



Räkna på klimatet

En guide till klimatforskningens påståenden

Martin Norlin

Utgåva 2026-09-04

Förord

Det är mycket tal om klimatet. Det pågår diskussioner om vad, hur och hur mycket som borde göras för att bromsa klimatförändringarna. Samtidigt är det många som inte är med på det tåget, utan ställer sig frågande: hur illa och bråttom är det egentligen? Är det kanske mest media som jagar klick? Och om det nu pågår klimatförändringar, vet man verkligen att det är vi människor som orsakar dem? Har inte klimatet alltid ändrats? Vore det förresten så illa om det blev lite varmare? Och vem ska man egentligen lyssna på? Forskarna säger det ena och det andra, men hur säkra kan de vara? De kanske också mest vill ha publicitet och forskningsanslag? Samtidigt vore det förstås allvarligt om de har rätt...

Frågetecknen är många, och att många uppfattar frågan som svår är inte konstigt: ämnet är närmast per definition stort och svåröverblickbart, samtidigt som starka åsikter i högt tonläge och tvärsäkra uttalanden går på tvärs med varandra. Man måste väsentligen välja vem man ska lyssna på.

Tänk om klimatfrågan hade varit enkel för en vanlig person att undersöka och reda ut på egen hand! Ungefär som att man kan kolla att varm luft stiger, hävstångsprincipen eller något annat greppbart och vardagligt. Eller om det gått att kontrollräkna sig fram med lite grundläggande matte och fysik. Men många har nog antagit att det inte går för en vanlig privatperson.

Men faktum är att det går i mycket större utsträckning än man kanske kan tro. Syftet med den här texten är att hjälpa dig med just detta: *visa hur man kan kontrollera klimatpåståendena på egen hand*, så att du kan bilda dig en välgrundad egen uppfattning.

Jag som skrivit det här är inte själv klimatforskare, och det är faktiskt en del av poängen. Jag är civilingenjör, vilket betyder att jag har en viss vana med siffror och grundläggande fysik. Jag har kunnat övertyga mig om hur det ligger till gällande klimatforskningens påståenden, och med den här texten som guide kan du göra det också.

Stockholm, september 2026

Martin Norlin

Den här texten finns fri att hämta på martinnorlin.se/klimatguide

Det kan vara värt att titta in där och se om det kommit en ny version.

Den här texten är inte sponsrad på något sätt, utan är ett helt obetalt arbete. Om du uppskattar innehållet finns möjlighet att lämna ett frivilligt bidrag via Swish, till nummer 123-496 13 48 eller genom att scanna QR-koden nedan. Mottagare är mitt bolag Majano.



123-496 13 48

Revisioner

Om du upptäcker fel i texten är du välkommen att maila martin@martinnorlin.se

Titta gärna först in på martinnorlin.se/klimatguide och se att du har den senaste versionen.
Konstruktiva synpunkter är också välkomna.

2026-09-04 Första publika versionen

Innehåll

Introduktion	7
1. Växthuseffekten	8
2. Koldioxid är en växthusgas	10
3. Koldioxidhalten stiger	11
Hur mycket koldioxid från fossil förbränning har mänskligheten släppt ut?	13
Hur mycket luft finns det i atmosfären?	16
Hur mycket högre borde halten bli utifrån utsläppen?	16
Syrehalten sjunker	17
Hur mycket är egentligen 1800 miljarder ton?	18
4. Medeltemperaturen stiger	20
Jordens temperatur historiskt	20
Hur mycket koldioxid värmer planeten är ett smårigt problem	22
Hur fungerar egentligen växthuseffekten?	24
Temperaturberäkning <i>utan</i> återkopplingar	26
Temperaturberäkning <i>med</i> återkopplingar	26
Klimatmodeller	29
5. Uppvärmningens orsaker	30
Det är inte solen	30
Det är inte något med jordens omloppsbana	31
Det är inte något annat naturfenomen	32
6. Global temperaturprognos	33
Fallet Venus	34
7. Uppvärmningens konsekvenser	36
Haven stiger	37
Polarisarna smälter	40
Glaciärerna smälter	42
Korallreven dör	43
Haven blir surare	45
Ökat extremväder	45
Mer värmeböljor	46
Blötare regnperioder och torrare torrperioder	46
Kraftigare stormar	47
Ekosystem rubbas	47
Arter utrotas	48

Kritiska brytpunkter.....	49
Effekter på människor	50
Slutsatser	52
Några vanliga klimatinvändningar.....	53
"Klimatet har alltid ändrats"	53
"Koldioxidhalten är för låg för att spela någon roll"	53
"Det är bra för växtligheten med mer koldioxid".....	53
Slutord	54
Faktarutor	55
Tiopotenser	55
Koldioxid	55
Atom- och molekylmassa, mol och substansmängd	55
Emissionsfaktor - omvandling från förbrukat bränsle till utsläpp av koldioxid.....	56
Kretslopps-kol vs fossilt kol	56
Växthuseffekt	56
Solarkonstanten	57
Enheter för kraft, energi och effekt.....	57
Figurförteckning	59
Referenser	60

Introduktion

Den här texten är alltså riktad till dig som skulle tycka att det vore intressant att på egen hand kunna reda ut huvudpåståenden i klimatforskningen, som:

- Jordens atmosfär ger upphov till en växthuseffekt
- Koldioxid är en växthusgas
- Halten av koldioxid i atmosfären har stigit sedan vi började elda med fossila bränslen
- Jordens medeltemperatur har under samma tid stigit ungefär 1,5 grader
- Vår användning av fossila bränslen är huvudorsaken till uppvärmningen
- Temperaturen kommer fortsätta att stiga om vi inte minskar utsläppen
- En global temperaturökning på bara några få grader innebär allvarliga konsekvenser

Texten har inga direkta förkunskapskrav, men kan kräva lite envishet, beroende på vad du har för bakgrund. Det dyker upp några enkla matematiska formler, ett par formler från fysiken samt en del räkningar med stora tal. Jag hoppas att det inte avskräcker. Viktigast är själva resonemangen, men klimatet är naturvetenskap, och då är det ofrånkomligt att det dyker upp formler och beräkningar; det är enda sättet att få fram något kvantitativt. Jag har försökt hålla det så enkelt som möjligt, och ge lagom mycket kontext. Den som vill ha mer bakgrund om någon formel eller något koncept kan enkelt hitta det i läroböcker, uppslagsverk eller på nätet. Jag har också lagt till några faktarutor i slutet som ger lite kompletterande förklaringar.

Upplägget är följande: vart och ett av påståendena ovan tillägnas ett eget kapitel, där vi med så enkel fysik och så få yttre antaganden som möjligt reder ut hur det ligger till.

1. Växthuseffekten

Forskningen påstår: jorden har en naturlig växthuseffekt som beror på vissa gaser i atmosfären, och den värmer ungefär 33 grader.

I princip all energi som når jorden kommer från solen; det är som bekant mörkt om natten. Den inkommande *effekten* (energi per tid) är ca 1361 Watt per kvadratmeter, mätt uppe vid toppen av atmosfären. Det här kan förstås inte du eller jag kolla själva om vi inte råkar ha en egen satellit, men se faktarutan om *Solarkonstanten*, som den kallas, för den går faktiskt att räkna ut.

Solens strålar kommer ju från ett håll, så den yta som solstrålarna träffar är samma som jordens tvärsnittsarea. Men jorden är rund och roterar, så energin sprids ut över hela ytan. Tvärsnittsarean av en sfär med radien r är πr^2 , men ytan är $4\pi r^2$, så ytan är fyra gånger större än tvärsnittet. Medeleffekten per kvadratmeter blir alltså $1361/4 \approx 340 \text{ W/m}^2$.

Jorden är inte kolsvart, utan reflekterar tillbaka ungefär 30 procent av ljuset ut i rymden. Det är bara resterande 70 procent som absorberas, så **den effekt som faktiskt tas upp blir ungefär $0,7 \cdot 340 \approx 240 \text{ W/m}^2$** . Måttet på andelen som reflekteras kallas förresten för *albedo*.

Hur mycket energi ett objekt av en viss temperatur strålar ut beskrivs av Stefan-Boltzmanns lag från 1880-talet, som relaterar utstrålad effekt per kvadratmeter M till objektets temperatur T :

$$M = \sigma T^4 \tag{1}$$

Uttryckt i ord: ett objekts utstrålade värmeeffekt, per ytenhet, är proportionell mot objektets temperatur upphöjt till fyra.

Den lilla proportionalitetskonstanten σ ("sigma") har värdet $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ och kallas Stefan–Boltzmanns konstant.

Fysikformler som innehåller temperaturer bygger nästan alltid på att man använder Kelvin istället för Celsiusgrader. Kelvinskalan utgår från absoluta nollpunkten, som är ungefär $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Här är vi ute efter temperaturen som jorden behöver ha, så vi stuvlar om i formeln:

$$T = (M/\sigma)^{1/4}$$

Ett objekt som varken blir varmare eller kallare (så kallad *termisk jämvikt*) måste stråla ut lika mycket som det tar emot. Så kan vi stoppa in de 240 W/m^2 vi fick fram ovan som värde på M , samt värdet på σ :

$$(240 / (5,67 \cdot 10^{-8}))^{0,25} \approx 255\text{ K eller } -18\text{ }^{\circ}\text{C}.$$

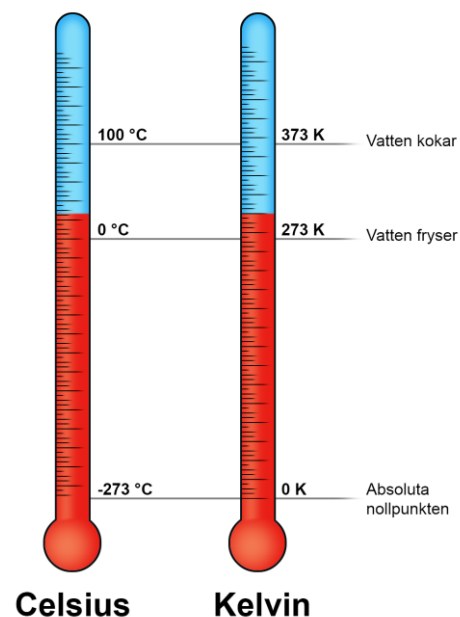
Det är alltså temperaturen jorden "borde" ha. Men medeltemperaturen på jorden är inte 18 minusgrader, utan ungefär $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ [1]. **Det är en skillnad på 33 grader.** Något håller tydligen kvar en hel del värme.

Men jorden är ju varm inuti, och vulkanutbrott är uppenbarligen väldigt heta historier. Kan inte skillnaden komma från jordens inre?

Så hade det kunnat vara, men berg leder värme dåligt. Värmeflödet till jordytan är mindre än 0,1 Watt per kvadratmeter [2], så det är försumbart i sammanhanget – solinstrålningen på 240 W är ungefär 3000 gånger större. Och även stora vulkanutbrott, som Pinatubo 1991, är tillfälliga och lokala. Utslaget över tid och över hela jorden är energin från vulkaner liten, ännu mindre än värmestrålningen från jordens inre.

Kan man tänka sig någon annan yttre energikälla än solen? Kosmisk strålning innehåller en del högenergetiska partiklar. Dessa kommer dock otroligt glest jämfört med strålningen från solen. Så om energiflödet från solen är 1360 Watt per kvadratmeter så är motsvarande siffra för kosmisk strålning något i stil med 0,01 milliWatt [3], alltså helt försumbart jämfört med solen.

Så om den extra värmen inte kommer från jordens inre eller utifrån, så måste det vara något i atmosfären som stänger in värme. Detta fenomen kallas växthuseffekt.



Figur 1. Temperaturskalor Celsius och Kelvin
Egen illustration

Vi har räknat fram att växthuseffekten på jorden är ungefär 33 grader.

2. Koldioxid är en växthusgas

Forskningen påstår: koldioxid är en växthusgas, det vill säga absorberar värmestrålning.

Det går ganska enkelt att övertyga sig om att några av de gaser som finns i atmosfären verkligen absorberar (tar upp) värmestrålning. Vi ska titta specifikt på koldioxid, CO_2 .

PET-flaskexperimentet

Det här är nog det enklaste tänkbara experimentet för att visa att koldioxid är en växthusgas, det vill säga binder värme. Du behöver:

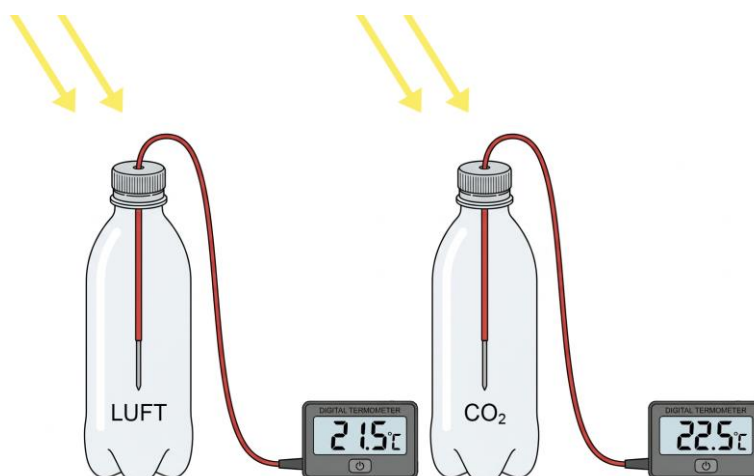
- två torra identiska PET-flaskor
- två termometrar *eller* en värmekamera (värmekänslighet NETD ≈ 100 mK eller bättre)
- en stark lampa eller solljus (solljus är förmodligen bättre)
- en källa till koldioxid, t.ex. bikarbonat och ättika eller en sodastreamer

Gör så här:

Sätt en termometer i vardera flaskan. Låt ena flaskan innehålla vanlig luft. Fyll den andra med luft där du höjt CO_2 -halten.

Belys sedan båda lika mycket med lampan/solen, och följ temperaturerna i kanske en kvart.

Om du gör detta bör flaskan med extra CO_2 bli varmare. Men effekten är inte så stor och ganska känslig för störningar. Du kanske behöver göra det flera gånger, men:



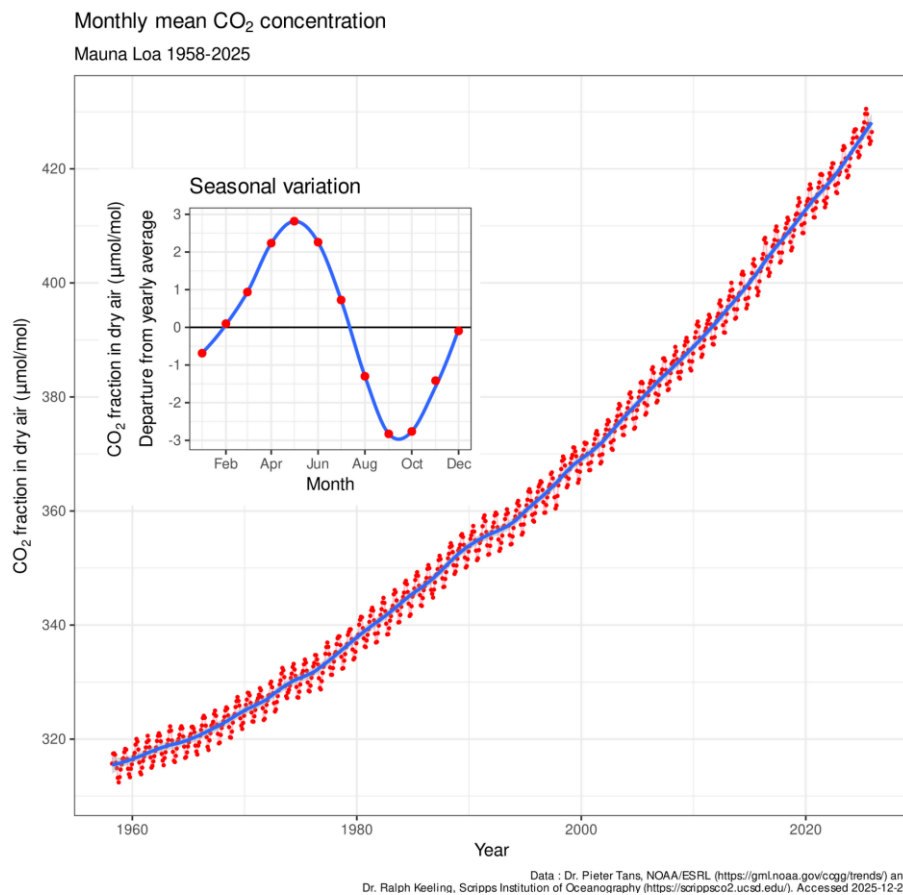
Figur 2. Hemma-experiment för att påvisa att koldioxid är en växthusgas
Egen illustration

Vi har med ett enkelt hemmaexperiment övertygat oss om att koldioxid är en växthusgas.

3. Koldioxidhalten stiger

Forskningen påstår: före den industriella revolutionen var halten av koldioxid i atmosfären ungefär 280 miljondelar. Nu är den uppe i ungefär 430 miljondelar och stiger med ungefär 2,5 miljondelar per år.

Den mest kända mätserien över koldioxidhalten i atmosfären är den så kallade *Keelingkurvan* [4] från Mauna Loa på Hawaii. Mätserien stäcker sig tillbaka till 1958. Då låg halten på ungefär 315 miljondelar.

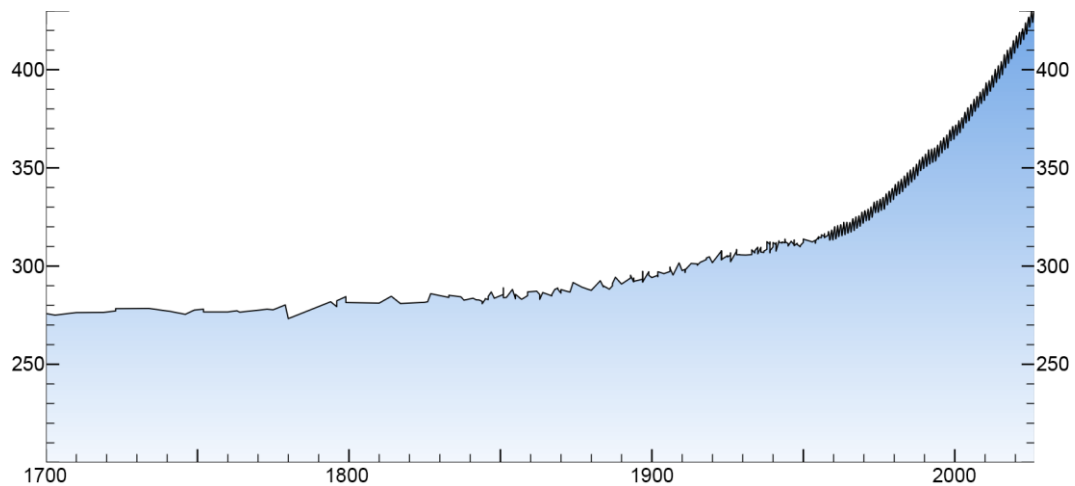


Figur 3. Keelingkurvan
Scripps Institution of Oceanography (CC BY)

Överlagrat den stigande generella trenden finns en årlig variation som kommer av att det är mer landmassa på norra halvklotet, och skogarna där tar upp koldioxid under våren, som de släpper ut igen på hösten. Man kan se att halten stiger snabbare nu än den gjorde på 60-talet.

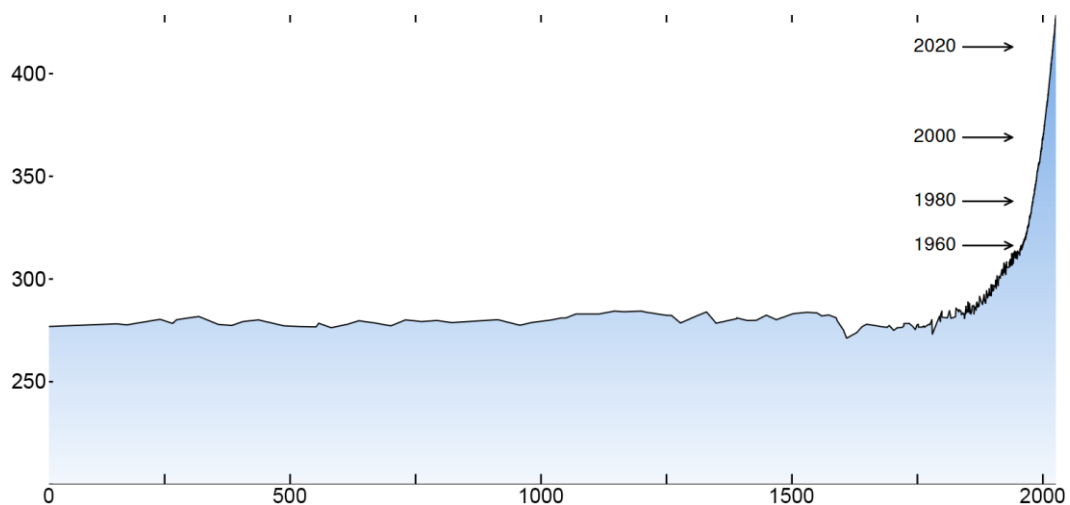
Man har sammanfogat Mauna Loa-mätserien med data från andra mätmetoder. Så här ser det ut om man tar med data från år 1700:

3. Koldioxidhalten stiger



Figur 4. Koldioxidhalten i atmosfären sedan år 1700
Scripps Institution of Oceanography (CC BY)

Det är förstås lite ojämna och glesare data längre tillbaka, men man kan ana att koldioxidhalten börjar stiga så smått runt år 1850. Ju mer man zoomar ut, desto tydligare blir det att något ovanligt är i görningen. Här är de senaste två tusen åren:

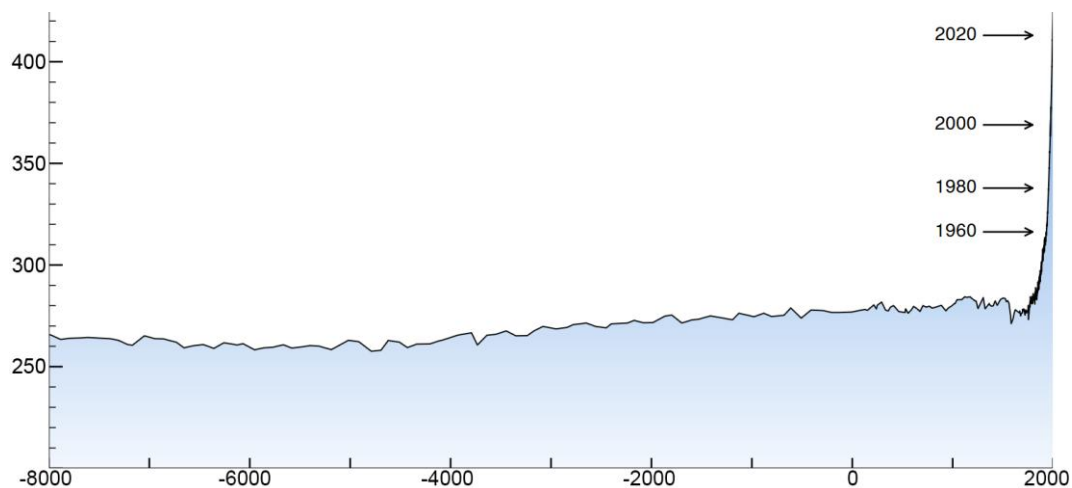


Figur 5. Koldioxidhalten i atmosfären under 2000 år
Scripps Institution of Oceanography (CC BY)

Det är knappt några förändringar alls de första 1800 åren eller så, och sen plötsligt på slutet drar värdet iväg snabbt och till synes utan inbromsning.

Vi zoomar ut ännu mer till de senaste tio tusen åren:

3. Koldioxidhalten stiger



Figur 6. Koldioxidhalten i atmosfären under tio tusen år
Scripps Institution of Oceanography (CC BY)

Det ger fortfarande väsentligen samma bild: långsamt böljande små förändringar, och så en spik rakt upp på slutet.

Historiska värden har man mätt bland annat genom att mäta halten koldioxid i små luftbubblor instängda i glaciärer och polarisar.

Alla dessa kurvor och historiska värden är förstås svåra för dig och mig att verifiera. Det aktuella värdet kan man mäta med en koldioxidmätare. De billigaste är inte att lita på, men de lite dyrare är utrustade med så kallad NDIR-sensor. De för konsumentbruk har inte superhög noggrannhet utan kan slå fel på uppåt 50 miljondelar.

Men just nu behöver vi faktiskt varken det förindustriella eller det nuvarande värdet: vi är mest intresserade av själva *ökningen*. Halten ska alltså ha ökat från ungefär 280 till 430 miljondelar, alltså ungefär **150 miljondelar**. När forskarna här talar om "halt" menar de förresten *andelen av antalet molekyler*, inte andelen av vad gasen väger eller något annat.

Kan vi verifiera den här ökningen?

Ja, om vi vet hur mycket koldioxid som släppts ut, och hur mycket luft det finns i hela atmosfären. Sen är det bara att räkna ut andelen.

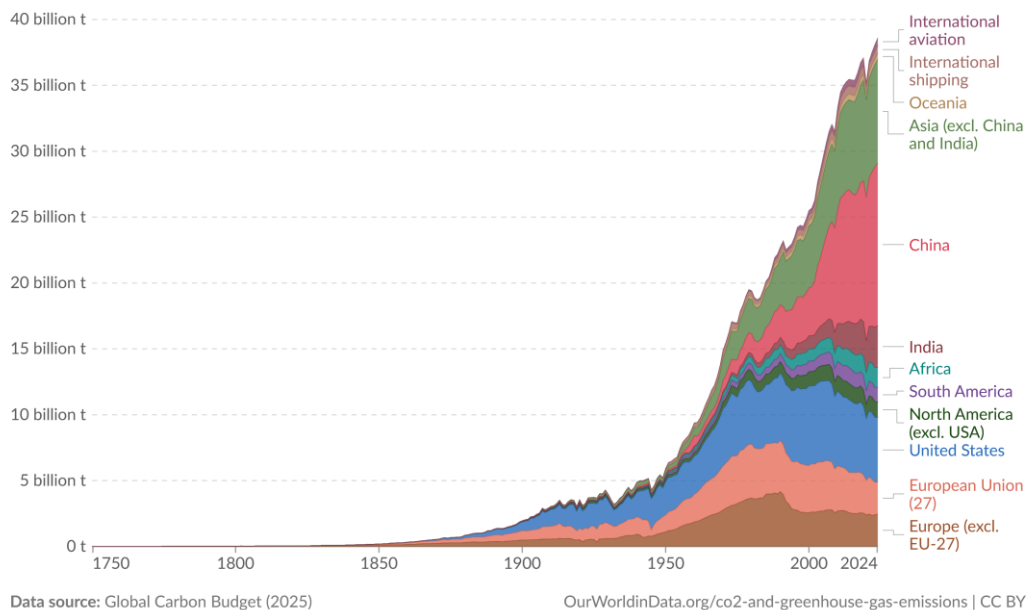
Hur mycket koldioxid från fossil förbränning har mänskligheten släppt ut?

Det finns numera ganska bra statistik över utsläpp, bland annat på sidan [Our World in Data](#) [5]. Här är mänsklighetens årliga utsläpp av koldioxid från år 1750 fram tills idag:

3. Koldioxidhalten stiger

Annual CO₂ emissions by world region

Emissions from fossil fuels and industry¹ are included, but not land-use change emissions². International aviation and shipping are included as separate entities, as they are not included in any country's emissions.



Figur 7. Världens årliga koldioxidutsläpp
Our World in Data (CC BY)

År 1800 fanns det ungefär en miljard människor. Industriella revolutionen pågick i England och det fanns ångmaskiner som eldades med kol. De globala årliga utsläppen från fossil förbränning var ungefär 30 miljoner ton koldioxid, eller i genomsnitt 33 kg per person i världen – förstås mycket ojämnt fördelat.

Det var först efter andra världskriget det verkligen tog fart. Då låg utsläppen på runt 5 miljarder ton per år, för att sedan ha ökat i ganska jämn takt fram till dagens ungefär 40 miljarder ton per år.

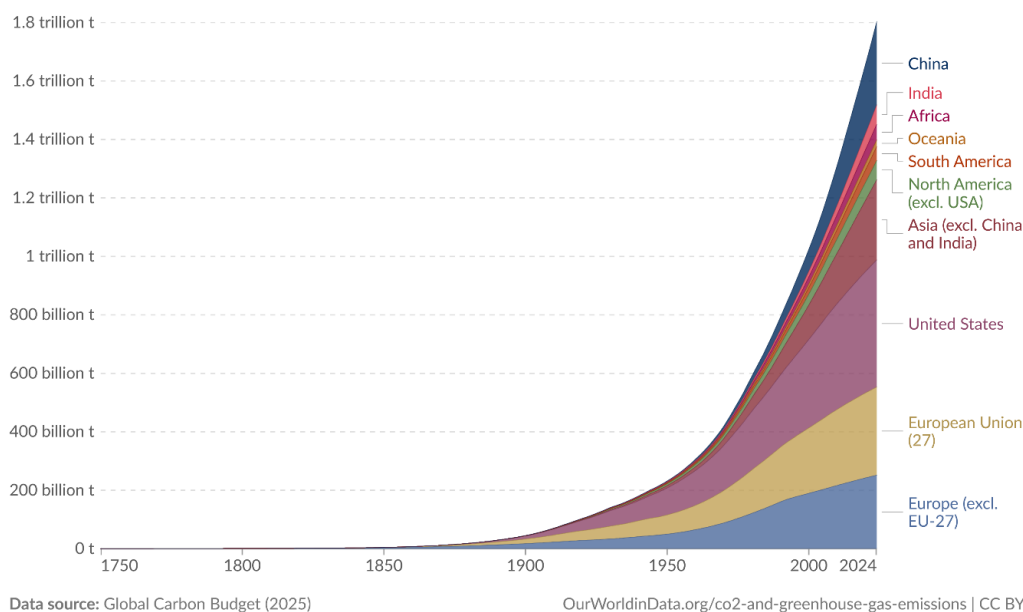
Jordens befolkning är idag drygt åtta miljarder människor, så det blir ungefär fem ton, 5000 kg, per person. Det är 150 gånger mer *per person* än år 1800, och över 1300 gånger mer *totalt*.

Om man *summerar* mänsklighetens utsläpp av koldioxid från fossil förbränning sedan industriella revolutionens början fram tills idag blir det omkring **1800 miljarder ton**, varav 90 procent har släppts ut efter 1940 och så mycket som 50 procent efter 1996:

3. Koldioxidhalten stiger

Cumulative CO₂ emissions by world region

Cumulative carbon dioxide (CO₂) emissions by region from the year 1750 onwards. This measures CO₂ emissions from fossil fuels and industry¹ only. Land-use change emissions² are not included.



Figur 8. Världens ackumulerade koldioxidutsläpp
Our World in Data (CC BY)

Kan vi med lite överslagsräkningar verifiera storleksordningen på denna siffra?

Säg att man har en bensinbil (den stora majoriteten av världens bilar drivs fortfarande med bensin eller diesel). Den drar lite mindre än en liter per mil, och man kanske kör den lite mer än tusen mil per år, så alltså går det åt ungefär tusen liter bensin per år. Men en liter bensin ger vid förbränning inte ett kg koldioxid, utan drygt 2,3 kg, eftersom varje kolatom binds till två syreatomer (se faktarutan om *emissionsfaktor*). Så bilens utsläpp blir ungefär 2,3 ton CO₂ per år.

Sen står förstås inte bilen för alla ens utsläpp, utan de kommer också från ens övriga transporter som flygresor, uppvärmningen och elen till ens hus, produktion och transport av mat och andra varor man köper, inklusive produktionen av både ens bil och ens hus, utslaget över deras livslängder. Till det behöver man per person slå ut samhällets alla andra utsläpp: energiproduktion, industrier, bygget av infrastruktur, och så vidare.

Alla har förstås inte egen bil. De flesta har inte det, globalt sett – det finns ungefär 1,5 miljarder personbilar i världen. Men man kan tänka sig att utsläpp på drygt det dubbla som vår exempelbil släpper ut – 5 ton koldioxid per person och år – inte är orimligt. Med 8 miljarder människor blir det just 40 miljarder ton per år.

Om vi tänker oss att utsläppen ökat linjärt från noll för nittio år sedan blir de totala utsläppen just $40 \cdot 90 / 2 = 1800$ miljarder ton. Så siffran från Our World in Data över mänsklighetens samlade koldioxidutsläpp verkar rimlig. Gör gärna din egen uppskattning.

Hur mycket luft finns det i atmosfären?

Det var utsläppen det. Den andra uppgiften vi behöver för att kunna räkna ut ökningen av koldioxidhalten är hur stor atmosfären är. Det går förstås att slå upp, men det går också att räkna ut, och det med en vanlig barometer: om vi vet lufttrycket vid marken, och vet hur stor jordens yta är, så kan vi räkna ut vad hela atmosfären väger.

En barometer visar vid havsytan vid normalt lufttryck 760 mm Hg, 1 013,25 millibar eller 101 325 Pascal. Det innebär att hela luftpelaren, ända upp i rymden, trycker med kraften 101 325 newton på en kvadratmeter av marken, eftersom enheten för tryck, Pascal, är definierad som en newton per kvadratmeter.

Trycket P är kraften F per area. Kraften i det här fallet kommer från luften: dess massa, m , gånger tyngdaccelerationen vid marken, g :

$$P = F/A = mg/A$$

Så

$$PA = mg \text{ eller } m = PA/g$$

Med $P = 101325 \text{ Pa}$, $A = 1 \text{ m}^2$ och $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, så blir $m = 101325 \cdot 1/9,81 = 10\,329 \text{ kg}$.

Atmosfären över varje kvadratmeter av jordens yta väger alltså drygt 10 ton. För att få vad hela atmosfären väger behöver vi bara multiplicera det värdet med jordens area.

Jordens area kan man i sin tur antingen slå upp, eller så räknar man ut den också med hjälp av den ursprungliga definitionen av en meter: det går tio miljoner meter mellan nordpolen och ekvatorn – en fjärdedel av omkretsen. Alltså är jordens omkrets 40 000 kilometer. Det stämmer inte helt exakt, men så noga är det inte.

Radien av en cirkel är omkretsen delat på 2π . Så jordens radie är $40\,000/2\pi \approx 6\,366$ kilometer.

Arean av en sfär är $4\pi r^2$. Stoppar vi in radien får vi 509 miljoner kvadratkilometer eller $5,09 \cdot 10^{14}$ kvadratmeter.

Så nu har vi vad atmosfären väger per kvadratmeter, och antalet kvadratmeter. Massan av hela atmosfären blir:

$$10329 \text{ kg/m}^2 \cdot 5,09 \cdot 10^{14} \text{ m}^2 \approx 5,3 \cdot 10^{18} \text{ kg} = 5300 \cdot 10^{15} \text{ kg} = 5300 \cdot 10^{12} \text{ ton}.$$

Alltså väger atmosfären ungefär 5 300 biljoner ton.

Hur mycket högre borde halten bli utifrån utsläppen?

Okej, dags för själva uträkningen av koldioxidhalten. Så vi har tillsatt 1,8 biljoner ton extra koldioxid till 5 300 biljoner ton atmosfär. Ska man vara petig borde väl atmosfären nu väga 5 301,8 biljoner



Figur 9. Barometer
Eget foto

ton. Fast det gör den inte riktigt, mer om det strax. Men någon biljon ton hit eller dit påverkar andelen koldioxid väldigt lite.

Viktandelen tillsatt koldioxid blir alltså helt enkelt $1,8/5300 \approx 0,000340 = 340$ miljondelar.

Inte helt tokigt, men mer än dubbelt så mycket som mätningarna visar, vilket ju var 150 miljondelar.

Men det är ju andelen koldioxid*molekyler* vi är ute efter, inte andelen av vikten. Och koldioxidmolekyler är lite tyngre än genomsnittliga luftmolekyler: 44 gram per mol mot luftens 29 gram per mol (se faktarutan om *molekylvikter*). Och eftersom de är tyngre så är de också färre. Så vi behöver kompensera med den faktorn: $29/44 = 0,66$.

Då får vi istället en ökning på 237 miljondelar. Bättre, men fortfarande för mycket.

Förklaringen till skillnaden är att inte all koldioxid vi släppt ut stannat i atmosfären. En del har tagits upp av världshaven och ytterligare en del av växtlighet. Att växter tar upp koldioxid genom fotosyntesen känner de flesta till, och att vatten också kan göra det känns troligt - det är ju det man gör när man kolsyrar vatten. Det är bara ungefär hälften av utsläppen som stannar i atmosfären [6].

Det kan vi också verifiera, för tittar man lite mer noga på Keelingkurvan ovan ser man att **halten koldioxid just nu stiger ungefär 2,5 miljondelar per år**. Vi såg också att utsläppen i nuläget är ungefär 40 miljarder ton per år. Med samma beräkning som vi gjorde ovan med de totala utsläppen kan vi stoppa in enbart ett års utsläpp, och se vad det borde ge för ökning:

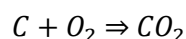
Viktfaktorn $0,66 \cdot (40 \text{ miljarder ton}) / (5300 \text{ biljoner ton}) = 0,66 \cdot (40 \cdot 10^9) / (5300 \cdot 10^{12}) \approx 0,00000498$ eller knappt 5 miljondelar - mycket riktigt dubbelt så mycket som den uppmätta ökningen, så det verifierar att omkring hälften försvinner. Så vi har en bra förklaring till varför värdet vi räknat fram är lite *högre* än det forskarna uppmätt.

Vi har verifierat att den ökning av koldioxidhalten som forskningen påstår är av rätt storlek.

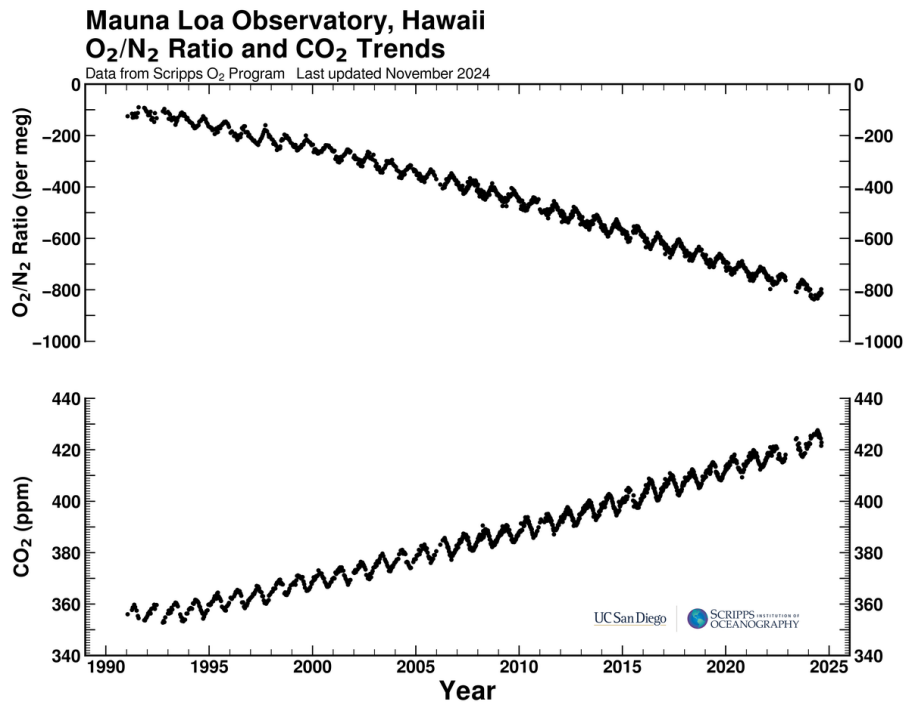
Syrehalten sjunker

En till pusselbit som stärker att koldioxiden kommer från förbränning och inte någon annan process, är att halten syre i luften sjunker [7]. Och innan någon får panik över att syret kommer ta slut: det är en *väldigt* liten förändring.

Vid förbränning av kol med god tillgång på syre är reaktionen enklast tänkbara, en kolatom och en syremolekyl bildar en koldioxidmolekyl:



Det betyder att för varje koldioxidmolekyl som bildas försvinner en syremolekyl, så om den ökade mängden koldioxiden i atmosfären kommer från förbränning så kan man förvänta sig att syret sjunker i samma takt. Om koldioxiden kom från något annat finns inget skäl att tro att syrehalten skulle uppvisa någon specifik trend. Men det ser ut så här:



Figur 10. Syrehalt och koldioxidhalt
Scripps Institution of Oceanography (CC BY)

Det är tydligen svårt att mäta syrehalten direkt med så stor noggrannhet som krävs, så istället mäter man kvoten mellan syre och kväve, och av det skälet är skalorna för CO₂ och O₂ olika i diagrammet vilket är lite frustrerande, men man ser ändå direkt att kurvorna är spegelbilder av varandra, och det kan de alltså rimligtvis bara vara om orsaken är just förbränning av kol.

Hur mycket är egentligen 1800 miljarder ton?

Vi har kontrollräknat att det verkar rimligt att mänsklighetens totala utsläpp från eldning med fossila bränslen så långt uppgår till ungefär 1800 miljarder ton. För att få lite bättre uppfattning om hur mycket det egentligen är kan vi räkna om det till motsvarande mängd olja.

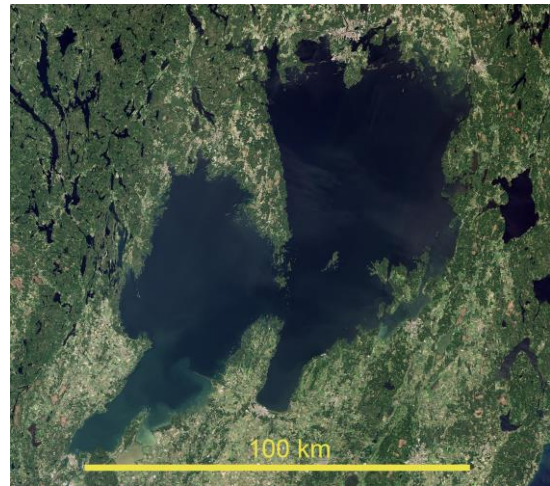
3. Koldioxidhalten stiger

Eftersom ett ton olja ger 3,1 ton koldioxid delar vi med den siffran för att få antal ton olja det motsvarar: 580 miljarder ton.

Olja har en densitet på ungefär 0,9 ton per kubikmeter, så vi delar med den för att få volymen. Vi får då ungefär 645 miljarder kubikmeter, eller 645 kubikkilometer. Sveriges största sjö, både till yta och volym är Vänern. Den innehåller 153 kubikkilometer vatten [8]. Alltså motsvarar det drygt fyra Vänern fyllda med olja, eller över en miljon Globen (som har volymen 600 000 kubikmeter, 0,0006 kubikkilometer).

Sprider man istället ut det över hela jordens yta (även haven) blir det ungefär 1,3 liter olja för varje kvadratmeter.

Även om jordens atmosfär är stor så är det inte svårt att föreställa sig att elda upp fyra Vänern fyllda med olja faktiskt gör skillnad.



*Figur 11. Vänern
Google Earth/Sentinel*

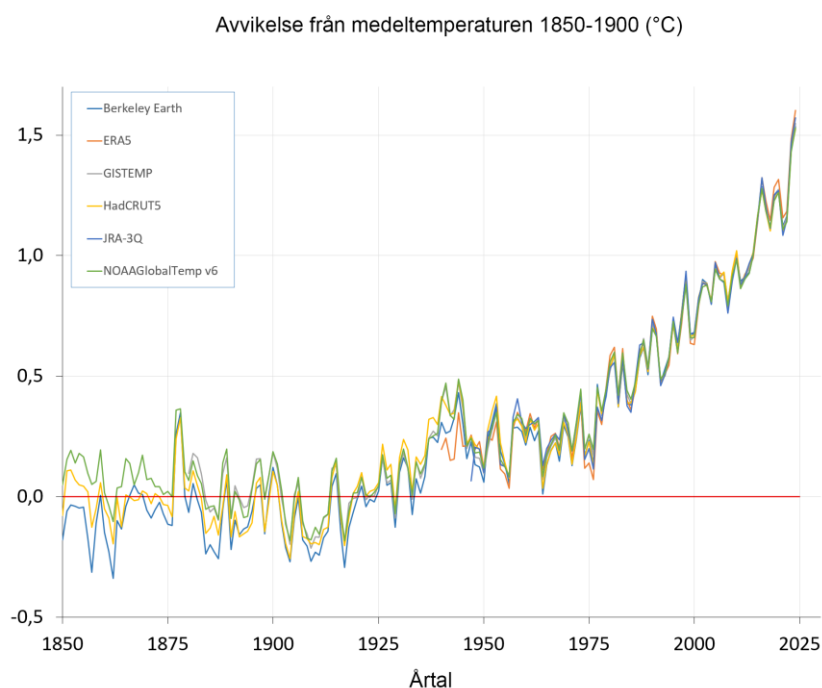
4. Medeltemperaturen stiger

Forskningen påstår: jordens medeltemperatur har hittills stigit med nästan 1,5 grad sedan industrialiseringen början.

Det här kapitlet är kanske det mest centrala. Det är förmodligen också det tyngsta. Så här är upplägget: först en titt på temperaturdata bakåt i tiden och några saker att lägga märke till gällande det, sedan en titt på varför problemet med att räkna ut exakt hur mycket koldioxid värmer planeten inte är helt enkelt, därefter en genomgång lite mer ingående hur växthuseffekten egentligen fungerar, och slutligen ger vi oss på själva uträkningen.

Jordens temperatur historiskt

Jordens temperatur har man helt enkelt mätt vid väderstationer världen över sedan 1800-talet. Det finns ett antal dataserier från bland annat NASA och NOAA som alla visar samma trend när det gäller den globala medeltemperaturen:



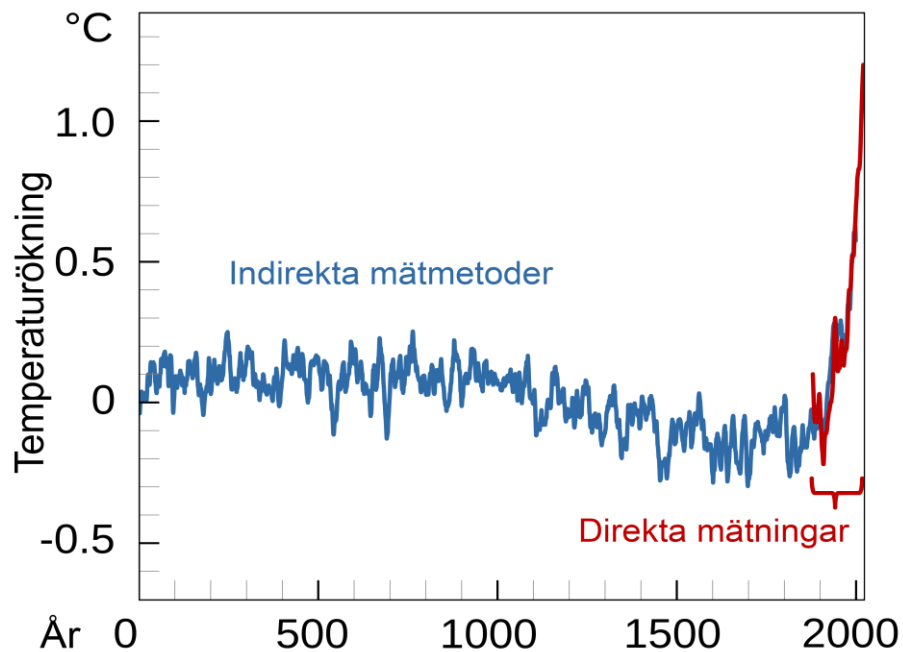
Figur 12. Global medeltemperatur 1880 - 2025

Eget diagram baserat på flera dataserier sammanställda av World Meteorological Organization [9]

Man kan se att det skiljer någon tiondels grad mellan serierna under de tidigaste åren, men det påverkar inte helhetsbilden. Totalt rör det sig om ungefär en och en halv grad ökning, och den största delen har skett de senaste 50 åren, och bara sedan år 2000 är ökningen ungefär 0,6 grader.

4. Medeltemperaturen stiger

För att gå längre tillbaka behöver man använda sig av indirekta metoder som årsringar i träd, analys av luftbubblor instängda i is och faktiskt även koraller. Precis som med koldioxidhalten blir det tydligt att den pågående trenden är något ovanligt när man tittar på längre tidsskala:



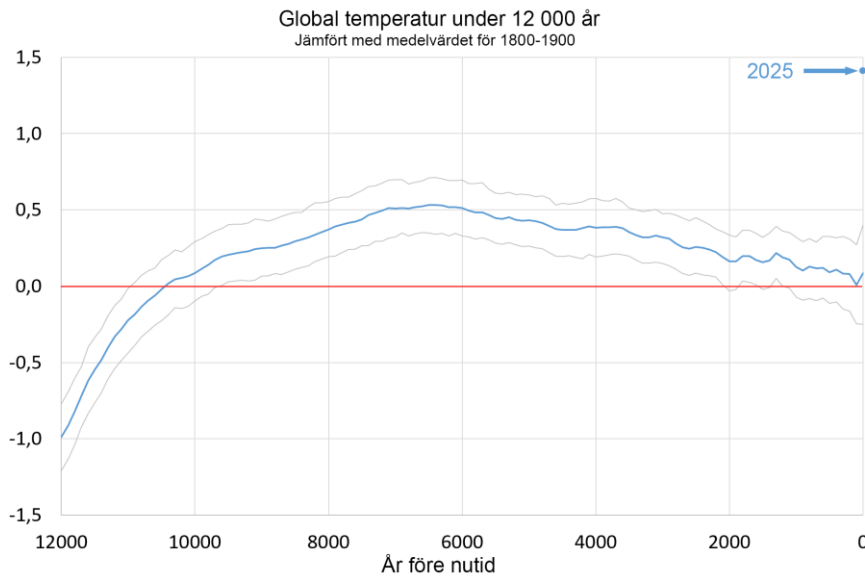
Figur 13. Global medeltemperatur under 2000 år

Figur av Efbrazil via Wikimedia Commons (CC BY-SA), baserat på dataset från PAGES 2k Consortium [10]

Det är en del mindre variationer upp och ner, och de äldre uppgifterna är rimligtvis inte perfekta, men vi ser ingenting under de senaste två tusen åren som likar uppgången under 1900-talet.

Vi kan zooma ut till de senaste 12 000 åren till det som kallas *Holocen*, epoken sedan senaste istiden:

4. Medeltemperaturen stiger



Figur 14. Global medeltemperatur under 12 000 år
Egen figur¹ baserad på data från Kaufman et al. Nature 2020 [11]. Grå linjer indikerar 5- och 95-percentiler.

Den här paleo-klimatologiska dataserien sträcker sig fram till 1950, och har därmed inte med uppgången som skett på senare tid. Notera värdet för 2025, inritat som referens. Ta för all del grafen med en viss nypa salt, sådana här rekonstruktioner har en viss osäkerhet.

Otvivelaktig är åtminstone den övergripande trenden. Det var som synes ganska varmt globalt för omkring 7 000 år sedan, men det är också tydligt att naturliga variationer går mycket långsamt, oftast bara någon tiondels grad per årtusende. Men precis på slutet drar temperaturen iväg rakt uppåt med 1,5 grad.

Av graferna över koldioxiden i förra kapitlet och av temperaturkurvan ovan kan vi våga oss på att dra ett par viktiga slutsatser: **När koldioxidhalten stiger, så stiger också temperaturen.**

Det orsakssambandet hade ju i teorin kunnat gå åt andra hållet: temperaturen har av någon anledning ökat, och det har gjort att koldioxidhalten stigit. Men figurerna visar även att **temperaturen kan variera utan att koldioxidhalten påverkas**. För i grafen över koldioxidhalten de senaste tio tusen åren låg halten i princip still ända fram till 1800-talet, medan temperaturen har fluktuerat mer under samma tid. Hade det varit temperaturen som drev ändringar i koldioxidhalten hade det synts i den koldioxidgrafen, men det gör det inte. Så det kan man utesluta, baserat på de här graferna. Dessutom vet vi ju redan sedan flaskexperimentet att koldioxid har förmågan att hålla kvar värme.

Hur mycket koldioxid värmer planeten är ett snårigt problem

Vi har räknat fram att den totala växthuseffekten på jorden är ungefär 33 grader. Vi har förvissat oss om att koldioxid är en växthusgas. Men även om det enkla flaskexperimentet visade att koldioxid

¹ Figuren är skapad genom att ta medelvärdet över alla 500 så kallade ensemblemedlemmar ur DCC-datasetet.

binder värme, kunde det inte avgöra *hur mycket*. För att ringa in det skulle det krävas en mer sofistikerad uppställning där gashalter, volymer och temperatur mäts noga.

Ungefär som med koldioxidhalten skulle vi vilja göra någon enkel räkning som ger hur stor temperaturökning planeten får av en viss mängd extra koldioxid. Men det är dock själva tiotusenkronorsfrågan, och om det varit lätt hade det, lite tillspetsat, inte behövts klimatforskning.

Till att börja med så är koldioxid inte den enda växthusgasen. Av den naturliga växthuseffekten på 33 grader står vattenånga för ungefär 50 %, moln för 25 %, koldioxid 19 %, övriga bl.a. ozon, metan och kvävedioxid för ca 7 % [12]. Moln är särskilt knepiga, för de har en värmande och avkylande effekt på samma gång: de fångar värme, men ökar också andelen solljus som reflekteras tillbaka ut i rymden. Den värmande effekten har visat sig vara större. Hur som helst, koldioxid står alltså bara för ungefär en femtedel av den totala växthuseffekten, eller knappt sju grader.

Ett till faktum att hålla i minnet är att koldioxid inte är den enda växthusgasen vi släppt ut mycket av på senare år, så även om vi exakt kunde räkna ut temperaturhöjningen enbart från denna så kan vi inte förvänta oss att den helt skulle matcha mätningarna.

Dessutom är bidragen av de gaser som ger upphov till växthuseffekten inte oberoende av varandra: *de är delvis överlappande*. Det betyder att bidragen från gaserna var för sig inte blir detsamma som den uppvärmande effekten av alla gaserna samtidigt.

Slutligen har jorden ett antal *återkopplingar* (engelska *feedbacks*) som antingen förstärker eller dämpar uppvärmningen. De kan vara både snabba eller ta lång tid. Exempel på *förstärkande* återkopplingar är ökad avdunstning (som går snabbt) och som leder till att luften innehåller mer vattenånga (som alltså i sin tur är en växthusgas), samt avsmältning av is (som går långsamt), vilket leder till att andelen solljus som jorden absorberar ökar. En *dämpande* återkoppling är att mer koldioxid i luften också gör att mer tas upp av hav och växtlighet. Men den effekten avtar i sin tur mer och mer ju varmare det blir – blir det för varmt börjar växtligheten ta stryk istället. Och så vidare, och så vidare.

Så exakt hur mycket varmare planeten blir av en viss ökning av halten koldioxid är ett riktigt snårigt problem. Det är faktiskt svårt även för avancerade klimatmodeller att få rätt, främst för att man ännu inte vet det exakta värdet på det som kallas *klimatkänslighet*: hur mycket den globala medeltemperaturen höjs vid en *fördubbling* av koldioxidhalten. Skälet till att den är så svår att fastställa är just dessa återkopplingar som vi ännu inte vet exakt hur starka de är.

Den förste som gav sig på att beräkna klimatkänsligheten var svenske kemisten och fysikern Svante Arrhenius år 1896. Vi ska smyga lite i hans fotspår men göra beräkningen i en modern, avskalad version. Men först lite mer om hur växthuseffekten och specifikt koldioxidens värmeupptag fungerar.

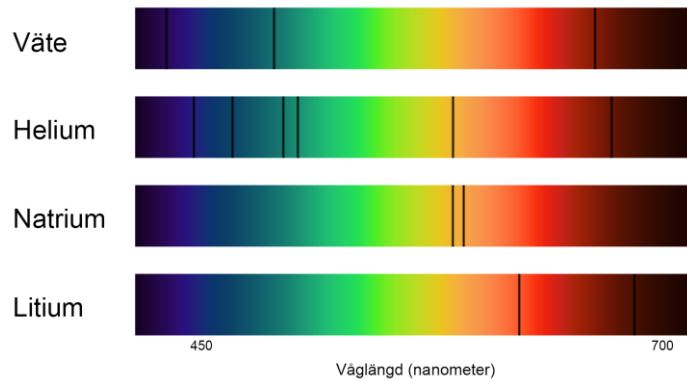


Figur 15. Svante Arrhenius
Public Domain

Hur fungerar egentligen växthuseffekten?

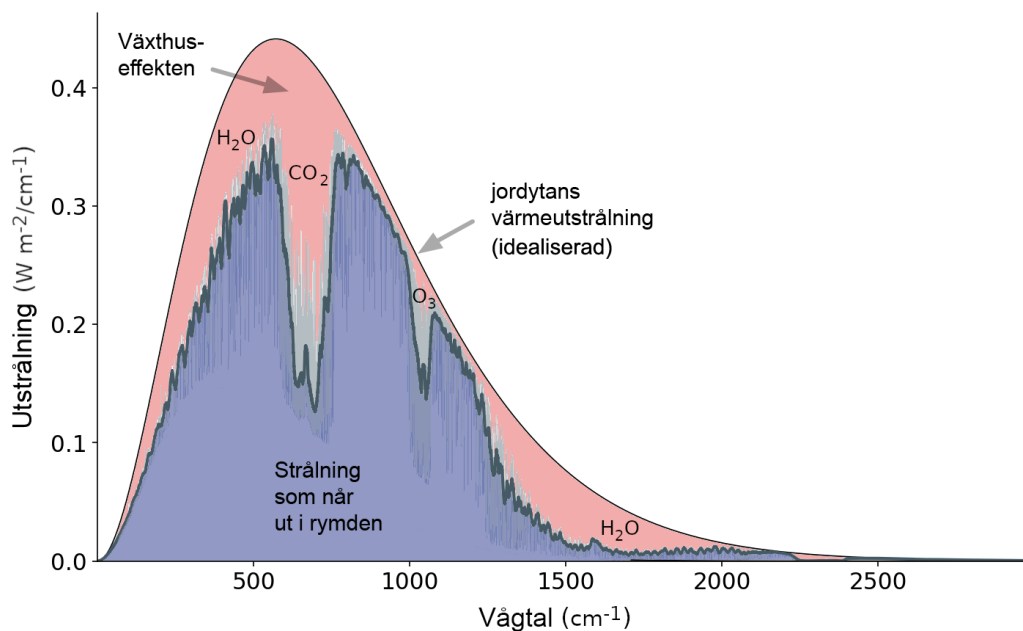
Synligt ljus och värmestrålning är egentligen samma sak: *elektromagnetisk strålning*, men med olika våglängder.

Alla gaser har *spektrum* med absorption av elektromagnetisk strålning i vissa våglängder. Linjerna motsvarar skillnader i elektronernas energinivåer eller vibrationsenergi i molekylerna, och de är unika för varje ämne. Så spektra fungerar lite som fingeravtryck, fast för gaser. Om trycket i gasen är så pass högt som det är i luft, så breddas även linjerna till band av att molekylerna krockar.



Figur 16. Exempel på spektrum (egen figur)

Koldioxidmolekyler består av tre atomer (kolatomen mellan de båda syreatomerna). Det gör vatten och ozon också, och det är ingen slump att det är just dessa som står för lejonparten av växthuseffekten: de kan böjas och vibrera kring atomen i mitten, och det ger energinivåer som motsvarar infrarött. Det betyder att de absorberar i ett band av våglängder som sammanfaller med jordens värmeutstrålning. Genom krockar med luftens övriga molekyler, främst N_2 och O_2 , överförs sedan energin till atmosfären, som blir varmare.

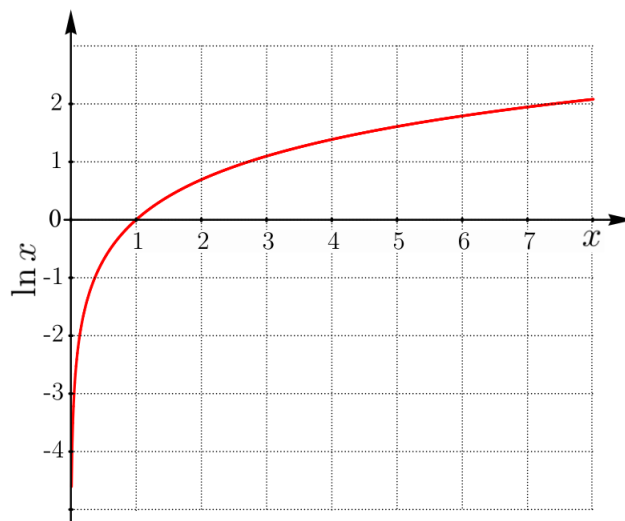


Figur 17. Strålningsdiagram över växthuseffekten
Försvenskning av figur av Robert Wentworth (CC BY-SA)

4. Medeltemperaturen stiger

Den rosa kurvan är en idealiserad strålningskurva, en så kallad *Planckkurva* uppkallad efter fysikern Max Planck som härledde dess utseende matematiskt. Växthuseffekten motsvaras av den rosa arean i figuren: skillnaden mellan strålningen från marken och strålningen som når ut i rymden – den värme som fångas upp av atmosfären på vägen ut i rymden. Figuren ovan är i ett avseende en pedagogisk förenkling: jordytans utstrålning är inte en perfekt planckkurva, men slutsatsen är ändå sann: växthuseffekten är skillnaden i area mellan de båda kurvorna.

Om koncentrationen av CO₂ ökar blir absorptionen i bandet kraftigare, men den breder också ut sig till intilliggande våglängder. I mitten av bandet är blir upptaget till slut mättat, så att mer CO₂ inte längre gör någon skillnad där. Men i vardera utkanten av bandet är det fortfarande delvis genomsläppligt för värme, och där spelar extra CO₂ roll. Den här kombinationen av redan mättade frekvenser och utbredning till nya ger inte ett linjärt samband mellan koldioxidhalt och temperatur, utan ett *logaritmiskt*: varje *fördubbling* av halten ger lika stor temperaturökning. Det betyder att temperaturökningen planar ut med ökad halt, men utan att upphöra helt. Principiellt ser en logaritmisk kurva ut så här:



Figur 18. Logaritmiskt samband
Svjo/Wikipedia (CC BY-SA)

Svante Arrhenius använde sig av mätningar som en annan vetenskapsman, Samuel Langley, gjort. Han hade observerat månen för att avgöra hur mycket infraröd strålning atmosfären absorberar i olika våglängder. Arrhenius kunde med hjälp av Langleys observationer beräkna vad en ändring i halten koldioxid skulle innebära för temperaturen. Hans räkningar är dock ganska långa [13] och han delade in atmosfären i olika skikt och gjorde separata beräkningar för olika breddgrader och olika årstider. Men han landade i att en fördubbling skulle ge mellan 5 och 6 grader global uppvärmning. I en senare artikel reviderade han ner det till mellan 1,6 och 3,9 grader efter att ha justerat vissa antaganden, värden som ligger nära det moderna spannet på mellan 2 och 5 grader.

Mer växthuseffekt betyder mer kvarhållen värme. Annorlunda uttryckt innebär det en *förskjutning av jordens strålningsbalans*. Det heter på engelska *radiative forcing* som har den aningen klumpiga termen *strålningsdrivning* på svenska, men det avser alltså en ändring i flödet av värmeenergi (per

area) uppe vid toppen av atmosfären. Som vi nyss var inne på är sambandet mellan koldioxidkoncentration och den inverkan den har logaritmiskt [14]:

$$\Delta F \approx \alpha \ln\left(\frac{C}{C_0}\right) \quad (2)$$

ΔF är alltså skillnaden i effekt per ytenhet (W/m^2) som uppstår på grund av en viss ändring i koldioxidhalten. C är den nya koncentrationen, C_0 den ursprungliga och "ln" indikerar att relationen är logaritmisk. Proportionalitetskonstanten α har ett värde på omkring $5,35 \text{ W/m}^2$.

Vi kan börja med att räkna på vad som händer vid en *fördubblad* koldioxidhalt. Stoppas man in att den nya koncentrationen C är lika med $2C_0$ får man

$$\Delta F_{2x} \approx \alpha \ln(2C_0/C_0) = 5,35 \cdot \ln(2) \approx 5,35 \cdot 0,6931... \approx 3,7 \text{ W/m}^2.$$

En dubbling av halten CO_2 motsvarar en förskjutning i strålningsbalansen på ungefär $3,7 \text{ W/m}^2$.

Det är ett robust och centralt resultat inom klimatfysiken.

Temperaturberäkning *utan* återkopplingar

I kapitel ett använde vi oss av Stefan-Boltzmanns värmestrålningslag, $M = \sigma T^4$, som alltså relaterar ett objekts utstrålade effekt per ytenhet med dess temperatur.

Vi räknade fram att solinstrålningen, jordens mottagna effekt per kvadratmeter, var 240 W/m^2 . Med dubblad koldioxidhalt har vi nu en mottagen effekt per area som är $3,7 \text{ W/m}^2$ högre. Det innebär enligt strålningslagen att jorden måste bli varmare. Hur mycket varmare?

Vi kan kalla den ursprungliga effekten per area för M_0 och den nya för $M_1 = 243,7 \text{ W/m}^2$

Vi kan räkna ut temperaturerna det motsvarar och ta skillnaden:

$$\Delta T_{\text{strålning}} = T_1 - T_0 = (M_1/\sigma)^{1/4} - (M_0/\sigma)^{1/4} = \{ \text{insättning av värden} \} \approx 0,98 \text{ grader.}$$

En fördubbling av koldioxidhalten skulle alltså enligt det här ge en temperaturökning på ungefär en grad. Det är klart mindre än det som observerats: koldioxidhalten har än så länge bara stigit med ungefär 50 procent, men den uppmätta ökningen är redan mer än en grad.

Men räkningen ovan tar inte med några klimatåterkopplingar, och för att få grepp om dem finns inga alternativ till att ge sig ut i världen och mäta och observera. Så vill vi komma vidare behöver vi plocka några värden som kommer från klimatfysiken.

Temperaturberäkning *med* återkopplingar

Uträkningen vi gjorde ovan gäller för en jord utan något klimat; den tog enbart med den fysikaliska grundrespons som har med värmeutstrålningen att göra. Den är i princip också en återkoppling, men

4. Medeltemperaturen stiger

eftersom den inte har med klimatet i sig att göra räknas den normalt inte som en klimatåterkoppling. Den är starkt *negativ* i bemärkelsen att den *motverkar förändringar*: ökar temperaturen ökar också utstrålningen.

I föregående avsnitt inkluderade vi enbart värmestrålningen, och vi fick då fram att $\Delta T_{\text{strålning}} \approx 1$ grad när ΔF var $3,7 \text{ W/m}^2$. Kvoten $\Delta F / \Delta T_{\text{strålning}}$ kan vi kalla för $\lambda_{\text{strålning}}$ och den har alltså, i vår idealiserade modell, ungefär värdet $3,7/1 = 3,7$ och mäts i enheten W/m^2 per Kelvin. Så vi har

$$\Delta T_{\text{strålning}} = \frac{\Delta F}{\lambda_{\text{strålning}}}$$

Man ser på formeln att λ avgör hur mycket temperaturändring man får för en viss ändring i strålningsbalansen: ett stort λ ger en liten ändring, och tvärt om.

Det går att utöka det här så att vi kan ta med andra återkopplingar. Vi inför

$$\lambda_{\text{total}} = \lambda_{\text{strålning}} + \lambda_{\text{vattenånga}} + \lambda_{\text{moln}} + \lambda_{\text{albedo}} + \dots$$

så att λ_{total} är summan av alla återkopplingar.

Vi inför också en teckenkonvention så att negativa återkopplingar faktiskt blir negativa, så att $\lambda_{\text{strålning}}$ blir $-3,7 \text{ W/m}^2$ per Kelvin, och så behöver vi stoppa in ett minustecken i formeln ovan. Det generaliserade sambandet blir²

$$\Delta T = -\frac{\Delta F}{\lambda_{\text{total}}} \quad (3)$$

Här är de viktigaste återkopplingarna och gällande bästa skattningar på deras värden [6].

Återkoppling	λ [W/m^2 per Kelvin]
strålningstermen	-3,22
Vattenånga + temperaturgradient	+1,30
Jordytans albedo	+0,35
Moln	+0,42
Övrigt	-0,01
λ_{total}	-1,16

² Man kan se detta som ett system med förstärkning, $\Delta T = G \cdot \Delta T_{\text{strålning}}$. Eftersom 1) $\Delta F = -\lambda_{\text{strålning}} \cdot \Delta T_{\text{strålning}}$ och 2) $\Delta T = -\Delta F / \lambda_{\text{total}}$ så kan vi sätta in 1) i 2) och få $\Delta T = \frac{\lambda_{\text{strålning}}}{\lambda_{\text{total}}} \cdot \Delta T_{\text{strålning}}$ så att förstärkningen $G = \frac{\lambda_{\text{strålning}}}{\lambda_{\text{total}}}$

Det första att notera är att strålningstermen inte har riktigt samma värde som det vi räknade ut. Det beror kortfattat på att jorden inte strålar ut perfekt enligt den idealiserade kurvan med en enda enhetlig temperatur.

Vattenånga är den viktigaste klimatåterkopplingen: vattenånga är som vi sett, en växthusgas precis som koldioxid, och mängden vattenånga atmosfären kan hålla ökar med ungefär 7 procent per grad. Ensam står vattenånga för nästan $1,8 \text{ W/m}^2$ per Kelvin, men den brukar slås ihop med det som kallas *lapse rate*, som är negativ, ungefär $-0,5 \text{ W/m}^2$ per Kelvin.

Luften blir, som de flesta känner till, kallare högre upp, i genomsnitt $6,5 \text{ }^\circ\text{C}$ per kilometer. Det heter på engelska *lapse rate* eller på svenska temperaturgradient. Den här gradienten förändras när planeten värms, och den beter sig olika på olika breddgrader, men totalt sett hjälper den jorden att stråla ut värme, så nettot som återkoppling betraktat är negativt. Den korrelerar med vattenånga-återkopplingen så att summan av dem är ungefär konstant, och av det skälet brukar man slå ihop dem.

Ändringen av jordytans albedo kommer av avsmältning av snö och is: det är en förstärkande återkoppling eftersom hav och land är mörkare än is och snö och därmed tar upp mer värme.

Moln står för den största osäkerheten. De verkar – kraftigt – åt båda hållen genom att dels reflektera inkommande solstrålning, och dels absorbera och återutsända värmestrålning. Det är svårt att modellera och förutsäga *exakt* vad som händer med molnigheten när det blir varmare, samtidigt har den stor inverkan. Det ger en relativt stor osäkerhet.

Tar vi med dessa återkopplingar får vi alltså ett nytt λ som är (till beloppet) mindre: $\lambda_{total} \approx -1,16 \text{ W/m}^2$ per Kelvin. Vi stoppar in det i formel 3:

$$\Delta T_{2x} = -\Delta F_{2x} / \lambda_{total} = -3,7 / -1,16 \approx 3,2 \text{ }^\circ\text{C}$$

3,2 graders temperaturökning vid fördubblad koldioxidhalt stämmer bra med gällande klimatforskning.

Det råder som sagt en viss osäkerhet kring det här värdet, och det hänger till stor del ihop med oklarheten kring moln-återkopplingen. λ_{total} kan vara nästan -2 , och då leder en fördubbling av koldioxidhalten till bara två graders uppvärmning. Men det är inte helt uteslutet att det kan vara så litet som $-0,5$ och då blir det hela 7 grader, vilket vore mycket allvarligt. Men det mest sannolika värdet är någonstans kring det vi använt. Vi kommer använda $-1,16$ och $3,2 \text{ }^\circ\text{C}$ fortsättningsvis, men ha i bakhuvudet att de inte är huggna i sten.

Så om en fördubbling betyder ökning av T med 3,2 grader, vad innebär då en ökning med 50 %, som är ungefär så mycket koldioxidhalten stigit hittills? Det kan vi nu enkelt räkna ut.

50 % mer koldioxid ($C = 1,5C_0$) ger en strålningsdrivning på (insättning i formel 2):

$$\Delta F_{+50\%} \approx \alpha \ln(1,5C_0/C_0) = 5,35 \cdot \ln(1,5) \approx 2,17 \text{ W/m}^2.$$

Vi stoppar in det i formel 3:

$$\Delta T_{+50\%} = -\Delta F_{+50\%} / \lambda_{total} = -2,17 / -1,16 \approx 1,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Inte så illa, men det är några tiondelar *mer* än den faktiskt uppmätta temperaturhöjningen.

Vad beror skillnaden på? Jo, räkningarna vi gjort avser ett *jämviktsläge*, där klimatsystemet hunnit värmas klart och jorden är i energibalans. Men i verkligheten är den inte det i nuläget, eftersom den värms. Haven har en enorm kapacitet för att ta upp värme, men det tar lång tid innan de värmts klart (årtionden till århundraden), och därför har de i nuläget en avkylande effekt. Man kan tänka på det som att ha vridit upp termostaten i ett rum, men att väggarna och allting i rummet har inte hunnit värmas upp ännu. Den här energiobalansen motsvarar enligt uppskattningar ungefär en halv grads uppvärmning, som vi alltså så att säga har "innestående": även om utsläppen gick ner till noll imorgon skulle planeten fortsätta att värmas upp en längre tid, och närma sig de 1,9 graderna vi räkna fram. Så siffran är inte "fel", den har bara inte fullt ut hunnit realiseras ännu.

Vi har bekräftat att 1,5 °C är i linje med den temperaturökning man kan förvänta sig av den uppmätta höjningen av koldioxidhalten.

Klimatmodeller

Det ska understrykas att räkningarna ovan inte var en komplett modell av jordens klimat.

Det vi räknade på var som sagt den globala energibalansen för ett jämviktsläge där allting hunnit ställa in sig, vilket det inte har i verkligheten. Vidare har vi enbart tagit med strålningsdrivningen specifikt från koldioxid och slutligen behandlade vi jorden som om den var likadan överallt.

En fullfjädrad klimatmodell delar in jorden i ett tredimensionellt rutnät där varje cell har värden för temperatur, tryck, luftfuktighet, vindar med mera. Därefter simuleras alltsammans genom numeriska beräkningar av det som kallas Navier-Stokes ekvationer för fluidmekanik.

Det är först med en sådan modell som det börjar gå att göra förutsägelser gällande mer lokala förändringar i temperatur, vindar, nederbörd, havsströmmar, vegetation, istäcken och så vidare. Modellerna har med åren utökats med att ta med allt fler effekter i takt med att både förståelsen och datorerna blivit bättre.

Trots detta kan man alltså med relativt enkla räkningar få fram en temperaturhöjning av rätt storlek, eftersom jordens energibalans är den dominerande mekanismen som styr den globala medeltemperaturen.

5. Uppvärmningens orsaker

Forskningen påstår: den pågående globala uppvärmningen som inleddes under 1900-talet beror nästan enbart på våra utsläpp, och inte på någon naturlig orsak.

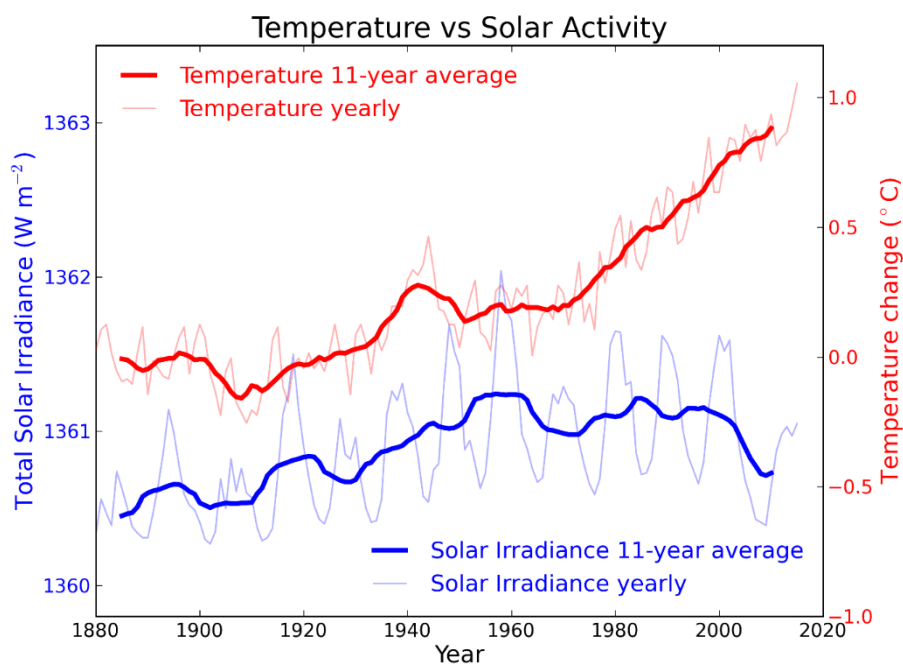
Med tanke på siffrorna, graferna, resonemangen och räkningarna vi gjort i kapitlen ovan är detta påstående väldigt sannolikt, eftersom vi redan kommit fram till att den förväntade temperaturökningen av de utsläpp vi gjort är av samma storlek som den uppmätta ökningen.

Men vi kan ändå gräva lite i frågan för att verkligen utesluta att det är något annat som ligger bakom. Här är det alltså uteslutningsmetoden som gäller.

Det är inte solen

Solen har en 11-års cykel under vilken utstrålningen varierar. Ute här hos oss på jorden är skillnaden mellan topp och dal i den cykeln ungefär en Watt. Medelutstrålningen från solen, Solarkonstanten, var ju 1361 Watt, så det är en variation på mindre än en promille. Som jämförelse räknade vi ju ut i föregående kapitel att redan vår 50-procentiga ökning av halten koldioxid ger en strålningsdrivning på drygt 2 Watt, och den varierar ju dessutom inte upp och ner. Våra utsläpp har alltså klart större inverkan än solens naturliga variationer.

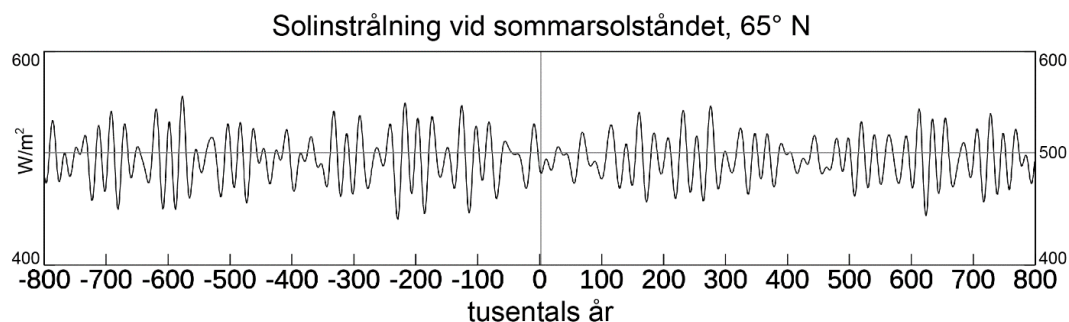
Utöver det kan styrkan variera något över längre tid, men tittar man på det grafiskt är det tydligt att det inte är solen som ligger bakom jordens temperaturökning de senaste årtiondena:



Figur. Solinstrålning och temperatur
Skeptical Science [15]. Temperatur från NASA GISS. Solinstrålning från Krivova et al. samt World Radiation Center (CC BY)

Det är inte något med jordens omloppsbanan

Jordens bana runt solen förändras periodiskt och förutsägbart i något som kallas Milanković-cykler [16] efter den serbiska geofysikern Milutin Milanković som beskrev dem på 1920-talet. På tidsskalor över många årtusenden orsakar de skiften i klimatet, och ändringarna är tillräckligt stora för att utlösa istider.



Figur 19. Långtidvariationer i solinstrålningen på norra halvklotet
Baserad på Incredio/Wikipedia (CC BY)

Men dessa cykler går *väldigt* långsamt. De går att förutsäga mycket långt framåt i tiden och de kan inte alls förklara den hastiga temperaturökningen det senaste århundradet.

Alla ändringar relaterade till jordens omloppsbanan skulle dessutom märkas i solinstrålningen, och den har vi ju redan tittat på.

Det är inte något annat naturfenomen

Det har inte skett några gigantiska vulkanutbrott eller andra fenomen. Och de hade verkligen behövt vara kolossala: inget av de största vulkanutbrotten de senaste hundra åren kommer upp i mer än någon tusendel av våra *årliga* utsläpp. Kort sagt: det hade vi märkt. Och det har inte plötsligt dykt upp någon annan värmekälla som värmer jorden.

Med det har vi väsentligen uttömt möjligheterna till andra förklaringar.

Så vi törs slå fast: det går inte att hitta någon naturlig förklaring till den plötsliga och tydliga temperaturökningen. Ökningen stämmer dessutom väldigt bra med den ökning man kan förvänta av just den mängd koldioxid mänskligheten hittills släppt ut.

Vi har resonerat oss fram till att det, bortom rimligt tvivel, i huvudsak är våra utsläpp som orsakat den pågående uppvärmningen.

6. Global temperaturprognos

Forskningen påstår: om utsläppen av koldioxid fortsätter i liknande takt som nu, kommer medeltemperaturen på jorden att stiga 3 till 4 grader till år 2100, jämfört med förindustriell tid.

Påståendet följer ganska logiskt ur det vi redan visat: koldioxid är en växthusgas, och våra utsläpp av den har lett till en uppvärmning. Då verkar det troligt att fortsatta utsläpp kommer leda till fortsatt uppvärmning. Vi har heller inte sett i temperaturkurvorna att uppvärmningen är på väg att plana ut – tvärt om, den har gått fortare och fortare. Det beror på en kombination av orsaker: våra utsläpp har fortsatt att öka, viss luftrening har minskat mängden aerosoler så att en del av den uppvärmning de tidigare motverkade har realiserats, men också på att planetens buffertförmåga börjar minska: varmare hav löser dels mindre CO₂ men skiktas också lättare, så att mindre varmt ytvatten blandas ner i djuphaven.

Man hade kunnat tänka sig att den uppvärmande effekten av koldioxid skulle mättas. Men det har vi tittat på i kapitel fyra: effekten är visserligen inte linjär utan logaritmisk, så att varje fördubbling av halten ger lika stor temperaturökning. Men det innebär att den heller inte upphör vid någon viss nivå.

Vi kan göra en överslagsräkning med hjälp av modellen vi använde i kapitel fyra. Vi såg i kapitel tre att halten koldioxid stiger med ungefär 2,5 miljondelar per år. Det skulle bli 185 miljondelar fram till år 2100. Halten nu är ungefär 430 miljondelar, så då kommer vi ha 615 miljondelar. Vi sätter den som C och den förindustriella halten på 280 miljondelar som C_0 och sätter in i formel 2:

$$\Delta F \approx \alpha \ln(615/280) = 5,35 \cdot \ln(2,19) \approx 4,21 \text{ W/m}^2$$

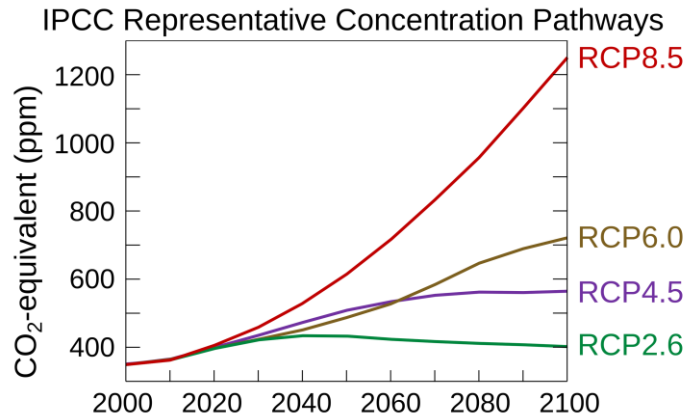
Vi stoppar in det i sambandet mellan strålningsdrivning och temperatur (formel 3):

$$\Delta T = -\Delta F / \lambda_{total} = -4,21 / -1,16 \approx 3,6 \text{ }^\circ\text{C, vilket är inom det påstådda spannet.}$$

Beroende på hur mycket vi släpper ut framöver kommer vi förstås få olika höga halt koldioxid i atmosfären, och det har vi sett ger olika stor påverkan på strålningsbalansen. Detta faktum är vad FN:s internationella klimatpanel använder för sina olika klimatscenarier, *Representative Concentration Pathways, RPC*.

Varje scenario bygger på ett antagande om hur våra framtida utsläpp kommer se ut, och siffrorna i namnet är storleken på den strålningsdrivning som utsläppen ger upphov till.

Det vi just räknade fram ovan ligger alltså i närheten av scenariot RCP4.5.



Figur 20. Representative Concentration Pathways
Efbrazil/Wikipedia baserat på IPCC:s AR5
(CC BY-SA)

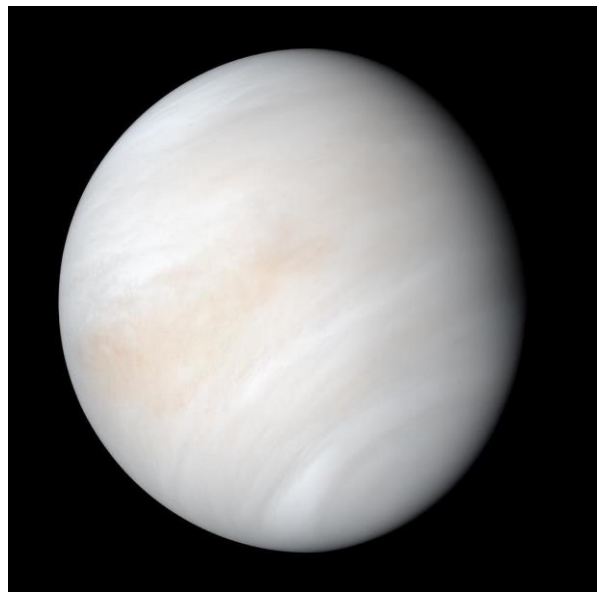
Vi är med på att temperaturen kommer fortsätta att stiga om vi fortsätter släppa ut koldioxid, och vi har genom egna räkningar kunnat verifiera att 3 till 4 grader, alltså ytterligare 1,5 till 2,5 grader fram till 2100, är rimligt, förutsatt bibehållen takt av utsläpp.

Fallet Venus

Ett exempel på att det inte finns någon skarp övre gräns för hur stor växthuseffekten kan bli är jordens närmsta planetgranne, Venus. Där är temperaturen på ytan över 460 °C [17]. Venus ligger närmre solen än jorden, men lite oväntat är det inte därför det är så varmt.

Vi kan göra om räkningen vi gjorde i kapitel ett, men för Venus.

Venus kretsar 108 miljoner kilometer från solen [17], att jämföra med jordens 150 miljoner kilometer. Eftersom ljuset från en ljuskälla minskar kvadratisk med avståndet blir solarkonstanten vid Venus $(150/108)^2 \approx 1,92$ gånger högre. Vid jorden är den som vi såg i kapitel ett 1361 W/m², så för Venus blir den ungefär $1361 \cdot 1,92 \approx 2625$ W/m².



Figur 21. Venus
NASA (Public Domain)

Precis som för jorden sprids värmen ut över hela ytan, som är fyra gånger större än tvärsnittsarean, så man behöver dela värdet med fyra. Det blir drygt 656 W/m^2 .

Men Venus är betydligt mer reflekterande än jorden, på grund av ljusa svavelmoln högt upp i atmosfären, och bara 25 % absorberas. Det betyder att den absorberade effekten per yta av planeten, som på jorden var 240 W/m^2 , bara blir $656 \cdot 0,25 = 164 \text{ W/m}^2$ på Venus.

Den effektiva temperaturen blir med Stefan-Boltzmanns strålningslag:

$$T = (\sigma/M)^{1/4} = (5,67 \cdot 10^{-8} / 164)^{1/4} \approx 230 \text{ Kelvin} = -43 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Det skulle alltså egentligen vara *kallare* på Venus än på jorden. Men atmosfären där är mycket tät; trycket vid ytan är 90 gånger högre än på jorden (som 900 meter under havsytan här), och atmosfären består *nästan enbart av koldioxid*. Det ger en växthuseffekt på 500 grader. Så det finns ingen klar gräns för hur stor växthuseffekten från koldioxid kan bli, trots att effekten är logaritmisk i koncentrationen.

7. Uppvärmningens konsekvenser

Forskningen påstår: en global temperaturökning på bara några få grader innebär allvarliga effekter på växter, djur, människor och våra samhällen.

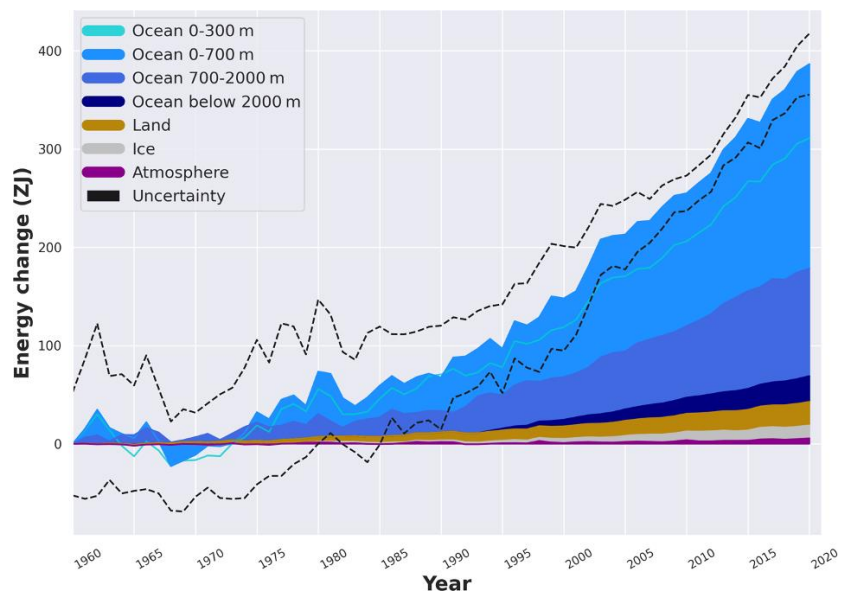
I det här kapitlet ska vi titta på vad några graders uppvärmning kan betyda. Först ett påpekande som kanske är uppenbart, men som också är centralt: nyckelbegreppen här är *globalt* och *i genomsnitt*. Exakt vad temperaturen är på en viss plats och en viss dag spelar nästan ingen roll, förutom för den som har tänkt ha picknick där. Det är *lokalt* och *tillfälligt*. Tre grader ökad *global medeltemperatur* är något helt annat. Varje extra grad global medeltemperatur innebär en *enormt* stor mängd extra värmeenergi i atmosfären, i markytan och i haven.

Vi kan göra en överslagsräkning för att se hur mycket energi det rör sig om. Värmekapaciteten för luft är av ungefär tusen Joule per kilo och Kelvin. Vi räknade ut i kapitel tre att massan av hela atmosfären är drygt 5 000 biljoner ton, $5 \cdot 10^{18}$ kg. **Det betyder att varje grads höjning av temperaturen ger $5 \cdot 10^{21}$ Joule extra värmeinnehåll i atmosfären.** Det är som jämförelse nästan tio gånger större än mänsklighetens totala årliga energianvändning på ungefär $6 \cdot 10^{20}$ Joule. Och det är alltså värmen enbart i atmosfären.

Värmemängden som tas upp av haven är mycket större, vilket framgår av figuren här intill. **Det totala extra energiinnehållet i hela klimatsystemet (luft, land, hav, is) är ungefär $3 \cdot 10^{23}$ Joule per grad.**

För att ta en dramatisk jämförelse: det är av samma storleksordning nedslagsenergin hos asteroiden som utrotade dinosaurierna [18]. Det är förstås inte samma sak; i fallet med asteroiden koncentrerades all energi på ett ställe på en gång, men det understryker ändå att det är riktigt mycket energi det handlar om.

De stora talen ovan har namn som inte förekommer så ofta: precis som 10^9 har förledet Giga eller bara G och heter miljard, har 10^{21} förledet Zetta eller bara Z och heter *triljard*. 10^{24} har förledet Yotta eller bara Y och heter *kvadriljon*.



Figur 22. Ökning av klimatsystemets värmeinnehåll
Ändring relativt 1960. Karina von Schuckmann et al. [28] (CC BY-SA)

Vidare innebär inte en viss global medeltemperaturhöjning att det blir lika mycket varmare överallt. Land värms snabbare än hav, i genomsnitt nästan dubbelt så mycket, och polerna värms snabbare än resten av planeten, främst eftersom is och snö försvinner och ersätts med mörka havs- och landytor som absorberar mycket mer solenergi. Men det uppstår även mer lokala variationer på grund av att havs- och luftströmmar påverkas så att vädermönster, molnighet och nederbörd ändras.

Ett till faktum är att *konsekvenserna inte är linjära i temperaturhöjningen* [19]. En höjning med till exempel 1,5 grader leder till vissa konsekvenser som kanske innebär vissa besvär och olägenheter. Det betyder inte att 1,5 grader till leder till ungefär lika mycket konsekvenser till, utan det blir betydligt värre. Man kan jämföra det med att ha feber: normal kroppstemperatur är 37 grader. 2 graders feber är otrevligt, men det är inte farligt. Ytterligare två graders feber – 41 grader – är livshotande. Att det fungerar så här beror på att klimatsystemet uppvisar sådant som:

- Trösklar - system som är stabila upp till en viss temperatur (som till exempel en is)
- Självförstärkande återkopplingar – när en process väl startat förstärker den sig själv
- Dominoeffekter - ett tippat system påverkar andra och leder till kedjereaktioner
- Asymmetrier - en liten ändring kan ge en stor effekt på ett känsligt system (som till exempel korallrev)

Vi kommer återkomma till den här sortens fenomen i avsnittet om kritiska brytpunkter.

Så vad kan uppvärmningen tänkas innebära mer konkret?

Vi kan börja med att titta på effekterna vi fått av den uppvärmning på lite drygt en grad vi redan har. Det har räckt för att orsaka bland annat:

- Stigande havsnivåer
- Minskad havsis i Arktis
- Glaciärförlust världen över
- Utbredd korallblekning
- Mer extremväder
- Rubbade ekosystem

Flera av dessa är företeelser som kanske inte är så lätta att lägga märke till för en enskild person. Om man inte har för vana att åka på polarexpeditioner, bestiga glaciärer eller regelbundet dyka vid korallrev ser man förstås inte förändringar som sker där med egna ögon. Förändringarna har också hittills varit relativt långsamma sedda ur en människas perspektiv, även om det inte längre i alla avseenden är så.

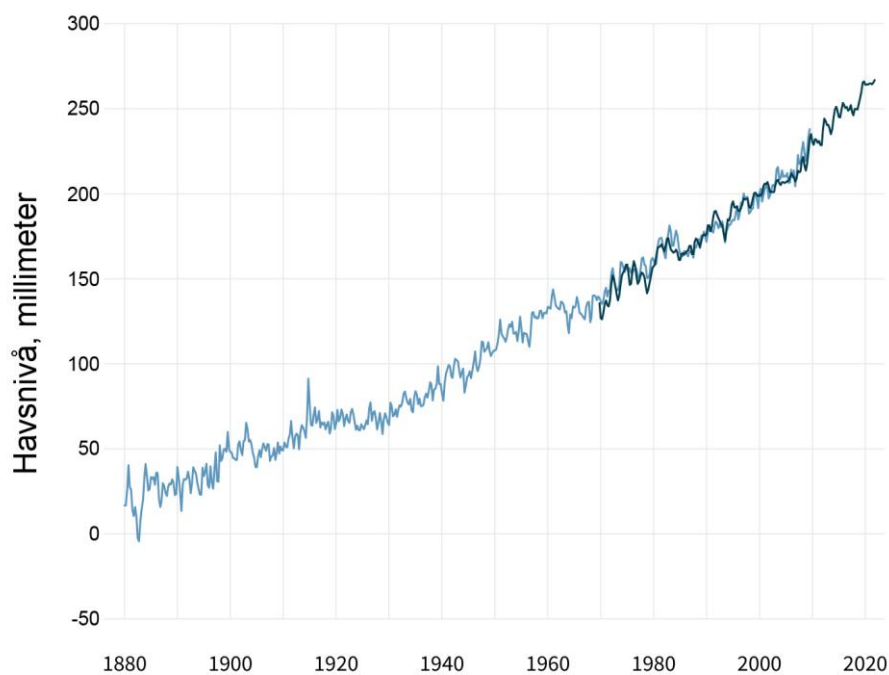
För att få ordentligt grepp om den här sortens storskaliga förändringar behövs systematiska mätningar, tidsserier och grafer.

Haven stiger

Havsnivån har ändrats *mycket* genom jordens långa historia. För 20 000 år sedan, under senaste istiden, låg haven 120 meter lägre än idag [20]. Under istidens slutfas steg de igen under en period på ungefär 7000 år, eller i genomsnitt ungefär 1,5 centimeter om året.

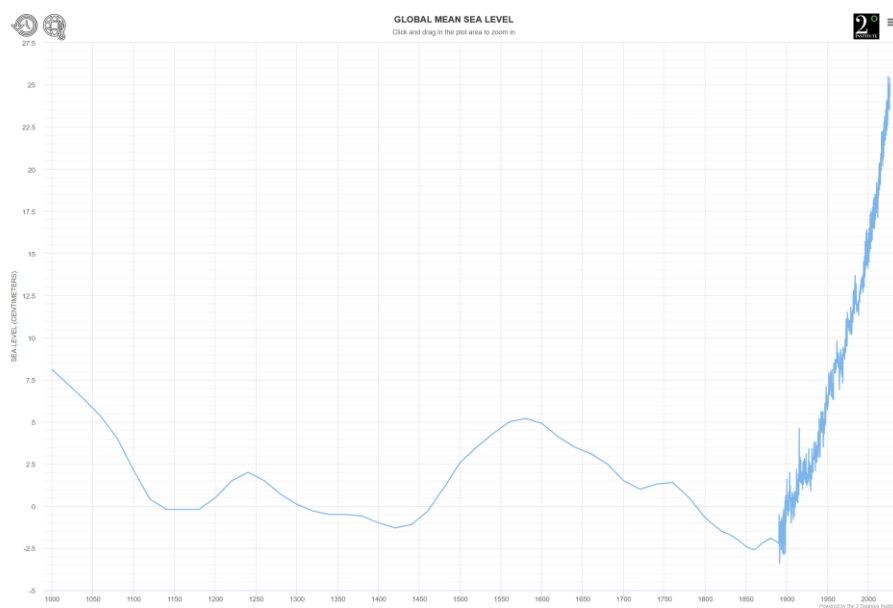
De senaste årtusendena har nivån legat nästan stilla, och stigit i genomsnitt någon tiondels millimeter per år [21]. Men sedan slutet av 1800-talet har ökningen tagit fart igen [22]:

7. Uppvärmningens konsekvenser



Figur 23 - Global havsnivå sedan 1880
NOAA Climate.gov (Public Domain)

Zoomar vi ut och tar med de senaste tusen åren framträder en kurva med en för oss numera bekant form:

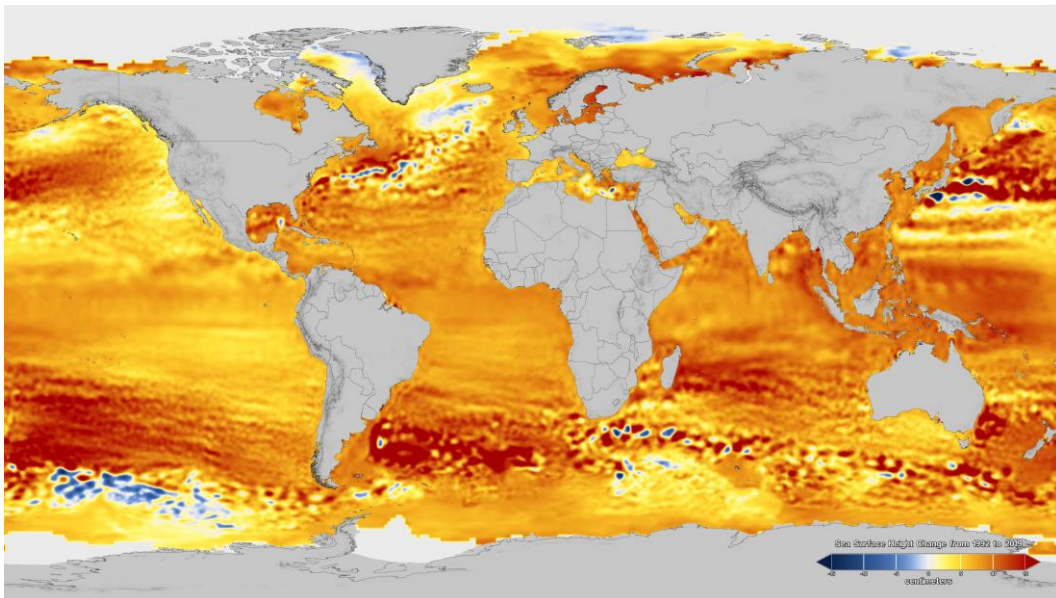


Figur 24 - Global havsnivå sedan år 1000
Graf från 2 degrees institute [23]

Vi får nog ta de äldre värdena med en viss nypa salt, men de är inte så inexakta att de ändrar den övergripande bilden: långsamma böljande små förändringar, följt av en skarp uppgång runt år 1900. Det har vi sett förut.

Även om vi skulle strypa utsläppen till noll imorgon, skulle havet fortsätta att stiga: havsnivåhöjningen släpar efter förändringarna i jordens temperatur med flera årtionden. Havsnivåerna stiger, både på grund av *termisk expansion* (varmare vatten tar större plats) och av smältvatten från glaciärer och istäckena på Grönland och Antarktis. Både smältandet och expanderandet skulle fortsätta under lång tid även om utsläppen upphörde, eftersom temperaturen redan stigit.

Så långt är den totala nivåhöjningen ungefär 25 centimeter, vilket kanske inte låter så dramatiskt, men precis som med temperaturen så är inte ökningen lika stor överallt. Nedan en bild av förändringen mellan 1992 och 2019 enligt NASA. Skalan är kanske svår att se, den går från -15 cm till +15 cm.



Figur 25 - Global havsnivåändring mellan 1993 och 2019
NASA [24]

Ökningen går också snabbare och snabbare. Fram till 70-talet var hastigheten drygt 2 millimeter per år, men har gradvis ökat och har de senaste 15 åren närmast sig 5 millimeter per år. IPCC:s uppskattning ligger på omkring ytterligare en halv meter höjning till år 2100, men osäkerheten är ganska stor, och det är inte uteslutet att det kan bli mer.

Ungefär 150 miljoner människor bor idag inom en meter över havsnivån, och deras hem är förstås i fara om haven stiger. Städer som Jakarta, Bangkok, Shanghai och Miami är sårbara för havsnivåhöjningar. I Florida har det redan blivit mycket dyrare eller rentav omöjligt att försäkra hus i vissa områden. Venedig är ett annat uppenbart exempel, med historiska byggnader och unika kulturmiljöer. Bostäder och byggnader är dock inte det enda problemet: när haven stiger tränger salt havsvatten in i grundvattnet, vilket förstör brunnar och kan göra odlingsmark obrukbar. Lågt liggande infrastruktur som hamnar, flygplatser, vägar, järnvägar och tunnelbanor påverkas. Det kan också

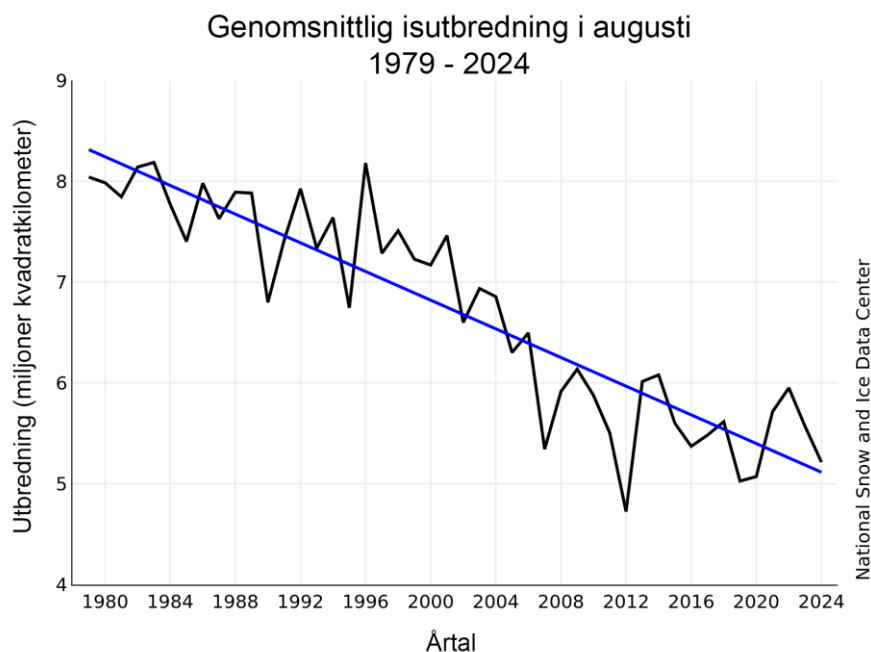
påverka ekosystem som mangroveskogar, korallrev och kustnära våtmarker, som i nuläget fungerar som stormskydd och dessutom ofta är ekonomiskt mycket produktiva, till exempel genom fiske och turism. Kustzoner står för ungefär 40 % av världens BNP, enligt Världsbanken.

Just i Sverige har vi ju fortfarande landhöjning efter istiden: från runt en millimeter per år i Skåne till nästan 10 millimeter per år vid Bottenviken. Det motverkar det stigande vattnet. Det betyder att den relativa havsnivån i Norrland sjunker, i Stockholmstrakten ligger den i nuläget ungefär still, och i Skåne stiger den. Så i nuläget är den stigande havsnivån bara ett begynnande bekymmer för sydligaste Sverige, men på sikt kan det förväntas bli allt mer omfattande.

Polarisarna smälter

När man talar om is vid polerna behöver man skilja på is som flyter och is som ligger på land. Den som flyter påverkar inte havsnivån om den smälter, men om den som ligger på land på ett eller annat sätt hamnar i vattnet gör den förstås det.

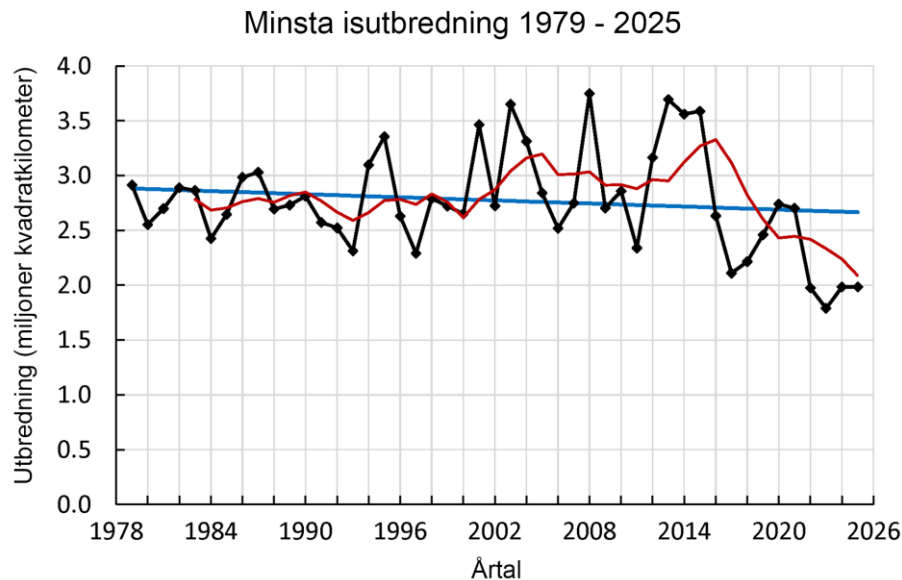
Vi börjar med den som flyter. Utbredningen av sommarisen i *Arktis* (kring Nordpolen) har minskat med i genomsnitt ett par miljoner kvadratkilometer (fyra gånger Sveriges yta) mot för 50 år sedan, och beräknas bli så gott som isfri sommartid inom några årtionden. Det är en stor förändring, och har förmodligen inte hänt sedan mellan de två senaste istiderna, för 120 000 år sedan.



Figur 26 - Utbredning av sommarisen i Arktis
National Snow and Ice Data Center [25]

Man kan ana en utplaning senaste årtiondet, men att det håller i sig är nog att hoppas på för mycket. Notera förresten att vertikala axeln inte går ner till noll, så minskningen är inte fullt så dramatisk som det ser ut, om man tittar på utbredningen. Det är den däremot om man tittar på den totala *volymen*, för isen har i genomsnitt blivit avsevärt tunnare samtidigt som den blivit mindre.

Läget kring *Antarktis* har varit delvis ett annat. Där ökade snarare havsisen från 70-talet (då man började följa isutbredningen mer i detalj) och framåt, för att de senaste tio åren börjat minska påtagligt:



Figur 27 - Isutbredningen i Antarktis
National Snow and Ice Data Center [26]

De båda polerna ser ganska olika ut: den södra är en landmassa omgiven av hav, och den norra är ett hav omgiven av landmassor. Det ger skillnader i klimatet kring respektive pol.

Vad Antarktis har som annars bara finns i liten skala på andra håll är enorma områden med glaciär-is som börjar uppe på land men som längre ut flyter på havet. En sådan landföranckad men flytande isplatta kallas på engelska *ice shelf* eller på svenska shelfis eller bara shelf. De kan vara hundratals meter tjocka och två av dem, Ross och Filchner-Rønne, är stora som Sverige. På bilden intill är Antarktis skalenligt inritat över Europa.



Figur 28. Antarktis och Europa i samma skala.
Egen figur baserad på Google Earth. Satellitbild från Landsat/Copernicus

Eftersom shelfar flyter bidrar de i sig inte till någon ytterligare havsnivåhöjning, men om de delar som ligger på land (glaciärerna ovanför dem) skulle glida ut i havet blir det snabbt tal om stora ökningar eftersom de är så gigantiska. Shelf-

isarna håller i viss mån emot glaciärerna och bromsar dem. Ett par shelfar har redan brutits sönder (Larsen A 1995, Larsen B 2002) och klimatforskare är oroliga för några andra och betydligt större. I fokus står ofta Thwaites-shelfen. Den bedöms vara på vippen att också brytas sönder, och glaciären ovanför den har en area av 192 000 kvadratkilometer och innehåller is motsvarande 65 centimeter havsnivåhöjning. Thwaites sitter också ihop med intilliggande Pine Island, och totalt innehåller glaciärerna i området uppåt 2,5 meter havsnivåhöjning. Det kommer sannolikt ta lång tid innan allt detta hamnar i havet, kanske hundratals år, men om processen väl påbörjats är den väsentligen omöjlig att stoppa.

Sammanlagt innehåller istäcket på Antarktis motsvarande drygt 60 meter och det på Grönland 7 meters höjning av den globala havsnivån. Ingen tror att *allt* detta kommer smälta inom överskådlig tid. I nuläget bidrar de ungefär en halv millimeter vardera till den årliga havsnivåhöjningen, men takten väntas öka.

Glaciärerna smälter

Intill är två foton av McCarty-glaciären i södra Alaska, tagna med nästan 100 års mellanrum. Liknande jämförelser finns från glaciärer runtom i världen.

Man brukar titta på glaciärer utanför polarområdena separat. Mellan 1971 och 2019 förlorade dessa åtta procent av sin massa. Årligen ger de numera ungefär 300 kubikkilometer smältvatten netto, det vill säga hur mycket som faktiskt går förlorat varje år – de växer ju till en del under vintern.



Figur 29. McCarty-glaciären
Foto 1909 av Ulysses Sherman Grant, USGS photo library
Foto 2004 av Bruce F. Molnia, USGS (Public Domain)

Glaciärvsmältningen är en bidragande orsak till havsnivåhöjningen. Hur mycket? Vi kan vår vana trogen göra en överslagsräkning. Vi kan vid det här laget jordens area, drygt 500 miljoner kvadratkilometer. Strax över 70 procent av det är hav, så haven är 360 miljoner kvadratkilometer eller så. Vi ska sprida ut 300 kubikkilometer över 360 miljoner kvadratkilometer. Omvandlat till meter: $300 \cdot 10^9 / (360 \cdot 10^6 \cdot 10^6) = 3 \cdot 10^{11} / (3,6 \cdot 10^{14}) \approx 0,00083$ eller knappt en millimeter per år.

Vi kan visualisera hur stort vattenflöde 300 kubikkilometer på ett år är. Det går $365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 = 31\,536\,000$ sekunder på ett år. Alltså blir det $3 \cdot 10^{11} / 31\,536\,000 \approx 9500$ kubikmeter i sekunden. Det är ungefär fyra olympiska simbassänger varje sekund, eller en Globen i minuten, eller två Väner om året.

Avsmältningen ökar ungefär i takt med i temperaturhöjningen, det vill säga att dubbelt så stor global temperaturhöjning ger dubbelt så stor avsmältning.

Sverige hade tills ganska nyligen omkring 300 glaciärer, men bara under sommaren 2024 försvann åtta av dem. Nu är det ungefär 250 kvar, och 80 % av dem kan vara borta till år 2100.

Vi har faktiskt världens äldsta övervakning av en glaciär, Storglaciären på Kebnekaises östsida, som mätts sedan 1946. Den har tappat ungefär 25 meter i tjocklek sedan mätningen började.

Kebnekaises högsta punkt var länge sydtoppen, som också är en glaciär. När jag själv var där första gången i början på 00-talet var den märkt som 2111 meter över havet och på tröjorna som såldes på fjällstationen stod det 2117 meter. Men nu har den smält ner så pass mycket att nordtoppen, som är fast berg, är högre med sina 2097 meter och sydtoppen är nere på 2088 meter.

Globalt är minst två miljarder människor beroende av smältvatten från glaciärer för sin vattenförsörjning. Under sommaren, när vattenbehovet är stort till odlingar och annat, ger glaciärerna ett stadigt vattenflöde nedströms. Utan glaciärer blir det antingen inget vatten alls, eller, om det regnar kraftigt uppe i bergen, så kommer allt på en gång och spolar i värsta fall bort både jord och odlingar.

I augusti 2026, under arbetet med den här texten, kollapsade en glaciär och en del av den underliggande bergssidan på Langtang Lirung i Nepal, vilket skapade ett ofantligt skred som längs vägen ner genom den branta dalgången drog med sig ytterligare material och ödelade samhällen längs en sträcka av flera mil utmed floden Trishuli. Energin som frigörs vid skred av den här omfattningen är av samma storleksordning som atombomben över Hiroshima³. Det är i skrivande stund inte fastslaget exakt orsak till kollapsen, men det man vet är att området generellt blivit avsevärt varmare på senare år. Själva berget expanderar när det blir varmare, vilket ökar risk för sprickbildning. Smältvatten kan tränga ner i sprickorna och vidga dem ytterligare. Både glaciärerna och bergen de vilar på tenderar alltså att bli mer instabila när det blir varmare, så det får bedömas som sannolikt att den här sortens katastrofer blir mer sannolika framöver.

Korallreven dör

Korallrev finns i framför allt i tropiska hav, och byggs under mycket lång tid långsamt upp av kalkskeletten från koralldjur. Gotland är till exempel uppbyggt av ett 400 miljoner år gammalt korallrev, från tiden då Sverige låg i tropikerna.

Det finns tusentals olika arter av koraller, och alla bildar inte korallrev, men många av de arter som gör det består av två organismer som lever i symbios: själva koralldjuren som är små nässeldjur, och en sorts encellig alg som finns inuti koralldjuren och förser dem med energi via fotosyntes.

Sedan mitten av 1980-talet har fenomenet *korallblekning* blivit allt vanligare. Symbiosförhållandet mellan alg och korall störs när det blir för varmt, algerna drivs ut av korallen och då försvinner både färgpigmenten och det mesta av energin. Det betyder inte nödvändigtvis att själva korallerna dör direkt, men det betyder att de svälter och blir sårbara för sjukdomar.

³ Anta att en kub av sten och is med sidan 100 m faller en höjd av 2000 meter. Om densiteten är 2000 kg/kubikmeter blir massan $2000 \cdot 100^3 = 2 \cdot 10^9$ kg. Med formeln för lägesenergi $E = mgh$ blir det $2 \cdot 10^9 \cdot 9,81 \cdot 2000 \approx 4 \cdot 10^{13}$ J. Bomben över Hiroshima frigjorde omkring $6 \cdot 10^{13}$ J. Räkningen är inget estimat av det aktuella skredet, bara en illustration av storleksordningen.



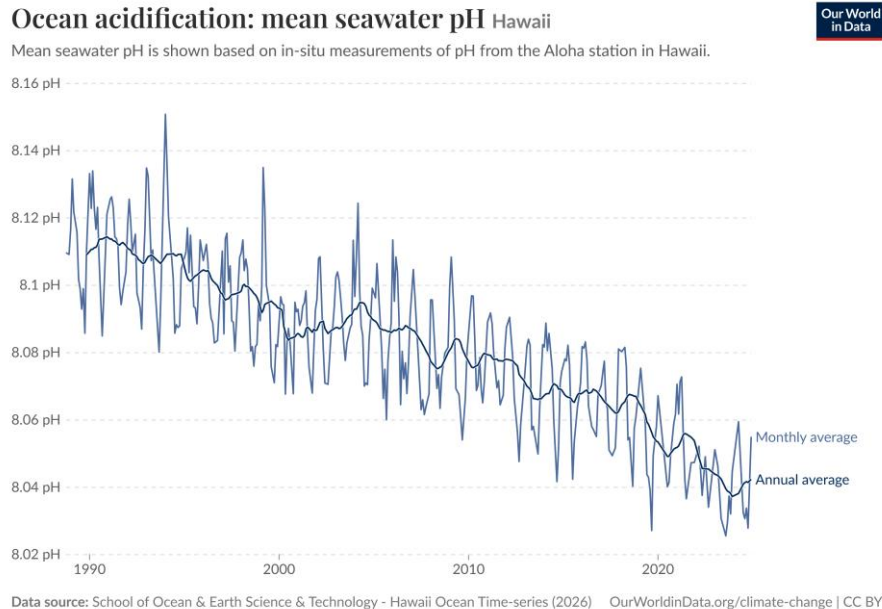
Figur 30. Jämförelse av frisk och blekt korall
Frisk korall Holobionics/Wikipedia. CC BY-SA. Blekt korall Acropora/Wikipedia. CC BY-SA.

Globala massblekningar har inträffat 1998, 2010, 2014-17 och 2023-25. De har successivt blivit mer omfattande och den senaste drabbade över 80 procent av världens korallrev. Världens största korallrev, Stora Barriärrevet, beräknas ha förlorat hälften av sina koraller mellan 1995 och 2020. 2024 drabbades nästan hela revet av blekning.

Korallreven i sin tur är viktiga för en stor del av allt liv i havet. När reven bleknar minskar ofta både artrikedomen och mängden marint liv omkring dem.

Haven blir surare

Det här är inte strikt en effekt av uppvärmningen, utan av koldioxidutsläppen i sig. När koldioxid löses i vatten bildas först kolsyra, H_2CO_3 , som löses upp i en vätekarbonatjon HCO_3^- och en vätejon, H^+ . De fria vätejonerna sänker pH-värdet. Värdet har sjunkit från ca 8,11 till 8,04 sedan början på 1990-talet:



Figur 31. Havens pH-värde
Our World in Data

Det låter kanske inte som så stor skillnad, men pH-skalan är inte linjär utan en förändring i pH-värde på ett motsvarar en tiofaldig ändring i koncentrationen av vätejoner.

Många marina organismer som koraller, snäckor, musslor, ostron, sjöborrar och sjöstjärnor bildar skal eller skelett av kalciumkarbonat, CaCO_3 . För att göra detta är de beroende av karbonatjoner, CO_3^{2-} , men dessa har nu de extra vätejonerna lagt beslag på och bildat om till vätekarbonat.

Så när haven blir surare kan en mängd havsdjur inte bilda sina skal och skelett ordentligt. Dessa djur finns ganska långt ner i näringskedjorna, och om de drabbas av problem kan det få långtgående följder för alla som är beroende av dem. I scenarier med fortsatta höga utsläpp kan pH-värdet i världshaven sjunka till 7,7. Under sådana förhållanden är till exempel snäckskal inte bara svåra att bilda, de löses rentav upp. Så försurningen av haven är ett tyst och dolt problem som kan utvecklas till att bli allvarligt.

Ökat extremväder

Det är inte bara nyhetsrubrikerna: vädret blir mer extremt.

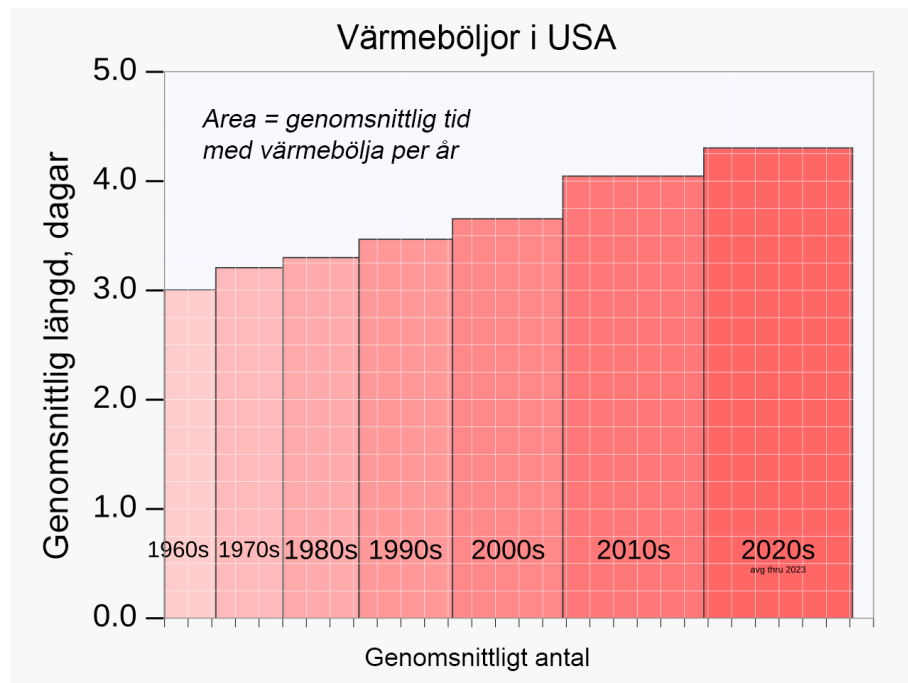
Vi räknade på det ökade värmeinnehållet i klimatsystemet (hav, land, is, luft) i början av kapitlet och såg att det handlar om ungefär $3 \cdot 10^{23}$ Joule per grad – ungefär 500 gånger mer än mänsklighetens samlade energiproduktion. Det ofrånkomligt att all denna extra värmeenergi manifesteras på olika sätt.

Vad menas då med "extremväder"? Lite oprecist är det väderhändelser som är ovanliga för en given plats och för tiden på året. Sedan kan man ha lite olika definition på vad som räknas som ovanligt: det man mäter (som temperatur, nederbörd eller vind) kanske måste nå över en viss nivå, eller så är det rent statistiskt baserat på hur sällan de inträffat historiskt.

Exempel kan vara skyfall, torka, värmeböljor, köldvågor, tornados, svåra stormar och orkaner som når utöver det vanliga. Det finns numera gott om data som kan belägga att alla dessa utom extrem kyla blir vanligare. Här följer några exempel.

Mer värmeböljor

Värmeböljorna blir fler och längre. Nedan mätningar från USA som visar att de blir både fler och längre, så att antalet dagar där det räknas som värmebölja har ökat kraftigt sedan 60-talet:



Figur 32. Värmeböljor i USA

Figur av RCraig09/Wikipedia, data från U.S. Environmental Protection Agency. Licensierad under CC BY-SA

Blötare regnperioder och torrare torrperioder

Mängden vattenånga i atmosfären har ökat med mellan 6 och 8 procent sedan 1990-talet, enligt EU:s jordobservationsprogram Copernicus. Det betyder att nederbörds mängden har ökat generellt, men det är ojämnt fördelat. Utanför tropikerna har nederbörden generellt ökat, men närmre ekvatorn har den minskat. Runt Medelhavet har det blivit torrare, men här uppe i norr har det blivit lite blötare.

Högre årsnederbörd på en plats behöver inte betyda mindre torka: det kan komma mer regn vid färre tillfällen, med torrperioder där emellan. Så både skyfall och torka ökar, och kan göra det till och med på samma plats. Det låter kanske lite paradoxalt, men eftersom avdunstningen från marken ökar när det blir varmare så torkar den ut samtidigt som luften innehåller mer vatten. För varje grad

Celsius ökar luftens förmåga att hålla vattenånga med ungefär sju procent. Torrperioderna blir torrare och regnperioderna blir regnigare.

Kraftigare stormar

Hur stark en tropisk cyklon blir styrs i hög grad av vattentemperaturen, och det krävs varmt ytvatten för att de ska kunna bildas.

När en cyklon når över en viss vindstyrka (33 m/s) klassas den som orkan. Orkaner delas in i fem kategorier beroende på vindstyrka (medelvind under en minut), där den högsta är de med vindar över 69 m/s. Skalan kallas Saffir-Simpson.

Studier har numera kunnat visa att klimatförändringarna gör stormarna starkare med i genomsnitt ungefär ett steg på skalan, så att en storm som utan uppvärmningen hade varit en kategori två nu blir kategori tre, och så vidare. De extremt kraftiga stormarna har blivit vanligare och det har föreslagits att skalan ska utökas med en kategori sex.

Ekosystem rubbas

När atmosfären innehåller mer värmeenergi påverkas, som vi sett, mer än bara temperaturen. Nederbörd och vindar ändras också. Det kan leda till mer regn på ett ställe och torka på ett annat. Det i sin tur påverkar naturligtvis växter och djur.

Ekosystem är komplexa nätverk av arter som samspelar, ibland på oväntade och intrikata sätt som kan vara känsliga för förändrade livsbetingelser.

Fenologi avser årstidsbundna företeelser för växter och djur, såsom lövsprickning, blomning, djurs vintervila, reproduktion, äggläggning, kläckning, tidpunkten för när flyttfåglar ger sig av, och så vidare. En övergripande konsekvens av förändrat klimat är att tidpunkterna för dessa händelser förskjuts, och då uppstår lätt obalanser. Alla arter reagerar inte likadant: vissa styrs mer av temperatur, och andra mer av ljuset, vilket förändrar konkurrensen.

När snön smälter tidigare börjar många växter blomma tidigare. Flyttfåglar anländer tidigare, lägger ägg tidigare som kläcks tidigare. Men både blommor och fåglar får problem om det då ännu inte finns tillräckligt med insekter: blommorna blir inte pollinerade, och fåglarna har för lite mat.

Sälar i Arktis föder sina kutar på isen vid en viss tid, och om isen smälter för tidigt kan kutarna falla i vattnet innan de är redo att simma.

Arter flyttar norrut och till högre höjd när värmen stiger, för att kompensera. Arter som tidigare inte fanns i ett område kan etablera sig och konkurrera ut befintliga arter, vilket i sin tur kan ge stora följdverkningar för resten av ekosystemet. De kan också föra med sig nya sjukdomar, som de lokala arterna saknar motståndskraft mot, eller skapa andra problem.

Ett exempel i Östersjön är storspigg, som trots sitt namn inte är större än ett finger. Den trivs bättre när vattnet blivit varmare, och har mer än tiodubblats sedan nittioalet. Spigg äter upp ägg från rovfiskar som gädda och abborre, som annars hade hållit spiggbestånden i schack. Så mer spigg leder till färre rovfiskar som kan äta upp dem, vilket leder till ännu mer spigg, och så vidare. De äter även stora mängder små kräftdjur, som annars betat blåstång och andra bottenväxter rena från trådalger. Konsekvensen blir att dels försvinner rovfiskarna och dels täcks med tiden sjöar och bottenar med trådalger och till slut har hela miljön förändrats.



Figur 33. Storspigg
Foto Jack Wolf, licensierad under CC BY

När det blir varmare förskjuts vegetationszonerna norrut på norra halvklotet och söderut på södra: platser där det tidigare varit för kallt för att odla någon specifik växt kan nu ha blivit tillräckligt varmt. Det kan förstås vara positivt. Andra sidan av det myntet är förstås att där det tidigare varit lagom temperatur nu kan ha blivit för varmt eller för torrt.

En fundamental begränsning kopplat till det här är att världens odlingsjor­dar ligger där de ligger. För att odla grödor behövs inte bara lagom temperatur och tillräckligt med vatten, utan det behövs som bekant även näringsrik jord, och det finns inte överallt. Så det är inte så enkelt att man kan börja odla vete där det nyss stod en granskog om det blivit varmare, för det kräver helt olika sorters jordmån. Ljusinstrålningen minskar förstås också ju närmre polerna man kommer, så för vissa grödor blir det helt enkelt för mörkt. Jordarnas fixa placering i kombination med vegetationszonernas förflyttning kan väntas orsaka tilltagande problem med den globala livsmedelsförsörjningen.

Arter utrotas

Som en konsekvens av klimatförändringarnas inverkan på ekosystem händer det allt oftare att arter helt dör ut. Att arter utrotas orsakas även av andra mänskliga aktiviteter, som avskogning och giftiga utsläpp. Människan har också genom historien utrotat mängder av djur genom jakt. Bland de mest kända exemplen är kanske dronten, en stor flygoförmögen fågel som enbart fanns på Mauritius utanför Madagaskar, och som snabbt dog ut efter att människor bosatt sig på ön, detta av en kombination av jakt och de invasiva arter som sjöfararna fört med sig, så som katter och råttor som plundrade drontbon.

Ibland hinner vi inte upptäcka arten innan den utrotas. Det finns fortfarande enorma mängder oupptäckta arter i regnskogar, grottsystem och i djuphaven, och nya beskrivs av vetenskapen hela tiden, i nuläget i en takt av omkring 15 000 om året. Totalt har drygt två miljoner nu levande arter beskrivits, men uppskattningen är att det finns ungefär fyra gånger fler.

Vid minst fem olika tillfällen i jordens historia har större massutdöenden skett. Det senaste var för 65 miljoner år sedan då dinosaurierna dog ut, sannolikt orsakad av den asteroid som slog ner på det som idag är Yucatánhalvön i Mexiko.

Arter dör förstås även ut naturligt, men den nuvarande takten, ungefär två om dagen, uppskattas vara mellan hundra och tusen gånger högre än den naturliga bakgrundstakten. Det benämns ibland som det sjätte massutdöendet, och är helt och hållet orsakat av människan.

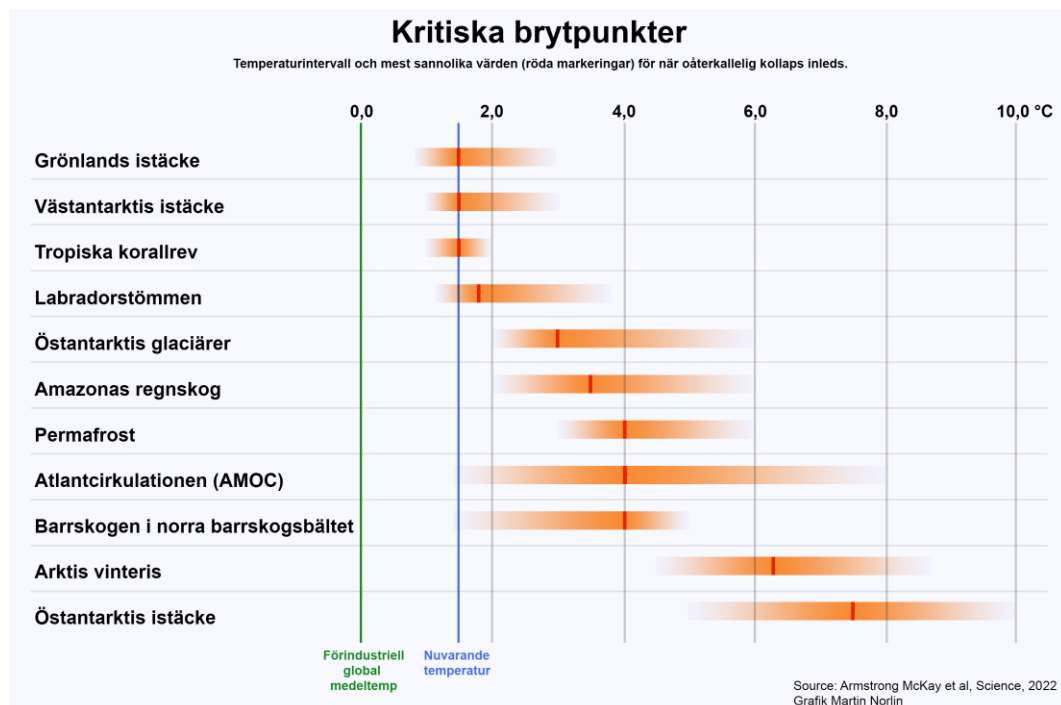
Kritiska brytpunkter

En kritisk brytpunkt (engelska *tipping point*) är en systemgräns, som om den passeras, innebär att det inte finns någon återvändo: systemet kantrar över i ett nytt läge och det är svårt eller omöjligt att få tillbaka det till ursprungstillståndet. Det är analogt med att putta till ett föremål som står upp: knuffar man det litegrann vickar det men vaggar tillbaka och återgår till det ursprungliga läget. Men knuffar man tillräckligt hårt passeras stabilitetsgränsen och föremålet ("systemet") tippas över.

Att det för ett visst system finns en kritisk brytpunkt betyder inte att själva gränsen är tydlig. Den kan vara osynlig, och man vet inte förrän i efterhand om den passerats.

Forskning på bland annat Stockholm Resilience Centre har identifierat ett antal sådana kritiska brytpunkter för klimatsystemet och försökt bestämma vid vilken global temperaturhöjning de kan tänkas passeras.

Begreppet är nära relaterat till återkopplingar som vi varit inne på i kapitel fyra, eftersom flertalet av dessa brytpunkter är självförstärkande. Flera av dem leder dessutom till ytterligare uppvärmning, så passerandet av en gräns kan leda till att fler gränser passeras, i en slags dominoeffekt. Här är ett urval av dem:



Figur 34. Kritiska brytpunkter
Eget arbete baserat på data från Armstrong McKay et al. Science [27]

Vi ser att redan med uppvärmningen på cirka 1,5 grader vi har idag är det ungefär 50/50 att den kritiska gränsen redan har passerats gällande avsmältningen av Grönlands istäcke, Västantarktis istäcke och massdöd av korallreven. Eventuellt har även gränsen för när Labradorströmmen stannar passerats, som är en havsström utanför Kanadas nordöstra kust mot Grönland. Den påverkas av avsmältningen på Grönland.

Med en grad till uppvärmning jämfört med idag är det fara och färde med glaciärer i östra Antarktis, att Amazonas regnskog förvandlas till savann, att permafrosten i främst Sibirien, Alaska och Kanada töar vilket i sin tur ger nya stora utsläpp av metan, att mycket av barrskogen på norra halvklotet går förlorad genom torka, bränder och skadeangrepp, samt att systemet av havsströmmar i Nordatlanten avstannar, vilket riskerar att göra det mycket kallare i Norden och på de Brittiska öarna.

Att en gräns passeras betyder inte att det associerade systemet kollapsar över en natt, men det betyder att processen påbörjats och i praktiken är omöjlig att stoppa.

Endast två av de här inkluderade systemelementen ser i nuläget relativt säkra ut: *vinterisen* i Arktis (alltså den som flyter) och inlandsisen i östra Antarktis, vilket är tur, för den innehåller is motsvarande 50 meters havsnivåhöjning.

Effekter på människor

Världshälsoorganisationen, WHO, har pekat ut klimatförändringarna som det största hotet mot global hälsa det här århundradet. Klimatförändringarnas påverkan på människor, våra samhällen och vår ekonomi är kopplade till ändringar i temperatur, nederbörd, extremväder, tillgång till dricksvatten och havsnivåhöjningar.

Dels kan vi drabbas av direkta effekter som värmeslag, eller behöva fly från skogsbränder, översvämningar och stormar. Men för majoriteten av de drabbade kommer påverkan i olika grad vara indirekt.

Det mesta av världens ekonomiska aktivitet är på ett eller annat sätt beroende av viss stabilitet i temperatur, vindar, nederbörd och tillgång till vatten. Varierar detta alltför mycket leder det närmast ofrånkomligt till kostsamma konsekvenser. Torrare klimat och mer extremväder som skyfall resulterar i minskade skördar. Mycket av det arbete som utförs utomhus, både i städer och på landsbygd, allt från byggarbeten till jordbruk, kan tvingas upphöra om det blir för varmt för att arbeta utomhus dagtid. Turismen kanske viker när den lokala attraktionen, som ett korallrev, tappat sin lyster. Det går inte att ha torgmarknad om det råder extrema väderförhållanden. Det går inte att resa till eller bo på Maldiverna om de uppslukats av havet. Och så vidare. Inte ens kärnkraftverk är immuna mot klimatförändringar; flera europeiska reaktorer belägna utmed floder fick stängas av under sommaren 2026 eftersom det inte fanns tillräckligt med kylvatten.

Sjukdomar som malaria och denguefeber kan öka, eftersom myggorna som bär på dem sprider sig till nya områden.

Resursbrister leder till ökad risk för väpnade konflikter, vilket kan tvinga människor på flykt.

Mest sårbara är, som oftast, de som redan är utsatta. Antalet människor som leder i extrem fattigdom (inkomst lägre än 3 dollar om dagen), har mer än halverats sedan 90-talet, men har nu börjat öka igen. Världsbanken uppskattar att närmare tio miljoner människor årligen hamnar i extrem fattigdom på grund av klimatförändringar.

Det är inte helt enkelt att frammana rätt mental bild av hur allt detta kommer utspela sig. Klimatförändringarna leder inte till en enda Hollywood-artad kataklysmisk katastrof, utan till en gradvis ökande ström av en myriad av små och medelstora händelser: en uttorkad brunn, allt mindre skördar, en kusttrakt drabbad av svår erosion, en skidort som fått stänga på grund av brist på snö, en kollapsad glaciär, en extra kraftig tropisk cyklon som ödelade ett kustområde, en svår torka blev nådastöten för en viss sorts odling på en plats, ett fiskebestånd som kollapsat och lämnat människor utan mat och inkomst, en regional konflikt om en vattenreservoar, torka, matbrist, översvämning, sjukdomar, krig, flyktingströmmar. Och så vidare och så vidare, på tusentals platser världen över, där detaljerna skiljer från plats till plats, men för varje år som går blir det i genomsnitt fler platser och större effekter.

Vi har genom exempel och modeller resonerat oss fram till att även bara några få graders uppvärmning leder till allvarliga konsekvenser.

Slutsatser

Vi kan nu anse oss ha åstadkommit det vi i början föresatte oss: att reda ut klimatforskningens huvudpåståenden.

- Vi har visat att det finns en växthuseffekt som värmer planeten och räknat ut hur stor den är: ungefär 33 grader
- Vi har med egna ögon kunnat se att koldioxid är en gas som binder värme, och alltså bidrar till växthuseffekten
- Vi har sett att mänskligheten sedan industriella revolutionens början genom att elda med kol, olja och gas släppt ut mycket koldioxid i atmosfären, och vi har genom överslagsräkning verifierat att den officiella siffran på ungefär 1 800 miljarder ton är rimlig.
- Vi har kommit fram till att storleken på utsläppen borde resulterat i en ökning av koldioxidhalten som är lite *högre* än vad forskningen säger, och att skillnaden beror på att en del av det vi släpper ut tas hav och växtlighet. Hittills har halten stigit med ungefär 50 procent sedan år 1800, från 280 till 430 miljondelar.
- Vi har sett att det finns ett logaritmiskt samband mellan koldioxidhalt och temperatur och att en tillämpning av det sambandet för en 50-procentig ökning av koldioxidhalten och med hänsyn tagen till klimatåterkopplingar ungefärligt kan reproducera de ca 1,5 graders uppvärmning som uppmätts sedan början av 1900-talet.
- En tillämpning av samma samband med *fördubblad* koldioxidhalt ger i vår modell en total temperaturökning på ungefär 3,2 °C, vilket är helt i linje med forskningen. Viss osäkerhet råder ännu om det exakta värdet.
- Vi har sett att varje grads ökning av temperaturen innebär en *mycket stor* ökning av den totala värmeenergin i klimatsystemet, och att det är väntat att det tar sig olika uttryck som förändrad väderlek och mer extrema väderhändelser.
- Vi har tittat på effekter av den uppvärmning vi redan har, och försökt sja om vad fortsatt uppvärmning kan tänkas medföra. Vi har sett att även en måttlig ökning av den globala medeltemperaturen på några få grader kan väntas ha allvarliga konsekvenser för växter, djur, människor, vår ekonomi och våra samhällen.

Kort sagt: vi har kunnat övertyga oss själva om huvuddragen i klimatforskningens påståenden.

Sedan går det att fördjupa sig långt mer än vad som är görbart med enbart grundläggande fysik, överslagsräkning och köksexperiment: jordens klimat är ett gigantiskt, dynamiskt och enormt komplext system med otaliga effekter som interagerar med varandra. Det är förstås därför vi har klimatforskare, satellitmätningar och klimatmodeller för att reda ut alla detaljer och kunna göra mer precisa mätningar, modeller och prognoser. Men huvuddragen går alltså att övertyga sig själv om, i högre utsträckning än vad som vanligtvis framkommer.

Klimatforskning *är* svårt, bland annat för att det inte direkt går att göra experiment på hela systemet. Men våra utsläpp utgör en form av gigantiskt experiment, eftersom de vid det här laget har en signifikant påverkan på klimatsystemet, men det är ett experiment där vi själva sitter med i provröret.

Jordens klimat befinner sig redan idag utanför vad människosläktet tidigare upplevt och är anpassat för. Det i sig är ett skäl till att vara mycket försiktiga. Och problemet är inte bara effekterna av uppvärmningen vi har just nu, utan hur trenden ser ut. Konsekvenserna kan ur i princip alla aspekter

väntas öka framöver, just nu utan någon tydlig gräns, och själva hastigheten på förändringarna är en del av problemet, eftersom det ger otillräckligt med tid för anpassning.

Det har funnits fullt moderna människor i omkring 70 000 år, men det var först för omkring åtta till tio tusen år sedan som de slog sig ner, började med jordbruk och skapade fasta samhällen. Det sammanfaller med när klimatet stabiliserat sig efter den senaste istiden. Ett stabilt klimat verkar alltså vara förutsättningen för själva civilisationen.

Några vanliga klimatinvändningar

Nedan följer några invändningar, med den gemensamma underförstådda tanken att klimatförändringarna och dess effekter är av marginell betydelse. Dessa bör vi vid det här laget ganska enkelt kunna ta ställning till, men vi kan ändå en titt på några av dem.

”Klimatet har alltid ändrats”

Det är naturligtvis helt sant. Istider har kommit och gått, och backar man tillbaka tillräckligt långt var jordens yta flytande lava. Men det som är relevant för alla som lever på planeten är *hur mycket* och *hur snabbt* klimatet ändras, och just nu ändras det mycket snabbare än det väsentligen någonsin har gjort, med undantag av just händelser som lett till massutdöenden. Och orsaken till den snabba ändringen är som vi sett mänsklighetens aktiviteter, främst utsläpp av växthusgaser.

”Koldioxidhalten är för låg för att spela någon roll”

Det här har vi studerat ingående i den här texten, och det visar sig att halten, även om den inte är så hög, spelar en väsentlig roll för klimatet.

Det är heller inte svårt att komma på andra fall där en låg halt av något kan spela stor roll: klorhalten i simbassänger är ungefär en miljondel och är tillräcklig för att döda bakterier i vattnet, och en tiondels miljondel bly i blodet räcker för att få blyförgiftning – båda avsevärt mindre ändringar än ändringen av koldioxidhalten i atmosfären. Så att halten av något ämne är låg innebär inte i sig att effekterna av det är försumbara.

”Det är bra för växtligheten med mer koldioxid”

Först kan man notera att det här påståendet inte går ihop med föregående påstående: koldioxidhalten kan inte samtidigt vara oväsentlig, men samtidigt vara avgörande för växtligheten.

Dock är påståendet i viss mån sant: växter behöver koldioxid för sin fotosyntes, och tillgången på koldioxid är ofta en begränsande faktor. Världen har under de senaste årtiondena på det hela taget blivit grönare. Man kan se det som en del av jordens buffertsystem för att dämpa förändringar. Men tecknen börjar hopa sig för att gränsen för den här buffertförmågan börjar bli nådd: när det blir *för* varmt börjar växtligheten vissna och dö istället. Här i Sverige är skogen än så länge en ganska stor kolsänka som tar upp mer kol än den släpper ut, men trenden är tydligt minskande. I vårt grannland Finland har skogen redan gått över till att vara en nettoutsläppare.

Slutord

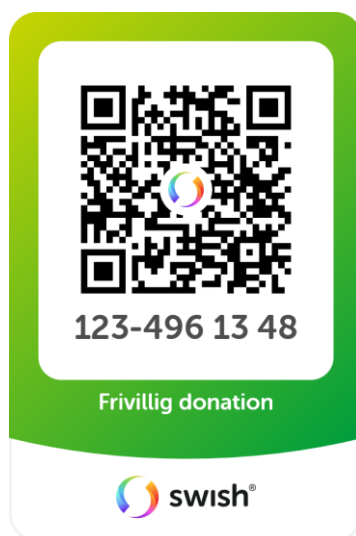
Det som beskrivits i den här texten är alltså inte *alla* miljö- och klimatproblem vi har, utan har fokuserat specifikt på konsekvenserna av utsläppen av främst koldioxid och att det gör att jorden blir varmare.

En kort personlig reflektion: många scenarier och prognoser är fokuserade på år 2050, 2075 eller 2100, men sällan längre. Men små barn idag kan tänkas leva ännu år 2125, och de i sin tur kommer känna personer som, om inget dramatiskt händer med medellivslängden, kommer vara vid liv förbi år 2200. Så personer som kommer få uppleva det 23:e århundradet är bara ett steg bort från oss.

Jag vill också nämna kort vad den här texten *inte* tagit upp: vad vi bör göra åt problemen. Det är en avsiktlig avgränsning, dels för att det i sig är ett mycket omfattande ämne, och dels för att det snabbt blir politik, vilket jag inte velat blanda in här. Fokus har varit på naturvetenskapen och att bli klar över hur själva läget ser ut, och varför. Det är en grundförutsättning för att kunna ta ställning till vad vi bör göra åt det.

Om du läst ända hit: tack!

Den här texten är resultatet av många timmars arbete av läsande, räknande och skrivande. Om du tycker att du fick ut något av den är du varmt välkommen att lämna ett bidrag. Det är helt valfritt, men betyder mycket.



Faktarutor

Tiopotenser

I texten används notationen med tiopotenser för stora tal, där den lilla upphöjda siffran anger hur många gånger 10 ska multipliceras med sig själv, så exempelvis $10^3 = 10 \cdot 10 \cdot 10 = 1000$ och $3,8 \cdot 10^6$ är 3,8 miljoner.

På svenska heter 10^9 (1 000 000 000) en miljard, 10^{12} en biljon och 10^{18} en triljon. Se upp med översättning av dessa och andra stora tal till och från engelska, för de betyder inte samma sak. Där heter till exempel 10^9 *billion*, 10^{12} *trillion* och 10^{18} heter *quintillion*.

Koldioxid

Koldioxid är gas som finns naturligt i atmosfären i låg koncentration. Den består av en molekyl som består av en atom kol och två atomer syre. Den bildas av djur när de andas och vid förbränning av biologiskt material. När den är löst i vatten kallas den kolsyra, det som finns i vanlig läsk. Det behövs alltså kol för att det ska kunna bildas koldioxid, och kol finns i levande varelser som växter och träd, men också bundet i stenkol, olja och gas.

Atom- och molekylmassa, mol och substansmängd

Molekyler består av atomer, och atomer består av protoner, neutroner och elektroner. Protoner och neutroner är ungefär lika tunga, och elektroner väger nästan ingenting. Man har infört måttet *atommassenhet*, eller *u* kort och gott, som är vad en proton eller neutron väger. Det är så löjligt lite som $1,66 \cdot 10^{-27}$ kg.

Det är *antalet protoner* som avgör vilket ämne det är. Neutronantalet kan variera något, det kallas för *isotoper*. De är inte alltid stabila, utan kan sönderfalla till andra ämnen med en viss hastighet (*halveringstid*). Kol består till exempel till största delen av isotopen kol-12 (6 protoner 6 neutroner), men i låg halt även bland annat av kol-14 (6 protoner 8 neutroner) som har ett visst kändisskap genom kol-14-metoden vilken gör det möjligt att åldersbestämma organiskt material.

Eftersom atomer är så små har man infört begreppet *substansmängd* som mäts i mol. En mol är i princip det antal protoner eller neutroner som går på ett gram. Det antalet är ungefär $6,022 \cdot 10^{23}$.

Det gör att ett ämne väger lika många gram per mol som molekylens atommassa. Så till exempel kol, med atommassan 12 u, väger 12 gram per mol.

För att jämföra vad olika atomer och molekyler väger behöver man i princip bara räkna hur många protoner och neutroner de består av.

Luft består till 78 % av kvävgas, där varje molekyl består av två kväveatomer. De består av vardera totalt 14 protoner och neutroner, så molekylmassan för kvävgas är ungefär 28 u. Därefter kommer syre (syrgas, O_2) på 21 %, som väger 32 u. Det gör att luft i genomsnitt väger ungefär 29 u.

Koldioxid består en kolatom (som väger 12 u) och två syre (16 u vardera), så koldioxid väger 44 u.

Emissionsfaktor - omvandling från förbrukat bränsle till utsläpp av koldioxid

En sak som är viktig att hålla reda på när man talar om förbrukat mängd fossilt bränsle och utsläpp av koldioxid: **ett ton kol blir inte ett ton koldioxid när det förbränns, utan betydligt mer.** Exakt hur mycket mer varierar lite från bränsle till bränsle. Omvandlingsfaktorn kallas för *emissionsfaktor*. Men den är ganska lätt att missa, så det gäller att se upp med sifferuppgifter om det avser ton kol eller ton koldioxid.

Som vi såg i faktarutan om molekylmassor så väger en kolatom 12 atommassenheter, u. När den omvandlas till koldioxid binds två syreatomer till den. Dessa väger 32 u, så koldioxid väger 44 u. Så om ett ton rent kol förbränns bildas $44/12 \approx 3,67$ ton koldioxid.

Ett kilo olja blir ungefär 3,1 kilo CO₂ (olja består inte enbart av kol).

Ett *kilo* bensin blir också till ca 3,1 kg CO₂. Men vi är mer vana vid att mäta bensin i liter, och bensin har ganska låg densitet, omkring 0,75 kg/liter, så en liter bensin ger drygt 2,3 kg CO₂.

Ett kilo naturgas (metan, CH₄) blir ungefär 2,75 kilo CO₂ vid ren förbränning.

Kretslopps-kol vs fossilt kol

Det finns en avgörande skillnad mellan att elda med ved och att elda med kol eller olja: båda förbränningarna släpper ut koldioxid, men det är bara kolen i veden som kommer från ett aktivt kretslopp. Kol som tas upp ur marken - stenkol, olja och naturgas - har legat där i miljontals år. När vi tar upp detta ur marken och förbränner det, ökar vi mängden kol i det aktiva kretsloppet. Torv är lite av ett mellanting, det innehåller kol som varit bundet längre tid än i träd och växter, men kortare tid än stenkol och olja. Det är "halvfossilt" men vi kan ignorera torv här, för det rör sig om små volymer jämfört med övriga energislag. Brunkol är en övergångsform mellan torv och stenkol och räknas som fossilt.

Växthuseffekt

Att koldioxid och en del andra gaser som vattenånga kan fånga värme gör att jorden har en växthuseffekt, alltså är varmare än vad den skulle ha varit utan de gaserna.

Grundprincipen är ingående och utgående strålning har olika våglängd, och att atmosfären är genomskinlig för den inkommande men, på grund av de här gaserna, bara delvis för den utgående. Det gör att en del av energin stängs in.

Så ljuset från solen, främst synligt ljus för vilket atmosfären är genomskinlig, träffar jorden som värms upp, och som sedan avger energin igen som värme i längre våglängder, främst infrarött ljus – för vilken atmosfären på grund av växthusgaserna *inte* är genomskinlig.

Atmosfärens förmåga att värma jordytan beskrevs första gången 1824 av den franske fysikern och matematikern Joseph Fourier.

1859 fann den irländske kemisten John Tyndall att det är vattenånga och koldioxid som står för merparten av värmeabsorptionen i atmosfären.

Den svenske kemisten Svante Arrhenius genomförde 1896 en första beräkning av hur människans utsläpp av koldioxid skulle kunna påverka temperaturen på jorden.

Idén om att människans förbränning av fossila bränslen kunde leda till klimatförändringar blev mer allmänt accepterad bland forskare på 1950-talet. Idag råder i princip total konsensus om detta, men det råder ännu viss osäkerhet kring exakt hur stor effekten kan tänkas bli framöver.

I kapitel ett räknade vi ut att växthuseffekten på jorden är ungefär 33 grader. Men bara en del av detta kommer från koldioxid – faktiskt en ganska liten del, ungefär 20 % eller 6 – 7 grader. Men den siffran stiger alltså, på grund av våra utsläpp.

Solarkonstanten

Solarkonstanten är den inkommande effekten (energi per sekund) från solen, per kvadratmeter, mätt ovanför atmosfären. Den har värdet 1361 W/m^2 .

Om man vill kan man räkna ut solarkonstanten från solens totala uteffekt, $3,828 \cdot 10^{26} \text{ Watt}$, och jordens banradie, 149,6 miljoner kilometer. Solen strålar lika mycket åt alla håll, så ute vid jordens avstånd fördelas hela effekten över en sfär med samma radie som jordens banradie. Arealen av en sfär är $4\pi r^2$, så effekten P per area A blir:

$$P/A = 3,828 \cdot 10^{26} / (4\pi r^2) = 1361 \text{ W/m}^2. \text{ Det värdet är solarkonstanten.}$$

Om man vill kan man i sin tur räkna ut solens uteffekt baserat på dess temperatur och dess radie, 695 700 km. Solens gula färg motsvarar en viss temperatur, ca 5500 grader Celsius (5778 Kelvin), och radien kan uppskattas ungefärligt baserat på vinkeln solen upptar på himlen och avståndet till den. Ur det kan man få fram effekten, återigen med hjälp av Stefan-Boltzmanns lag $M = \sigma T^4$ (som ju gav effekt per kvadratmeter), gånger solens area, $4\pi r^2$:

$$P = A \cdot M = A \cdot \sigma T^4 = 4\pi r^2 \cdot \sigma T^4 \approx 4\pi \cdot 695700000^2 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 5778^4 \approx 3,845 \cdot 10^{26} \text{ Watt}$$

vilket är väldigt nära tabellvärdet på effekten ovan.

Hur vet vi då avståndet till solen? Uppskattningar gjordes redan under antiken, men det var under 1600- och 1700-talet när det fanns teleskop det gick att få fram mer exakt. Under 1700-talet användes observationer av planeten Venus passage framför solen för att få fram jordens avstånd från solen. Detaljerna är spännande men faller utanför syftet med den här texten. Numera kan vi räkna ut mycket exakta avstånd med hjälp av radarmätningar av främst Venus. Solen ger inga radarekon eftersom den inte har någon fast yta och själv är en extremt stark utsändare av radiovågor.

Enheter för kraft, energi och effekt

Newton är grundenheten för kraft. En newton är definierad som den kraft som krävs för att ge en massa på ett kilo accelerationen 1 m/s^2 . Det kommer direkt ur Newtons andra lag: $F = ma$. Kraften är lika med massan gånger accelerationen.

Joule är grundenheten för energi. En Joule motsvarar arbetet av kraften en Newton över en meter. Det är ungefär så mycket energi det tar att lyfta ett äpple en meter rakt upp - eller som frigörs när det faller ner igen.

Watt är grundenheten för effekt, som är energi per tid. En Watt är definierad som en Joule per sekund.

Omvänt kan man säga att en Joule är energin i en Watt under en sekund.

Till vardags är mer vana vid energienheter som kilowattimme. Det är alltså energin som motsvarar effekten tusen Watt under en timme. Det går 3600 sekunder på en timme, alltså är en kilowattimme 3,6 MJ (MegaJoule).

Figurförteckning

Figur 1. Temperaturskalor Celsius och Kelvin	9
Figur 2. Hemma-experiment för att påvisa att koldioxid är en växthusgas	10
Figur 3. Keelingkurvan	11
Figur 4. Koldioxidhalten i atmosfären sedan år 1700.....	12
Figur 5. Koldioxidhalten i atmosfären under 2000 år.....	12
Figur 6. Koldioxidhalten i atmosfären under tio tusen år	13
Figur 7. Världens årliga koldioxidutsläpp	14
Figur 8. Världens ackumulerade koldioxidutsläpp	15
Figur 9. Barometer	16
Figur 10. Syrehalt och koldioxidhalt	18
Figur 11. Vätern	19
Figur 12. Global medeltemperatur 1880 - 2025.....	20
Figur 13. Global medeltemperatur under 2000 år.....	21
Figur 14. Global medeltemperatur under 12 000 år	22
Figur 15. Svante Arrhenius	23
Figur 16. Exempel på spektrum (egen figur)	24
Figur 17. Strålningsdiagram över växthuseffekten.....	24
Figur 18. Logaritmiskt samband	25
Figur 19. Långtidvariationer i solinstrålningen på norra halvklotet	31
Figur 20. Representative Concentration Pathways.....	34
Figur 21. Venus.....	34
Figur 22. Ökning av klimatsystemets värmeinhåll.....	36
Figur 23 - Global havsnivå sedan 1880.....	38
Figur 24 - Global havsnivå sedan år 1000.....	38
Figur 25 - Global havsnivåändring mellan 1993 och 2019	39
Figur 26 - Utbredning av sommarisen i Arktis.....	40
Figur 27 - Isutbredningen i Antarktis.....	41
Figur 28. Antarktis och Europa i samma skala.....	41
Figur 29. McCarty-glaciären	42
Figur 30. Jämförelse av frisk och blekt korall	44
Figur 31. Havens pH-värde	45
Figur 32. Värmeböljor i USA	46
Figur 33. Storspigg	48
Figur 34. Kritiska brytpunkter.....	49

Licenstext för CC BY-SA: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0>

Referenser

- [1] "Solar System Temperatures," NASA, 2023. [Online]. Available: <https://science.nasa.gov/resource/solar-system-temperatures>.
- [2] J. H. Davies och D. R. Davies, "Earth's surface heat flux," *Solid Earth*, vol. 1, p. 5–24, 2010.
- [3] M. Boezio, "The cosmic-ray proton and helium spectra measured with the CAPRICE98 balloon experiment," *Astroparticle Physics*, vol. 4, p. 583–604, 2003.
- [4] Scripps Institution of Oceanography, "The Keeling Curve," Scripps O₂ Program, UC San Diego, [Online]. Available: <https://keelingcurve.ucsd.edu>.
- [5] Our World in Data, "Carbon emissions," [Online]. Available: <https://ourworldindata.org/co2-emissions>.
- [6] IPCC, "Climate Change 2021: The Physical Science Basis, Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report," Cambridge Univ. Press, 2021.
- [7] Scripps Institution of Oceanography, "Atmospheric Oxygen Levels are Decreasing," Scripps O₂ Program, UC San Diego, [Online]. Available: <https://scrippsco2.ucsd.edu>.
- [8] SMHI, "Fakta om Vätern," Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut, [Online]. Available: <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/hydrologi/de-stora-sjoarna/fakta-om-vatern>.
- [9] World Meteorological Organization, "Climate Monitoring Dashboards," [Online]. Available: <https://wmo.int/resources/dashboards/global-mean-temperature-1850-2024>.
- [10] PAGES 2k Consortium, "Consistent multidecadal variability in global temperature reconstructions and simulations over the Common Era," *Nature Geoscience*, vol. 12, p. 643–649, 2019.
- [11] D. S. Kaufman et al., "Temperature 12k database," Figshare, 2020. [Online]. Available: doi: 10.6084/m9.figshare.11455824.
- [12] G. A. Schmidt, R. Ruedy, R. L. Miller och A. A. Lacis, "The attribution of the present-day total greenhouse effect," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 115, nr D20, pp. 1-6, 2010.
- [13] S. Arrhenius, "On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground," *Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 41, nr 251, p. 237–276, 1896.
- [14] G. Myhre, E. J. Highwood, K. P. Shine och F. Stordal, "New estimates of radiative forcing due to well mixed greenhouse gases," *Geophysical Research Letters*, vol. 25, nr 14, p. 2715–2718, 1998.
- [15] "Sun & Climate: moving in opposite directions," Skeptical Science, 2023. [Online]. Available: <https://skepticalscience.com/solar-activity-sunspots-global-warming.htm>.

- [16] "Milankovitch (Orbital) Cycles and Their Role in Earth's Climate," NASA, 2024. [Online]. Available: <https://science.nasa.gov/science-research/earth-science/milankovitch-orbital-cycles-and-their-role-in-earths-climate/>.
- [17] "Venus facts," NASA, 2026. [Online]. Available: <https://science.nasa.gov/venus/venus-facts/>.
- [18] Morgan, J.V., Bralower, T.J., Brugger, J. et al., "The Chicxulub impact and its environmental consequences," *Nature Reviews Earth & Environment*, vol. 3, p. 338–354, 2022.
- [19] Fang et al., "Tipping Points and Cascading Transitions: Methods, Principles, and Evidence," *National Science Review*, 2026.
- [20] K. Lambeck et al., "Sea level and global ice volumes from the Last Glacial Maximum to the Holocene," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 111, nr 43, p. 15296–15303, 2014.
- [21] J. A. Church et al., "Changes in Sea Level," EPIC / AWI, 2001.
- [22] "Climate change: global sea level," NOAA / Climate.gov, 2026. [Online]. Available: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-sea-level>.
- [23] "2 degrees institute - Global mean sea level," 2026. [Online]. Available: <https://www.2degreesinstitute.org>.
- [24] "27-year Sea Level Rise - TOPEX/JASON," NASA, 2020. [Online]. Available: <https://svs.gsfc.nasa.gov/4853>.
- [25] "The race to the bottom," National Snow and Ice Data Center, 2024. [Online]. Available: <https://nsidc.org/sea-ice-today/analyses/race-bottom>.
- [26] "Antarctic sea ice extent hits a third low in a row," National Snow and Ice Data Center, 2024. [Online]. Available: <https://nsidc.org/sea-ice-today/analyses/antarctic-sea-ice-extent-hits-third-low-row>.
- [27] Armstrong McKay et al., "Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points," *Science*, vol. 377, nr 6611, 2022.
- [28] Karina von Schuckmann et al., "Heat stored in the Earth system 1960–2020: where does the energy go?," *Earth System Science Data*, vol. 15, nr 4, p. 1675–1709, 2023.

