både kyla och värme kan vara vådliga för hälsan, men det är framför allt vid stark hetta som antalet dödsfall börjar stiga märkbart. Diagrammet visar hur den genomsnittliga dödligheten i Moskva under åren 2006–2010 varierade med temperaturen (mätt som veckomedeltal).

– Från Shaposhnikov *et al.* 2014.

## EXTREM SOMMARHETTA I EUROPA – EN FÖRETEELSE SOM INTE LÄNGRE ÄR UNIK



I augusti 2003 utsattes stora delar av västra och södra Europa för en sällsynt intensiv värmebölja. I Paris över-skred dagstemperaturen 35° tio dagar i sträck; vissa dagar blev det uppåt 40° varmt. Värmer rekord slogs i bl.a. England (38,5°), Schweiz (41,5°) och Portugal (47,3°).

Behovet av luftkonditionering ledde till ovanligt hög elförbrukning, men flera kraftverk tvingades dra ned på sin produktion eftersom kylvattnet sinade eller blev alltför varmt. I den torka som åtföljde hettan uppkom mer än 25 000 skogsbränder – i Portugal eldhärjades 5 procent av landets hela areal – och jordbruket drabbades på många håll av missväxt. Totalt beräknas hettan och torkan ha vållat ekonomiska förluster motsvarande ca 120 miljarder kronor.

Men det var framför allt de höga dödsiffrorna som gjorde 2003 års värmebölja till den svåraste naturkatastrof som ägt rum i Europa på nästan ett sekel. Sammanlagt bedöms hettan under augusti ha förkortat mer än 40 000 människors liv. Flertalet avlidna var gamla, men en stor del av dem var inte skröpligare än att de kunde ha levt vidare i årtal om de sluppit värmeböljan.

Den extrema sommarvärmerna år 2003 föreföll unik – den saknade av allt att döma motstycke i Europa åtminstone 500 år bakåt i tiden. Det dröjde emellertid inte länge förrän något liknande inträffade på nytt. Sommaren 2010 råkade de europeiska delarna av Ryssland ut för en ännu långvarigare och geografiskt mer omfattande värmebölja än den som ägde rum 2003. Dödsfallsstatistiken tyder på att ca 55 000 människor föll offer för hettan, 11 000 av dem i Moskva.

Som en följd av den allmänna temperaturhöjningen tycks risken för extrema händelser av det här slaget ha mångfaldigats på bara något decennium. Allt talar också för att de kommer att bli ännu vanligare framöver. Om några decennier äger de kanske rum var och varannan sommar.

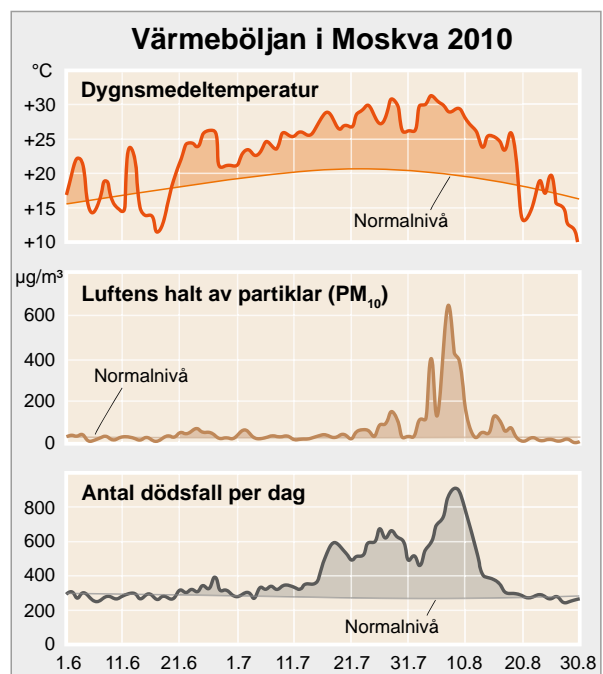
Hälsovårdens beredskap för perioder med stark hetta har på sistone förbättrats i många länder, och vi kan därför hoppas att värmeböljorna i fortsättningen inte medför lika stor överdödighet som 2003 och 2010. Andra konsekvenser av hettan, däribland den ökade brandrisken, kan visa sig bli avsevärt svårare att bemästra.

Sommaren 2003 blev den varmaste i Europa på åtminstone 500 år, men noteringen överträffades med god marginal bara sju år senare. Diagrammet ovan visar fördelningen av uppmätta eller rekonstruerade sommartemperaturer sedan år 1500.

– Från Barriopedro *et al.* 2011.



Värmeböljan i Ryssland år 2010 tog livet av 11 000 personer enbart i Moskva, delvis på grund av starkt försämrad luftkvalitet. Luften fylldes tidvis av rök från skogsbränder i omgivningarna.



Det var när dygnsmedeltemperaturen i slutet av juli 2010 närmade sig 30° som antalet dödsfall i Moskva började stiga markant. När dessutom luftens innehåll av sotpartiklar nådde skyhöga nivåer i början av augusti blev dödstaten upp till tre gånger högre än normalt. – Från Shaposhnikov *et al.* 2014.

## KLIMATFÖRÄNDRINGAR SOM ORSAK TILL KONFLIKTER OCH MIGRATION

Vid åtskilliga tillfällen i det förgångna har klimatförändringar åtföljts av väpnade konflikter eller av mäktiga rikens nedgång och fall. Det är knappast förvånande att ett samhälle kan börja vackla i sina grundvalar om det drabbas av torka eller översvämningar som blir så omfattande och varaktiga att de hotar befolkningens möjligheter att försörja sig. En slutsats som kan ligga nära till hands är att människans nutida och framtida klimatpåverkan skulle kunna utlösa nya konflikter, kanske fler och värre än de vi har genomlevt förr.

Men de flesta konfliktforskare är eniga om att klimatförändringar sällan eller aldrig har utgjort den enda orsaken till ofred eller samhällsomstörtning. Bakom händelser av de slagen ligger nästan alltid en rad olika faktorer. Klimatförändringar kan försvåra redan existerande motsättningar, särskilt i länder med outvecklade eller försvagade samhällsinstitutioner, men de ger knappast på egen hand upphov till konflikter om inga andra riskfaktorer finns med i bilden.

De förändringar av klimatet som vi kan vänta under kommande decennier har onekligen vissa förutsättningar att vålla nationell eller internationell osämja, exempelvis om de reducerar färskvattentillgångar som utnyttjas av flera olika befolkningsgrupper, om de förskjuter utbredningsområdena för kommersiellt viktiga fiskbestånd, eller om de öppnar nya möjligheter för exploatering av naturresurser i polartrakterna. Å andra si-

dan har vi genom åren sett många exempel på att tvister kring sådana resurser går att lösa på fredlig väg.

Att klimatförändringar kan driva fram folkomflyttningar är ställt utom allt tvivel, men ingen vet säkert hur många som är eller skulle kunna bli berörda. Tusentals människor kan tvingas lämna sina hem efter en svår storm eller en tillfällig översvämning, men de flyttar i sådana fall sällan några längre sträckor, och många av dem återvänder efterhand till sina hemtrakter.

Om klimatets förändringar innebär att sådana händelser inträffar allt oftare inom ett visst område kan följden bli att invånarna börjar överge området för gott. Men åtminstone i dagsläget går klimatet sällan att skilja ut som en dominerande orsak till att människor permanent byter vistelseort.

Den migration som klimatförändringarna framöver skulle kunna bidra till beskrivs ofta som ett hot i sig, en av alla de olägenheter som vår klimatpåverkan kan ge upphov till. Å andra sidan kan migrationen också betraktas som ett naturligt och legitimt sätt för människor att anpassa sig till ändrade omständigheter. Till saken hör att det framför allt är unga och arbetsföra personer som flyttar. Andra befolkningskategorier kan ha betydligt sämre möjligheter att lämna sina hemtrakter för att därigenom undkomma effekterna av ett ogynnsamt klimat. Det kan bli bland sådana grupper som klimatförändringarna får de svåraste konsekvenserna.

KHALED AL-HARIRI / TT NYHETSBYRÅN



Det inbördeskrig som inleddes i Syrien 2011 har ofta lyfts fram som ett exempel på vad de pågående klimatförändringarna kan leda till. Konflikten föregicks av långvarig torka i Mellanöstern. Åren 2007–10 tycks torkan ha varit svårare än vad som noterats där på många hundra år, vilket kan tyda på att den åtminstone delvis var ett resultat av mänsklig klimatpåverkan. I Syrien medförde den återkommande missväxt, och många odlare och boskapsskötare lämnade landsbygden för att flytta in till städerna. På en del håll har det hävdats att denna inflyttning gav upphov

till sociala motsättningar som i sin tur blev en tändande gnista för kriget. Men kopplingarna mellan torkan, inflyttningen till städerna och krigsutbrottet är inte väldokumenterade, och de har ifrågasatts av många bedömare. Urbaniseringen i Syrien är inget nytt fenomen, och de oroligheter som förekom innan kriget bröt ut kan också ses som en följd av regimens oförmåga att hantera den ekonomiska och sociala situationen i landet.

På bilden en fårhjord i Raqqaprovinsen i östra Syrien. Året är 2010, och torkan har varat i fyra år.



En fortsatt uppvärmning kommer att förbättra möjligheterna till vinodling i Sverige. Framtidsutsikter av det slaget kan för oss här i norr få de väntade klimatförändringarna att framstå som eftersträvarsvärda. Men en sådan slutsats är bara möjlig om vi tänker såväl kortsiktigt som själviskt.



## Värmen gynnar Sverige – om vi bortser från omvärld och framtid

För majoriteten av oss som vistas i Sveriges förhållandevis svala klimat lär kommande decenniernas värmeböljor trots allt bara vålla övergående besvär. Än en gång finner vi alltså att de väntade klimatförändringarna förefaller utgöra ett ganska begränsat problem för oss svenskar, i den mån vi inte rentav kan vinna på dem.

Man skulle kunna tycka att vi i Sverige därför borde kunna emotse effekterna av människans klimatpåverkan med ett upphöjt lugn. Visserligen riskerar vi att nya skadeorganismer och sjukdomar sprider sig hit, att vintersporter blir svårare att utöva och att översvämningar blir vanligare – men allt sådant förbleknar lätt inför visioner av skånska vinddistrikt, nordiska sommarnätter med kontinental värme, Riviérens badliv förflyttat till Östersjökusten, stigande produktion av jordbruksgrödor, virke och vattenkraft, avtagande behov av energi för uppvärmning, minskande bekymmer med snöskottning och ishalka. Skulle växthuseffekten verkligen vara något att oroa sig för här uppe i norr?

Ja, dessvärre är den ändå det. Det finns flera mycket goda skäl till att också vi nordbor bör försöka undvika och motverka en påverkan på klimatet.

För det första är växthuseffektens förstärkning ett globalt problem. Större delen av jordens befolkning lever i betydligt varmare trakter än Sverige, och där skulle en ytterligare uppvärmning övervägande vara av ondo. De som missgynnas av utvecklingen lär alltså vara fler än de som gynnas. Sett ur rättvisesynvinkel borde det redan därmed vara klart hur vi måste ställa oss till människans klimatpåverkan.

Även den nordbo som sätter egenintresset högre än den internationella solidariteten har anledning att fundera över vad som händer i omgivningen. I en värld som blivit alltmer globaliserad kan inget enskilt land undgå att beröras – vare sig ekonomiskt, politiskt eller moraliskt – av utvecklingen i andra länder. Här i Sverige kommer vi att få bära en del av de bördor som till följd av klimatrubbningarna drabbar människor på andra delar av jordklotet. Och de fördelar som vi kan vinna på klimatets förändringar här hemma kommer vi inte att kunna hålla för oss själva. På olika sätt måste vi dela med oss av dem till omvärlden, antingen vi vill det eller ej.

Det är dessutom mycket sannolikt att våra negativa effekter av klimatförändringarna efterhand börjar uppträda allt närmare inpå oss. Torka och missväxt av en omfattning som vi i dag associerar med Centralafrika är kanske inom hundra år en realitet i Sydeuropa – alltså inom EU:s nuvarande gränser.

Ytterligare ett skäl att ta klimatförändringarna på allvar är att deras långsiktiga konsekvenser kan bli betydligt allvarligare än de som ligger närmare i tiden. Förändringar som inledningsvis är till fördel kan mycket väl bli till nackdel om de tillåts fortsätta, både i Sverige och i andra delar av världen.

Vi vet egentligen mycket litet om vad som i längden kan hända med jordens klimatsystem om vi utsätter det för tilltagande påverkan. Plötsliga och dramatiska effekter går på intet sätt att utesluta. Att fortsätta som hittills med allt större utsläpp av klimatstörande föroreningar vore därför att spela hasard med våra efterkommandes tillvaro.

Hur detta skulle kunna sluta ska vi se närmare på i nästa kapitel.



## II Bortom år 2100

Det är sannolikt att något osannolikt kommer att inträffa.

ARISTOTELES

Prognos utfärdad på 300-talet f.Kr.  
Fortfarande giltig.

DE FLESTA BEDÖMNINGAR som har gjorts av klimatets fortsatta utveckling, både av FN:s klimatpanel IPCC och av andra, sträcker sig ungefär ett sekel framåt i tiden. Ett sådant tidsperspektiv dominerar också helt i den allmänna klimatdebatten. Kanske kan detta ge ett intryck av att situationen ändå är rätt hanterlig. De förändringar som förutspås till år 2100 – kanske ett par grader högre medeltemperatur än i dag, kanske några decimeter högre vattenstånd i havet – är visserligen påtagliga, men blir det inte värre än så borde väl den globala uppvärmningen kunna betraktas som ett någorlunda begränsat problem?

### Kurvorna pekar fortfarande uppåt år 2100

Dessvärre kan vi inte inskränka oss till vad som händer under återstoden av det här seklet om vi vill få en fullständig bild av vad människans klimatpåverkan kan innebära. Ett förhållande som ofta hamnar i skymundan i debatten är att kurvorna för temperatur och havsnivå i flertalet klimatscenarier oförtrutet pekar uppåt ännu år 2100.

Risken är med andra ord uppenbar att det längre fram i tiden blir ännu varmare. När det gäller havsnivån finns knappast något som helst utrymme för tvivel – havet kommer obönhörligen att fortsätta stiga också långt efter nästa sekelskifte.

Och även när våra utsläpp av växthusgaser en gång i framtiden slutligen upphör kommer deras inverkan på jordens atmosfär, klimat och livsmiljö att förbli märkbar i årtusenden. Våra efterkommande måste leva med de klimatpåverkande föroreningarna och deras effekter i hundratals generationer snarare än hundratals år.

Det här området i Nordafrika var bevuxet till för ungefär 5 500 år sedan, men då inträffade en plötslig klimatförändring som ledde till Saharaökens uppkomst. Den förändringen var naturlig, men risken för oväntade händelser av liknande slag ökar om människan utsätter klimatsystemet för tilltagande påverkan.  
– Från Ahaggarbergen i centrala Sahara.

### Stabilisering av koldioxidhalten kräver att utsläppen nästan upphör

Några egentliga prognoser för utsläppen av växthusgaser på andra sidan år 2100 går naturligtvis inte att åstadkomma. Som vi har sett (s. 84) är det svårt nog att bedöma vad som kommer att hända med utsläppen under innevarande sekel. Häri ligger också en av orsakerna till att klimatforskarna oftast har avstått från utsläppsscenarioer och modellberäkningar som sträcker sig längre än hundra år.

Likafullt kan vi i mer allmänna ordalag resonera om hur klimatet skulle kunna utveckla sig bortom tjugohundratalet. Ett grundläggande faktum är att uppvärmningen kan väntas fortgå även om utsläppen av växthusgaser upphör att öka och framöver hålls oförändrade eller rentav börjar avta en del. Inte minst koldioxiden är så långlivad att den under sådana omständigheter fortsätter att ackumuleras i luften, varigenom växthuseffekten efterhand blir allt kraftigare (se s. 86).

Ska vi kunna hejda förstärkningen av växthuseffekten räcker det alltså inte att hejda ökningen av utsläppen – i stället måste vi försöka stoppa växthusgasernas *haltökning* i atmosfären. Att *stabilisera* luftens innehåll av sådana gaser på en inte alltför hög nivå måste i själva verket vara det primära målet för alla försök att begränsa människans klimatpåverkan.

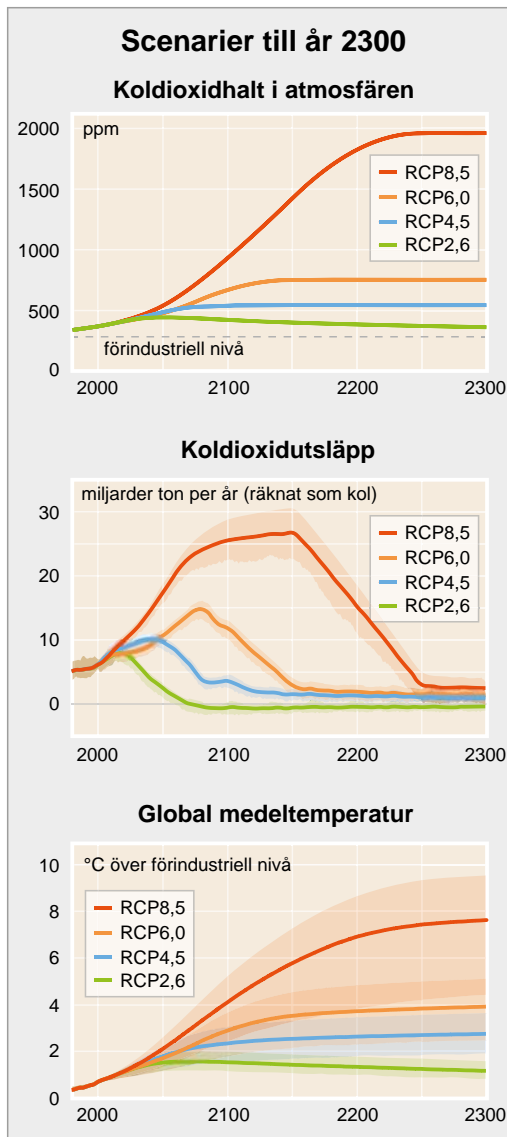
FN:s klimatkonvention (se s. 172) anger att halterna av växthusgaser ska stabiliseras på en sådan nivå att ”farlig antropogen påverkan på klimatsystemet kan undvikas”. Konventions-texten specificerar inte vilka halter som kan anses ofarliga, men låt oss som ett exempel anta att luftens koldioxidhalt inte får bli mer än dubbelt så hög som den förindustriella nivån på knappt 280 ppm (vi bortser för stunden från de andra växthusgaserna).

RCP-scenarierna, som vi stiftade bekantskap med i kapitel 7, har här förlängts till år 2300. Tre av dem utgår från antagandet att luftens koldioxidhalt förr eller senare stabiliseras. I fallet RCP<sub>4,5</sub> stannar haltökningen av på ungefär dubbla förindustriella nivå (ca 550 ppm).

För att koldioxidhalten ska sluta öka och stabiliseras på en viss nivå måste utsläppen av koldioxid framöver skäras ned till en bråkdel av dagens nivå.

Oavsett på vilken nivå koldioxidhalten stabiliseras lär temperaturen på jorden sedan långsamt fortsätta att stiga i ytterligare flera hundra år.

– Underlag från IPCC 2013, fig. 12.42 och 12.44.



Koldioxidhalten i atmosfären ökar i dag med 2–3 ppm per år och har redan passerat 400 ppm (se s. 64). Om vi ska kunna stabilisera halten vid dubbla förindustriella nivå (dvs. ca 550 ppm) måste den hittillsvarande ökningen av världens totala koldioxidutsläpp inom några decennier vändas till en kraftig minskning. På längre sikt – under kommande sekler – måste utsläppen ned till en bråkdel av dagens nivå.

Så länge koldioxidhalten fortsätter att öka kommer också den globala medeltemperaturen att stiga. Även om vi till sist lyckas få haltökningen att stanna av vid 550 ppm kommer det sannolikt då att vara mer än 2 grader varmare på jorden än i förindustriell tid.

Av allt att döma kommer temperaturhöjningen sedan att fortskrida – om än långsamt – också när koldioxidhalten inte längre förändras. Huvudorsaken är att djuphavets temperatur ännu inte har hunnit anpassa sig till atmosfärens

uppvärmning. Det tar många sekler för värmen att sprida sig nedåt i djupen. Av samma skäl kommer havsvattnets termiska expansion (se s. 48) att fortgå under mer än tusen år efter det att koldioxidhalten stabiliserats. När hela världshavet till sist har nått temperaturjämvikt med atmosfären kan värmen vid jordytan ha stigit med ytterligare drygt en halv grad sedan koldioxidhalten slutade öka.

Så långt in i framtiden måste utsläppen av koldioxid ha skurits ned till enstaka procent av dagens nivå för att halten i atmosfären inte ska börja stiga igen. Skälet är att havets och landmiljöns innehåll av kol vid det laget i stort sett har nått jämvikt med koldioxidhalten i luften. En stor del av den koldioxid som människan släpper ut i atmosfären tas ju i dagsläget upp av havsvattnet och vegetationen, men denna nettoupptagning sjunker gradvis mot noll i takt med att jämvikten närmar sig.

## Stora mängder fossila bränslen finns sannolikt kvar under jord

Det ovan beskrivna scenariot måste trots allt betecknas som förhållandevis optimistiskt. För att det ska kunna realiseras måste världens energi- och transportsystem under loppet av innevarande sekel förändras till något radikalt annorlunda än det vi har i dag. Scenariot förutsätter också att användningen av fossila bränslen på längre sikt upphör nästan helt, och detta i ett läge då det sannolikt återstår betydande bränsletillgångar som ännu är orörda.

De kvarvarande olje- och gasreserver som i dag är identifierade och ekonomiskt exploaterbara medger ytterligare ungefär femtio års fortsatt konsumtion av nutida omfattning. De kända reserverna av stenkol och brunkol är större – de bör räcka i drygt hundra år med nuvarande utvinningstakt.

Tillsammans omfattar de kända reserverna av fossila bränslen drygt 800 miljarder ton (uttryckt som deras innehåll av grundämnet kol), dvs. ungefär dubbelt så mycket som de drygt 400 miljarder ton människan hittills har utvunnit och förbränt.

Av allt att döma skulle vi kunna elda upp samtliga i dag kända bränslereserver utan att avvika särskilt mycket från det nyss nämnda scenariot, dvs. utan att atmosfärens koldioxidhalt blir mycket högre än 550 ppm. Förutsättningen är i

så fall att förbrukningen efterhand begränsas så kraftigt att dagens bränslereserver inte töms ut helt förrän efter flera hundra år. Skulle vi använda merparten av reserverna redan inom några decennier kan koldioxidhalten tillfälligt nå ett gott stycke över 550 ppm. Även i det fallet skulle halten dock på längre sikt hamna i närheten av dubbla förindustriella nivåer.

Men de identifierade reserverna utgör bara en del av alla de bränsleresurser som antas dölja sig i jordskorpan. Genom fortlöpande prospektering har de kända olje- och gasreserverna i själva verket fortsatt att växa, trots den ständiga exploateringen. Vi vet inte hur länge identifiering och kartläggning av nya fyndigheter på det

sättet kan ”kompensera” för förbrukningen, men de totala bränsleresurserna anses i allmänhet vara avsevärt större än de kända reserverna. Kvantiteterna är svårbedömda, men uppskattningarna hamnar ofta en bra bit över 10 000 miljarder ton (fortfarande uttryckt som innehållet av kol). En del av dessa resurser är inte ekonomiskt exploaterbara med dagens energipriser och utvinningsteknik, men de skulle kunna bli det i framtiden.

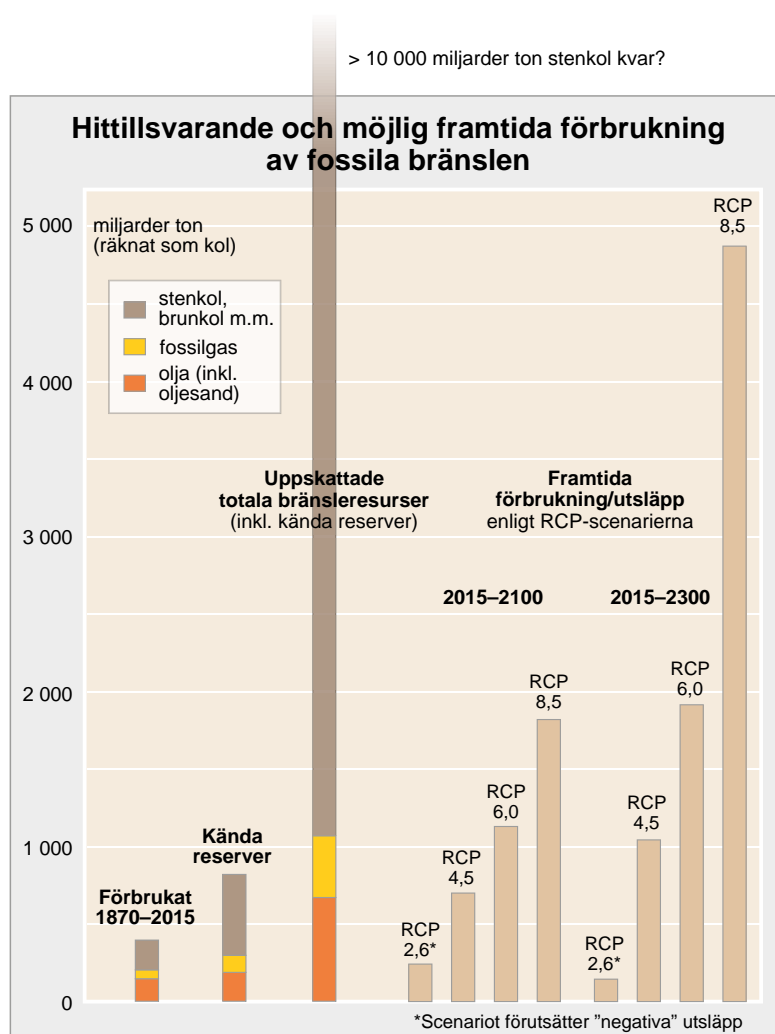
## Fortsatt flitig bränsleanvändning kan värma jorden mycket kraftigt

De samlade tillgångarna av fossila bränslen skulle alltså kunna möjliggöra en flera gånger större förbrukning än den som ryms inom ett scenario där koldioxidhalten stabiliseras vid 550 ppm. Beklagligtvis kan vi därför också konstruera ett betydligt mer pessimistiskt långtidsscenario än så utan att behöva gå utöver gränserna för vad som är rimligt.

Vi skulle exempelvis kunna tänka oss att användningen av fossila bränslen fortsätter att öka under hela tjugohundratalet, att den fortgår i stor omfattning ytterligare ett halvsekel, och att den först därefter gradvis minskar (såsom i förlängningen av scenariot RCP8,5 i figuren på föregående sida).

Fram till år 2300 skulle vi på det sättet totalt kunna förbruka närmare 5 000 miljarder ton räknat som kol. Vid det laget skulle atmosfärens koldioxidhalt i så fall vara uppe i nästan 2 000 ppm.

Konsekvenserna av en sådan utveckling är svåra att bedöma i detalj, eftersom det handlar om en klimatpåverkan av helt annan storleksordning än den vi har erfarenhet av hittills. Enligt beräkningar som återges i IPCC:s sammanställning från 2013 skulle den globala medeltemperaturen i det här scenariot nå närmare 8 grader över förindustriell nivå kring år 2300. Nyare beräkningar med mer avancerade jordsystemmodeller (se s. 90) tyder emellertid på att temperaturhöjningen skulle kunna uppgå till 10 grader eller mer. I delar av Arktis skulle årsmedeltemperaturen rentav kunna stiga med 20 grader. Årsnederbörden skulle kunna fyrfaldigas i tropiska delar av Stilla havet, samtidigt som den kanske avtar till mindre än hälften av den nuvarande i bl.a. Medelhavsområdet och Amazonas.



De kvarvarande kända reserverna av fossila bränslen är dubbelt så stora som de hittills förbrukade mängderna. Ändå skulle de inte medge fortsatt ökande förbrukning till slutet av det här seklet (som i scenarierna RCP6,0 eller RCP8,5). Men utöver de kända reserverna finns troligen betydligt större bränsleresurser som ännu inte är upptäckta eller kartlagda i detalj. Dessa resurser skulle kunna möjliggöra hög bränsleförbrukning och stora koldioxidutsläpp även ett stycke bortom år 2100.

– Data från Boden *et al.* 2015 och Le Quéré *et al.* 2015 (förbrukning), IEA 2015 (reserver och resurser, omräknade till mängd kol enligt McGlade & Ekins 2015) samt Meinshausen *et al.* 2011 och IPCC 2013 (scenarier).

## Koldioxidhalt och temperatur förblir förhöjda i tusentals år

Oavsett hur människans koldioxidutsläpp förändras i framtiden kommer de förr eller senare att upphöra praktiskt taget helt, antingen till följd av brist på tekniskt och ekonomiskt exploaterbara fossila bränslen eller genom att vi frivilligt avstår från att använda sådana bränslen.

Sannolikt kommer halten av koldioxid i luften då sakta att sjunka igen, främst genom att havsvattnet fortsätter att ta upp ämnet ända tills det efter ett par tusen år råder jämvikt mellan världshavets och atmosfärens kolinnehåll. Men även efter uppnådd jämvikt kommer en hel del av den koldioxid som människan frigjort att fin-

nas kvar i atmosfären. Den kvarvarande andelen lär uppgå till åtminstone 20 procent, men den blir större om vi släpper ut stora mängder koldioxid. Den slutliga jämviktshalten av koldioxid i luften kommer att bestämmas av hur stora våra samlade utsläpp till sist blev, nästan oberoende av i vilken takt utsläppen ägde rum. Som vi tidigare konstaterat (se s. 74) kan den frigjorda koldioxiden sedan cirkulera mycket länge mellan luft, hav och landmiljö utan att brytas ned.

Om koldioxidhalten i atmosfären sjunker en del när utsläppen upphör kan också temperaturen efterhand väntas avta i viss mån. Den utvecklingen kommer emellertid delvis att motverkas av att inlandsisarna på Grönland och i Antarktis så sakta börjar krympa i det varmare klimatet. I områden där isarna ersätts av barmark kommer ju jordens reflektionsförmåga att minska, varigenom mer solljus absorberas och omvandlas till värme. Även växtligheten på jorden kan i ett varmare klimat gradvis förändras på ett sätt som påverkar absorptionen av solljuset.

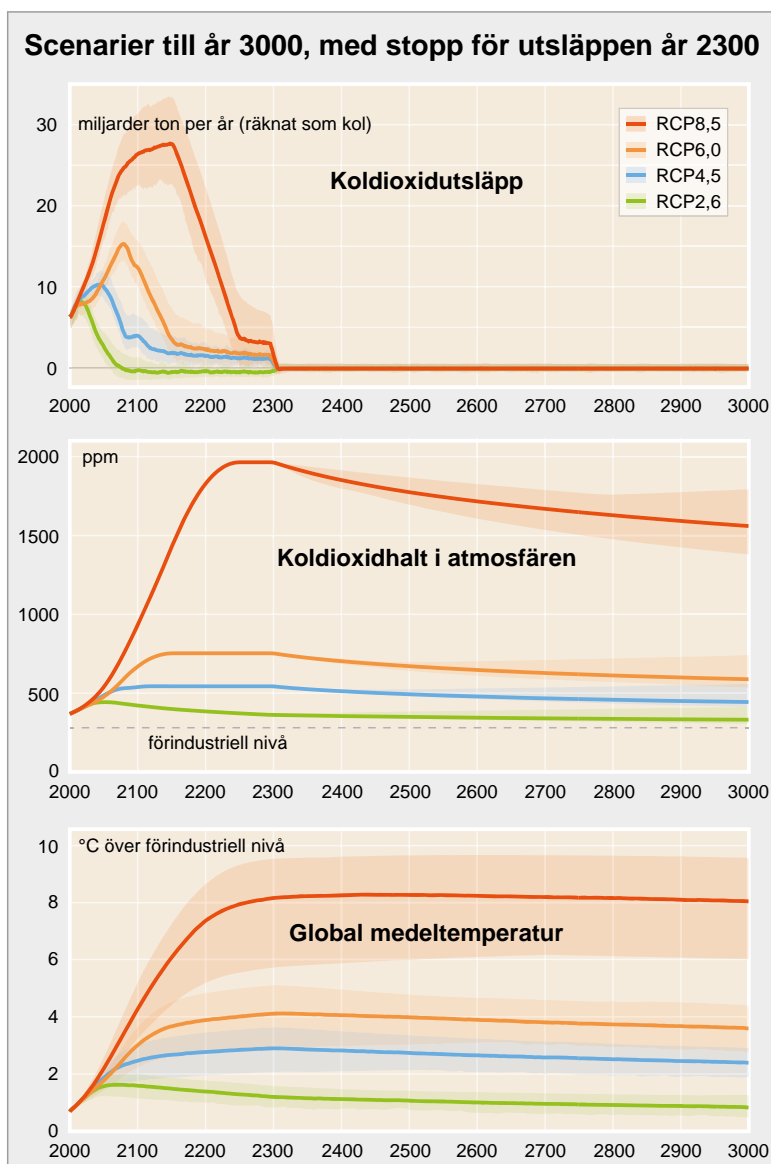
Det är därför stor risk att temperaturen i framtiden inte sjunker lika mycket som koldioxidhalten. I själva verket kan större delen av den uppvärmning som människan nu åstadkommer bli bestående i många tusen år, även om våra utsläpp skulle upphöra helt inom något eller några sekler.

### Efter oss syndafloden?

Att utsläppens effekter på temperaturen är så långvariga får i sin tur följder som kan bli än mer kännbara och varaktiga. Även en ganska måttlig uppvärmning kommer under årtusendenas lopp att medföra en utomordentligt påtaglig höjning av världshavets nivå.

Under de första tusen åren efter en höjning av temperaturen vid jordytan beror havsnivåns stigning till relativt stor del på att vattnet expanderar när det blir varmare. En bestående uppvärmning kommer för varje grad att ha höjt havsnivån med flera decimeter när värmen väl hunnit sprida sig ned i djuphavet.

På ännu kortare sikt medverkar också smältvatten från glaciärerna i jordens bergstrakter till att havsnivån stiger i ett varmare klimat. Men efter ett par hundra års fortsatt avsmältning finns det inte längre mycket kvar av glaciärerna, och deras framtida bidrag till havsnivåhöjning-

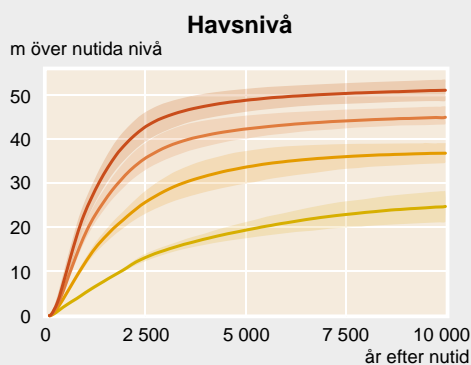
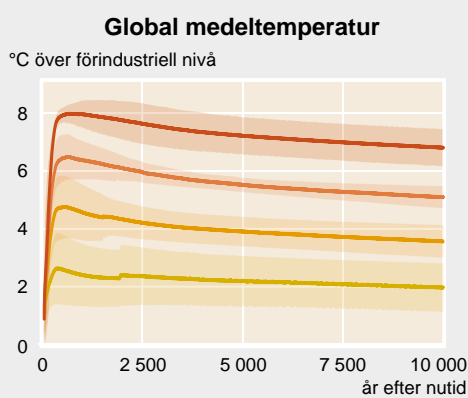
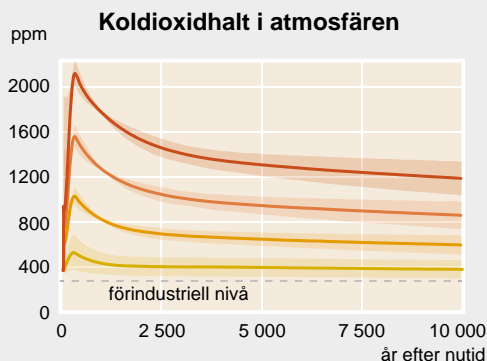


Även sedan utsläppen av koldioxid har upphört helt kommer koldioxidhalten i atmosfären att sjunka mycket långsamt. Temperaturen på jorden kommer förmodligen att avta i ännu långsammare takt. – Från Zickfeld *et al.* 2013.

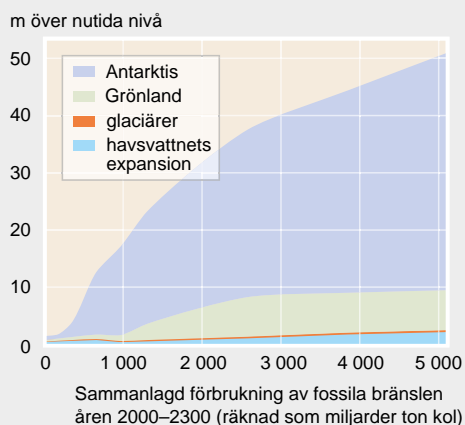
## Scenarier tiotusen år in i framtiden

Sammanlagd förbrukning av fossila bränslen under åren 2000–2300 (räknad som miljarder ton kol)

- 5 120
- 3 840
- 2 560
- 1 280



## Olika bidrag till kommande tiotusen års havsnivåhöjning



Ännu om tiotusen år kommer verkningarna av vår tids koldioxidutsläpp från fossila bränslen att förbli mycket tydliga. Havsnivån kan vid det laget stå tiotals meter högre än i dag, och den kan fortfarande vara på väg uppåt.

Diagrammen visar beräknade effekter av olika utsläppsmängder under tiden fram till år 2300 (därefter antas utsläppen upphöra).

Scenariot med den lägsta bränsleförbrukningen – sammanlagt 1 280 miljarder ton under åren 2000–2300 – kan betecknas som förhållandevis optimistiskt. Det överensstämmer tämligen väl med det förlängda RCP4,5-scenario som återges på föregående sidor. Scenariot med den största bränsleförbrukningen är jämförbart med RCP8,5-scenariot.

– Från Clark *et al.* 2016.

Det är framför allt den antarktiska inlandsisen som på lång sikt väntas lämna de största bidragen till havets nivåhöjning.

Diagrammet anger hur bränsleanvändningens och koldioxidutsläppens omfattning under kommande 300 år kan inverka på havets nivå om tiotusen år.

– Underlag från Clark *et al.* 2016.

en blir därför aldrig mycket större än ca 0,3 m, nästan oavsett hur varmt det blir på jorden.

På sikt är det i stället isutflöden och smältvattnen från de stora inlandsisarna som kan väntas åstadkomma den riktigt genomgripande förändringen av världshavets nivå. Under förra interglacialen, för ca 125 000 år sedan, var det under flera tusen år ett par grader varmare på jorden än nu (se s. 29). Att världshavet då nådde 5–10 m över dagens nivå måste främst ha berott på utströmning från Grönland och Antarktis.

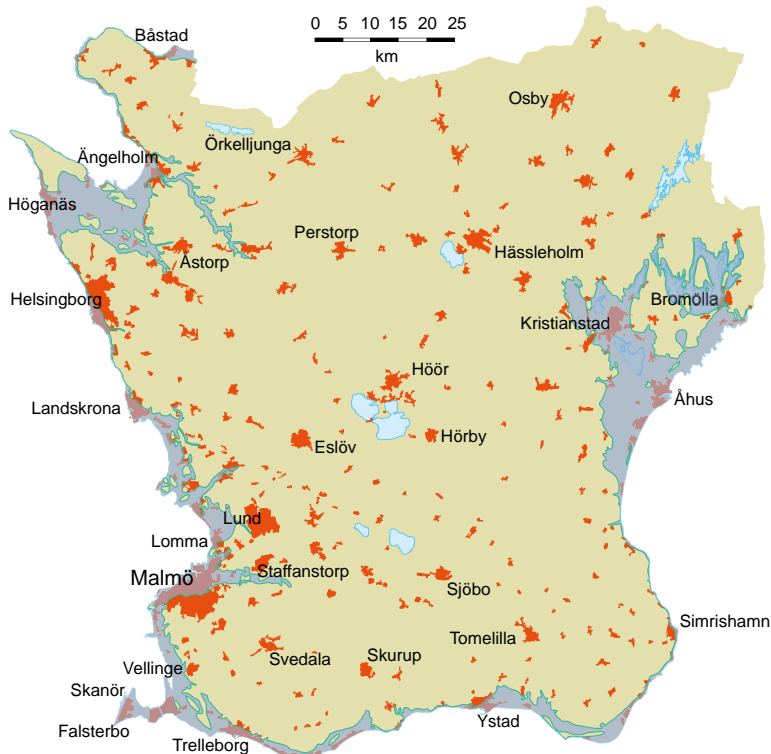
Under kommande årtusenden skulle is och smältvatten från Grönland på samma sätt kunna höja havet med flera meter, även i ett ”optimistiskt” scenario där människans koldioxidutsläpp begränsas så kraftigt att koldioxidhalten i luften aldrig överstiger dubbla förindustriella nivå. Större utsläpp kan sannolikt leda till att den grönländska inlandsisen med tiden smälter bort fullständigt, vilket skulle höja världshavet med 7 m. Förbrukar vi lika mycket fossila bränslen som i det tidigare nämnda pessimistiska scenariot (dvs. omkring 5 000 miljarder ton räknat som kol) skulle Grönland kunna bli helt isfritt redan inom 2 500 år.

I Antarktis finns så mycket is att den skulle räcka för att höja havsnivån med 58 m. Den antarktiska inlandsisen har tidigare ofta betraktats som förhållandevis okänslig för människans klimatpåverkan, eftersom de nutida temperaturerna i området brukar ligga långt under isens smältpunkt. Det mesta tyder emellertid på att även denna inlandsis med tiden kommer att krympa mycket påtagligt om den utsätts för en bestående uppvärmning.

Under de kommande tvåtusen åren beräknas världshavets nivå sammanlagt kunna stiga ungefär 10 m även i ett förhållandevis optimistiskt scenario, till största delen på grund av bidrag från isen i Antarktis. I scenarier med större utsläpp kan havet inom samma tidrymd stiga med 20 m eller mer. På tiotusen års sikt uppgår motsvarande siffror till ca 25 m respektive 40–50 m. I den sistnämnda situationen skulle också Antarktis till stor del ha blivit isfritt.

Det säger sig självt att vidsträckta kusttrakter under sådana omständigheter skulle bli översvämmade. Även om vi håller oss till det optimistiska scenariot innebär beräkningarna att nästan en femtedel av jordens nutida befolkning bor i områden som kan stå under vatten om tiotusen år.

## Skåne efter en höjning av havsnivån med 10 meter



En höjning av havets nivå med 10 meter skulle sätta betydande delar av Skånes nuvarande bebyggelse och bästa åkermark under vatten. På ett par tusen års sikt är det här scenariot fullt realistiskt. Om utsläppen av växthusgaser inte begränsas tillräckligt skulle det kanske kunna bli verklighet redan inom några århundraden.

## Utsläppens effekter kan bestå till nästa istid – som lär dröja

Som vi har sett kommer människans koldioxidutsläpp att få effekter – på atmosfärens sammansättning, på temperaturen, på havets nivå – som blir kvar mycket långt efter det att utsläppen upphört. Det betyder att effekterna måste betraktas som praktiskt taget *irreversibla* (oåterkalleliga). De geologiska processer som till sist kan eliminera den frigiorda koldioxiden agerar i tidsskalor på tiotusentals år eller mer.

En del av utsläppens inverkan på klimatsystemet skulle dessutom kunna bestå även om överskottet av koldioxid i atmosfären en dag skulle försvinna helt. Om de grönländska och antarktiska inlandsisarna i det läget har hunnit krympa påtagligt är det nämligen inte säkert att de kan återfå sin nutida storlek och kylande verkan på jordens klimat förrän nästa istid är på väg att inledas. Och så länge inte detta inträffar kommer inte heller havet att sjunka tillbaka till sin nutida nivå.

De förändringar av solinstrålningen till jordytan som brukar styra växlingen mellan istider och interglacialer (se s. 18) kan förutses i detalj även långt in i framtiden, men det är ändå oklart när nästa nedisning kommer att börja. Av allt att döma blir den nuvarande interglacialen ovanligt lång – sannolikt är det först om ungefär

femtio tusen år som solinstrålningen sommartid åter blir så svag på norra halvklotet att nya inlandsisar skulle kunna bildas där. Men mycket talar för att det då alltså kan finnas så mycket koldioxid kvar i atmosfären från människans utsläpp att nedisningen dröjer tiotusentals år ytterligare.

Att den kommande istiden på detta sätt skulle kunna skjutas upp fungerar likväl dåligt som försvar för våra nutida utsläpp av växthusgaser. Det är inte av omsorg om våra efterkommande tiotusentals år in i framtiden som vi i dag använder fossila bränslen. Om vi trots allt såg dessa bränslen som ett medel att bevara ett gynnsamt klimat på jorden borde vi rimligtvis vänta med att elda upp dem tills nästa istid faktiskt stod för dörren.

## Risk för överraskningar

I de ovan skisserade framtidsvisionerna – både de förhållandevis optimistiska och de mer pessimistiska – genomgår klimatsystemet förändringar som blir genomgripande på sikt men som ändå framskrider successivt under seklernas lopp.

Men framtidens klimat skulle också kunna innefatta överraskningar i form av oväntade och ganska plötsliga händelser. Att jordens klimatsystem är mycket komplext innebär att det ingalunda behöver förändras i proportion till den påverkan som det utsätts för. Under vissa omständigheter skulle även en begränsad störning kunna få dramatiska konsekvenser.

Det kan exempelvis hända att klimatsystemet länge bevarar vissa egenskaper nästan oförändrade även om det utsätts för en gradvis ökande påverkan, men att det sedan ”slår om” och får helt andra egenskaper om denna påverkan tilltar ytterligare något och därmed passerar en kritisk nivå – en ”tröskel”. Det skulle också kunna tänkas att systemets nya tillstånd är minst lika stabilt som det gamla. I så fall finns inga garantier för en återgång till ursprungstillståndet om påverkan senare skulle minska igen.

Vi vet att klimatsystemet åtskilliga gånger i det förflutna har genomgått drastiska omläggningar från ett tillstånd till ett annat. Ett exempel är de snabba kast mellan ett genuint istidsklimat och betydligt mildare förhållanden som under den senaste istiden ägde rum kring Nordatlanten (se s. 30). Ofta tycks övergången



mellan de olika klimattillstånden bara ha tagit några decennier i anspråk, om ens så mycket.

En annan omläggning inträffade i Nordafrika för ungefär 5500 år sedan. Dittills hade området till stor del varit bevuxet, men sedan minskade nederbördsmängderna så påtagligt att växtligheten försvann och Saharaöknen började bildas. Omvandlingen från savann till öken återverkade på det lokala klimatet på ett sådant sätt att torkan förvärrades och blev bestående.

Oväntade förändringar i klimatsystemet kan uppenbarligen förekomma även utan människans medverkan, men risken för sådana överraskningar är sannolikt på väg att öka genom att vi nu utsätter systemet för tilltagande påverkan. Ett exempel är den förvandling av regnskog till savannliknande växtlighet som skulle kunna äga rum i delar av Amazonas om utsläppen av växthusgaser leder till att nederbörden minskar där (se s. 127). Även i det fallet skulle vegetationens omvandling kunna förstärka förändringarna av det lokala klimatet.

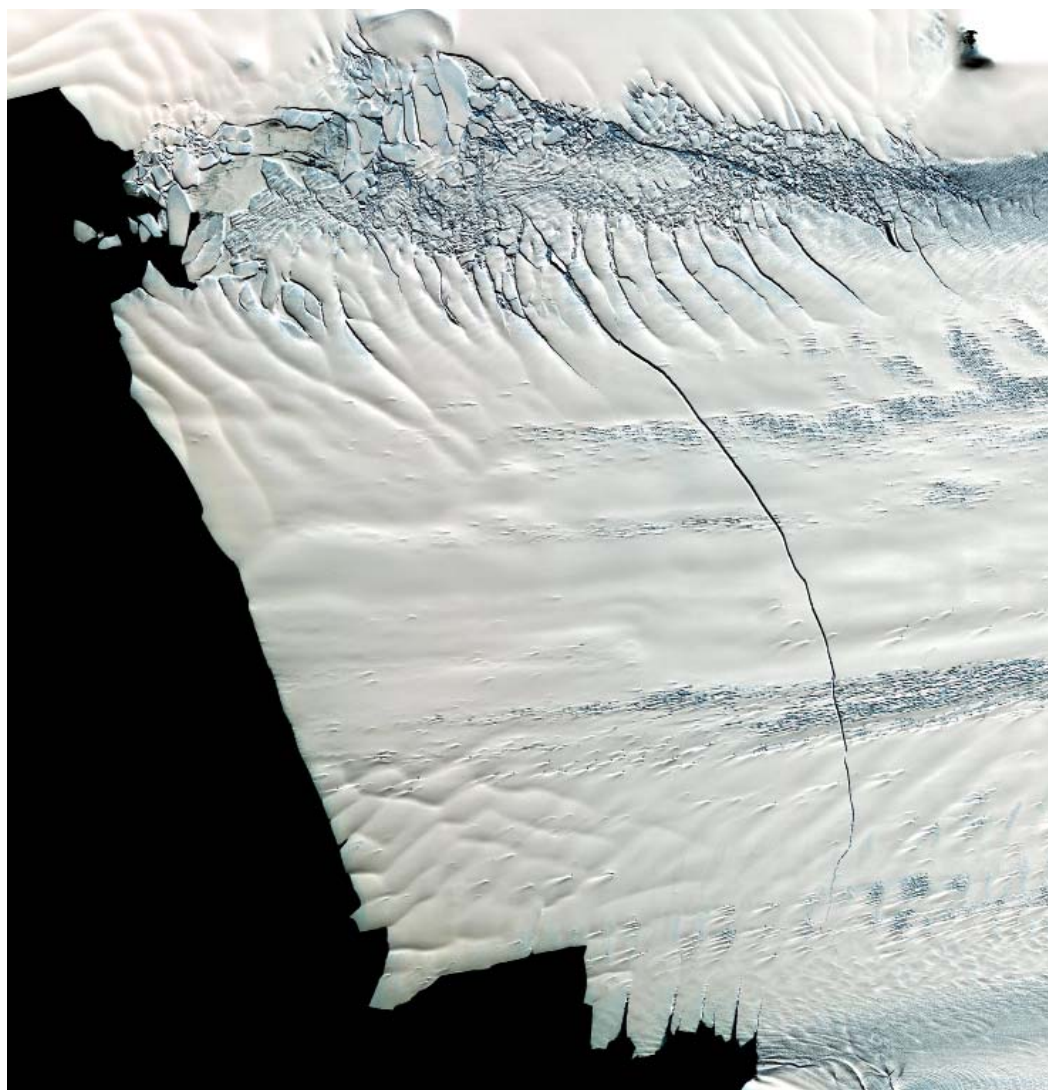
En överraskande förändring av klimatsystemet som vi redan har åstadkommit och vars utveckling vi nu kan följa från år till år är havsisens försvinnande från Norra ishavet sommartid. Det förloppet har visat sig gå betydligt snabbare än vi kunde tro för bara ett par decennier sedan.

### Lossnar isen i Västantarktis?

Ingenting tyder på att det som nu händer med havsisen i norr skulle vara ohejdbart. Om vi lyckas stoppa den pågående globala uppvärmningen och i stället får temperaturen att sjunka kan istäcket i Arktis snart väntas börja växa igen. Börjar vi påverka de stora inlandsisarna kan vi däremot orsaka förändringar som tar så lång tid att vända att de i praktiken måste ses som irreversibla. Skulle delar av dessa istäcken försvinna kommer de att behöva tusentals år för att återskapas, även om temperaturen på jorden skulle återgå till förindustriell nivå.

Pine Island Glacier är en av de glaciärtungor där is från det västantarktiska inlandet når ut i havet. Glaciären har på senare tid underminerats av havsvatten – sedan början av 1990-talet har vattnet trängt drygt tre mil in under is som tidigare vilade på havsbotten. Genom att friktionen mot underlaget därigenom minskat har isen börjat strömma ut snabbare.

Risken har också ökat att de yttre delarna av glaciärtungan bryts sönder och skingras, något som ytterligare skulle underlätta isutflödet från inlandet. Sprickan på satellitbilden upptäcktes 2011 och var då tre mil lång, 80 m bred och 60 m djup.



Vi har redan noterat att delar av den antarktiska inlandsisen gradvis skulle kunna försvinna under kommande årtusenden, men det finns också en risk att isen i Västantarktis elimineras betydligt snabbare än så. Där vilar ismassorna nämligen till stor del på berggrund belägen under havsytans nivå, vilket innebär att de är förhållandevis dåligt förankrade. Genom att havsnivån stiger och havsvattnet blir varmare kan förankringen dessutom befaras bli allt sämre med tiden. Det är därför fullt möjligt att den västantarktiska inlandsisen med tiden förlorar fästet, bryts sönder och börjar glida ut till havs. Isutflödet skulle kunna höja världshavets nivå med över 3 m.

En kollaps av det här slaget skulle inte ske momentant, och FN:s klimatpanel bedömde det 2013 som extremt osannolikt att isen i Västantarktis skulle försvinna helt inom det närmaste seklet. Förloppet kan förmodligen ta hundratals år i anspråk, men det finns nyligen påvisade tecken på att det redan har inletts. På vissa håll i Västantarktis har havsvattnet nu trängt in flera mil under is som för bara ett par decennier sedan vilade på havsbotten.

En del forskare pekar också på risken att smältvatten från såväl Grönland som Antarktis kan påverka havets omsättning på ett sätt som påskyndar isförlusterna. Genom en sådan återkoppling skulle instabila delar av inlandsisarna möjligen kunna försvinna så snabbt att havsnivån stiger med flera meter inom loppet av bara något sekel.

### Stopp för Golfströmmen?

Att havsvattnets omsättning i Nordatlanten är känslig för störningar råder det knappast något tvivel om. Som vi tidigare sett tycks den senaste istidens kraftiga klimatskiftningar i vår del av världen ha berott på växlingar mellan olika cirkulationsmönster i detta havsområde (se s. 31). Vi har också konstaterat att den globala uppvärmningen redan under innevarande sekel kan väntas reducera djupvattenbildningen i Nordatlanten och försvaga de varma havsströmmarna från söder, vilket sannolikt innebär att uppvärmningen i Skandinavien kommer att gå något långsammare än den annars skulle ha gjort (se s. 99).

Farhågor har ibland framförts om att djupvattenbildningen och resulterande strömmar

i Nordatlanten skulle kunna avstanna helt till följd av den fortsatta temperaturhöjningen. Samtidigt som uppvärmningen fortskred i andra delar av världen skulle kanske Skandinavien i så fall få ett något *svalare* klimat än det nutida (dock ingalunda ett istidsklimat, trots att det har förekommit åtskilliga spekulationer i den vägen).

En del beräkningar tyder på att cirkulationen i Nordatlanten faktiskt skulle kunna hejdas på detta sätt, förutsatt att uppvärmningen blir tillräckligt snabb och kraftig. Ett stopp för djupvattenbildningen före år 2100 bedöms som mycket osannolikt, men möjligen kan det inträffa längre fram. Av allt att döma skulle havsvattnets cirkulation i så fall inte upphöra plötsligt utan reduceras gradvis under loppet av åtskilliga decennier, kanske flera sekler. Enligt vissa modellberäkningar skulle den dessutom långsamt öka takten igen sedan temperaturen väl slutat stiga, men cirkulationens förändringar på lång sikt är mycket svåra att förutsäga.

### Skenande frigörelse av metan?

Den kanske mest oroande av alla tänkbara konsekvenser av en global uppvärmning är att den skulle kunna utlösa en omfattande frigörelse av växthusgaser från naturliga förråd under jord eller i havet. Temperaturen skulle då stiga ytterligare, med ett ännu kraftigare läckage av växthusgaser som följd. Resultatet skulle i värsta fall kunna bli en okontrollerad, näst intill skenande förstärkning av växthuseffekten.

Farhågorna handlar bland annat om att allt mer koldioxid och metan kan komma att frigöras från smältande permafrost. Under loppet av gångna årtusenden har permafrosten bundit minst dubbelt så mycket kol som det för närvarande finns i atmosfären. En uppvärmning skulle kunna medföra att en stor del av dessa kolföreningar på relativt kort tid når ut i luften.

En annan anledning till oro är att det också finns stora mängder metan i havssediment och djupt ned i tundrajordar. Gasen uppträder där i form av metanhydrater (även kallade metanklaturer), vilket innebär att den är innesluten i iskristaller. I princip skulle det gå att utvinna metangas ur sådana fyndigheter, även om det i dagsläget inte är ekonomiskt genomförbart (i översikten på s. 155 över kvarvarande bränsleresurser är metanhydraterna inte medräknade).

När permafrosten i Arktis smälter frigörs mängder av koldioxid och metan som hållits bundna i isen. Bilden är tagen vid Alaskas nordkust, där de tidigare ständigt frusna jordarna nu utsätts för kraftig uppvärmning och därtill ökad vågerosion från det allt oftare isfria Ishavet.



ALASKA SCIENCE CENTER, US GEOLOGICAL SURVEY

Om temperaturen stiger så mycket att iskristallerna börjar smälta kan metangas i tilltagande omfattning läcka ut från havsbottnar eller tundraområden och nå atmosfären. Det finns en del som tyder på att något sådant redan har inträffat vid åtminstone ett tillfälle i det förgångna. För ungefär 55 miljoner år sedan tycks i runt tal 5000 miljarder ton kol ha tillförts hav och atmosfär inom loppet av ett antal tusen år. Följden blev en temperaturuppgång med uppskattningsvis 4–7 grader globalt och så mycket som 20 grader på höga latituder. Det är oklart vad som från början utlöste processen, men smältning av metanhydrater i havsedimenten var sannolikt en viktig orsak till att så stora mängder kol nådde ut i luften.

Även om bara en mindre del av de nutida förråden av metanhydrater frigjordes på liknande sätt skulle climateffekterna kunna bli drastiska, eftersom metan har så kraftfull växthusverkan. Gasen har begränsad livslängd i atmosfären, men efter sin tillvaro som metan omvandlas den till betydligt mer långlivad koldioxid. Efter den metanfrigörelse som ägde rum för 55 miljoner år sedan tycks växthuseffekten ha förblivit förstärkt och temperaturen förhöjd under mer än hundra tusen år.

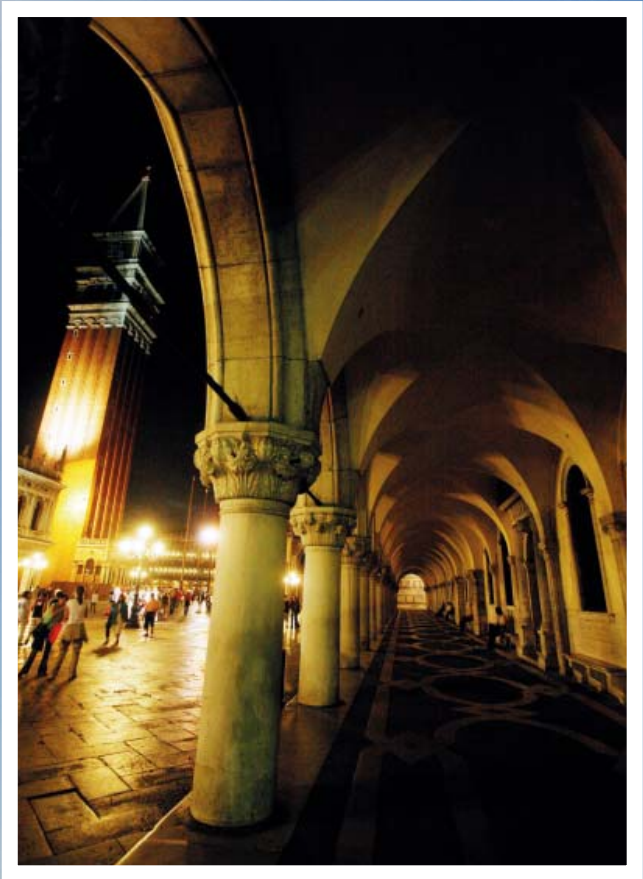
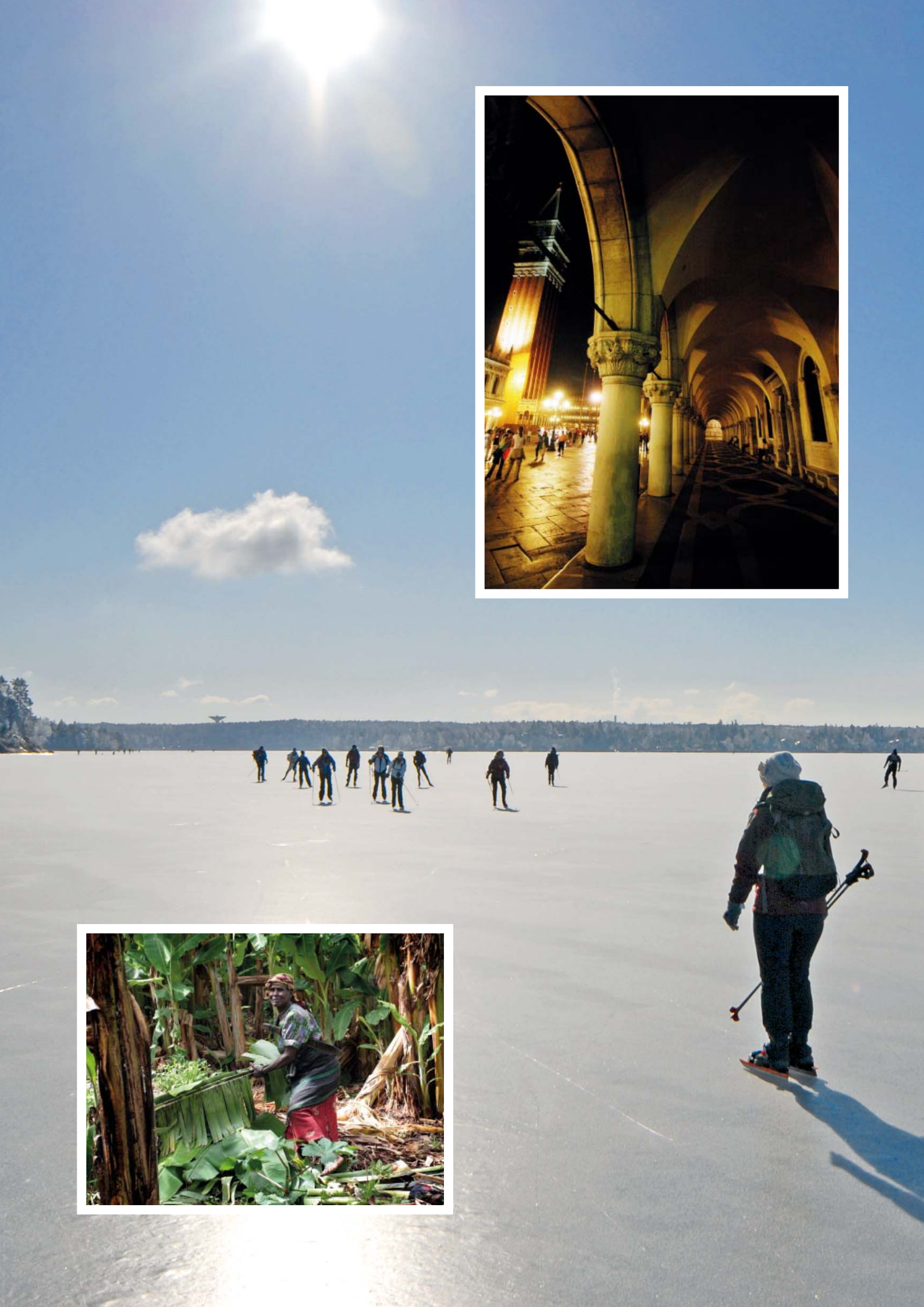
Iakttagelser i Arktis visar att koldioxid och metan redan i dag läcker ut i luften från smältande permafrost eller metanhydrater. Inom de

närmaste hundra åren bedöms utsläppen från sådana källor förbli begränsade om än inte försumbara, men på längre sikt skulle de kunna accelerera och åstadkomma en mycket påtaglig och långvarig förstärkning av den globala uppvärmningen.

### Räkna med något osannolikt!

Att uppvärmningen under kommande sekler skulle utlösa ett fritt skenande läckage av metan ur metanhydrater kan utan överdrift betecknas som ett katastrofscenari. De flesta bedömer sannolikheten för ett sådant förlopp som låg, liksom det också anses osannolikt att isen i Väst-antarktis försvinner från det ena året till det andra, eller att Skandinavien blir kallare när resten av världen blir varmare.

Men inträffar inte något av detta, så inträffar kanske något annat som vi i dag bedömer vara minst lika långsökt (eller över huvud taget inte har föreställt oss). När det gäller framtiden i allmänhet och det utomordentligt komplicerade klimatsystemets framtid i synnerhet är möjligheterna oändligt många. Varje specifik händelseutveckling, dramatisk eller ej, kan på förhand te sig ytterligt osannolikt. Ändå kommer en av dem till sist att bli verklighet. Därför är det i själva verket sannolikt att det i framtiden inträffar något osannolikt; vi vet bara inte vad.



# I2 Vad kan vi göra?

INGEN KAN PÅ FÖRHAND veta säkert vad som händer med klimatet under återstoden av seklet och där bortom. Full visshet om människans inverkan på det framtida klimatet får vi inte förrän framtiden är här och effekterna väl har infunnit sig. Kan vi då inte vänta och se innan vi vidtar kostnadskrävande åtgärder mot utsläppen av växthusgaser? Utsläppens klimateffekter kanske blir så begränsade att insatser av det slaget inte behövs?

Nej, klimatsystemets tröghet och växthusgasernas långa livslängd innebär att en sådan passivitet kan få vådliga följder. Om vi underlåter att minska utsläppen nu är risken stor att de framöver orsakar mycket svåra klimatstörningar. Hamnar vi i den situationen kommer inga åtgärder att vara kraftfulla nog för att avvärja skadeverkningarna.

## Långvariga effekter kräver snabba åtgärder

En i miljövardssammanhang allmänt accepterad och åtminstone tidvis tillämplig princip, *försiktighetsprincipen*, säger att vi bör agera för att undvika hälso- och miljöskador även i fall där vi inte säkert vet hur allvarliga skadorna faktiskt kan bli.

Följer vi den principen bör vi försöka reducera vår påverkan på klimatet, trots att dagens utsläppsscenarier och klimatmodeller inte kan förutsäga framtida klimatförändringar med full tillförlitlighet. Det är möjligt att en del av våra farhågor om kommande klimatstörningar och deras konsekvenser kommer att te sig överdrivna i efterhand, men vi spelar ett högt spel om vi ignorerar dem. Det kan ju nämligen också hända att farhågorna besannas – eller visar sig vara tilltagna i underkant. Att bortse från dem vore som att strunta i en orkanvarning därför att det trots allt finns en chans att orkanen uteblir.

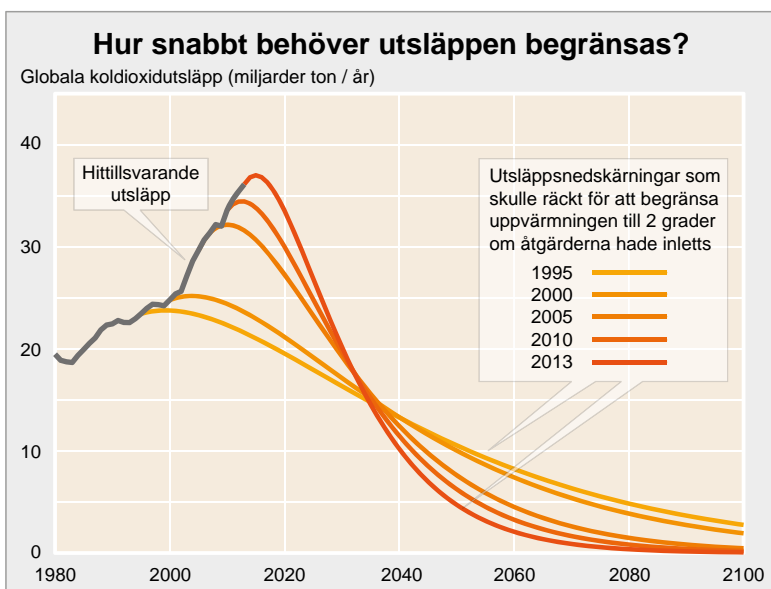
Men kanske det ändå inte är så bråttom? Vi har ju konstaterat att redan de hittillsvarande koldioxidutsläppens effekter på klimatsystemet lär bli bestående i årtusenden (se s. 74). Om våra efterkommande i alla händelser måste leva med klimatstörningarna under så lång tid borde det väl inte göra så stor skillnad om vi väntar i några år till med att minska utsläppen?

Jo, faktum är att ett förhållande av utsläpps-begränsningarna gör en avsevärd skillnad just på grund av att koldioxiden är så seglivad och att dess effekter på klimatet därigenom kan bli så långvariga. Fortsatt användning av fossila bränslen kommer att ackumulera allt mer koldioxid till den som redan finns i luften. Ytterligare tio år utan en minskning av utsläppen innebär därför inte bara tio års förlängning av klimatstörningarnas tusentals år långa tidsskala. Det innebär också att koldioxidhalterna blir högre och klimatförändringarna kraftigare under *alla* dessa årtusenden än de skulle bli om vi började reducera utsläppen nu.

Vi hade kunnat känna oss betydligt lugnare om koldioxid och andra växthusgaser hade varit lika kortlivade som exempelvis partikelburna luftföroreningar, som oftast inte blir kvar mer än några dygn i atmosfären. I så fall skulle vi förhållandevis obekymrat ha kunnat vänta med åtgärder tills utsläppens klimateffekter började bli besvärande, eftersom en reduktion av utsläppen då skulle ha fått gynnsam verkan utan nämnvärd fördröjning.

I verkligheten kommer det i stället att bli allt svårare och kostsammare att hålla klimatstörningarna inom acceptabla gränser ju längre åtgärderna dröjer. Ju mer koldioxid vi släpper ut de närmaste åren, desto kraftigare måste vi skära ned utsläppen längre fram om vi vill begränsa den långsiktiga uppvärmningen till en nivå som inte är alltför hög. Att vänta med kraven på utsläppsreduktioner skulle dessutom kunna

Än är det inte för sent att begränsa vår inverkan på klimatet. Än har vi möjlighet att till våra barnbarn överlämna en värld där isarna bär i svenska skärgårdar, en värld där människor i varmare länder kan bruka sin jord utan att grödorna förtvinar av torka, en värld där Venedig fortfarande når ovanför havsytan. Förutsättningen är att vi alla är beredda att göra något åt saken.



Ju längre vi väntar med att reducera utsläppen av koldioxid, desto kraftigare kommer vi att tvingas minska dem under kommande år, förutsatt att vi vill hålla den globala uppvärmningen på någorlunda hanterliga nivåer. Diagrammet visar hur koldioxidutsläppen vid olika tidpunkter hade behövt förändras för att vi skulle kunna begränsa uppvärmningen till två grader. Hade vi börjat dra ned på utsläppen redan på 1990-talet kunde vi ha nöjt oss med en betydligt måttligare minskningstakt än den vi skulle behöva ta till nu.

– Från R.M. Andrew, Center for International Climate and Environmental Research, Oslo.

leda till att vi låser fast oss ytterligare i vårt beroende av fossila bränslen, exempelvis genom investeringar i energikrävande transportsystem. Sådana system är både långlivade och dyra att byta ut i efterhand.

### **Koldioxid är svår att bli av med – därför måste vi minska utsläppen**

Flera av de allvarliga och omfattande föroreningsproblemen som gjorde sig kännbara under senare delen av 1900-talet har i dag till stor del bringats under kontroll, även om det kommer att ta decennier eller mer innan de helt kan vara ur världen. Till dessa problem hör försurningen av sjöar och vattendrag i Nordeuropa och Nordamerika, liksom nedbrytningen av stratosfärens ozonskikt. Utsläppen av svavel och andra förorenande ämnen kunde reduceras genom avgas- och rökgasrening, och de ozonnedbrytande ämnena kunde ersättas med substanser som inte är lika skadliga för ozonskiktet (se s. 78).

Tekniska lösningar av sådana slag är mycket svårare att åstadkomma när det gäller utsläppen av koldioxid, en gas som obönhörligen uppkommer vid all förbränning av kolhaltiga bränslen, oavsett hur och var den äger rum. När

koldioxiden väl har bildats finns inga praktiskt användbara möjligheter att bryta ned den.

Ett tänkbart alternativ skulle kunna vara att fånga upp den koldioxid som frigörs vid förbränning av fossila bränslen och pumpa ned den i berggrunden. Med hjälp av sådan teknik, kallad CCS (carbon capture and storage), skulle vi teoretiskt kunna fortsätta att använda olja, fossilgas och stenkol utan att åstadkomma alltför stora klimatstörningar. Tekniken skulle till och med kunna göra det möjligt att befria atmosfären från en del av den koldioxid som vi redan har släppt ut. Förutsättningen är i så fall att vi också börjar lagra koldioxid från förbränning av ved eller annan biomassa, dvs. bränslen som har bundit koldioxid från luften i vår egen tid, inte för miljontals år sedan.

Tack vare de här möjligheterna har koldioxidlagring ofta setts som en utväg ur klimatproblemen, inte bara av företrädare för olje-, gas- och kolindustrin utan också inom klimatforskningen och energipolitiken. Klimat-scenarier som räknar med att vi inom en snar framtid kan hejda den globala uppvärmningen bygger i de flesta fall på att vi med hjälp av CCS-teknik får ned nettoutsläppen av koldioxid inte bara till noll utan rentav till negativa nivåer mot slutet av innevarande sekel. Till dessa scenarier hör RCP2,6, det mest optimistiska av dem som valdes ut när FN:s klimatpanel skulle genomföra sin senaste utvärdering av klimatförändringarna (se s. 86).

Men trots flera decenniers experiment med koldioxidlagring har tekniken ännu inte slagit igenom. Den tillämpas ibland vid utvinning av olja eller fossilgas, eftersom koldioxid ofta uppträder som förorening i sådana bränslen. I de fallen samlas koldioxiden upp för att sedan pumpas ned i berggrunden igen, främst för att underlätta fortsatt olje- och gasutvinning. I kraftverk och andra förbränningsanläggningar har CCS-teknik däremot bara kommit till användning i enstaka fall, och hittills aldrig med lönsamhet. Att skilja av koldioxid från övriga förbränningsgaser kräver en hel del energi, och kostnaderna är höga. Åtskilliga utvecklingsprojekt har lagts ned på grund av tekniska och/eller ekonomiska svårigheter. Och att vi på det här sättet skulle kunna ta hand om koldioxidutsläppen från små och rörliga källor såsom bilar och andra fordon förefaller över huvud taget inte realistiskt.

Det förefaller därför allt mer osannolikt att vi med hjälp av CCS skulle kunna undvika allvarliga klimatstörningar utan att dra ned på användningen av fossila bränslen. Det finns åtskilliga andra idéer om hur vi på teknisk väg skulle kunna åstadkomma något sådant (se s. 82–83), men alla lösningar av det slaget kan på olika grunder ifrågasättas. De flesta av metoderna finns bara på papperet, och ingen är prövad i stor skala. Alla är synnerligen utrymmes- och/eller energikrävande och därför mer eller mindre kostsamma. Alla kan dessutom få omfattande och oönskade bieffekter på jordens miljö.

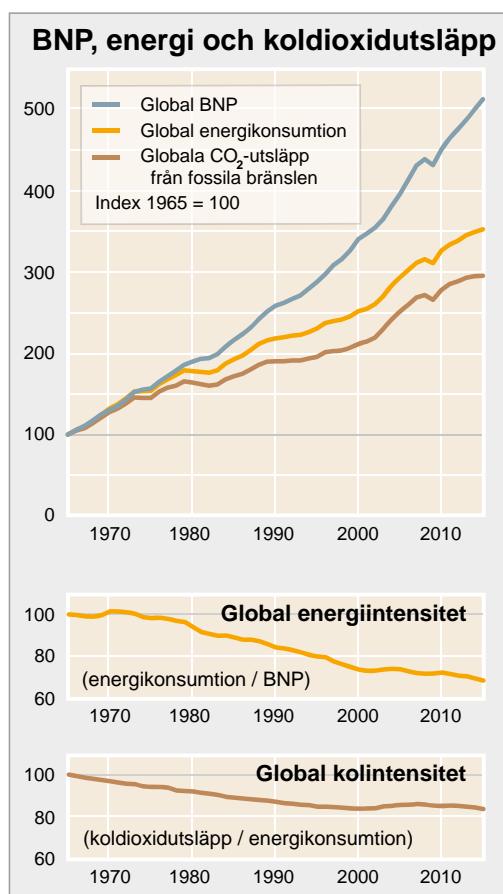
Kanske ter sig klimatstörningarna en dag så hotande att vi ändå ser oss tvungna att ta till någon form av storskalig ingenjörskonst för att försöka begränsa dem. Men vi tar mycket stora risker om vi förlitar oss på lösningar av det slaget och tror att de räcker för att vi ska kunna bevara ett gynnsamt klimat.

CCS-teknik betraktas fortfarande som ett tänkbart komplement till åtgärder som medför faktiska utsläpps begränsningar, men ska vi kunna hejda koldioxidhaltens nuvarande ökning i atmosfären har vi i realiteten inget annat val än att reducera förbrukningen av fossila bränslen.

Världsekonomin tillväxt har dragit med sig tilltagande energibehov och utsläpp av koldioxid. Men energikonsumtionen har inte ökat lika snabbt som bruttonationalprodukten (BNP), och koldioxidutsläppen har tilltagit något långsammare än den totala konsumtionen av energi.

Annorlunda uttryckt har energi- och kolintensiteten minskat – sambanden mellan tillväxt och utsläpp har försvagats. Kring år 2000 upphörde dock kolintensiteten att avta, främst på grund av ökande stenkolsanvändning i utvecklingsländerna.

– Data från Världsbanken och BP Statistical Review of World Energy.



## Sambandet mellan tillväxt och koldioxidutsläpp måste brytas

Allt sedan industrialiseringen tog sin början har användningen av fossila bränslen varit en av de viktigaste drivkrafterna för ekonomisk tillväxt och materiell välståndökning. Det betyder att koldioxidutsläppen länge har avspeglat den samhällsekonomiska utvecklingen – stigande bruttonationalprodukt har åtföljts av tilltagande utsläpp.

Också i fortsättningen kan ekonomisk tillväxt väntas innebära ökande globala koldioxidutsläpp, såvida vi inte börjar göra mer för att begränsa utsläppen än hittills. De rika länderna har hittills varit ovilliga att minska sitt nyttjande av fossila bränslen i en sådan omfattning att det skulle kunna inverka negativt på ekonomin. I utvecklingsländerna har strävandena att nå materiell välmåga lett till snabbt ökande bränsleanvändning och koldioxidutsläpp. Där anser man generellt att huvudansvaret för att begränsa den globala uppvärmningen ligger hos den rikare delen av världen. Man pekar på att dagens klimatförändringar främst beror på tidigare utsläpp i västvärlden, och att de rika länderna alltjämt släpper ut mer växthusgaser per capita än de fattiga.

Det här innebär att kraftiga minskningar av koldioxidutsläppen knappast är att räkna med så länge kopplingen mellan ekonomisk utveckling och användning av fossila bränslen består. Att på olika sätt bryta denna koppling har blivit en huvudlinje i försöken att reducera människans klimatpåverkan.

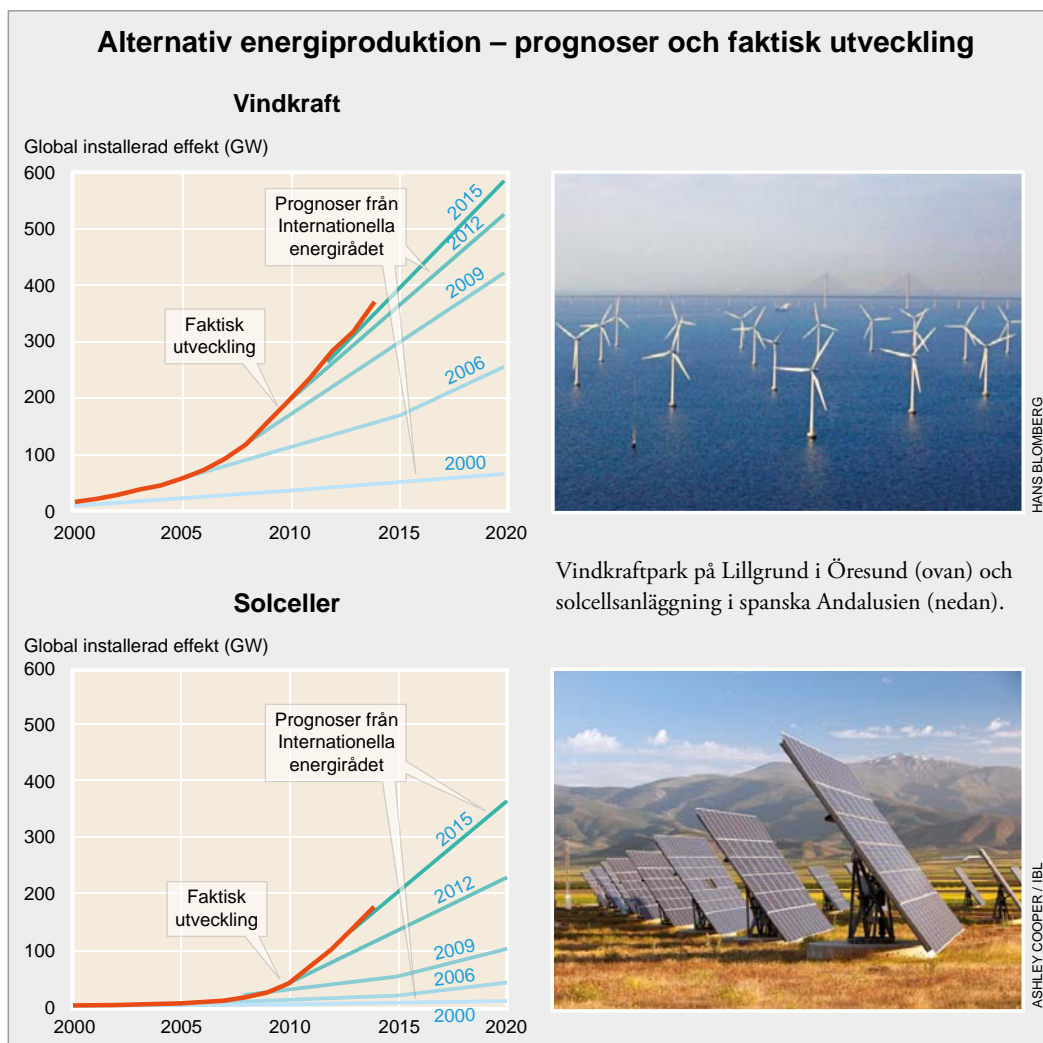
Faktum är att det finns rätt goda möjligheter att reducera förbrukningen av fossila bränslen utan att behöva göra avkall på den ekonomiska tillväxten. Tack vare tekniska framsteg har vi lyckats utnyttja energi med allt större effektivitet och allt mindre förluster. *Energiintensiteten*, förhållandet mellan energiförbrukning och bruttonationalprodukt, har därigenom avtagit allt mer. I västvärlden har den utvecklingen fortgått sedan mer än hundra år, och numera ser vi den också i flertalet övriga länder.

Under senare delen av 1900-talet kännetecknades den globala energianvändningen också av minskande *kolintensitet*, dvs. minskande koldioxidutsläpp från fossila bränslen i förhållande till den totala mängden förbrukad energi. Detta uppnåddes främst genom övergång från stenkol

Möjligheterna att i stor skala ersätta fossila bränslen med alternativa energikällor har tidigare ofta underskattats. Både vindkraft och solceller har blivit allt mer konkurrenskraftiga och installeras nu i en omfattning som få förutsåg för bara några år sedan.

Diagrammen visar hur Internationella energirådet (International Energy Agency) år för år har fått justera upp sina prognoser för utbyggnadstakten. Verkligheten har hela tiden överträffat förväntningarna.

– Data från *World Energy Outlook*, IEA.



till olja eller gas och från fossila bränslen till andra slags energikällor.

Inte minst i Sverige har vi numera kommit ganska långt på den vägen. Tack vare effektivare tillverkningsprocesser och energianvändning har stora delar av den svenska industrin kunnat minska sina koldioxidutsläpp trots ökad produktion. Genom processförändringar och återanvändning av egna restprodukter har exempelvis massindustrin sedan 1980 reducerat sin oljeförbrukning med 90 procent, samtidigt som massproduktionen tilltagit med närmare 50 procent.

Förbättrad isolering, värmeåtervinning ur ventilationsluft och effektivare värmesystem innebär också att vi i dag förbrukar betydligt mindre energi per kvadratmeter för uppvärmning av bostäder och arbetslokaler än för några decennier sedan.

Insatser av sådana slag har medfört att de rikare ländernas förbrukning av fossila bränslen under senare år inte varit lika starkt knuten till samhällsekonomin som tidigare. Den föränd-

ringen har till största delen åstadkommit utan att vara pådriven av klimatpolitiska ingripanden, och mycket talar för att den skulle kunna fortsätta på samma spontana sätt länge än. Med få undantag har den nämligen varit ekonomiskt gynnsam för näringsliv, samhälle och enskilda medborgare.

Investeringar i energisnål teknik och nya energislag kan visserligen vara dyrbara, men tack vare minskade energikostnader kan de betala sig på relativt kort tid. Ofta får sådana investeringar också positiva bieffekter i form av förbättrad luftkvalitet och minskat beroende av importerade bränslen.

En särskilt hoppig utveckling på det här området är senare års snabba genomslag för alternativa energikällor, i första hand vindkraft och solceller. De tas nu i bruk i en takt som överträffar alla tidigare förväntningar. Kostnaderna för tillverkning av solceller är nere i en bråkdel av vad de var för bara några år sedan. Stora framsteg har också gjorts när det gäller möjligheterna till energilagring i exempelvis batterier.



## Resurssnål teknik kan behöva hjälpas fram av samhället

Att en investering i ny och miljövänligare teknik har förutsättningar att betala sig – dvs. att utbytet kan väntas överstiga kostnaderna – är dessvärre ingen garanti för att den faktiskt blir av. I en idealiskt fungerande marknadsekonomi skulle den genomföras utan dröjsmål, men i verkligheten finns hinder som kan medföra att den uteblir. Dit hör bristande kännedom om möjliga effektiviseringar, fattigdom som omöjliggör kostsamma investeringar, samt inrotade vanor, sociala normer eller personliga värderingar som innebär att vissa handlingsmönster och tekniska lösningar upprätthålls trots att det kan finnas ekonomiskt fördelaktigare alternativ.

En del tänkbara omställningar kan även förseas eller utebli på grund av sin komplexitet. För att bilar avsedda för ett nytt drivmedel ska bli tillverkade och köpta i betydande omfattning måste drivmedlet ifråga göras lättåtkomligt i en stor del av världen. Samtidigt gäller också det omvända – för att det nya drivmedlet ska få allmän spridning måste det gå att sälja, vilket förutsätter att ett tillräckligt stort antal bilar av den nya typen har tagits i bruk. Den ena förändringen är inte möjlig utan att också den andra genomförs. En framgångsrik omställning kan underlättas genom att samhället stöttar teknikutveckling, kommersialisering och konsumentefterfrågan.

Något vi behöver vara uppmärksamma på är att det ekonomiska utrymme som skapas av resurssnålare teknik ofta blir utnyttjat för ökad konsumtion. Fenomenet brukar kallas *rekyleffekt*. Energiåtgången per kvadratmeter för bostadsuppvärmning har minskat, men det har motverkats av att bostäderna blivit större. Bilmotorerna har blivit bränslesnålare, men bilarernas totala bränsleförbrukning har förblivit hög genom att de blivit fler, tyngre och motorstarkare och genom att körsträckorna blivit längre.

Sådant har bidragit till att de globala koldioxidutsläppen fortsatt att öka även efter millennieskiftet. Tack vare minskad energi- och kolintensitet har utsläppen visserligen börjat avta i åtskilliga europeiska länder, däribland Sverige, men på de flesta andra håll i världen har uppgången fortsatt. Även där har energiintensiteten reducerats genom effektiviseringar, men det har inte kunnat hindra energiförbrukningen

från att öka när den ekonomiska tillväxten skjuttit fart. Många utvecklingsländer har dessutom baserat en allt större del av sin energiproduktion på stenkol. Kring år 2000 upphörde den globala kolintensiteten därigenom att sjunka.

## Ändrad livsstil en nyckel till rejäla utsläppsbegränsningar

Om vi ska kunna undvika en kraftig ökning av klimatförändringarna måste utsläppen av koldioxid från fossila bränslen upphöra i det närmaste helt inom loppet av det här århundradet. Annorlunda uttryckt måste den globala kolintensiteten i stort sett ha minskat till noll vid nästa sekelskifte.

För att något sådant ska bli möjligt räcker det knappast med att vi byter ut fossila bränslen mot förnybar energi – sannolikt måste vi också dra ned på den totala energikonsumtionen. Exempelvis behöver vi av allt att döma minska transportvolymerna. Det är tveksamt om vi kan reducera trafikens koldioxidutsläpp tillräckligt snabbt enbart genom att förlita oss på en övergång från bensin och diesel till biobränslen, el eller andra alternativa drivmedel. Till saken hör att biobränslen inte går att framställa i hur stora mängder som helst. Oavsett om produktionen av sådana bränslen baseras på jordbruksgrödor eller på skogsråvara finns det gränser för hur stora odlingsarealer den kan ta i anspråk.

Fossila bränslen används i våra dagar inom praktiskt taget alla samhällssektorer, särskilt i de rikare länderna. Förutom trafik och transporter har också energi- och varuproduktion, skogsbruk, jordbruk och flertalet andra näringar i större eller mindre grad gjort sig beroende av sådana bränslen. Och utan skärpta åtgärder mot vår klimatpåverkan kan de globala utsläppen av växthusgaser väntas fortsätta att öka inom samtliga sektorer utom skogs- och jordbruk.

Ansvar för att begränsa utsläppen av koldioxid och andra växthusgaser kan därför inte läggas på någon specifik verksamhet – det åvilar samhället och befolkningen i dess helhet. De kraftiga utsläppsminskningar som behöver göras fordrar inte bara teknikutveckling utan också väsentliga förändringar av den enskilda människans livsstil. Våra matvanor, vår boendestandard och vårt resande bidrar i hög grad till de klimatpåverkande utsläppen och har därför blivit alltmer ifrågasatta.

## MATEN OCH KLIMATET

Mer än 20 miljoner ton växthusgaser (räknat som koldioxidekvivalenter) släpps varje år ut i samband med produktion och transporter av de livsmedel som svenska hushåll konsumerar. Det innebär att mat och dryck svarar för en tredjedel av hushållskonsumtionens totala klimatpåverkan. Andelen har dessutom tenderat att öka under senare år.

Enbart produktionen av de animalier (kött, mejeriprodukter och ägg) som vi äter i Sverige orsakar lika stora utsläpp av växthusgaser som all personbilstrafik i landet. Visserligen har den inhemska animalieproduktionen minskat sedan början av 1990-talet, men genomsnittssvenskens konsumtion av kött har under samma tid ökat med drygt 40 procent. Allt mer kött har därför importerats. Vi får av den anledningen en felaktig bild av den svenska köttkonsumtionens klimateffekter om vi bara granskar utsläppen från Sveriges egen produktion av kött. Indirekt påverkar vi också klimatet via jordbruk och livsmedelsindustri i utlandet.

En viktig orsak till att just animalieproduktionen får så stor inverkan på klimatet är att den kräver stora arealer. Mer än två tredjedelar av all jordbruksmark i världen används för bete eller odling av fodergrödor. Det betyder att produktionen av djurfoder står för en stor del av jordbrukets totala växthusgasutsläpp. Till dessa utsläpp hör frigörelsen av koldioxid och dikväveoxid från jordbruksmark samt koldioxidutsläppen från

jordbruksmaskiner som drivs med fossila bränslen. Dikväveoxid släpps också ut vid framställning av den mineralgödsel som används i jordbruket. Mycket koldioxid frigörs dessutom om man avverkar skog för att ersätta den med betesmark eller odlingsmark.

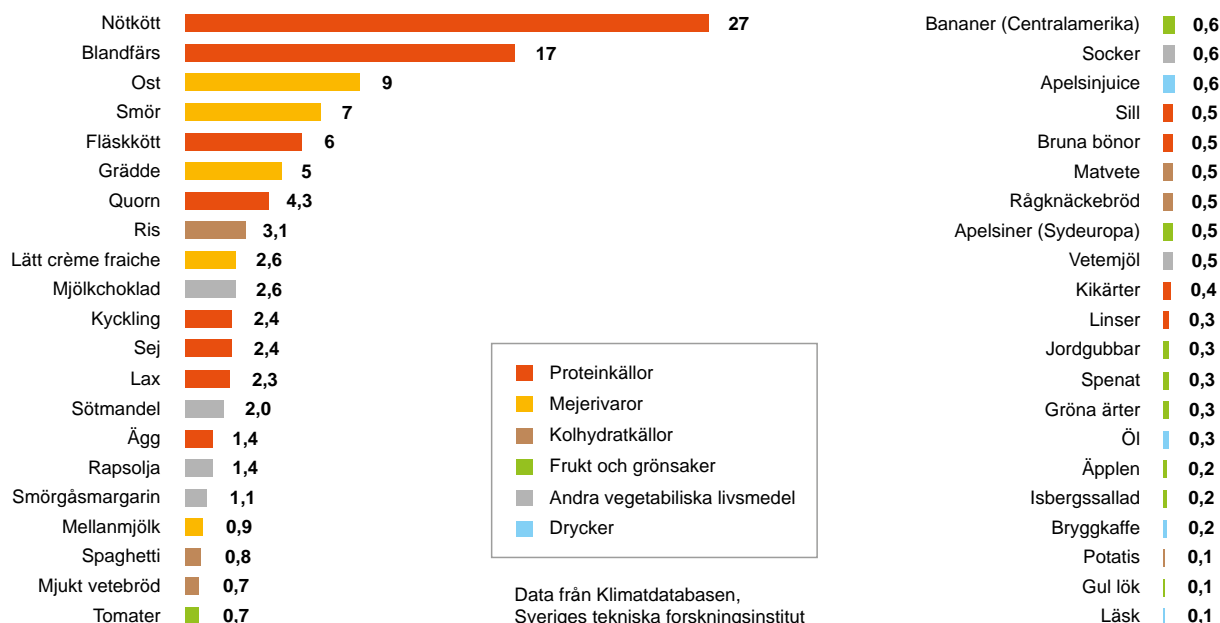
Därtill bildas stora mängder metan vid matsmältningen hos idisslande boskap såsom nötkreatur och får. Det bidrar till att vi påverkar klimatet betydligt mer genom konsumtion av nötkött än om vi väljer att äta lika mycket fläskkött eller kyckling. Av samma skäl hör också ost till de mest klimatpåverkande livsmedlen.

Allt detta innebär att våra matvanor kan ha lika stor betydelse för klimatet som vårt resande eller boende. Minskad köttkonsumtion medför minskade utsläpp av växthusgaser (och kan dessutom få positiva effekter på folkhälsan). Om alla övergick till helt vegetarisk kost kompletterad med ägg och mejeriprodukter skulle klimateffekterna av Sveriges livsmedelskonsumtion halveras. Vi kan också reducera utsläppen genom att se till att mindre mat går till spillo.

Samtidigt måste vi ha klart för oss att boskapsskötsel och köttproduktion lämnar mycket väsentliga bidrag till världens resurshushållning, livsmedelsförsörjning och ekologiska tillgångar. Åtskilligt av betet är förlagt till marker som inte lämpar sig för odling av grödor, och betande djur spelar en avgörande roll för jordbrukslandskapets attraktionsvärden och biologiska mångfald.

### Olika livsmedels klimatpåverkan

Utsläpp av växthusgaser (kg CO<sub>2</sub>-ekvivalenter per kg livsmedel) vid produktion och transporter



Data från Klimatdatabasen, Sveriges tekniska forskningsinstitut

De flesta av oss som bor i Sverige eller andra rika länder har avsevärda möjligheter att begränsa vår egen klimatpåverkan. Vi kan välja att göra färre och/eller kortare resor med bil och flyg, vi kan köpa färre kapitalvaror, vi kan dra ned inomhustemperaturen någon grad under den kalla årstiden, vi kan använda duschen i stället för badkaret, och vi kan äta mindre kött. Många av oss har redan dragit ett och annat strå till den stacken, men mycket mer kommer att behövas för att effekterna ska bli stora nog.

Oavsett hur vår personliga klimatpåverkan ser ut är följderna av den svåra att urskilja. Många slags föroeningar som människan släpper ut orsakar de allvarligaste skadeverkningarna i utsläppskällornas omedelbara närhet, men växthusgaserna får ju i stället jämn spridning i hela jordatmosfären. Den som släpper ut koldioxid från sin bil eller sitt hus ser av den anledningen inga som helst effekter av sina utsläpp i den egna omgivningen. Visserligen kanske det märks att klimatet blir varmare, men detta är i så fall det samlade resultatet av växthusgasutsläppen i hela världen.

Av motsvarande skäl kommer den som *undviker* att släppa ut koldioxid aldrig att se några lokala, positiva effekter av sitt eget handlande. Även om utsläppsbegränsningar efterhand börjar genomföras i så många delar av världen att de globala koldioxidutsläppen faktiskt reduceras märkbart kommer det att dröja decennier innan nedskärningarna får mätbar inverkan på klimatet.

Detta stora avstånd i tiden mellan åtgärd och effekt bidrar till att det kan bli svårt att få gehör för omfattande insatser mot klimatstörningarna, särskilt om de inkräktar på det personliga levnadssättet. De uppkostnader och utgifter som krävs för att åstadkomma olika slags utsläppsminskningar i dag är förhållandevis lätta att identifiera och beräkna, och de belastar enskilda människor, företag och nationer här och nu. De vinster som uppkommer genom uteblivna klimatstörningar är avsevärt svårare att värdera, och de tillfaller en anonym eftervärld.

## Nationalekonomi och etik

Hur ska man egentligen väga framtida fördelar mot nutida kostnader? I samhällsekonomiska analyser brukar framtida vinster normalt *diskonteras* (skrivas ned). De anses alltså mindre

värda än nutida vinster, som redan i dag kan investeras, läggas till grund för fortsatt ekonomisk tillväxt och därmed skapa ytterligare vinster framöver. På motsvarande sätt diskonteras också kostnaderna för framtida skador.

Om diskonteringsräntan i en ekonomisk analys sätts till exempelvis 4 procent kommer händelser som inträffar bortom de närmaste decennierna att tillmätas mycket liten vikt. Men frågan är hur väl konventionella analyser av det slaget fungerar som vägledning för beslut som kan få mycket långvariga följder. Diskonteringen bygger på hur vi värderar nutida vinster i förhållande till vinster som kan tillfalla oss själva längre fram i livet. Det blir genast mer problematiskt att på liknande sätt ställa vår egen nutida ekonomiska situation mot kommande generationers välfärd. Människor som ännu inte är födda kan inte argumentera för sin sak. Gör vi oss skyldiga till diskriminering om vi anser att deras välfärd är mindre värd än vår egen?

Nedskrivningen av framtida vinster och kostnader bygger dessutom på antagandet att den ekonomiska tillväxten kommer att fortsätta ungefär som hittills. Sett i ett långt tidsperspektiv är ett sådant antagande knappast välgrundat. Gångna decenniers tillväxt har ju varit starkt kopplad till den ökade användningen av fossila bränslen. Vad händer med tillväxten om vi framöver – frivilligt eller ofrivilligt – drar ned på förbrukningen av sådana bränslen? Och vad händer med vår ekonomi om vi i stället fortsätter att använda allt mer fossila bränslen och klimatstörningarna därigenom får allt mer kostsamma konsekvenser?

Sådana frågor ledde till att den brittiske nationalekonomen Nicholas Stern valde att sätta diskonteringsräntan så lågt som 0,1 procent när han år 2006 granskade klimatförändringarnas ekonomiska konsekvenser. Därigenom fick även mycket långsiktiga effekter av vårt nutida handlande stort genomslag i analysresultaten. Med andra ord tillskrevs framtida skadeverkningar av dagens utsläpp långt större betydelse än i mer konventionella ekonomiska analyser. På motsvarande sätt uppvärderades också de positiva följderna av nutida utsläppsbegränsningar.

Sterns utredning blev mycket uppmärksam, och i dess efterföljd har även en del nyare klimatekonomiska analyser utgått från diskon-

teringsräntor i närheten av noll. Men det finns inget objektivt och vetenskapligt svar på vilken diskonteringsränta som är den rätta. Efter- som valet handlar om hur vi värderar framtida generationers välfärd i förhållande till vår egen är det i praktiken fråga om ett etiskt övervägande.

Att uppskatta vad det totalt skulle kosta oss att undvika farliga klimatstörningar är svårt också av ett annat skäl. En sådan uppskattning förutsätter att vi kan bedöma kostnaderna inte bara för nutida insatser mot klimatförändringarna utan också för åtgärder som genomförs åtskilliga decennier in i framtiden. I verkligheten kan vi förstås bara gissa oss till vilka tekniska möjligheter att begränsa utsläppen som kommer att finnas vid det laget, och vilka politiska, ekonomiska och sociala hinder som kommer att stå i vägen.

Flera försök har ändå gjorts att beräkna totalkostnaderna för att stabilisera atmosfärens innehåll av växthusgaser vid en någorlunda måttlig nivå. I typiska fall säger resultaten att de åtgärder som krävs på sin höjd skulle bromsa den globala ekonomiska tillväxten med 0,1 procentenheter per år. Till år 2100 skulle världsekonomin i så fall sammanlagt växa några procent mindre än om åtgärderna inte vidtogs.

Olika beräkningar av åtgärdskostnaderna kan emellertid gå starkt isär. I allmänhet bygger de också på kraftigt idealiserade antaganden, såsom att samtliga länder genast påbörjar insatser mot klimatförändringarna och att utsläpp av koldioxid sker på samma ekonomiska villkor i hela världen. I många fall utgår beräk-

ningarna dessutom indirekt från att klimatstörningar inte kostar något – de jämför utsläpps- begränsningars inverkan på den ekonomiska tillväxten med scenarier där utsläppen inte begränsas men där deras klimateffekter ändå inte påverkar tillväxten negativt.

Men även om vi skulle ifrågasätta kostnads- beräkningar av det här slaget kan vi finna det säkrast att helhjärtat satsa på begränsningar av vår klimatpåverkan. Klimathoten är så allvarliga att det finns goda skäl att försöka undvika dem trots att vi inte på förhand vet säkert vad åtgärderna kommer att kosta.

## Juridiska och ekonomiska styrmedel som klimatpolitiska redskap

Hur önskvärd det än vore kan vi knappast utgå från att enskilda individer och företag helt på eget bevåg kommer att begränsa sina utsläpp av växthusgaser i tillräcklig utsträckning. För att begränsningarna ska bli omfattande nog och genomföras tillräckligt snabbt krävs i praktiken en aktiv och målmedveten klimatpolitik.

Lagar, regler och andra *juridiska* eller *administrativa styrmedel* är de traditionella redskap som samhället använder för att förverkliga en politisk viljeinriktning. I dag finns åtskilliga sådana regler som lett till begränsningar av vår klimatpåverkan, även om en del av dem i första hand har tillkommit i något annat syfte. Till dem hör en rad bestämmelser avsedda att minska förbrukningen av energi, däribland de svenska byggnormernas krav på värmeisolering och EU:s ramdirektiv om ekodesign. Direktivet

Genom att samla in matavfall och röta det i stället för att köra det till tippen kan man ersätta fossila bränslen med ett förnybart bränsle (biogas), samtidigt som man minskar metanutsläppen från avfallsupplagen. Tillkomsten av biogasverk som detta i Skellefteå har drivits fram av flera olika slags styrmedel, både juridiska (såsom förbudet mot deponering av organiskt avfall) och ekonomiska (såsom beskattningen av fossila bränslen).



ifråga, som infördes i svensk lag 2008, gör det möjligt att förbjuda särskilt energi- och resurskrävande produkter på EU-marknaden. Med stöd av ekodesigndirektivet har EU exempelvis stoppat all försäljning av glödlampor.

Ett annat exempel är det förbud mot deponering av organiskt avfall som Sverige i enlighet med ett EU-direktiv införde 2005. En viktig avsikt med förbudet var att förbättra hushållningen med resurser, men åtgärden har också medfört minskade utsläpp av metan från avfallsupplagen (se s. 76). Även skogsvårdslagen, tillkommen 1903, har hjälpt till att begränsa Sveriges klimatpåverkan. Dess krav på god skogsskötsel och återbeskogning efter avverkning har bidragit till att de svenska virkesvolymerna vuxit och att skogen därigenom tagit upp allt mer koldioxid från luften.

Det finns också lagstiftning som mer direkt är riktad mot utsläppen av växthusgaser. Dit hör en EU-förordning om koldioxidutsläppen från bilar. Förordningen säger att den uppsättning personbilsmodeller som en biltillverkare saluför i genomsnitt får släppa ut högst 130 g koldioxid per körd kilometer. Kravet kommer efterhand att skärpas – från och med 2021 får genomsnittsutsläppen inte överstiga 95 g/km.

Som alternativ eller komplement till lagar och regler används också olika slags *ekonomiska styrmedel* som klimatpolitiska redskap, både i Sverige och utomlands. Investeringar i ny teknik som innebär reducerad eller helt eliminerad klimatpåverkan kan sålunda uppmuntras genom ekonomiskt stöd. Svenska exempel på sådant stöd är de statliga bidrag som utgår till investeringar i vindkraftverk och installation av solceller.

Ännu viktigare än ”morötter” av ovan nämnda slag är ”piskor” i form av skatter och avgifter som sätter ett pris på användning av fossila bränslen och utsläpp av koldioxid. Styrmedel av den typen är särskilt användbara för begränsning av utsläpp som kommer från många olika samhällssektorer och som kan åtgärdas på en rad skilda sätt. Till skillnad från juridiska styrmedel ger de både producenter och konsumenter möjlighet att agera efter eget huvud, men genom att höja kostnaderna för varor och tjänster med stor klimatpåverkan uppmuntrar de ett skifte till ”klimatvänligare” alternativ.

I Sverige infördes en allmän energiskatt redan på 1950-talet. Detta var långt innan nå-

gon klimatpolitik var påtänkt – beskattningen tillkom av rent statsfinansiella skäl och gjorde till en början ingen skillnad mellan olika slags bränslen utgående från deras klimatpåverkan. År 1984 befriades emellertid biobränslen från energiskatt, vilket genast ökade intresset för bränslen av det slaget. År 1991 införde Sverige dessutom som ett av de första länderna i världen en särskild koldioxidskatt på fossila bränslen, direkt relaterad till hur stora koldioxidutsläpp förbränningen orsakar. Under de följande åren drev beskattningen fram en omfattande övergång till förnybara bränslen vid de svenska fjärrvärmeverken.

Energi- och koldioxidskatterna är de hittills kraftfullaste medel som Sverige har tagit i bruk för att begränsa de klimatpåverkande utsläppen. Tillsammans uppgår dessa skatter i dag till ca 65 miljarder kronor per år. Olika former av koldioxidbeskattning har nu också införts eller är på väg att införas i ett fyrtiotal andra länder.

En global koldioxidskatt vore enligt många ekonomer ett idealiskt verktyg för begränsning av människans klimatpåverkan, men dit är vägen lång. Fortfarande finns många länder som i stället subventionerar utvinning eller användning av fossila bränslen. I själva verket är dessa subventioner sammantagna betydligt större än den sammanlagda beskattning av koldioxidutsläpp som hittills införts på olika håll i världen.

De svenska energi- och koldioxidskatterna har delvis kompenseras genom sänkningar av skatterna på arbete. En sådan s.k. grön skatteväxling begränsar inte bara koldioxidutsläppen utan kan också medföra samhällsvinster i form av ökad sysselsättning. Att Sverige var tidigt ute med energi- och koldioxidbeskattning vållade likväl oro inom exportindustrin, som befarade ett försämrat konkurrensläge gentemot länder som ännu inte hade infört skatter av det slaget. Varningar framfördes om att många företag skulle välja att förlägga produktionen utomlands, vilket skulle innebära att deras koldioxidutsläpp bara flyttades i stället för att skäras ned.

Det kan diskuteras hur stor risken för sådant ”koldioxidläckage” över gränserna egentligen är, men den har ändå föranlett justeringar av de svenska energi- och koldioxidskatterna. Bränslen som utnyttjas till bl.a. elproduktion, i tillverkningsindustri och i skogs- och jordbruk beskattas lindrigare än bränslen som används i andra sammanhang, och företag med särskilt

stor energiförbrukning får ytterligare skattelättnader. Detta begränsar givetvis skatternas effekter på koldioxidutsläppen.

Flertalet större processindustrier samt kraft- och värmeverk i Sverige omfattas nu i stället av det system för *handel med utsläppsrätter* som EU införde 2005. Ett tak har satts för det sammanlagda utsläppet av koldioxid från sådana anläggningar inom hela unionen. Varje enskild anläggning har tilldelats ett visst antal utsläppsrätter motsvarande 1 ton koldioxid per styck. Ett företag som till låg kostnad kan minska sina utsläpp har möjlighet att sälja sitt överskott av utsläppsrätter till andra företag inom EU där åtgärder mot koldioxidutsläppen är dyrare.

Att använda ett *marknadsbaserat styrmedel* av det här slaget är i teorin ett kostnadseffektivt sätt att begränsa utsläppen. En förutsättning är emellertid att den totala mängd utsläppsrätter som delas ut är mindre än vad företagen tidigare ansett sig behöva. I praktiken har tilldelningen hittills varit alldeles för frikostig. Eftersom få företag behövt köpa utsläppsrätter har deras marknadsvärde sjunkit till mycket låga nivåer, motsvarande en bråkdel av den svenska koldioxidskatten. Handelssystemets effekter på koldioxidutsläppen är därför fortfarande relativt begränsade.

Ett marknadsbaserat styrmedel som i högre grad har infriat förväntningarna är det system med *elcertifikat* som infördes i Sverige år 2003. Elleverantörerna har ålagts att hämta en viss minimiandel av den distribuerade elkraften från nytillkomna förnybara energikällor. Marknadsaktörerna får själva välja hur de vill lösa uppgiften, men hittills är det framför allt vindkraftens och biobränslenas andelar av elproduktionen som har stigit sedan elcertifikaten infördes.

Vid sidan om juridiska och ekonomiska styrmedel kan även *information* medverka till att vi minskar vår klimatpåverkan. Myndigheter, massmedier och ideella organisationer ger tips om energisparande och andra praktiska råd om hur den enskilde kan begränsa sitt bidrag till utsläppen av växthusgaser. Inom EU måste en rad olika slags vitvaror, lampor och andra elapparater numera vara försedda med energimärkning, dvs. en klassificering av hur mycket el de förbrukar. För alla nya bilar som säljs inom EU gäller därtill krav på information om bränsleförbrukning och koldioxidutsläpp.

## Alla stöder klimatkonventionen, men förhandlingarna har tagit tid

För ett land som vill reducera sina utsläpp av växthusgaser finns som vi har sett en hel rad redskap till förfogande. I dagens globaliserade värld är det likväl svårt för en enskild nation att driva en radikal klimatpolitik på egen hand. Även om något sådant skulle lyckas kan insatserna naturligtvis inte ha någon större verkan på jordens klimat förrän de får efterföljd i andra länder. Klimatförändringarna är ett världsomfattande problem som knappast går att lösa annat än i global samverkan.

Dessbättre har en internationell process för att begränsa de klimatpåverkande utsläppen varit i gång sedan början av 1990-talet. Utgångspunkten är *FN:s klimatkonvention*, som antogs vid konferensen om miljö och utveckling i Rio de Janeiro år 1992. Tecknen på att människan förändrar jordens klimat var då ännu inte helt övertygande, men konferensdeltagarna valde att följa försiktighetsprincipen. De ansåg hotbilden vara så allvarlig att motåtgärder var befogade trots att det fortfarande fanns luckor i det vetenskapliga underlaget.

Klimatkonventionen trädde i kraft 1994, och i dag har 197 parter anslutit sig till den, däribland EU och samtliga medlemsstater i FN. Texten är utformad som en ramkonvention – den anger bara i mycket allmänna ordalag att farlig klimatpåverkan ska undvikas. Avsikten är att parterna efterhand ska fylla konventionen med ett mer konkret innehåll, framför allt i form av juridiskt bindande utfästelser om utsläppsminskningar.

Vid ett möte i Japan år 1997 antogs en första uppsättning av sådana utfästelser, kallad *Kyotoprotokollet*. Enligt detta avtal skulle de rikare länderna reducera sina utsläpp av växthusgaser med i genomsnitt 5 procent från år 1990 till perioden 2008–2012. Utvecklingsländerna slapp tills vidare krav på specifika utsläpps begränsningar. De ansågs ännu stå i början av sin ekonomiska utveckling, och deras utsläpp per capita var i allmänhet relativt små.

Kyotoprotokollet gav de rika länderna möjlighet att uppfylla en del av sina åtaganden utrikes i stället för på hemmaplan. Ett land som fann det alltför svårt eller kostsamt att hålla sin egen klimatpåverkan inom tillåtna gränser skulle kunna köpa sig rättigheter till extra utsläpp

från ett annat land som inte utnyttjade sin ”utsläppskvot” fullt ut. Det blev också möjligt för ett land att genomföra utsläppsbegränsande investeringar och liknande åtgärder utomlands – i både rika och fattiga länder – och tillgodoräkna sig de utsläppsminskningar som blev följden.

Tanken med dessa s.k. *flexibla mekanismer* var att insatser mot klimatpåverkande utsläpp ska kunna utföras där det är billigast. Exempelvis kan det vara enklare att effektivisera energianvändningen i en fattig nation än i ett rikare land där effektiviseringen redan har drivits ganska långt. Verkningarna på jordens klimat av en viss utsläppsminskning blir ju desamma oavsett i vilket land den äger rum.

Flera års förhandlingar krävdes innan parterna var överens om alla detaljer kring hur Kyotoprotokollet skulle tillämpas, och först år 2005 kunde avtalet träda i kraft. USA och Australien hade då valt att ställa sig utanför överenskommelsen, som senare övergavs även av Kanada. Övriga rika länder lyckades i de flesta fall genomföra utlovade utsläppsreduktioner inom utsatt tid, men så hade av allt att döma skett också utan ett bindande avtal. En viktigare faktor bakom minskningarna var de ekonomiska tillbakagångar som ägde rum i Östeuropa efter kommunismens fall och i Västeuropa i samband med 2008 års finanskris. Insatser i utvecklingsländerna inom ramen för Kyotoprotokollets flexibla mekanismer pågår än i dag, men de har aldrig fått någon större omfattning.

Att Kyotoavtalet fick blygsam inverkan på utsläppen av växthusgaser berodde emellertid framför allt på att utvecklingsländerna inte hade

ålagts några specifika begränsningar av sin klimatpåverkan. Till följd av snabb ekonomisk tillväxt kom åtskilliga av dessa länder tvärtom att mångfaldiga sina utsläpp från 1990 till åren kring 2010, den period som omfattades av avtalet. I stället för att minska kom de globala växthusgasutsläppen därför att öka med 50 procent under perioden ifråga.

Kyotoprotokollet betraktades å andra sidan bara som ett första steg i en lång process. Tanken var att det skulle följas av en rad bestämmelser om allt striktare och mer omfattande utsläppsbegränsningar. År 2009 träffades klimatkonventionens parter i Köpenhamn i syfte att besluta om ett avtal för tiden efter 2012. Mötet föregicks av högt ställda förväntningar om en överenskommelse som skulle kunna hejda den snabba utsläppsökningen och vända den i en nedgång.

Ändå blev förhandlingarna nästan resultatlösa, främst beroende på djupgående oenighet om hur utsläppsbegränsningarna skulle fördelas mellan rika och fattiga länder. Mötet utmynnade inte i något avtal utan bara i ett kortfattat kompromissdokument. Där utlovades stöd till klimatsatsningar i utvecklingsländerna – det rädde en allmän insikt om att dessa inte skulle kunna begränsa sina utsläpp tillräckligt snabbt utan en omfattande överföring av såväl kapital som tekniskt bistånd från rikare länder. En notering gjordes också om att den globala temperaturhöjningen borde begränsas till högst två grader. Dokumentet blev dock inte officiellt antaget, och det innehöll inga utfästelser om minskade utsläpp av växthusgaser.

Förhandlingarna inom ramen för FN:s klimatkonvention har ofta präglats av motsättningar mellan rika länder med stora utsläpp och fattigare länder med mindre men snabbt ökande utsläpp. Bilden är tagen vid en informell diskussion mellan representanter för olika utvecklingsländer under en paus vid klimatmötet i Paris 2015.



## Tvågradersmålet i centrum för nytt klimatavtal

Målet att begränsa den globala uppvärmningen till två grader fastställdes av klimatkonventionens parter vid ett möte i Cancún 2010, året efter Köpenhamns-mötet. Temperatursiffran utgjorde ett försök att tolka och konkretisera klimatkonventionens allmänna formulering om att undvika farlig klimatpåverkan. Självfallet finns ingen tydlig gräns mellan farliga och ofarliga klimatförändringar, men enligt många klimatforskare kommer två graders temperaturhöjning att få kännbara men ändå någorlunda hanterliga effekter på samhälle och miljö. Blir uppvärmningen kraftigare kan man vänta avsevärt svårare följder.

Tvågradersmålet hade antagits av EU redan 1996, och det hade med åren blivit allt mer etablerat som ett tydligt och lättbegripligt riktmärke för strävandena att begränsa människans klimatpåverkan. Fortfarande fanns dock inga internationella beslut om hur tvågradersmålet skulle nås.

Det blev efterhand alltmer uppenbart att världens alla länder knappast skulle kunna enas om gemensamma och bindande regler för hur mycket växthusgasutsläppen ska skäras ned. Den insikten ledde till att FN:s klimatförhandlingar gradvis ändrade inriktning. Inför 2015 års klimattmöte, som skulle hållas i Paris, offentliggjorde flertalet länder planer för hur mycket de

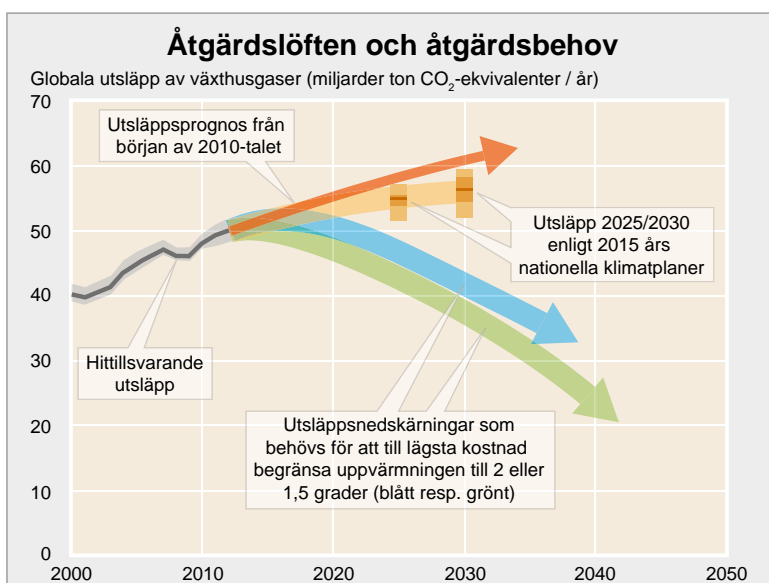
själva avsåg att begränsa sina utsläpp under de närmast följande åren. Parismötet kom därför att liknas vid ett knytkalas – alla deltagare bidrog med så mycket de för egen del ansåg sig förmå. Utfästelserna skiftade kraftigt i ambitionsgrad från land till land, men med frivilligheten som grund förlöpte förhandlingarna väl, och mötet resulterade i ett globalt klimatavtal, *Parisavtalet*, som ska gälla från 2020. Alla parter åtar sig i och med detta att anmäla nationella klimatplaner med löften om egna utsläpps begränsningar under kommande år.

En skärpt formulering av tvågradersmålet är inskriven som själva kärnan i Parisavtalet. Avsikten med överenskommelsen är att höjningen av den globala medeltemperaturen ska hållas ”väl under 2 °C”. Strävanden ska också göras att begränsa temperaturhöjningen till 1,5 °C. Det sistnämnda tillägget är till stor del ett resultat av påtryckningar från önationer där även en måttlig uppvärmning kan få förödande följder via sin inverkan på havsnivån.

Den allmänna uppslutningen bakom dessa höga ambitioner innebar att Parisavtalet sågs som en stor och symboliskt viktig framgång för det internationella klimatarbetet. Samtidigt har avtalet beskrivits som långt ifrån tillräckligt. De enskilda ländernas åtaganden blir i praktiken inte bindande, och ingen nation kan heller ställas till svars om den globala uppvärmningen framöver blir större än två grader.

Det finns också skäl att undra om tvågradersmålet fortfarande är realistiskt, eller om det egentligen redan är för sent att hejda uppvärmningen vid den nivån. För varje år krymper ”utsläppsutrymmet”, dvs. den återstående mängd växthusgaser som vi kan släppa ut utan att temperaturhöjningen överstiger två grader. I dag är detta utrymme nere i ca 1 000 miljarder ton räknat som koldioxidekvivalenter, vilket motsvarar ungefär tjugo års utsläpp av nutida omfattning.

För att tvågradersmålet ska kunna nås krävs därför mycket kraftiga minskningar av de globala växthusgasutsläppen inom de närmaste decennierna. Sannolikt behövs därtill storskalig infångning och lagring av koldioxid eller någon annan form av planetär ingenjörskonst. Att begränsa uppvärmningen till 1,5 grader förefaller praktiskt taget omöjligt eftersom medeltemperaturen redan har stigit ungefär en grad och i rask takt är på väg vidare uppåt.



De klimatplaner som presenterades av ett stort antal länder i samband med Parismötet 2015 innefattade löften om vissa utsläpps begränsningar till 2025 eller 2030. För att den globala uppvärmningen ska kunna hållas under 2 eller rentav 1,5 grader krävs dock betydligt kraftfullare insatser. – Underlag från UNFCCC 2016.



De frivilliga utsläpps begränsningar som världens länder hittills har åtagit sig räcker hur som helst inte för att hålla temperaturhöjningen under två grader. Nivån på dagens utfästelser pekar snarare mot en uppvärmning med närmare tre grader till år 2100. Detta behöver å andra sidan inte utesluta att åtagandena utökas efterhand. Enligt Parisavtalet ska alla länder uppdatera sina klimatplaner vart femte år, och meningen är att de utlovade åtgärderna mot utsläppen med tiden ska bli allt mer omfattande.

Ändå innebär de senaste årens utveckling att det internationella samarbetet inom ramen för klimatkonventionen för närvarande inte spelar en fullt lika central roll för insatserna mot klimatförändringarna som det ursprungligen var tänkt. Ansvaret för klimatarbetet måste i stället i ökad omfattning tas på regional, nationell och lokal nivå.

## Svenska klimatmål mer ambitiösa än de internationella

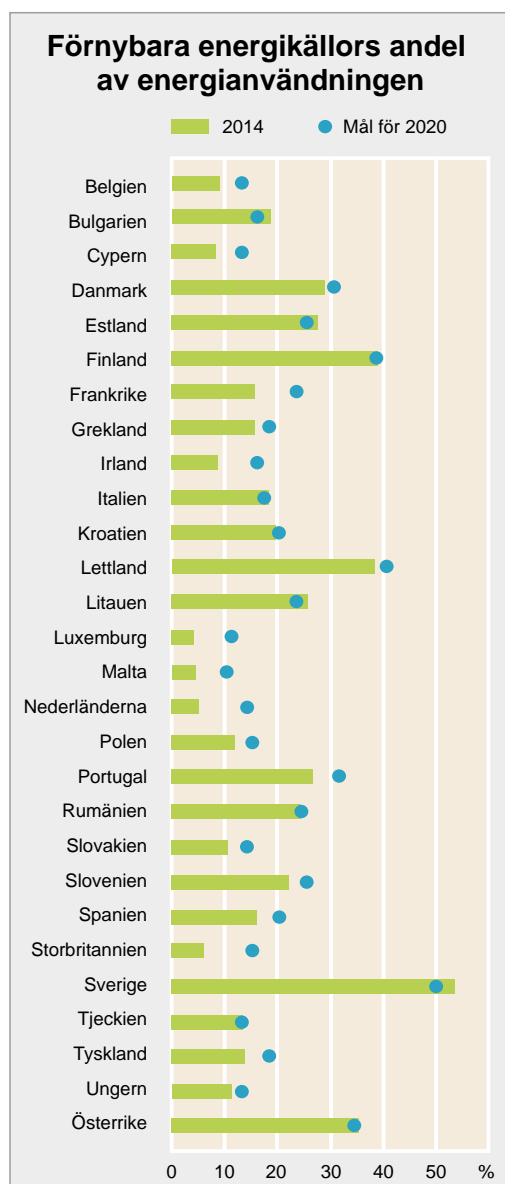
Eftersom dagens åtgärder mot klimatförändringarna främst måste bygga på frivilliga nationella initiativ kan länder som går före få en viktig roll som inspiratörer. Om de kan visa att kraftiga utsläpps begränsningar är tekniskt och ekonomiskt genomförbara förbättras utsikterna att även andra länder reducerar sin klimatpåverkan.

I vissa avseenden har Sverige sedan länge spelat en sådan roll. Vi åstadkom redan kring 1980 en betydande minskning av våra klimatpåverkande utsläpp, som räknade per capita sedan dess har varit lägre än genomsnittet för västvärlden (se s. 68). Bakom den insatsen låg i första hand ekonomiska drivkrafter – genom rejäla prishöjningar under 1970-talet hade den tidigare så billiga oljan plötsligt blivit mycket dyrare. Vår rika tillgång på biobränslen och den pågående utbyggnaden av kärnkraften gav oss då möjlighet att ersätta ungefär en tredjedel av oljeimporten med annan slags energitillförsel.

Under senare delen av 1980-talet upphörde vår användning av fossila bränslen att minska, och när Sverige år 1988 fastställde sitt första klimatpolitiska mål var föresatserna ganska beskedliga – vi åtog oss inte mer än att stabilisera koldioxidutsläppen ”på dagens nivå”. Genom energisparande och fortsatt övergång till biobränslen kunde vi dock utan svårighet uppfylla det löftet, av allt att döma utan att det gick ut över den ekonomiska tillväxten.

Kring millennieskiftet hade Sveriges ambitioner på klimatområdet ökat. Visserligen beslöt EU efter överenskommelsen i Kyoto att vi fick *öka* våra växthusgasutsläpp med 4 procent från 1990 till 2008–2012 eftersom vi redan hade genomfört en kraftig begränsning av utsläppen. Riksdagen bestämde emellertid år 2002 att de svenska utsläppen i stället skulle skäras ned med 4 procent under perioden ifråga. Också det åtagandet uppfylldes, dessutom med god marginal – utsläppen reducerades i själva verket med 16 procent. Till detta bidrog inte bara minskad användning av fossila bränslen utan även avtagande metan- och dikväveoxidutsläpp från avfallsupplag, jordbruk och industriprocesser.

År 2009 skärpte Sverige sina klimatmål ytterligare. Riksdagen beslöt då att utsläppen av växthusgaser ska reduceras med 40 procent från



EU har satt som mål att minst 20 procent av unionens totala energianvändning ska härröra från förnybara energikällor år 2020. Målnivån varierar mellan enskilda medlemsstater beroende på förutsättningar och hittillsvarande utveckling på området. Sverige har ålagts att nå den högsta andelen förnybar energi av alla EU-länder – 49 procent – men hör ändå till de relativt få stater som redan har nått sina mål.

– Från Europeiska miljöbyrå 2015.

1990 till 2020, om än med vissa förbehåll – siffran avser bara de utsläpp som inte omfattas av EU:s handel med utsläppsrätter, och vi kan tillgodoräkna oss upp till en tredjedel av utsläppsbegränsningen genom att bidra till åtgärder i andra länder.

Till de klimatmål som sattes upp 2009 hörde också att den svenska fordonsflottan ska bli oberoende av fossila bränslen till år 2030, liksom en vision av att Sveriges totala nettoutsläpp av växthusgaser ska vara nere i noll år 2050. Miljömålsberedningen, en parlamentarisk kommitté som fått regeringens uppdrag att skissera ett ramverk för landets långsiktiga klimatpolitik, föreslog år 2016 att nollutsläppsmålet skulle tidigareläggas till 2045.

Sverige har på så sätt fortsatt att gå före. Våra nationella klimatmål är striktare än exempelvis EU:s gemensamma klimatplan, som säger att unionens totala växthusgasutsläpp först år 2030 måste ha reducerats med 40 procent i förhållande till 1990 års nivå. På motsvarande sätt har ett antal enskilda kommuner i Sverige frivilligt åtagit sig mer långtgående insatser mot klimatförändringarna än landet som helhet. Flera av kommunerna har angett som mål att de ska bli helt "fossilfria" till 2030.

Men vi kan inte räkna med att framtida klimatmål blir lika lätta att nå som dem vi hittills har klarat av. De enklaste och på kort sikt mest lönsamma åtgärderna är redan vidtagna, och det återstår mycket att göra om vi inom några få decennier ska kunna komma ned till nollutsläpp.

Inte minst inom transportsektorn är utmaningarna stora. Utan ytterligare åtgärder pekar Trafikverkets prognoser mot i stort sett oförändrade utsläpp från den svenska trafiken fram till 2030. Visserligen bedöms bilmotorernas energieffektivitet fortsätta att förbättras, men det motverkas av att både person- och godstransporter på vägarna väntas öka även under kommande år. Om vi till 2030 ska kunna åstadkomma "en fossiloberoende fordonsflotta" måste trafiken i stället minska.

Ett av de hinder som står i vägen är att en hel del klimatpåverkan har "byggts in" i tätorternas struktur. Genomsnittsavstånden mellan bostäder, arbetsplatser och köpcentra har gradvis vuxit, och förbättrade transportleder har knutit samman många tätorter till vidsträckt regioner. Ökade möjligheter till långväga ar-

betspendling har länge varit ett uttalat mål för svensk infrastrukturplanering, men den politiken har nu börjat ifrågasättas eftersom den medverkar till biltrafikens expansion.

Insatserna mot bebyggelsens egna bidrag till växthusgasutsläppen har länge fokuserats på att minska behovet av energi för uppvärmning. På den vägen har vi numera kommit långt i Sverige. Nya byggnader är så energisnåla att de kan användas i femtio år innan uppvärmningen av dem har orsakat större utsläpp än själva byggandet av husen. Om vi ska kunna dra ned utsläppen från bebyggelsen ännu mer måste därför även byggmaterialens och byggteknikens klimatpåverkan reduceras.

Något som också återstår att ta tag i är de indirekta climateffekterna av Sveriges import av konsumtionsvaror som producerats utomlands, liksom de utsläpp som härrör från vårt internationella flygresande.

## Anpassning till oundvikliga förändringar

Oavsett hur väl vi lyckas begränsa människans klimatpåverkan kommer klimatet framöver att genomgå påtagliga förändringar. Den globala uppvärmningen har redan börjat, och allt talar för att den kommer att fortsätta i decennier eller mer. Om vi ska kunna slippa alltför skadliga effekter av klimatstörningarna kan vi därför inte nöja oss med åtgärder mot utsläppen – vi måste också försöka *anpassa* samhället till de klimatförändringar som inte längre går att undvika.

Översvämningar, skred, sommarhetta, torka och skogsbränder hör till de climateffekter som vi kan behöva rusta oss emot i Sverige. Förebyggande insatser mot sådana effekter kan bli kostsamma, men de bedöms i allmänhet ändå löna sig i förhållande till vad det kostar att reparera skador som uppkommer om insatserna uteblir.

Behovet av klimatanpassning varierar från plats till plats och från samhällssektor till samhällssektor, och det finns en hel flora av tänkbara åtgärdsalternativ. Bland mycket annat kan anpassningen handla om att anlägga våtmarker, parker eller andra grönområden som fångar upp och dämpar tillfälliga vattenflöden i samband med skyfall, att förbättra färskvattenförsörjningen i nederbördsfattiga kusttrakter med hjälp av anläggningar för avsättning av havsvatten, att inom skogsbruket plantera träd-

En viktig form av klimatanpassning är att se till att kustnära bebyggelse klarar en högre havsnivå än den nutida. I det här bostadsområdet vid Kalmarsund har husen närmast stranden byggts på pelare. På så sätt förblir de oskadda även om havet skulle stiga 2,5 m över dagens medelvattenstånd.



CLAES BERNES

slag som är tåliga för framtida klimatförhållanden, eller att inom hälso- och sjukvården skapa rutiner som minskar hälsoriskerna i samband med värmeböljor.

Ofta kan ett och samma klimathot bemötas på flera olika sätt. Enligt en modell som utarbetats i Storbritannien skulle exempelvis kuststäder kunna välja mellan tre strategier för sin anpassning till havsnivåns höjning: ”reträtt” (att överge bebyggelse som förr eller senare kommer att hamna under vatten), ”försvar” (att skydda befintlig bebyggelse med hjälp av vallar) eller ”attack” (att börja bygga i vattnet – på flytande konstruktioner, pålar e.d. – i stället för på land).

En viktig förutsättning för framgångsrik klimatanpassning är att vi har tillräckliga kunskaper om de skaderisker som ligger framför oss. I Sverige har vi exempelvis på senare år genomfört detaljerade kartläggningar av höjdförhållandena i terrängen och av risken för ras och skred längs vattendragen. Med ett sådant underlag blir det lättare att avgöra var det finns behov av skydd mot översvämningar och deras effekter.

### **Det är inte för sent att begränsa klimatstörningarna**

Är det i själva verket lika bra att vi överger strävandena att minska vår klimatpåverkan och i stället bara försöker anpassa oss till klimatförändringarna så gott det går?

Det kan ju verka som om det redan är för sent att hejda klimatstörningarna och deras effekter. Världens samlade utsläpp av växthusgaser har fortsatt att öka trots att nästan alla nationer för mer än tjugo år sedan enades om att farlig klimatpåverkan måste undvikas. Förhoppningarna om att vi ska kunna bromsa uppvärmningen genom koldioxidlagring eller någon annan form av planetär ingenjörskonst förefaller svåra att infria. Och även om vi trots allt lyckas minska utsläppen av växthusgaser till noll inom några decennier kommer vi att ha satt ett avtryck på jordens klimat som inte går att utplåna inom överskådlig tid.

Men vi får inte glömma att också våra åtgärder mot utsläppen får följder som blir bestående mycket länge. Varje utsläpp av växthusgaser som vi förmår undvika innebär att klimatstörningarna blir lite mindre allvarliga än de annars skulle ha blivit, inte bara under de närmast följande åren utan i sekler och rentav årtusenden. Under hela denna tid förblir förändringarna av temperaturen, havsnivån och alla andra egenskaper hos klimatsystemet mindre än de hade blivit om vi hade låtit bli att begränsa vår klimatpåverkan.

Vår hantering av klimatfrågan i dag blir på så sätt avgörande för våra efterkommandes livsmiljö hundratals generationer in i framtiden. Utmaningarna är många, men vi har redan kommit en bit på väg, och vi har tillräckliga kunskaper om vad vi kan och behöver göra. De möjligheterna måste vi nu omsätta i handling.

# Litteratur

## I INLEDNING

Länsstyrelsen Västmanlands län (2014): *Skogsbranden i Västmanland 2014*.

Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (2015): *Skogsbranden i Västmanland 2014*. MSB798

## 2 VAD KAN FÖRÄNDRA KLIMATET?

J.P. Peixoto & A.H. Oort (1992): *Physics of climate*. American Institute of Physics, New York

K.E. Trenberth *et al.* (2009): "Earth's global energy budget." *BAMS* 90, 311–323

M. Wild *et al.* (2013): "The global energy balance from a surface perspective." *Clim. Dyn.* 40, 3107–3134

## 3 KLIMATFÖRÄNDRINGAR I FÖRINDUSTRIELL TID

D.O. Breecker *et al.* (2010): "Atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations during ancient greenhouse climates were similar to those predicted for A.D. 2100." *PNAS* 107, 576–580

L. Gustafsson & I. Ahlén (1996): *Växter och djur*. Sveriges nationalatlas

IPCC (2013): *Climate change 2013: The physical science basis*. Working Group I contribution to the fifth assessment report of the IPCC (red. T.F. Stocker *et al.*), Cambridge University Press

S.J. Johnsen *et al.* (1995): "Greenland palaeotemperatures derived from GRIP bore hole temperature and ice core isotope profiles." *Tellus* 47B, 624–629

P. Kindler *et al.* (2014): "Temperature reconstruction from 10 to 120 kyr b2k from the NGRIP ice core." *Clim. Past* 10, 887–902

L. Lisiecki & M. Raymo (2005): "A Pliocene–Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic δ<sup>18</sup>O records." *Paleoceanography* 20, PA1003–PA1020

S. Rahmstorf (2002): "Ocean circulation and climate during the past 120,000 years." *Nature* 419, 207–214

J.D. Shakun *et al.* (2015): "An 800-kyr record of global surface ocean δ<sup>18</sup>O and implications for ice volume-temperature coupling." *Earth and Planetary Science Letters* 426, 58–68

## 4 KLIMATFÖRÄNDRINGAR I MODERN TID

B.J. Benson *et al.* (2012): "Extreme events, trends, and variability in Northern Hemisphere lake-ice phenology (1855–2005)." *Climatic Change* 112, 299–323

J.A. Church & N.J. White (2011): "Sea-level rise from the late 19th to the early 21st century." *Surv. Geophys.* 32, 585–602

K. Cowtan & R.G. Way (2014): "Coverage bias in the HadCRUT4 temperature series and its impact on recent temperature trends." *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 140, 1935–1944

A. Dai *et al.* (2009): "Changes in continental freshwater discharge from 1948 to 2004." *J. of Climate* 22, 2773–2792

A. Dai (2013): "Increasing drought under global warming in observations and models." *Nature Climate Change* 3, 52–58

J.J. Haapala *et al.* (2015): "Recent change – sea ice", i BACC II Author Team: *Second assessment of climate change for the Baltic Sea basin*. Springer International Publishing, s. 145–153

IPCC (2013): *Climate change 2013: The physical science basis*. Working Group I contribution to the fifth assessment report of the IPCC (red. T.F. Stocker *et al.*), Cambridge University Press

S. Jevrejeva *et al.* (2014): "Trends and acceleration in global and regional sea levels since 1807." *Global and Planetary Change* 113, 11–22

E. Kjellström *et al.* (2014): *Uppdatering av det klimatvetenskapliga kunskapsläget*. SMHI, Klimatologi 9

G. Lindström (2011): *Klimat, vattentillgång och höga flöden i Sverige 1860–2010*. Elforsk, Rapport 11:73

R.S. Nerem *et al.* (2010): "Estimating mean sea level change from the TOPEX and Jason altimeter missions." *Marine Geodesy* 33, Suppl. 1, 435–446

R.D. Ray & B.C. Douglas (2011): "Experiments in reconstructing twentieth-century sea levels." *Prog. Oceanogr.* 91, 495–515

SMHI (2011): *Vind och storm i Sverige 1901–2010*. Faktablad 51

J.E. Walsh *et al.* (2016): "A database for depicting Arctic sea ice variations back to 1850." *Geographical Review*, doi: 10.1111/j.1931-0846.2016.12195.x

L. Wern & L. Bärning (2009): *Sveriges vindklimat 1901–2008. Analys av förändring i geostrofisk vind*. SMHI, Meteorologi 138

L. Wern (2015): *Snödjup i Sverige 1904/05 – 2013/14*. SMHI, Meteorologi 158

## EN PAUS I UPPVÄRMNINGEN?

- N. Cahill *et al.* (2015): "Change points of global temperature." *Environ. Res. Lett.* **10**: 084002
- J.C. Fyfe *et al.* (2016): "Making sense of the early-2000s warming slowdown." *Nature Climate Change* **6**, 224–228
- T.R. Karl *et al.* (2015): "Possible artifacts of data biases in the recent global surface warming hiatus." *Science* **348**, 1469–1472
- J. Nielsen-Gammon (2012): "About the lack of warming ... ." *Houston Chronicle*, <http://blog.chron.com/climateabyss/2012/04/about-the-lack-of-warming/>

## 5 VARFÖR FÖRÄNDRAS KLIMATET NU?

- T.J. Crowley & M.B. Unterman (2013): "Technical details concerning development of a 1200-yr proxy index for global volcanism." *Earth System Science Data* **5**, 187–197
- C. Fröhlich (2006): "Solar irradiance variability since 1978: Revision of the PMOD composite during solar cycle 21." *Space Science Rev.* **125**, 53–65
- R.B. Skeie *et al.* (2011): "Anthropogenic radiative forcing time series from pre-industrial times until 2010." *Atmos. Chem. Phys.* **11**, 11827–11857
- D.T. Shindell *et al.* (2013): "Radiative forcing in the ACCMIP historical and future climate simulations." *Atmos. Chem. Phys.* **13**, 2939–2974
- R. Wang *et al.* (2014): "Trend in global black carbon emissions from 1960 to 2007." *Environ. Sci. Technol.* **48**, 6780–6787

## KUNSKAPEN OM VÄXTHUSEFFEKTEN

### – EN KORT HISTORIK

- S. Arrhenius (1896): "On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature on the ground." *Philosophical Magazine* **41**, 237–276
- B. Bolin *et al.* (red.) (1986): *The greenhouse effect, climatic change, and ecosystems*. SCOPE 29, John Wiley & Sons
- G.S. Callendar (1938): "The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature." *Quart. J. R. Meteorol. Soc.* **64**, 223–240
- E. Crawford (1997): "Arrhenius' 1896 model of the greenhouse effect in context." *Ambio* **26**, 6–11
- J.R. Fleming (1998): *Historical perspectives on climate change*. Oxford University Press
- J. Fourier (1824): "Remarques générales sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires." *Annal. Chim. Phys.* **27**, 136–167
- J. T. Houghton *et al.* (1990): *Climate change. The IPCC scientific assessment*. Cambridge University Press
- J. T. Houghton *et al.* (red.) (1996): *Climate change 1995. The science of climate change*. Cambridge University Press
- G.E. Hutchinson (1954): "The biochemistry of the terrestrial atmosphere", i G.P. Kuiper (red.): *The earth as a planet*. University of Chicago Press
- A. Högbom (1895): "Om sannolikheten för sekulära förändringar i atmosfärens kolsyrehalt." *Svensk kemisk tidskr.* **5**, 169–176

IPCC (2001): *Climate change 2001: The scientific basis*. Contribution of Working Group I to the third assessment report of the IPCC (red. J.T. Houghton *et al.*), Cambridge University Press

IPCC (2007): *Climate change 2007: The physical science basis*. Working Group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC (red. S. Solomon *et al.*), Cambridge University Press

IPCC (2013): *Climate change 2013: The physical science basis*. Working Group I contribution to the fifth assessment report of the IPCC (red. T.F. Stocker *et al.*), Cambridge University Press

S. Manabe (1997): "Early development in the study of greenhouse warming: The emergence of climate models." *Ambio* **26**, 47–51

S. Manabe & R.T. Wetherald (1967): "Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity." *J. Atmos. Sci.* **24**, 241–259

J.C. Pales & C.D. Keeling (1965): "The concentration of atmospheric carbon dioxide in Hawaii." *J. Geophys. Res.* **70**, 6053–6076

G.N. Plass (1956): "The carbon dioxide theory of climate change." *Tellus* **8**, 140–154

V. Ramanathan (1975): "Greenhouse effect due to chlorofluorocarbons: Climatic implications." *Science* **190**, 50–52

R. Revelle & H.E. Suess (1957): "Carbon dioxide exchange between atmosphere and ocean and the question of an increase of atmospheric CO<sub>2</sub> during the past decades." *Tellus* **9**, 18–27

H. Rodhe *et al.* (1997): "Svante Arrhenius and the greenhouse effect." *Ambio* **26**, 2–5

J. Tyndall (1859): "Note on the transmission of heat through gaseous bodies." *Proc. R. Soc.* **10**, 37–39

S. Weart (2003): *The discovery of global warming*. Harvard University Press

R.W. Wood (1909): "Note on the theory of the greenhouse." *Philosophical Magazine* **17**, 319–320

## 6 KÄLLOR OCH SÄNKOR FÖR VÄXTHUSGASER

T.A. Boden *et al.* (2015): *Global, regional, and national fossil-fuel CO<sub>2</sub> emissions*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory

J.H. Butler & S.A. Montzka (2015): *The NOAA Annual Greenhouse Gas Index (AGGI)*. Earth System Research Laboratory, NOAA

Energimyndigheten (2015): *Energiläget 2015*.

K. Hjerpe *et al.* (2014): *Utsläpp av växthusgaser från torvmark*. Jordbruksverket, Rapport 2014:24

R.B. Jackson *et al.* (2016): "Reaching peak emissions." *Nature Climate Change* **6**, 7–10

C. Le Quéré *et al.* (2015): "Global carbon budget 2015." *Earth Syst. Sci. Data* **7**, 349–396

Miljödepartementet (2014): *Sveriges sjätte nationalrapport om klimatförändringar*. Ds 2014:11

Naturvårdsverket (2015): *National Inventory Report Sweden 2015. Greenhouse gas emission inventories 1990–2013*.

J.G.J. Olivier *et al.* (2015): *Trends in global CO<sub>2</sub> emissions: 2015 report*. JRC Technical Note 98184 / PBL report 1803

M. Rigby *et al.* (2014): "Recent and future trends in synthetic greenhouse gas radiative forcing." *Geophys. Res. Lett.* **41**, 2623–2630

SLU (2015): *Skogsdata 2015*. Institutionen för skoglig resurshushållning, Umeå

A. Tyukavina *et al.* (2015): "Aboveground carbon loss in natural and managed tropical forests from 2000 to 2012." *Environ. Res. Lett.* **10**: 074002

J. Åkerman (2012): "Climate impact of international travel by Swedish residents." *J. of Transport Geography* **25**, 87–93

#### TORVTÄKT OCH TORVFÖRBRÄNNING

Naturvårdsverket (2016): *Torvutvinningens och torvavändningens klimat- och miljöpåverkan*. Redovisning av regeringsuppdrag M2015/03518/Nm

SCB (2016): *Torv 2015. Produktion, användning och miljöeffekter m.m.* MI 25 SM 1501

#### PLANETÄR INGENJÖRSKONST

IPCC (2013): *Climate change 2013: The physical science basis*. Working Group I contribution to the fifth assessment report of the IPCC (red. T.F. Stocker *et al.*), Cambridge University Press

P. Smith *et al.* (2016): "Biophysical and economic limits to negative CO<sub>2</sub> emissions." *Nature Climate Change* **6**, 42–50

#### 7 KLIMATSCENARIER OCH KLIMATMODELLER

K. Marvel *et al.* (2016): "Implications for climate sensitivity from the response to individual forcings." *Nature Climate Change* **6**, 386–389

G. Persson *et al.* (2015): *Vägledning för användande av klimatscenarier*. SMHI, Klimatologi 11

D.I. Stern (2006): "Reversal of the trend in global anthropogenic sulfur emissions." *Global Environmental Change* **16**, 207–220

D.P. van Vuuren *et al.* (2011): "The representative concentration pathways: an overview." *Climatic Change* **109**, 5–31

#### 8 KLIMATET UNDER ÅTERSTODEN AV SEKLET

G. Berglöv *et al.* (2015): *Framtidsklimat i Norrbottens län – enligt RCP-scenarier*. SMHI, Klimatologi 16

A. Eklund *et al.* (2015): *Sveriges framtida klimat. Underlag till dricksvattenutredningen*. SOU 2015:51, Bilaga 6

E. Kjellström *et al.* (2014): *Uppdatering av det klimatvetenskapliga kunskapsläget*. SMHI, Klimatologi 9

Klimat- och sårbarhetsutredningen (2007): *Sverige inför klimatförändringarna – hot och möjligheter*. SOU 2007:60

H.E.M. Meier *et al.* (2004): "Simulated distributions of Baltic sea-ice in warming climate and consequences for the winter habitat of the Baltic ringed seal." *Ambio* **33**, 249–256

H.E.M. Meier (2015): "Projected change – marine physics", i The BACC II Author Team: *Second assessment of climate change for the Baltic Sea basin*. Springer International Publishing, s. 243–252

Naturvårdsverket (2015): *Luft & miljö Arktis 2015*.

R.S. Nerem *et al.* (2010): "Estimating mean sea level change from the TOPEX and Jason altimeter missions." *Marine Geodesy* **33**, Suppl. 1, 435–446

L. Nylén *et al.* (2015): *Framtidsklimat i Västernorrlands län – enligt RCP-scenarier*. SMHI, Klimatologi 35

A. Ohlsson *et al.* (2015): *Framtidsklimat i Skåne län – enligt RCP-scenarier*. SMHI, Klimatologi 29

G. Persson *et al.* (2007): *Beräknade temperaturförhållanden för tre platser i Sverige – perioderna 1961–1990 och 2011–2040*. SMHI, Meteorologi 124

G. Strandberg *et al.* (2014): *CORDEX scenarios for Europe from the Rossby Centre regional climate model RCA4*. SMHI, Report Meteorology and Climatology 116

#### 9 KLIMATFÖRÄNDRINGARNA OCH NATURMILJÖN

M.B. Araújo *et al.* (2011): "Climate change threatens European conservation areas." *Ecology Letters* **14**, 484–492

J. Barichivich *et al.* (2013): "Large-scale variations in the vegetation growing season and annual cycle of atmospheric CO<sub>2</sub> at high northern latitudes from 1950 to 2011." *Global Change Biology* **19**, 3167–3183

C. Bernes (2005): *Förändringar under ytan. Sveriges havsmiljö granskad på djupet*. Naturvårdsverket, Monitor 19

C. Bernes (2011): *Biologisk mångfald i Sverige*. Naturvårdsverket, Monitor 22

M.T. Burrows *et al.* (2014): "Geographical limits to species-range shifts are suggested by climate velocity." *Nature* **507**, 492–495

A.E. Cahill *et al.* (2013): "How does climate change cause extinction?" *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* **280**: 20121890

I.-C. Chen *et al.* (2011): "Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming." *Science* **333**, 1024–1026

V. Devictor *et al.* (2012): "Differences in the climatic debts of birds and butterflies at a continental scale." *Nature Climate Change* **2**, 121–124

R. Engler *et al.* (2011): "21st century climate change threatens mountain flora unequally across Europe." *Global Change Biology* **17**, 2330–2341

HELCOM (2013): *Climate change in the Baltic Sea Area: HELCOM thematic assessment in 2013*. Balt. Sea Environ. Proc. 137

M. Hellström *et al.* (2015): *Fågelräkning och ringmärkning vid Ottenby fågelstation 2014*. Ottenby fågelstation

S.M. Hsiang & A.H. Sobel (2016): "Potentially extreme population displacement and concentration in the tropics under non-extreme warming." *Scientific Reports* **6**: 25697

IPCC (2013): *Climate change 2013: The physical science basis*. Working Group I contribution to the fifth assessment report of the IPCC (red. T.F. Stocker *et al.*), Cambridge University Press

- IPCC (2014): *Climate change 2014: Impacts, adaption and vulnerability*. Working Group II contribution to the fifth assessment report of the IPCC (red. C.B. Field *et al.*), Cambridge University Press
- C. Kullberg *et al.* (2015): "Change in spring arrival of migratory birds under an era of climate change, Swedish data from the last 140 years." *Ambio* 44 (Suppl. 1), 69–77
- L. Kullman & L. Öberg (2009): "Post-Little Ice Age tree line rise and climate warming in the Swedish Scandes: a landscape ecological perspective." *Journal of Ecology* 97, 415–429
- Å. Lindström *et al.* (2013): "Rapid changes in bird community composition at multiple temporal and spatial scales in response to recent climate change." *Ecography* 36, 313–322
- J.G. Molinos *et al.* (2016): "Climate velocity and the future global redistribution of marine biodiversity." *Nature Climate Change* 6, 83–88
- I. Montero-Serra *et al.* (2015): "Warming shelf seas drive the subtropicalization of European pelagic fish communities." *Global Change Biology* 21, 144–153
- Naturvårdsverket (2016): *Klimatförändringen och miljömål*. Rapport 6705
- C. Parmesan (2007): "Influences of species, latitudes and methodologies on estimates of phenological response to global warming." *Global Change Biology* 13, 1860–1872
- H. Pauli *et al.* (2012): "Recent plant diversity changes on Europe's mountain summits." *Science* 336, 353–355
- B. Schneider *et al.* (2015): "Environmental impacts – marine biogeochemistry", i The BACC II Author Team: *Second assessment of climate change for the Baltic Sea basin*. Springer International Publishing, s. 337–361
- T. Wittwer *et al.* (2010): *Klimatförändringars effekt på den biologiska mångfalden i odlingslandskapets gräsmarker*. Jordbruksverket, Rapport 2010:29
- IO KLIMATFÖRÄNDRINGARNA  
OCH SAMHÄLLET**
- L. Andersson *et al.* (2015): *Underlag till kontrollstation 2015 för anpassning till ett förändrat klimat*. SMHI, Klimatologi 12
- Beredskapsstyrelsen (2012): *Redegørelse vedrørende skybruddet i Storkøbenhavn lørdag den 2. juli 2011*.
- M. Boettle *et al.* (2016): "Quantifying the effect of sea level rise and flood defence – a point process perspective on coastal flood damage." *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 16, 559–576
- Dricksvattenutredningen (2015): *Klimatförändringar och dricksvattenförsörjning*. SOU 2015:51
- H. Eriksson *et al.* (2015): *Effekter av ett förändrat klimat – SKA 15*. Skogsstyrelsen, Rapport 12/2015
- H. Eriksson *et al.* (2016): *Effekter av klimatförändringar på skogen och behov av anpassning i skogsbruket*. Skogsstyrelsen, Rapport 2/2016
- M. Hall *et al.* (red.) (2015): *Klimatsäkrat Skåne*. Centrum för miljö- och klimatforskning, Lunds universitet, CEC Rapport 02
- S. Hallegatte *et al.* (2013): "Future flood losses in major coastal cities." *Nature Climate Change* 3, 802–806
- IPCC (2014): *Climate change 2014: Impacts, adaption and vulnerability*. Working Group II contribution to the fifth assessment report of the IPCC (red. C.B. Field *et al.*), Cambridge University Press
- Jordbruksverket (2007): *En meter i timmen – klimatförändringarnas påverkan på jordbruket i Sverige*. Rapport 2007:16
- Klimat- och sårbarhetsutredningen (2007): *Sverige inför klimatförändringarna – hot och möjligheter*. SOU 2007:60
- Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (2011): *Identifiering av områden med betydande översvämningsrisk*. Slutrapport, dnr 2011-2996
- Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (2012): *Konsekvenser av en översvämning i Mälaren*. MSB406
- Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (2013): *Skador och effekter av storm. En kunskapsöversikt*. MSB534
- Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (2013): *Pluviala översvämnningar. Konsekvenser vid skyfall över tätorter. En kunskapsöversikt*. MSB567
- Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (2015): *Värmens påverkan på samhället – en kunskapsöversikt för kommuner med faktablad och rekommendationer vid värmebölja*. MSB870
- J.H. Nilsson & S. Gössling (2013): "Tourist responses to extreme environmental events: the case of Baltic Sea algal blooms." *Tourism Planning & Development* 10, 32–44
- H. Orru *et al.* (2013): "Impact of climate change on ozone-related mortality and morbidity in Europe." *Eur. Respir. J.* 41, 285–294
- D. Oudin-Åström (2014): *On temperature-related mortality in an elderly population and susceptible groups*. Umeå universitet (avhandling)
- J.S. Pal & E.A.B. Eltahir (2016): "Future temperature in southwest Asia projected to exceed a threshold for human adaptability." *Nature Climate Change* 6, 197–200
- J. Rocklöv & B. Forsberg (2010): "The effect of high ambient temperature on elderly population in three regions of Sweden." *Int. J. Env. Res. Publ. Health* 7, 2607–2619
- E. Sjökvist *et al.* (2016): *Framtida perioder med hög risk för skogsbrand enligt HBV-modellen och RCP-scenarier*. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap, MSB997
- SMHI (2014): *Risker, konsekvenser och sårbarhet för samhället av förändrat klimat – en kunskapsöversikt*. Klimatologi 10
- Statens folkhälsoinstitut (2010): *Värmeböljor och dödlighet bland sårbara grupper – en svensk studie*. R 2010:12
- P. Thörn & J. Arnell (2013): *Konsekvenser för energisektorn av klimatförändringar. En översiktlig kunskapsmanställning*. Elforsk, Rapport 13:97
- A. Tornevi *et al.* (2014): "Precipitation effects on microbial pollution in a river: Lag structures and seasonal effect modification." *PLoS ONE* 9(5): e98546
- M. Wivstad (2010): *Klimatförändringarna – en utmaning för jordbruket och Giftfri miljö*. Kemikalieinspektionen, PM 2/10

## EXTREM SOMMARHETTA I EUROPA

- D. Barriopedro *et al.* (2011): "The hot summer of 2010: Redrawing the temperature record map of Europe." *Science* 332, 220–224
- N. Christidis *et al.* (2015): "Dramatically increasing chance of extremely hot summers since the 2003 European heatwave." *Nature Climate Change* 5, 46–50
- R. García-Herrera *et al.* (2011): "A review of the European summer heat wave of 2003." *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 40, 267–306
- J.-M. Robine *et al.* (2008): "Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003." *C. R. Biologies* 331, 171–178
- D. Shaposhnikov *et al.* (2014): "Mortality related to air pollution with the Moscow heat wave and wildfire of 2010." *Epidemiology* 25, 359–364

## KLIMATFÖRÄNDRINGAR SOM ORSAK TILL KONFLIKTER OCH MIGRATION

- C.P. Kelley *et al.* (2015): "Climate change in the Fertile Crescent and implications of the recent Syrian drought." *PNAS* 112, 3241–3246
- M. Mobjörk & B. Johansson (2014): *Klimatförändringarnas indirekta effekter och deras betydelse för Sverige. Underlag till SMHI:s uppdrag inför Kontrollstation 2015.* FOI Memo 5129
- J. Selby & M. Hulme (2015): "Is climate change really to blame for Syria's civil war?" *The Guardian*, 29 november 2015

## II BORTOM ÅR 2100

- T.A. Boden *et al.* (2015): *Global, regional, and national fossil-fuel CO<sub>2</sub> emissions.* Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory
- P.U. Clark *et al.* (2016): "Consequences of twenty-first-century policy for multi-millennial climate and sea-level change." *Nature Climate Change* 6, 360–369
- A. Ganopolski *et al.* (2016): "Critical insolation–CO<sub>2</sub> relation for diagnosing past and future glacial inception." *Nature* 529, 200–203
- J. Hansen *et al.* (2016): "Ice melt, sea level rise and superstorms: evidence from paleoclimate data, climate modeling, and modern observations that 2 °C global warming could be dangerous." *Atmos. Chem. Phys.* 16, 3761–3812
- IEA (2015): *World energy outlook 2015.* International Energy Agency
- IPCC (2013): *Climate change 2013: The physical science basis.* Working Group I contribution to the fifth assessment report of the IPCC (red. T.F. Stocker *et al.*), Cambridge University Press
- C. Le Quéré *et al.* (2015): "Global carbon budget 2015." *Earth Syst. Sci. Data* 7, 349–396
- C. McGlade & P. Ekins (2015): "The geographical distribution of fossil fuels unused when limiting global warming to 2 °C." *Nature* 517, 187–190
- M. Meinshausen *et al.* (2011): "The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300." *Climatic Change* 109, 213–241

E. Rignot *et al.* (2014): "Widespread, rapid grounding line retreat of Pine Island, Thwaites, Smith, and Kohler glaciers, West Antarctica, from 1992 to 2011." *Geophysical Research Letters* 41, 3502–3509

K.B. Tokarska *et al.* (2016): "The climate response to five trillion tonnes of carbon." *Nature Climate Change* 6, 851–855

K. Zickfeld *et al.* (2013): "Long-term climate change commitment and reversibility: An EMIC intercomparison." *J. of Climate* 26, 5782–5809

## 12 VAD KAN VI GÖRA?

Analysgruppen för grön omställning och konkurrenskraft (2016): *Omställning till hållbarhet och konkurrenskraft. Sveriges väg mot ett fossilfritt och resurseffektivt välfärdssamhälle.*

L. Andersson *et al.* (2015): *Underlag till kontrollstation 2015 för anpassning till ett förändrat klimat.* SMHI, Klimatologi 12

R.M. DeConto & D. Pollard (2016): "Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise." *Nature* 531, 591–597

Europeiska miljöbyrån (2015): *Trends and projections in Europe 2015. Tracking progress towards Europe's climate and energy targets.* EEA Report 4/2015

IPCC (2014): *Climate change 2014: Impacts, adaptation and vulnerability.* Working Group II contribution to the fifth assessment report of the IPCC (red. C.B. Field *et al.*), Cambridge University Press

IPCC (2014): *Climate change 2014: Mitigation of climate change.* Working Group III contribution to the fifth assessment report of the IPCC (red. O. Edenhofer *et al.*), Cambridge University Press

S. Fuss *et al.* (2014): "Betting on negative emissions." *Nature Climate Change* 4, 850–853

M. Hall *et al.* (red.) (2015): *Klimatsäkrat Skåne.* CEC Rapport nr 02, Centrum för miljö- och klimatforskning, Lunds universitet

Miljödepartementet (2014): *Sveriges sjätte nationalrapport om klimatförändringar.* Ds 2014:11

Naturvårdsverket (2015): *Mål i sikte. Analys och bedömning av de 16 miljö kvalitetsmålen i fördjupad utvärdering. Volym 1.* Rapport 6662

R.A. Rosen & E. Guenther (2015): "The economics of mitigating climate change: What can we know?" *Technological Forecasting and Social Change* 91, 93–106

N. Stern (2016): "Current climate models are grossly misleading." *Nature* 530, 407–409

UNFCCC (2016): *Aggregate effect of the intended nationally determined contributions: an update.* Provisional agenda, Conference of the Parties, Twenty-second session, Marrakech, 7–18 November 2016

## MATEN OCH KLIMATET

Analysgruppen för grön omställning och konkurrenskraft (2016): *Omställning till hållbarhet och konkurrenskraft. Sveriges väg mot ett fossilfritt och resurseffektivt välfärdssamhälle.*

Naturvårdsverket (2011): *Köttkonsumtionens klimatpåverkan. Drivkrafter och styrmedel.* Rapport 6456



# Register

- ALBEDO 19, 60–61
- Antarktis 28–30, 44–46, 98, 105–106, 156–160
- AOGCM (kopplade klimatmodeller) 90
- Arktis 44–45, 47, 92, 98, 105, 127–128, 155, 159, 161
- Arrhenius, Svante 56–57
- avdunstning 23, 41–42, 103, 107
- avfall 75–76, 170–171
- avrinning 43, 111–112, 142–144
- avskogning 57, 61, 66, 69–71
- BADSÅRSFEBER 147
- biobränslen 58, 65, 68, 76, 140, 167, 170
- biogas 170
- biokol 82
- biologiska pumpen 74, 82
- blågrönalger 126
- blåmussla 124–125
- bok 119
- boskapskötsel 75–76, 168
- CCS-TEKNIK, se koldioxid, infångning och lagring
- cementtillverkning 66, 69
- CFC (klorfluorkarboner) 55, 57, 61, 78, 87
- DIKNING 70–73, 134
- dikväveoxid 22, 24–25, 53–54, 61, 76, 79–81, 86, 168
- diskontering 169–170
- djupvattenbildning 31, 74, 99, 160
- EEM 29
- ekodesigndirektivet 170–171
- ekonomiska styrmedel 171–172
- elcertifikat 172
- El Niño 16, 37, 47, 73
- elproduktion och elförsörjning 67–68, 136, 139–141, 166
- energiintensitet 163, 167
- ensembler 92
- ENSO 16, 37
- ESM (jordssystemmodeller) 90
- extremflöden 112, 142–144, 147
- extremväder 13, 40–41, 46–47, 98–99, 102–103, 110, 129, 140–141, 144
- FC (FLUORKARBONER) 78–81, 86
- fisk och fiske 124–126, 137–138
- fjällen 122–124, 139
- flexibla mekanismer 173
- fluorhaltiga växthusgaser 55, 57, 61, 78–81, 86–87
- fluorkarboner (FC) 78–81, 86
- fluorkolväten (HFC) 78–81
- flyttfåglar 116
- FN:s klimatpanel 50–51, 57, 63, 92
- fossila bränslen 54, 58, 64–69, 74, 76, 154–155, 164–167, 175–176
- fossilgas 64–66, 68, 76, 154–155
- fotosyntes 27, 64
- freoner, se CFC
- främmande arter 122, 125
- fästingar 147
- förnybara energikällor (se även biobränslen, vattenkraft, vindkraft och solceller) 175
- försiktighetsprincipen 163
- försurning av havsvattnet 125, 129
- GCM (GLOBALA KLIMATMODELLER) 89–90
- geoengineering 82–83
- glaciärer 33–34, 44–45, 48, 105–106, 156–157
- Golfströmmen 30–31, 99, 160
- gran 122–123, 134
- Grönland 28–31, 35, 45, 47, 105–106, 156–158
- grön skatteväxling 171
- Gudrun 46, 72–73, 136–137
- GWP-faktorer 79–81
- Göta älv 143, 147
- HALOKLIN 126
- haloner 55, 7–79
- havsförsurning 125, 129
- havsis 44–45, 92, 94, 98, 104–105, 159
- havsnivån 29, 32–34, 48, 106–107, 128, 144–146, 156–158, 177
- havsströmmar 28, 30–32, 99, 160
- HCFC (klorfluorkolväten) 55, 61, 78–80
- HFC (fluorkolväten) 78–81
- holocen 29, 33–34
- hotade arter 118, 120–122, 124–125
- humus 64, 69, 72, 117, 134
- hydroxylradikaler 77, 79
- hälsorisker 147–149
- INDIREKTA VÄXTHUSGASER 55, 61, 76–77
- inlandsisar 28–29, 31–33, 45, 48, 105–107, 156–160
- interglacialer 29, 33, 97, 158
- IPCC 50–51, 57, 63, 92
- isbjörn 114, 118, 127
- is på sjöar och vattendrag 35, 44, 94, 139
- istider 19, 27–32, 97, 158
- JORDBRUK 33, 35, 69, 72–73, 75–76, 82, 130–134, 168
- jordssystemmodeller (ESM) 90
- juridiska styrmedel 170–171
- järgödsling 82
- KLIMAT, definition 13, 16
- klimatanpassning 118, 131, 176–177
- klimatförändringar
  - i framtiden 95–113, 153–161
  - i förfluten tid 27–49
  - inverkan på naturmiljön 115–129
  - inverkan på samhället 131–151
  - motåtgärder 163–177
  - orsaker 15–25, 50–63
- klimatkonventionen 153, 172–175
- klimatkänslighet 91
- klimatmodeller 57, 62, 87, 89–93
- klimatprojektioner, se klimatscenarier
- klimatscenarier 84–87, 154–157
- klimatsystemet 15–16, 89, 158
- klimat- och vegetationszoner, forskjutningar 119–120, 122–124
- klorfluorkarboner (CFC) 55, 57, 61, 78, 87
- klorfluorkolväten (HCFC) 55, 61, 78–80
- kol (stenkol) 65–67, 154–155
- koldioxid 22, 24–25
  - halt i luften 27, 29–30, 47, 52–54, 57, 63–64, 74–75, 79–80, 85–86, 95, 153–157, 163
- infångning och lagring 82–83, 86, 164–165, 174
- sänkor 71–74, 82–83, 90–91
- utsläpp 54, 56–57, 61, 64–75, 81, 85–86, 153–157, 160–161, 163–169, 175

- koldioxidkvivalenter 79  
koldioxidgödning 117–118, 131–132  
koldioxidskatt 171  
kolets kretslopp 56, 65, 74, 90  
kolintensitet 165, 167  
kolmonoxid 54–55, 61, 76–77, 87  
koloradoskalbagge 134  
kolväten 54–55, 61, 76–77, 87  
kondensationsstrimmor 60, 61  
konfliktrisker 150  
kontinentalförskjutningen 28  
konvektion 23  
koraller 128–129  
kustekosystem 128  
kusterosion 106, 128, 146, 161  
kvartärperioden 28–29, 33  
kväve 25, 71, 76, 117  
kväveoxider 54–55, 61, 76–77, 87  
Kyotoprotokollet 172–173  
Köpenhamnsmötet 173
- LA NIÑA 16, 37  
landhöjningen 48, 106–107  
lilla istiden 35  
livsmedel 168  
livsstilsförändringar 167–169  
luftfuktighet 42, 107  
luftkonditionering 140  
lustgas, se dikväveoxid
- MACCHIAVEGETATION 116  
majs 131–133  
malaria 147  
markfuktighet 43, 111, 117  
marknadsbaserade styrmedel 172  
Medelhavsområdet 100–103, 108–110, 116–117, 138–139  
medeltida värmeperioden 35  
metan 22, 24–25, 27, 30, 53–54, 61, 75–77, 79–81, 86–87, 91, 160–161, 168  
metanhydrater 160–161  
migration 150  
Milankovićcykler 18–19, 29–30  
mineralstoff 59, 61  
moln och molnighet 19–22, 41, 59, 61, 90, 110  
Mälaren 143
- NATURGAS, se fossilgas  
nederbörd  
extremmängder 110, 142–144  
i framtiden 107–110  
i förfluten tid 41–42  
i Sverige 41–42, 46, 107–110  
mätteknik 40  
Nildeltat 146  
nitratpartiklar 59, 61  
Nordatlanten 30–31, 37, 99, 158–160  
nordatlantiska oscillationen (NAO) 15–16  
Nordatlantiska strömmen 30–31, 99  
Norra ishavet 44–45, 47, 92, 105, 159
- OLJA 64–66, 154–155  
oljesand 65  
organiska partiklar 59, 61  
ozon 22, 24–25, 54–55, 61, 76–78, 80, 87, 148  
ozonnedbrytande ämnen 55, 61, 78–81, 87, 164  
ozonskiktet 24, 55, 78, 87, 164
- PALSAR 127  
parametrisering 89  
Parisavtalet 174–175  
partiklar 20–22, 55–56, 58–62, 86–87, 149  
permafrost 44, 104–105, 127, 160–161  
PFC, se FC  
Pinatubo 21, 52, 91  
planetär ingenjörskonst 82–83  
plankton 125–126, 128–129  
postglaciala varmetiden 34
- RCA4 93  
RCM (regionala klimatmodeller) 93  
RCP-scenarierna 85–87, 95–96, 154–156  
regional nedskälning 93  
rekyleffekt 167
- SAHARA 152, 159  
salthalt i havsvattnet 42, 113, 124–126  
Sandy 141  
shelfisar 45–46  
skadeorganismer 134–135, 147  
skandinaviska inlandsisen 28, 32–33  
skog och skogsbruk 43, 71–73, 82, 119–124, 127–128, 134–137, 171  
skogsbränder 10–13, 47, 69, 135, 137, 149  
skred 46, 143–144  
skyfall 42  
Skåne 158  
snötäckan 19, 27–28, 44, 61, 90, 94, 98–99, 103, 105, 139  
solaktivitet 17, 51–53, 61  
solceller 166  
solen och solinstrålningen 17–20, 22–24, 27, 29–30, 33, 51–53, 61  
sotpartiklar 20–21, 58, 61  
stenkol, se kol  
Storglaciären 44  
stormar 46–47, 49, 136–137, 140–141, 144  
stormfällning av skog 136–137  
strålningsdrivning 60–61, 80, 85–87  
sulfatpartiklar 20, 53, 55–56, 58, 61, 83, 86  
svaveldioxid 20, 55, 58, 61, 86–87  
svavelhexafluorid 78–81, 86  
syre 24–25, 27, 76–77  
syrebrist 75, 126  
Syrien 150
- TALL 121–122, 134  
temperatur  
extremvärden 98–99, 102–103  
i framtiden 95–104, 153–157  
i förfluten tid 27–39, 53, 97  
i havsvattnet 29, 36, 38  
i Sverige 38–39, 97–103  
i Östersjön 104, 125–126  
i övre atmosfären 36, 38  
på Grönland 30  
mätteknik 40  
termisk expansion (av havsvatten) 48, 106, 154, 156–157  
termohalin cirkulation 31–32  
tjäle 103–104, 136–137  
torka 43, 111, 117, 132–134, 140  
torsk 124–125, 137  
torv 70, 72–73  
trafik 68–69, 76, 139, 167, 171, 176  
tropiska cykloner 47, 49, 113, 140–141  
trädgränsen 34, 122–124  
tundra 120, 127  
turistnäring 138–139  
tvågradersmålet 164, 173–175
- UPPVÄRMNING AV BOSTÄDER OCH LOKALER 68, 76, 139–140, 166, 176  
utsläppsätter 172  
utsläppsutrymme 174
- VATTENFÖRING, se avrinning  
vattenkraft 140  
vattenånga 22–25, 41–42, 56, 90  
vegetationsförändringar 19, 32–34, 61, 115–124  
vegetationsperioden 115–116, 132–133  
vektorburna sjukdomar 147  
vete 131–132  
vindar 49, 113  
vindkraft 166  
vulkanutbrott 20–21, 52–53, 61–62  
vårflod 44, 112  
väderobservationer 36, 38, 40  
väderprognoser 88–89  
Vänern 46, 143  
värmeböljor 11, 13, 47, 98–99, 148–149  
värmestrålning 17, 19–20, 22–24  
varmetiden 34  
växthuseffekten 22–25, 27, 52–57, 60–63  
växthusgas 22–25, 52–57, 60–63, 64–81, 84–87, 95, 153–157, 160–161, 163–168, 172–177
- YNGRE DRYAS 32
- ÅTERKOPPLINGAR 19, 90–91
- ÖSTERSJÖN 44, 104–105, 113, 124–127, 137–139, 147  
översvämningar 46, 140, 142–147

# En varmare värld

## Växthuseffekten och klimatets förändringar

### Tredje upplagan

Genom sina utsläpp av koldioxid och andra föroreningar förstärker människan atmosfärens växthuseffekt. Detta leder till en global uppvärmning som kan få genomgripande följder för våra efterkommande många generationer in i framtiden.

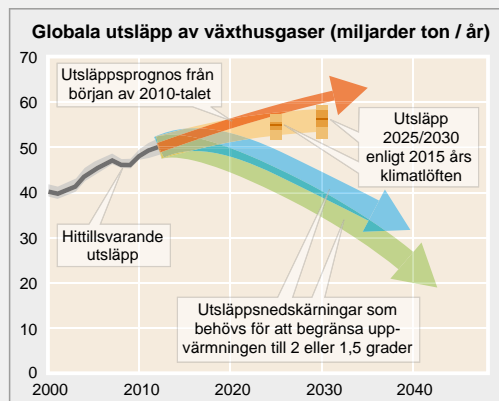
Men hur fungerar växthuseffekten? Vilken roll spelar klimatets naturliga variationer? Hur har klimatet förändrats i det förgångna? Hur kan man beräkna det framtida klimatet, och vad säger resultaten? Vilka konsekvenser kan ett förändrat klimat få för naturmiljön och samhället? Och vad kan vi göra för att minska vår klimatpåverkan? I den här boken finns svar på alla dessa frågor och många därtill.

*En varmare värld* bygger på aktuell klimatforskning från hela världen, inklusive de kunskapssammanställningar som genomförts av FN:s klimatpanel. Här presenteras också svenska beräkningar av vad som kan hända med klimatet i våra trakter under återstoden av seklet.

Denna tredje upplaga av *En varmare värld* är en utökad och grundligt reviderad version av tidigare utgåvor. Boken är faktsäckad men lättläst och rikligt illustrerad. Den är användbar både som lärobok och som kunskapskälla för alla som i sitt arbete kommer i kontakt med klimatfrågor.



JOHAN BERNES



UNFCCC



ASHLEY COOPER / IBL

