

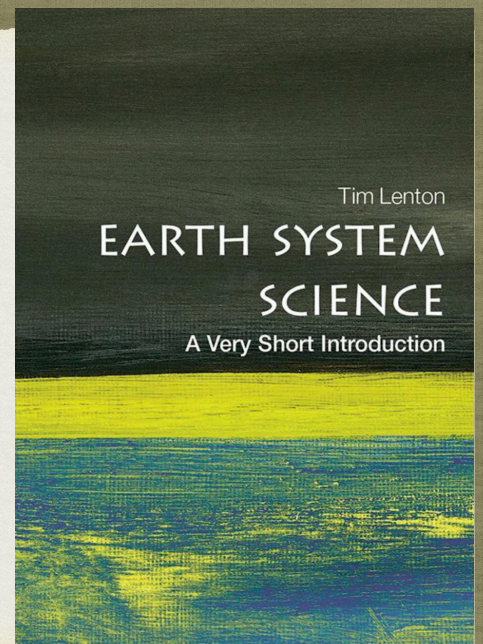
KLIMATHOTET

Sett ur ett systemteoretiskt perspektiv

1

BAKGRUND

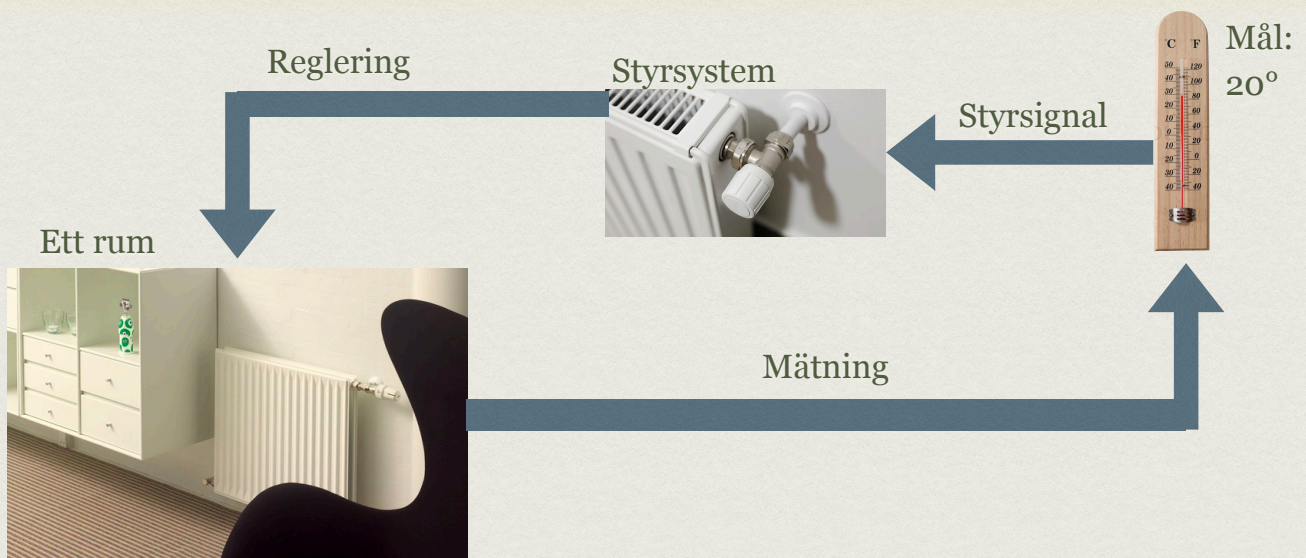
- Denna presentation baseras på en bok av Tim Lenton: *Earth system science: a very short introduction*
- Den ger en god förklaring till hur jorden, sett som ett system, fungerar
- Den beskriver utvecklingen i ett väldigt långt perspektiv 4,5 miljard år, dvs i princip jordens livslängd
- Kan köpas på Google som e-bok för en billig peng



SYSTEMTEORI?

- Är inte alls så svårt som det låter
- Ett system är en samling relaterade komponenter
- Med andra ord något avgränsat, som man kan sätta inom en ram
- Det är alltid någon som ritar upp denna ram
- Ett system kan ha ett mål, t.ex. att reglera temperaturen
- Typiskt för system är feed-back loopar

ENKELT REGLERSYSTEM



SJÄLVA REGLERINGEN



5

DIGITAL REGLERING



Mål:
20°



Systemet kommer att löpa amok!

Det enkla systemet i förra bilden brukar inte fungera speciellt bra. Därför inför vi ett digitalt system som känner av temperaturen 1 ggr/sek i rummet och reglerar ventilen därefter. Tanken är att uppnå jämvikt

6

REGLERINGAR

- Detta lilla exempel visar att även enkla system kan bete sig oväntat
- Det visar också att det kan finnas fler komponenter än man tror från början
- I detta fallet tog vi inte hänsyn till tiden i form av den tid det tar för värmen att sprida sig.
- Hade det varit bättre med längre avkänningsintervall?
- Nej, det hade blivit samma resultat, fast man hade fått frysa/svettas längre
- I moderna system regleras vattentemperaturen av yttertemperaturen och termostaten på elementet är i princip alltid öppen.
- Det är bara om t.ex. solen värmer rummet, som termostaten på elementet stänger av

FEED BACK

- Feed back är det centrala begreppet. Finns två sorter:
- Positiv feed back som skapar förstärkande loopar. Kan eventuellt löpa amok, som det digitala elementet
- Negativ feed back som skapar försvagande loopar. En vanlig mekanisk termostat är en sådan

KLIMATSYSTEMET

Långa processer

9

ESS (EARTH SCIENCE SYSTEM)

- Beskriver vår planet som ett system, som gjort möjligt för livet att uppstå och utvecklas
- Beskriver också vad detta liv just nu gör med planeten
- Och vad som kan hända i framtiden
- Det är tvärvetenskap som omfattar geologi, biologi, kemi, fysik och matematik

NÅGOT HÅLLER JORDEN VARM

- Solen skiner allt starkare med tiden. Idag är den 30% starkare än för 4,5 miljarder år sedan
- Vid den tiden borde jorden ha varit 33° kallare och det borde inte ha funnits vatten och liv borde inte kunna uppkomma
- Men det finns sedimentära bergarter som är 3,8 miljarder år gamla och som visar att det då fanns vatten på jorden
- Idag tror vi att jorden då hade en tjock atmosfär av CO₂ som gradvis har överförts till jordskorpan

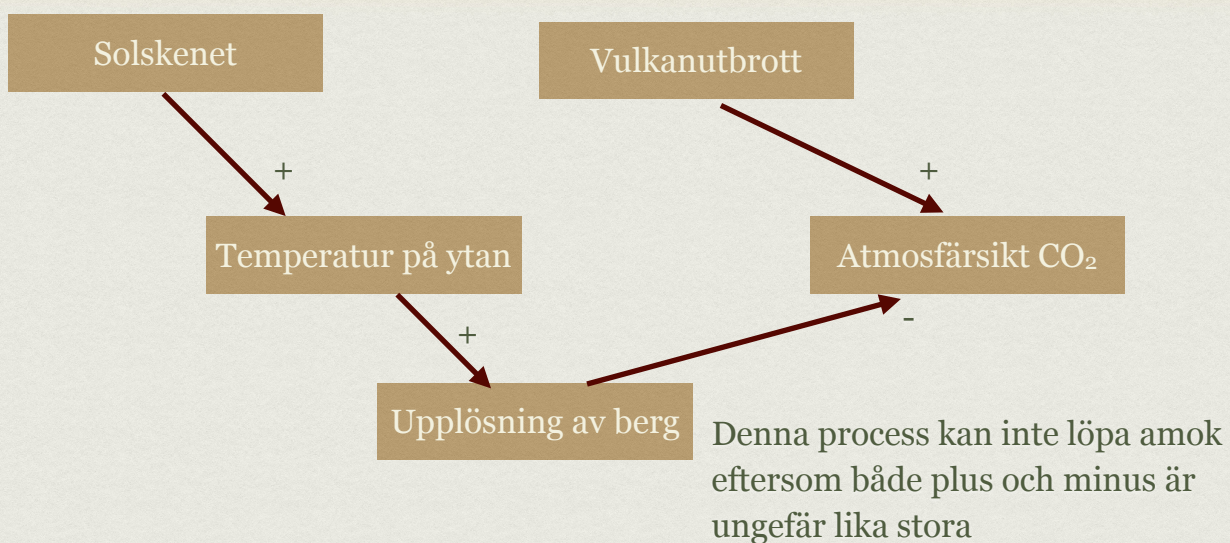
GAIA TEORIN

- James Lovelock på NASA formulerade tillsammans med biologen Lynn Margulis en hypotes om att atmosfären på jorden hade påverkats av livet och skapat ett självreglerande system.
- De kallade hypotesen för Gaia-hypotesen efter den grekiska gudinnan Gaia, som var jordens gudinna.
- Numera kallar de hypotesen för Gaia-teorin eftersom de anser den vara bevisad.
- Detta är en av de första försöken att beskriva jorden som ett helt system
- Kritiseras för att man påstår att jorden har ett medvetande

MEKANISMER SOM STABILISERAR

- CO₂ och regn löser upp en del berg och binder på så sätt kol i jordskorpan
- På så sätt minskar temperaturen
- Men kolet kommer upp igen med vulkanutbrotten, som producerar massor av CO₂.
- På så sätt ökar temperaturen.
- Dessa processer löper på miljontals år och de balanserar varandra tämligen bra.
- Men så har vi albedo-effekten...

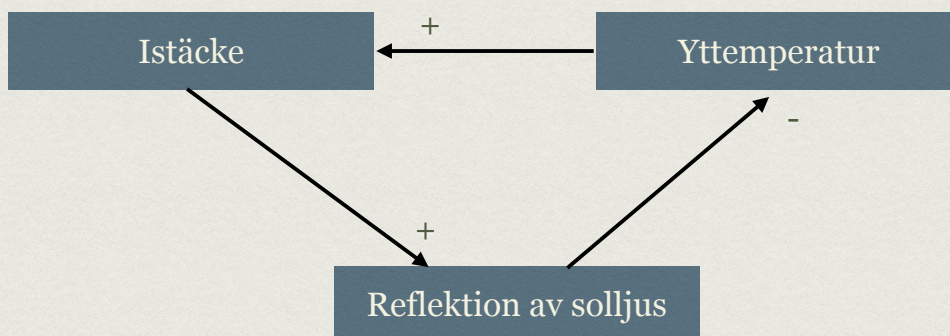
BERGUPPLÖSNING



ALBEDO EFFEKTEN

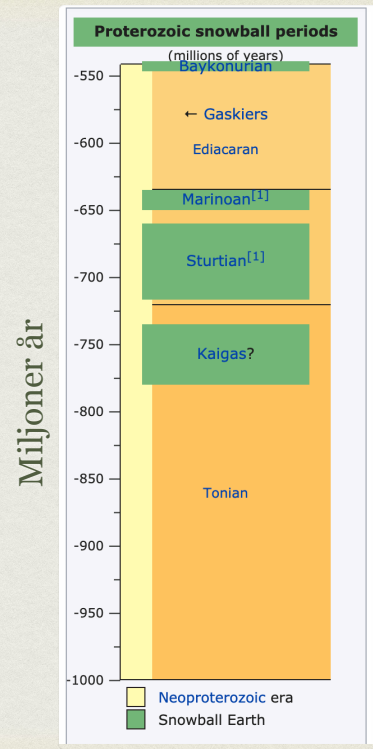
- En ljus yta reflekterar mer ljus och värme än en mörk dito.
- Snö och is reflekterar mycket värme och sänker temperaturen. Blir det tillräckligt mycket, skenar processen och jorden blir helt tillfrusen, snöbollsjorden
- Detta är i princip ett stabilt tillstånd.
- Men vulkanerna fortsätter att spruta ut koldioxid även om de är täckta av tjock is
- Efter några miljoner år har därför snöbollsjorden töat upp igen
- Detta verkar ha hänt flera gånger

ALBEDOEFFEKTEN



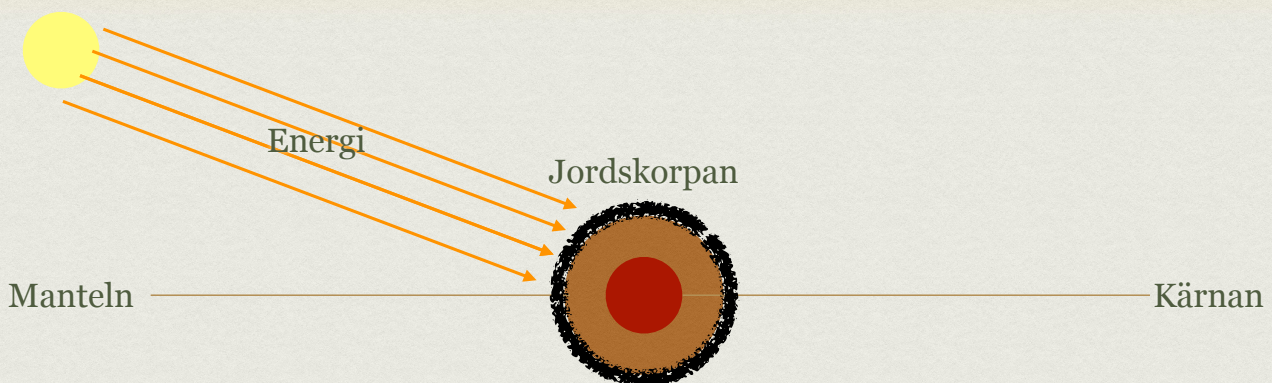
Denna process kan löpa amok. Då får vi en snöbollsjord

- Man tror jorden varit helt istäckt vid fyra tillfällen enligt bilden t h
- Sedan Kambrium har det dock inte varit någon nerisning.
- Dessa processer sker under miljontals år och har inget med dagens höga CO₂-halter att göra.



17

JORDENS DELAR



Det är jordskorpan som är vårt system
Och solen är energikällan

KLIMATSYSTEMET

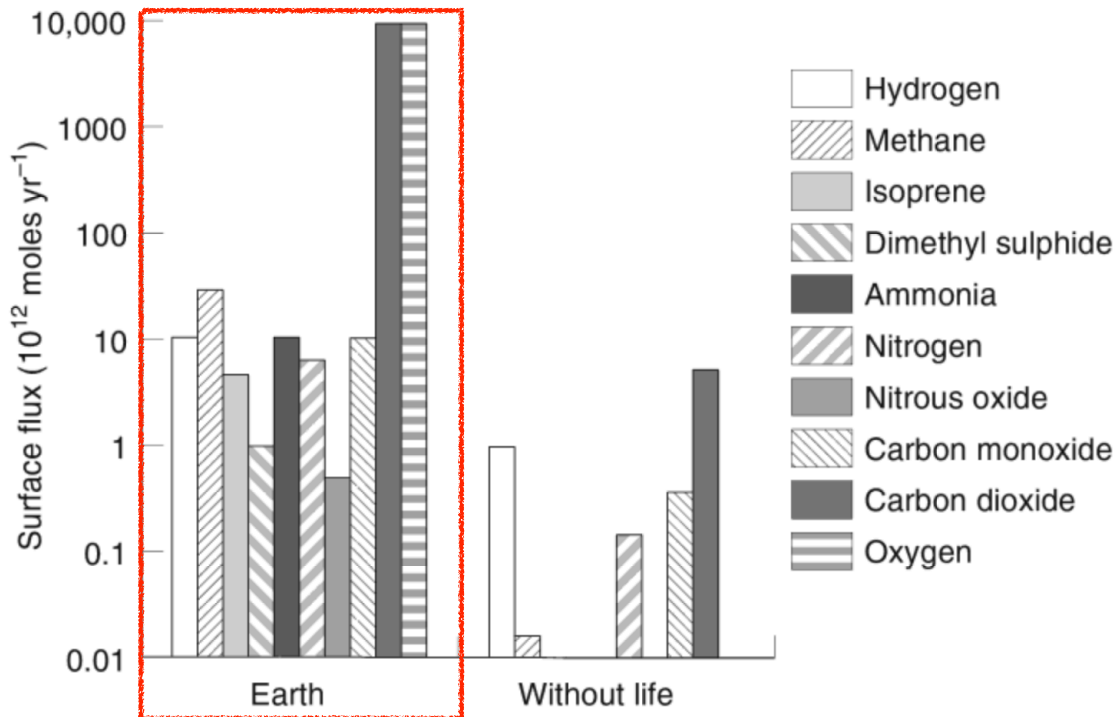
Korta processer

19

BIOGEOKEMISKA CYKLER

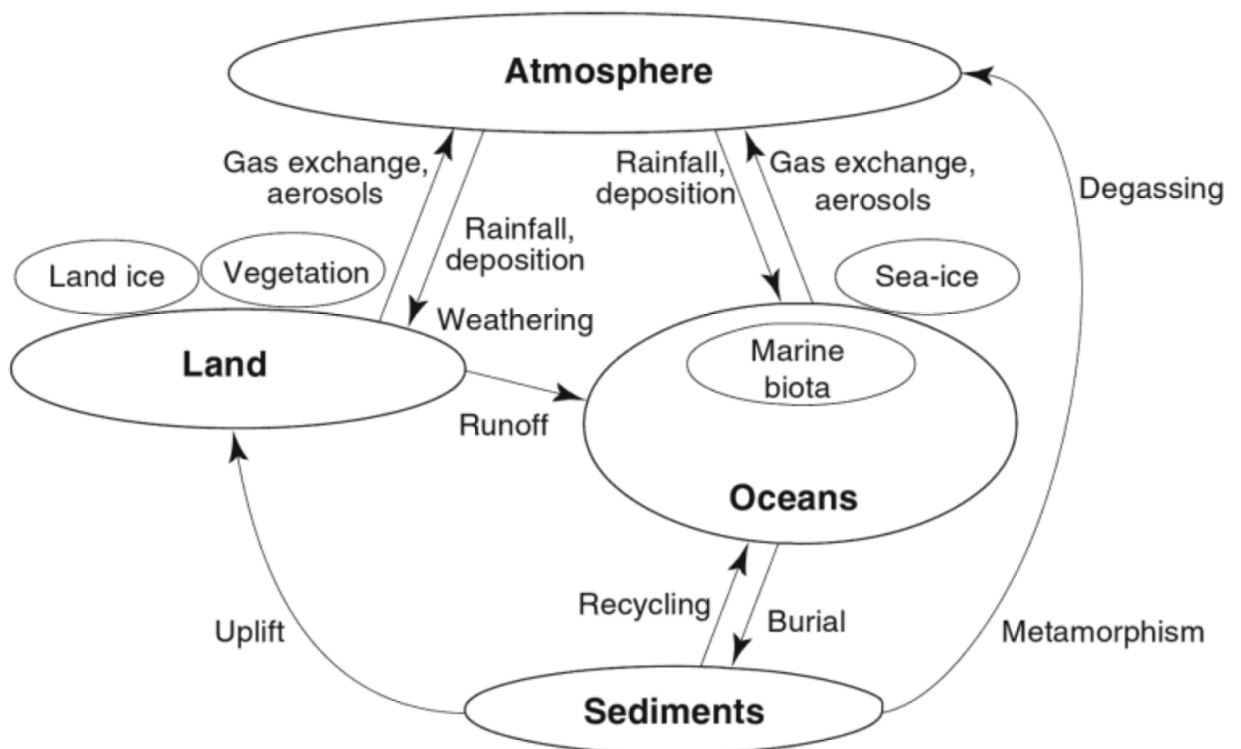
- Jordytan är ett tämligen slutet system, så för att livet där ska fortbestå krävs återbruk i stor skala
- Materialet omformas, bryts ner och byggs upp hela tiden
- Till detta krävs energi, som kommer från solen, både för kemisk omvandling och för transport runt jorden

Antal molekyler som omsätts per år



6. Fluxes of gases exchanged at the Earth's surface today and on an abiotic Earth—showing the profound effect of life.

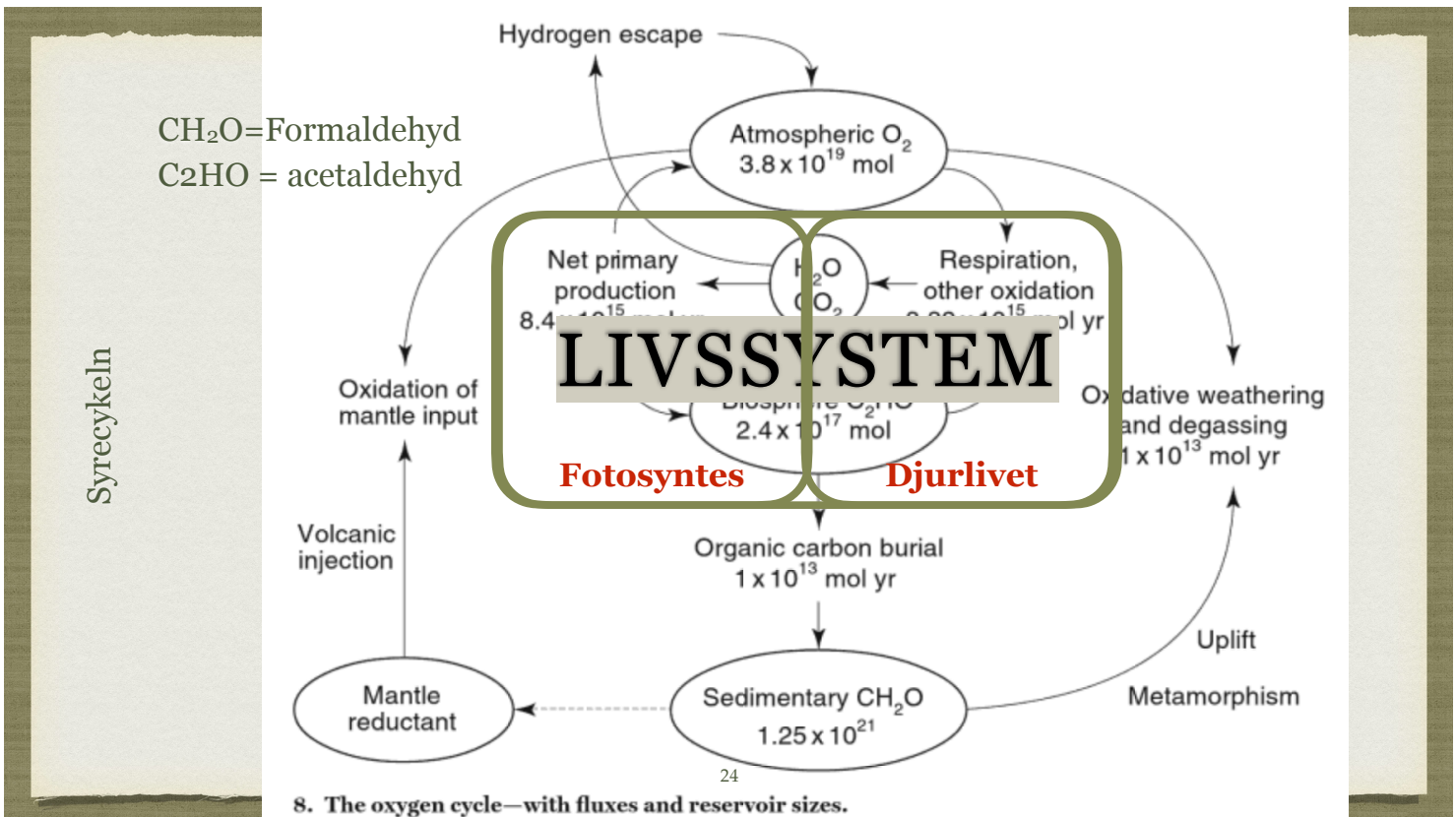
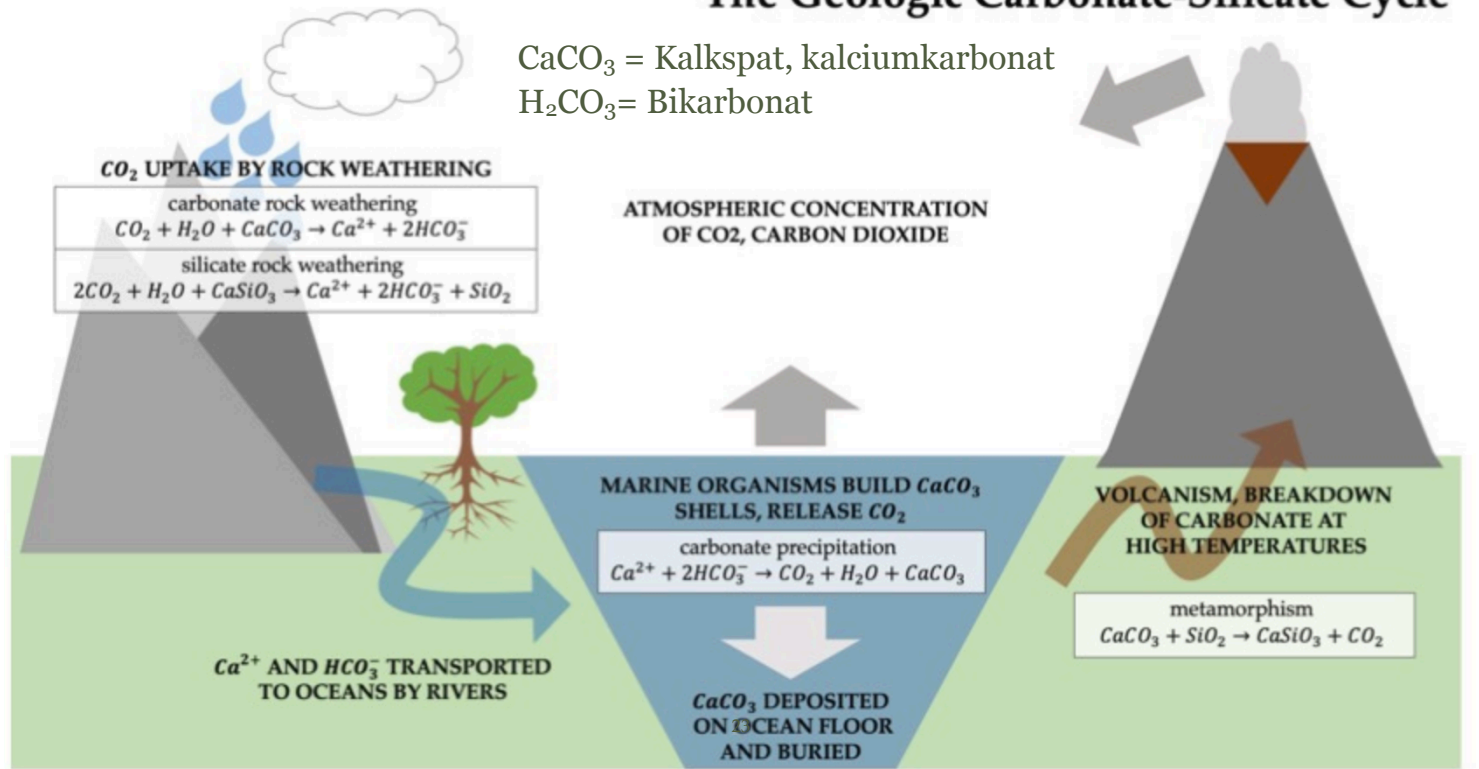
Översiktbild



7. Biogeochemical cycling at Earth's surface and via the rock cycle—showing key processes and reservoirs.

The Geologic Carbonate-Silicate Cycle

CaCO₃ = Kalkspat, kalciumkarbonat
 H₂CO₃ = Bikarbonat

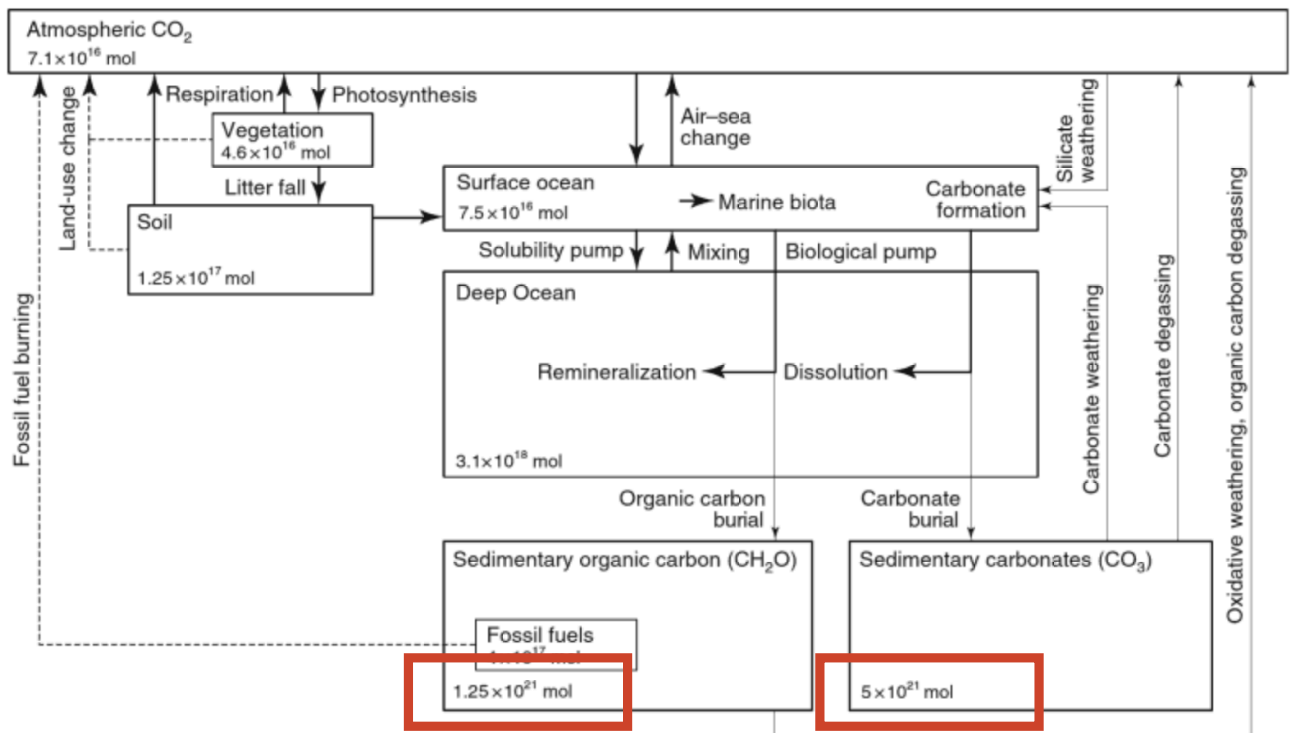


8. The oxygen cycle—with fluxes and reservoir sizes.

SYRECYKLEN

- Det mesta syret finns i atmosfären och det är så mycket att det inte kan förbrukas av andning eller oxidering
- Det produceras av växter och större delen producerades av cyanobakterier för ca 2 miljarder år sedan

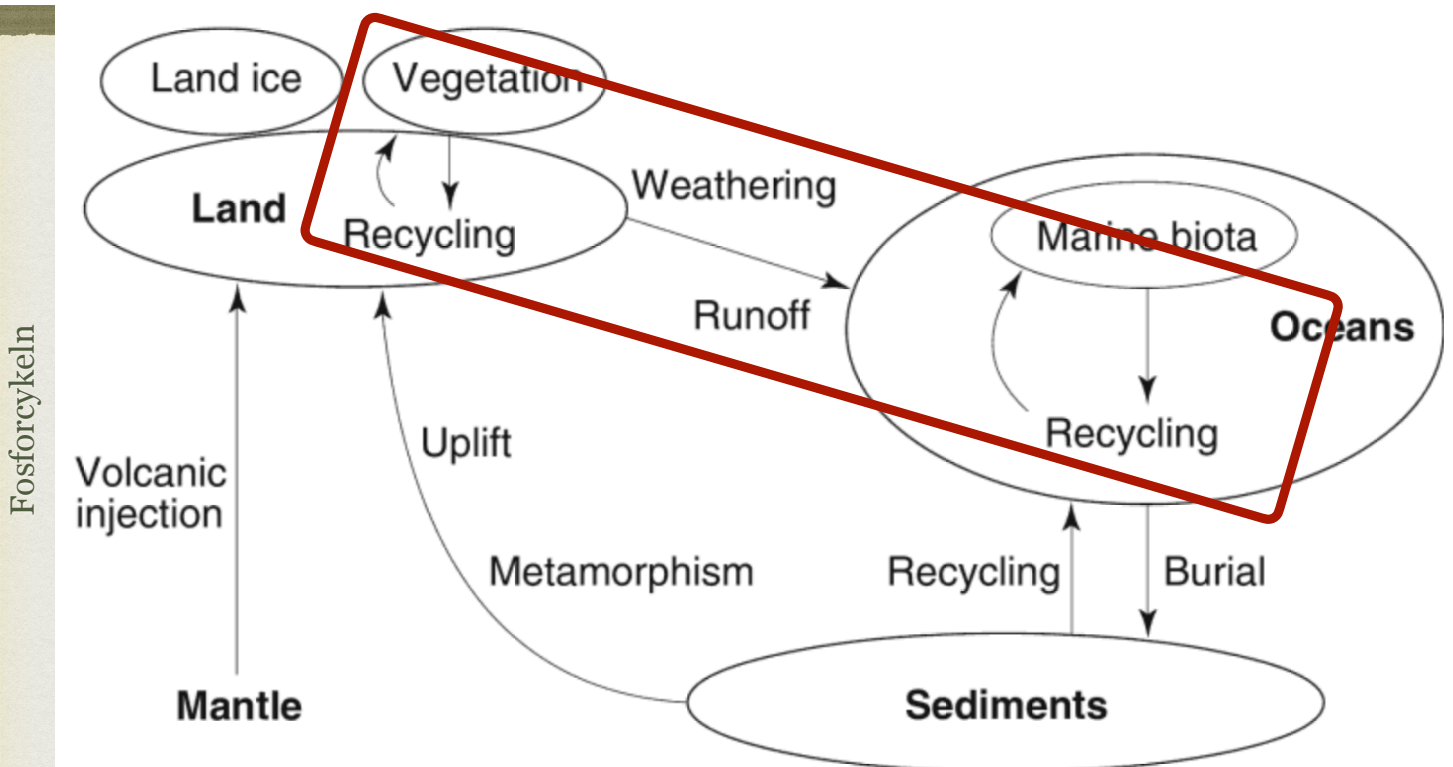
Kolcykeln



9. The carbon cycle—showing both short-term surface cycling (bigger arrows) and long-term exchange with the crust (smaller arrows), together with major anthropogenic fluxes (dashed arrows).

KOLCYKLEN

- Det finns mycket mindre CO₂ än syre, så förändringar har större påverkan.
- Största reservoaren för CO₂ är haven.
- 1/5 finns i atmosfären, resten i hav och berg.
- CO₂-utbyte mellan atmosfär och land sker främst biologiskt.
- När vattnet, som flyter norrut svalnar kan det hålla mer CO₂ och del sjunker ner i djuphavet och bildar olika sorters mineral och snäckor/koraller av olika slag.
 - När vi förbränner fossilt bränsle frigörs massor gammal CO₂ i atmosfären
 - Mätningarna baseras på modeller och olika isotopförhållanden

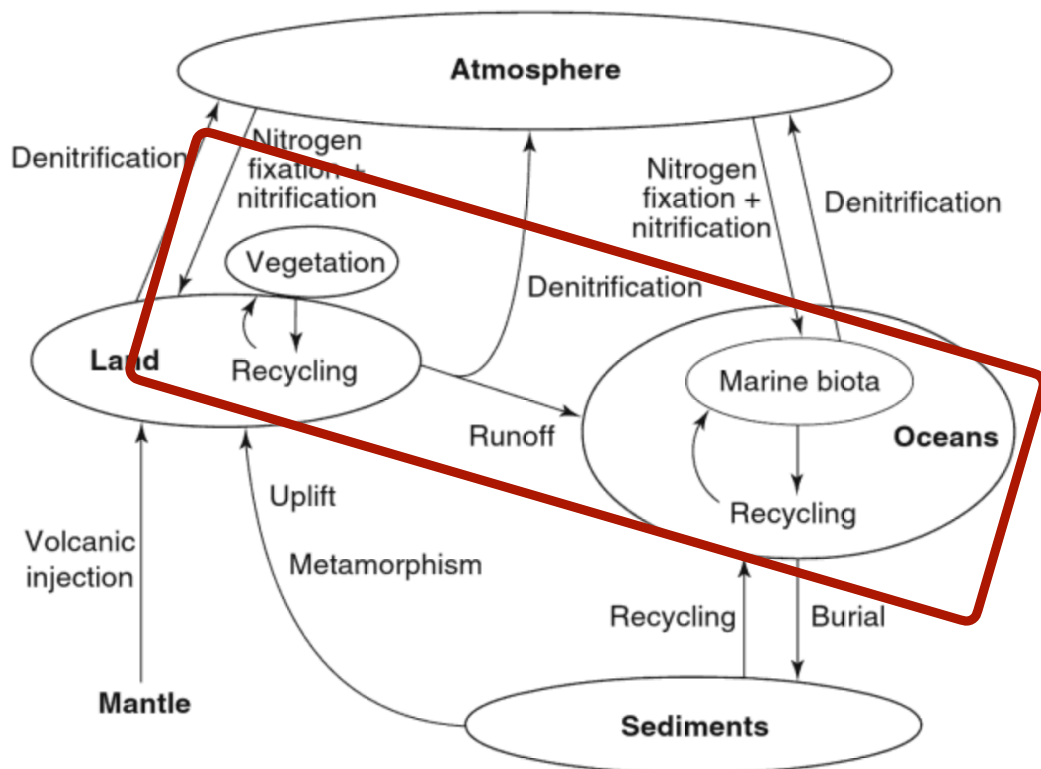


10. The phosphorus cycle.

FOSFORCYKELN

- Fosfor är livsviktigt för allt liv och växter och svampar är duktiga på att ta upp fosfor
- På land cirkulerar fosfor ca 25 ggr innan den rinner ut i havet
- Där upplöses den och det mesta tas upp av olika plankton
- En del av dem dör och sjunker till botten där en del sedimenteras
- Sedimenten kommer upp igen vid jordbävningar o dyl

Kvävecykeln



11. The nitrogen cycle.

KVÄVECYKELN

- Det mesta kvävet finns i luften och N_2 är en otroligt stabil förening.
- Det är endast vissa bakterier, typ cyanobakterier, som kan omvandla kväve till nitrat som växterna kan ta upp
- All cirkulation sker på detta sätt
- Sedimentloopen tar ca 500 000 år.

REGLERING

Feed-back loopar

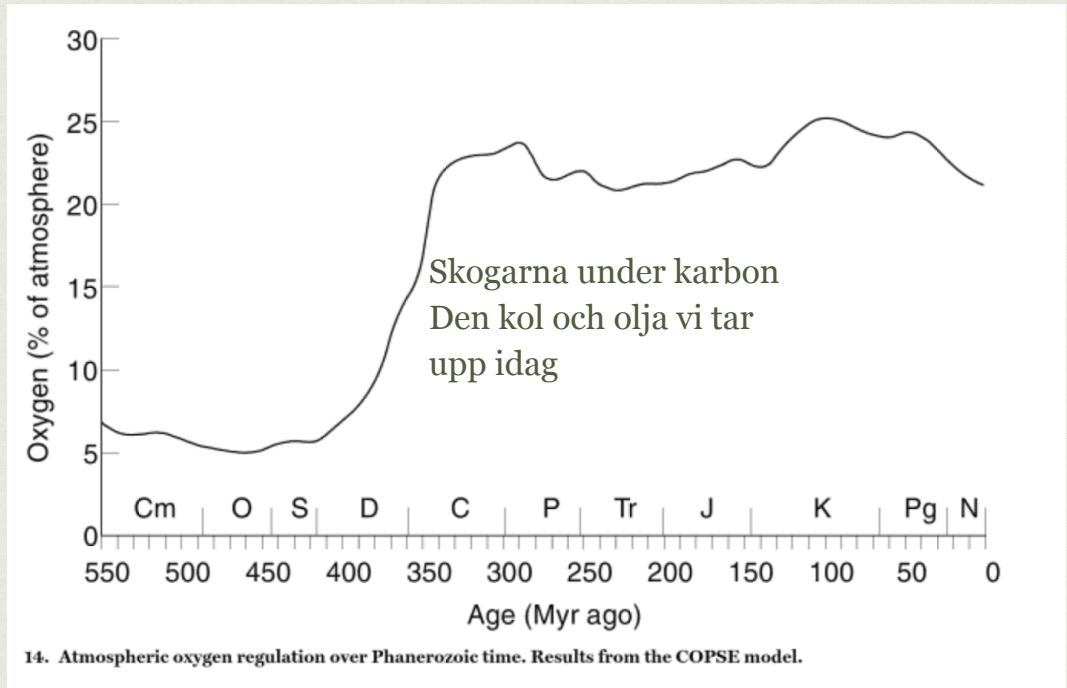
BIOGEOKEMISKA MODELLER

- En modell förklarar hur de tidigare cyklerna kan hållas stabila
- Den beskriver på ett mer eller mindre mekaniskt sätt hur olika variabler samverkar med varandra
- Genom att sätta in historiska data kan man kontrollera olika hypoteser angående variablernas samverkan
- Den modell vi ska prata om här heter COPSE och berör de senaste 542 miljoner åren

SYRE I ATMOSFÄREN

- För att skogar ska kunna finnas måste syrehalten vara mellan 17-30%
- Det har funnits skogar i 370 milj år och syrehalten har hållit sig inom dessa gränser. Hur går det till?
- Det är två mekanismer som sänker syrehalten:
 1. Organiskt kol som begravs i marken (allt levande innehåller kol, syre och väte)
 2. Oxidering av berg och klippor
- Allt hamnar i havet och är kopplat till fosforcykeln: Låg syrehalt => mer fosfor löses => mer växtlighet => högre syrehalt => mindre fosfor i havet OCH fler skogsbränder => låg syrehalt

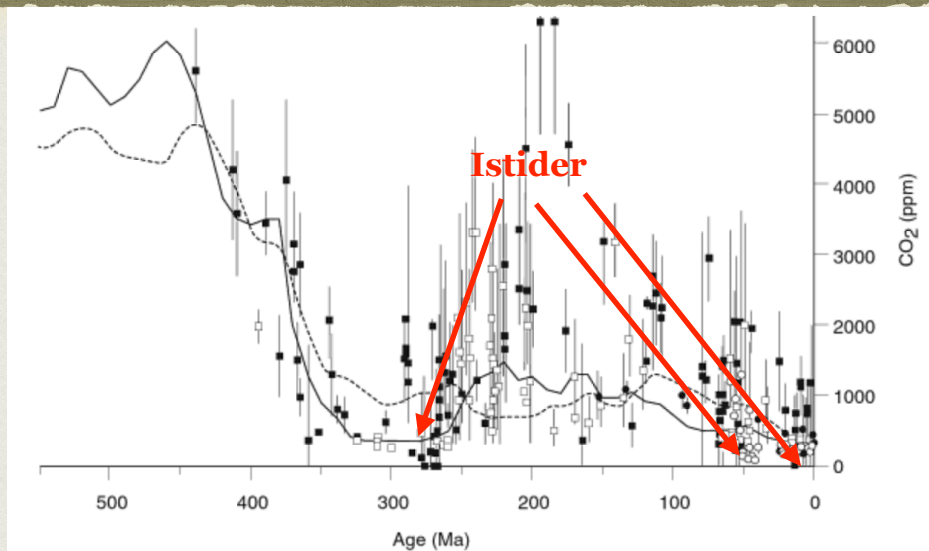
Syrehalten i atmosfären



35

CO₂ LÅNGTID

- Ökad temperatur OCH ökad CO₂ => mer vittrat berg OCH mer växtlighet => mindre CO₂ OCH lägre temperatur



15. Atmospheric CO₂ variation over Phanerozoic time. A compilation of proxy data (points with error ranges) and model predictions (GEOCARB II—solid line; COPSE—dashed line).

CO₂ KORTTID

- Vulkanutbrott och jordbävningar kan emellertid ibland på kort tid öka CO₂-halten i atmosfären. Likaså mänsklig aktivitet. Men det finns förhållanden som reducerar
- 0-100 år: CO₂ tas upp av vatten och växter. Efter ungefär 1000 år är maximum nådd, vattnet kan inte upp mer CO₂
- 1000-10 000 år: Det sura vattnet löser upp mer och mer av kolhaltiga sediment och ökar vattnets förmåga att ta upp CO₂.
- 100 000 - : Övergång till den långsiktiga skalan

ETT HISTORISKT EXEMPEL

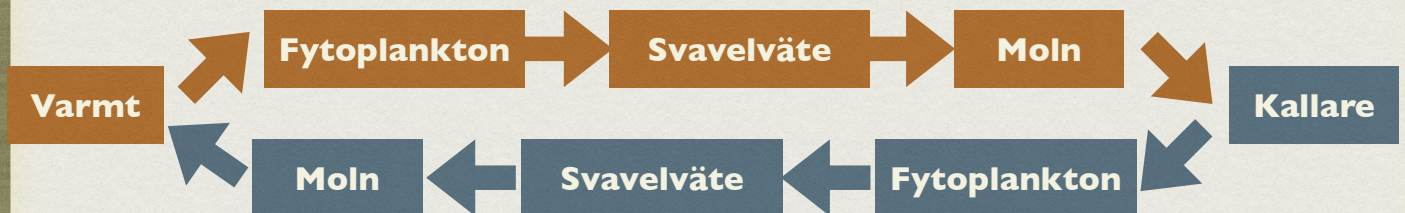
- För 55,8 milj år sedan hände detta:
- Troligen beroende på massiva vulkanutbrott och metan från upptinad permafrost i två omgångar med 20 000 år emellan
- Temperaturen steg 5° och var så i ungefär 100 000 år
- Det tog ungefär 200 000 år innan ordningen var återställd
- Vår nuvarande förbränning av fossila bränslen kan förväntas ge liknande effekter
- Och så var det ett meteoritnerslag....

MOLN

- Moln reflekterar solljuset. Moln kräver dock små partiklar som vattenånga kan kondenseras kring
- Fytoplankton avsöndrar svavelväte som bildar partiklar moln kan bildas av.
- Om det är varmt växer fytoplankton och då blir det fler moln som gör det kallare
- Då minskar fytoplankton, det blir mindre moln och temperaturen stiger.
- Men om det blir för varmt skiktas sig vattnet och fytoplankton får inte tillräckligt med näring underifrån
- Då är vi inne i en positiv loop som förstärker temperaturhöjningen

© Per Flensburg

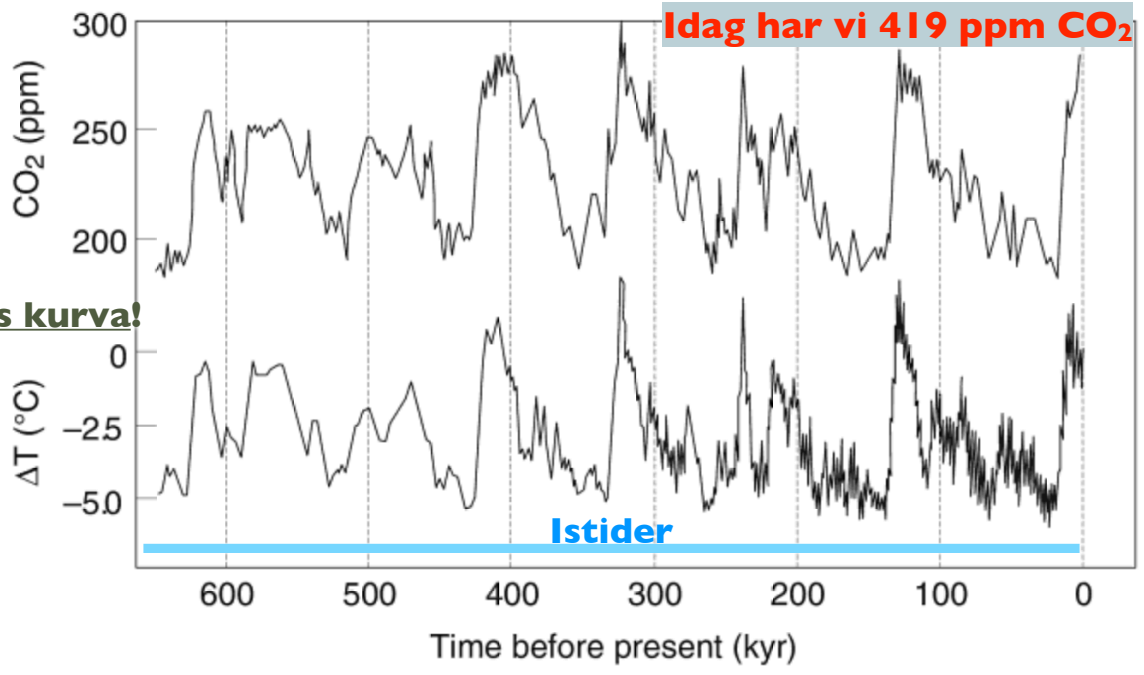
CLAW-HYPOTHESEN



© Per Flensburg

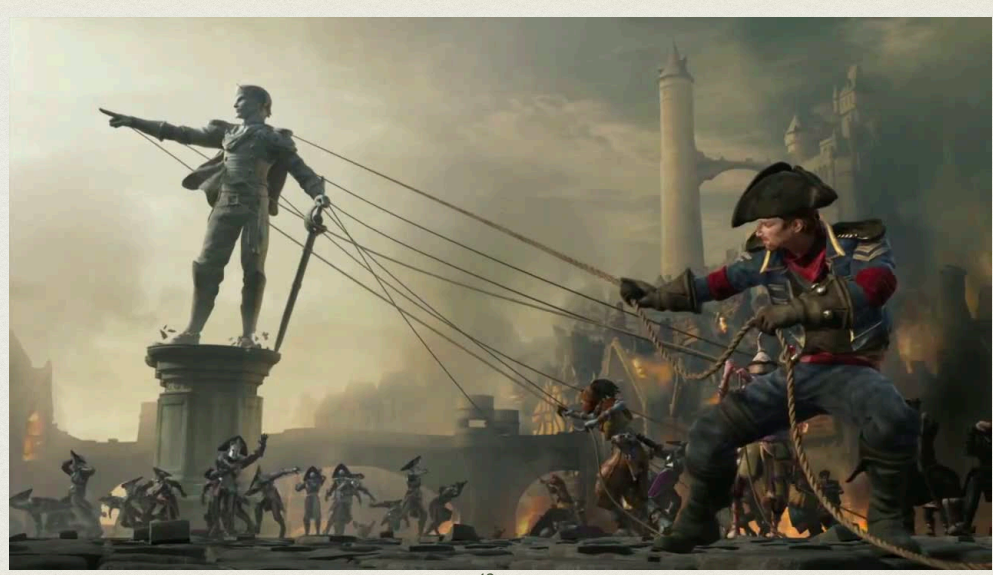
40

Jfr Al Gores kurva!



17. The Antarctic ice core record of atmospheric CO₂ and temperature change (rescaled here to represent approximately global temperature change).

REVOLUTIONER I KLIMATET

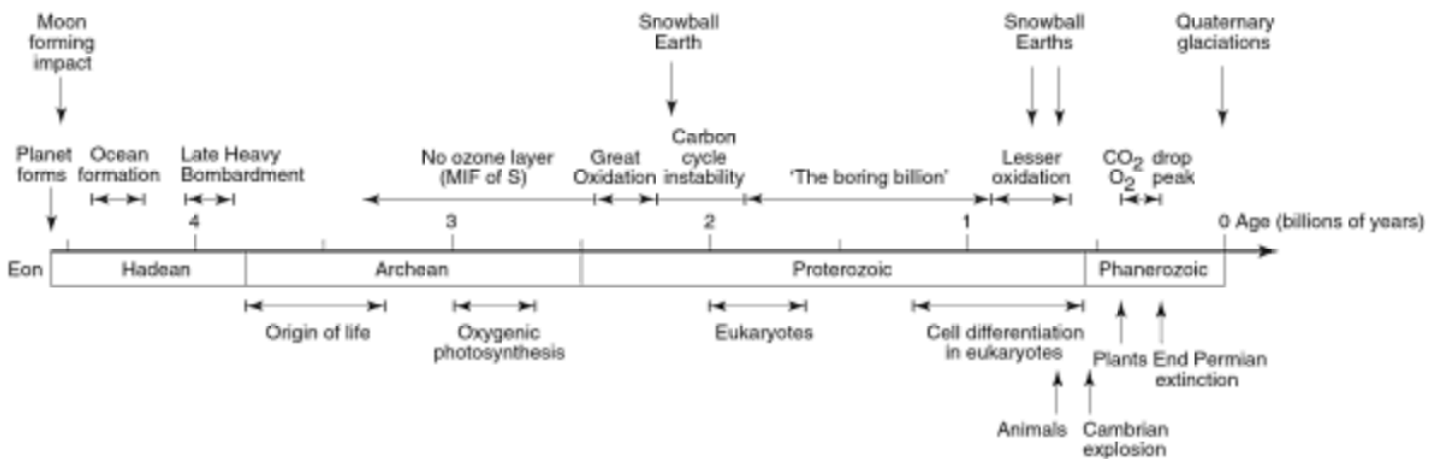


FRÅGA

- Hur kan det komma sig att Jorden är så annorlunda jämfört med Mars och Venus?
- Det beror på att livet på planeten har hjälpt till att forma den
- Vi ser spåren i urgamla klippor, i sedimentära bergarter och i fossil av många olika slag.
- På så sätt kan vi rekonstruera jordens utveckling
- Det sker genom att mäta förekomsten av olika blyatomer, som resultat av radioaktivt sönderfall i mineralet zirkon

© Per Flensburg

Earth System Science

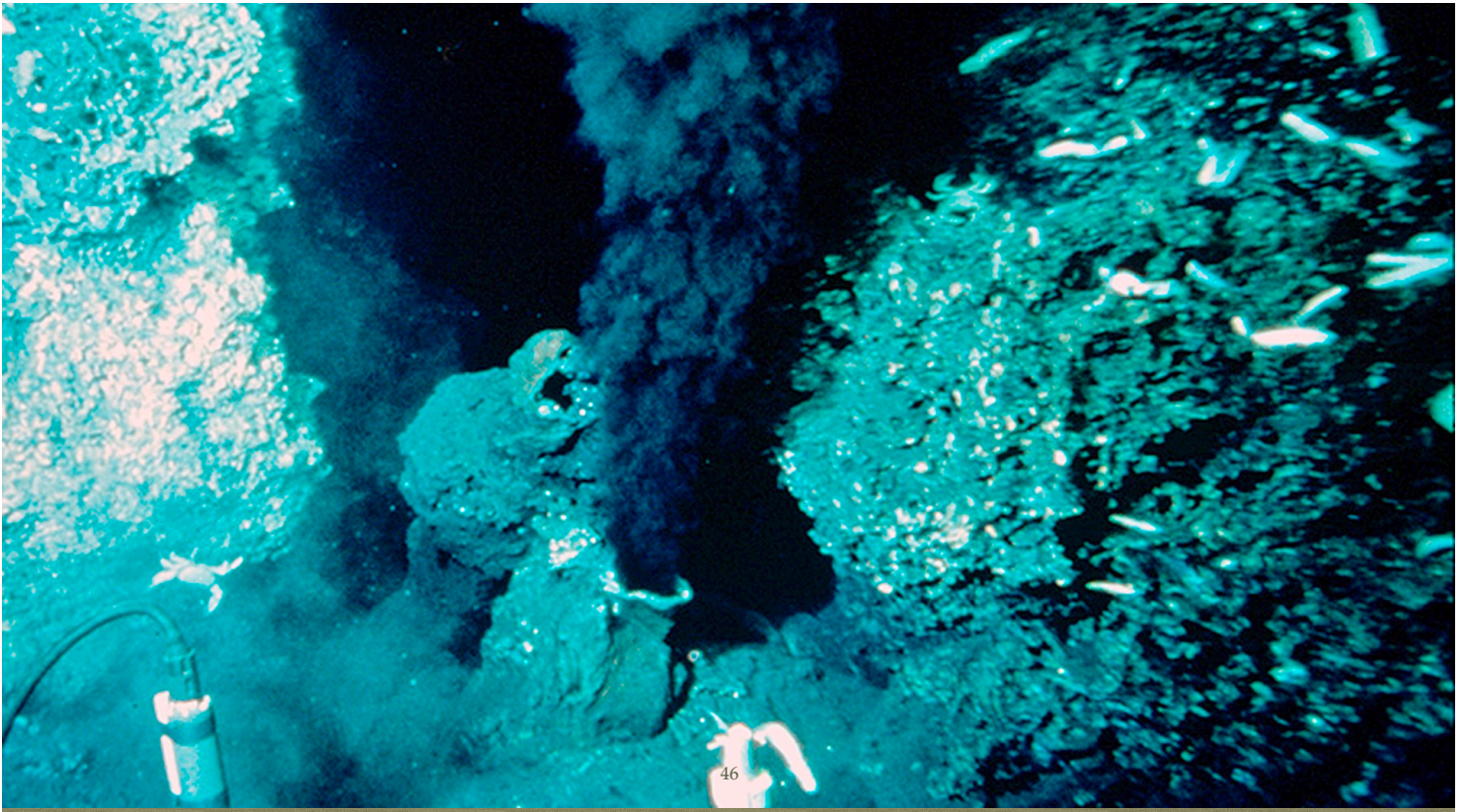


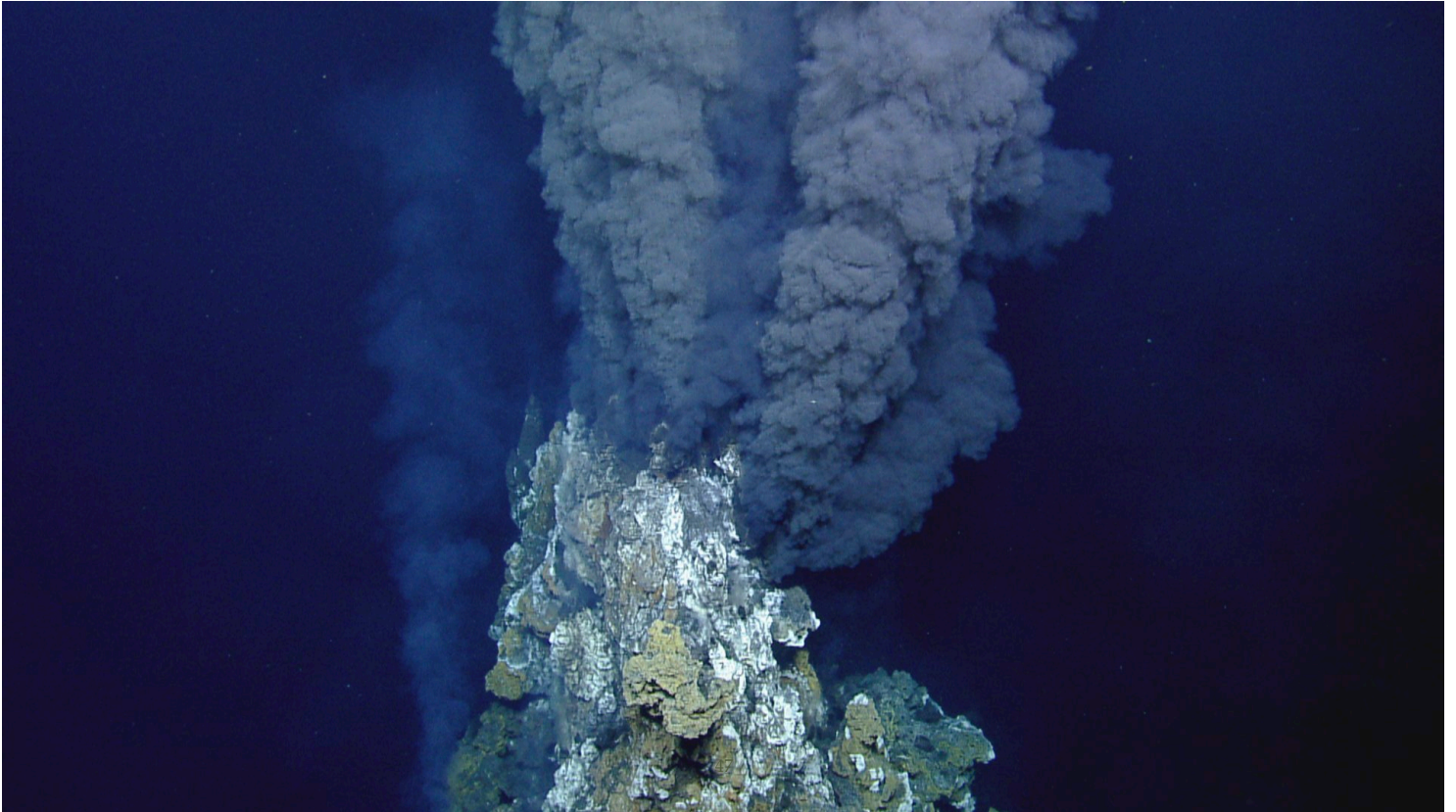
18. Timeline of Earth history showing key events in the environment (above the line) and the history of life (below the line).

VAD GJORDE ATT DET UPPKOM LIV?

- Kemisk energi typ skorstenarna i mittatlantiska ryggen. Men det räcker inte till planetarisk skala
- Väte och CO₂ kan skapa en metanbaserad livsform, men det är fortfarande för lite produktivitet
- Svaret är fotosyntesen som uppkom för ca 3,8 miljarder år sedan
- Men i början producerade inte fotosyntesen syre, däremot etablerades snabbt effektiva återbrukscykler
- Men som mest räckte det ändå inte till mer än max 10% av dagens produktivitet

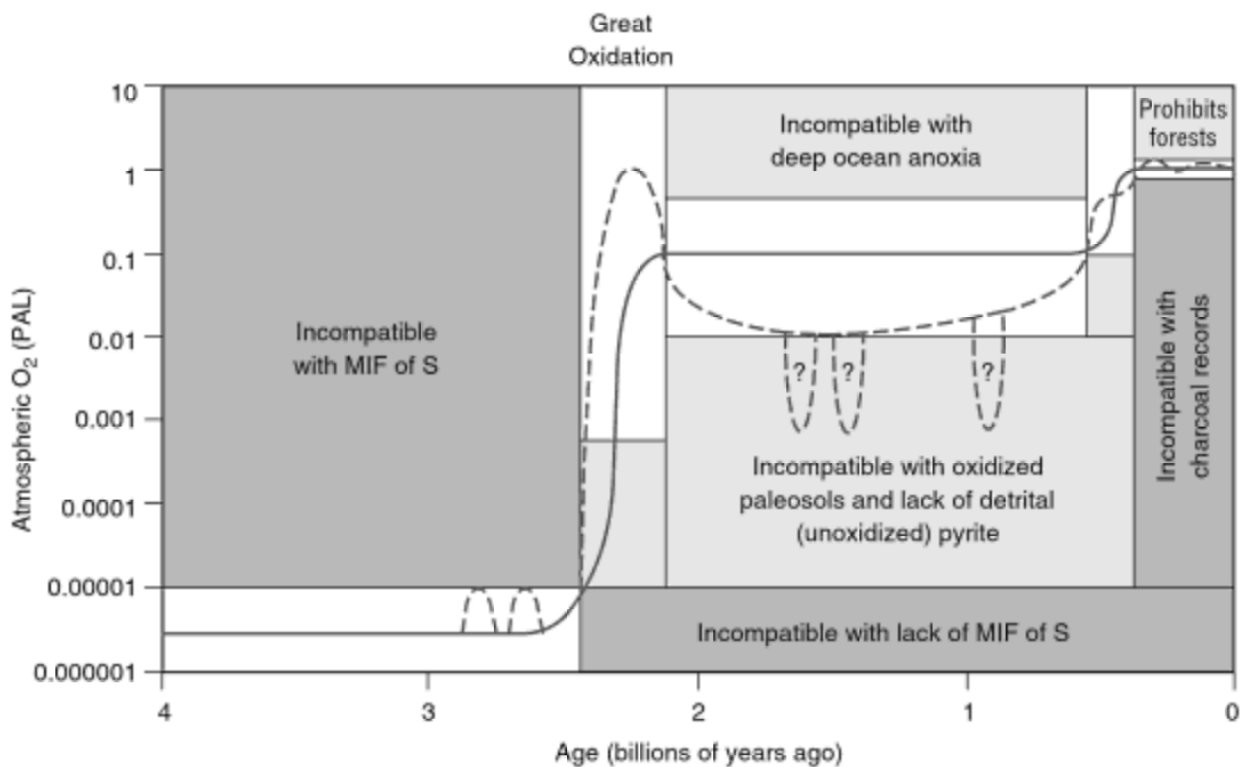
© Per Flensburg





FOTOSYNTES

- Fotosyntesen bygger på väteatomer som förenas med kolatomer. I den första fotosyntesen användes väte från olika kemiska föreningar, som fanns i havet och i atmosfären.
- Efter ungefär 1 miljard år skapades en fotosyntes som bygger på att vätet kommer från vatten. Denna kräver betydligt mer energi än den förra processen. Syre blev en biprodukt
- Cyanobakterier blev den stora syreproducenten men det tog ca 500 milj år innan det blev tillräckligt hög syrehalt. Det kan man se genom förekomst av olika svavelföreningar som indikerar att det inte fanns något ozonlager



19. Atmospheric oxygen over Earth history.

VAD HÄNDE UNDER GREAT OXIDATION?

- UV-strålning gör att metan och CO₂ bildar vatten, därmed hållande syret på låg nivå.
- Cyanobakterierna producerar så mycket syre att det skyddar mot UV-strålning och därmed byggs det upp ännu mer syre
- Samtidigt minskade koncentrationen av metan och det blev kallare. För 2,2 miljarder år sedan var hela jorden täckt av is.
- Syret i luften löste också också upp svavel i klipporna. Det gav upphov till surt regn, som löste upp fosfor och spolade ut det i havet
- Det var utmärkt gödning som satte fart på tillväxten ännu mer.

NÄSTA MILJARD?

- Superkontinenten Rodina bröts upp och landmassorna samlades nära ekvatorn för 750 miljoner år sedan.
- Den höga temperaturen gjorde att kiselvittringen ökade, CO₂-halten minskade och temperaturen sjönk
- Det medförde i sin tur en snöbollsjord
- Men efter några 10-tals miljoner år hade den tinat upp igen
- Men så hände det igen! För 635 milj år sedan.

DEN KAMBRISKA EXPLOSIONEN

- Efter nerisningen för 635 år sedan tog livet fart igen. Syrehalten steg i djuphaven och livet exploderade 540-515 milj år före vår tid: Den kambriska explosionen
- Växter och framförallt djur blev helt enkelt bättre på att ta upp näring för växternas del i form av CO₂ och fosfor och för djurens del, ja de åt växterna
- För 470 milj år sedan började det växa på land och för 370 milj sedan hade vi de första globala skogarna
- Detta fördubblade fotosyntesen och snabbade upp kretsloppet
- Men det förekom också tillfällen då livet nästan utrotades

MASSUTROTNING

- Det har förekommit både stora vulkanutbrott och kometnerslag, som nästan utrotat livet.
- För 232 milj år sedan var det några massiva vulkanutbrott på Kanadas västkust (som då låg på ett helt annat ställe!) och som ledde till ett mycket fuktigare klimat och som utrotade 95% av jordens liv.
- Berömd är också kometen som slog ner i Centralamerika för 65 milj år sedan och utrotade dinosaurierna.
- Frågan är: Håller människan på med något liknande nu?

© Per Flensburg

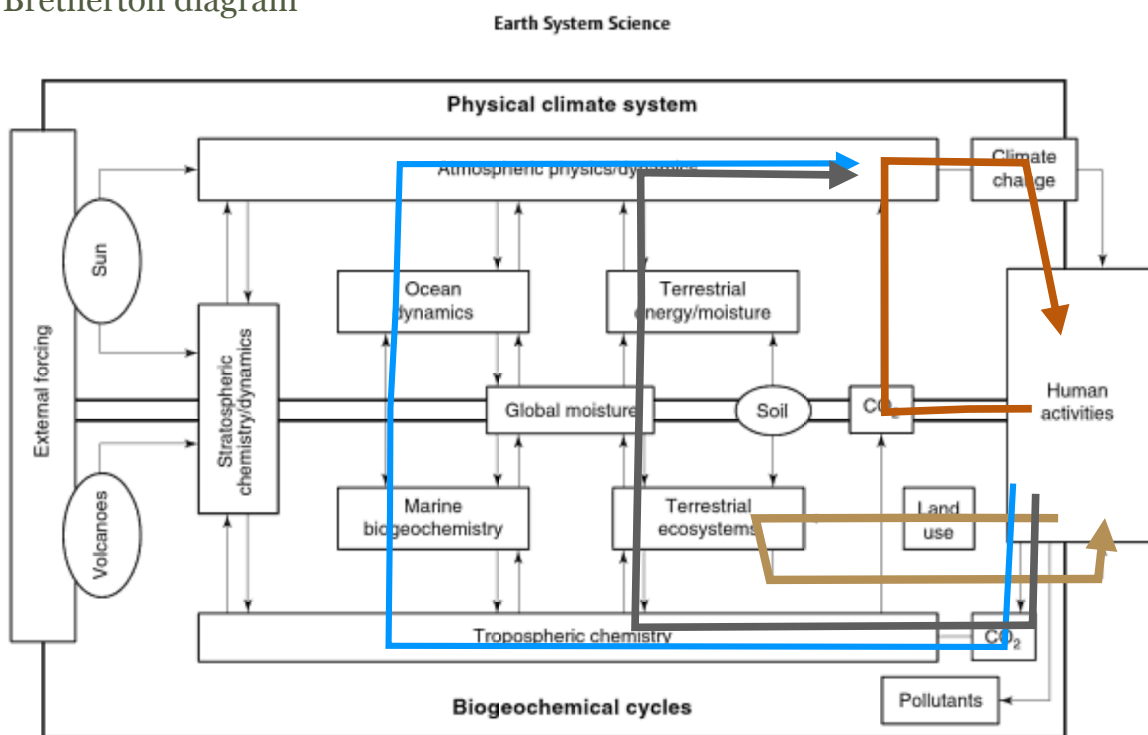
MÄNNISKANS PÅVERKAN

BREHERTONDIAGRAMMET

- Diagrammet ger en översiktsbild av hur Jorden fungerar

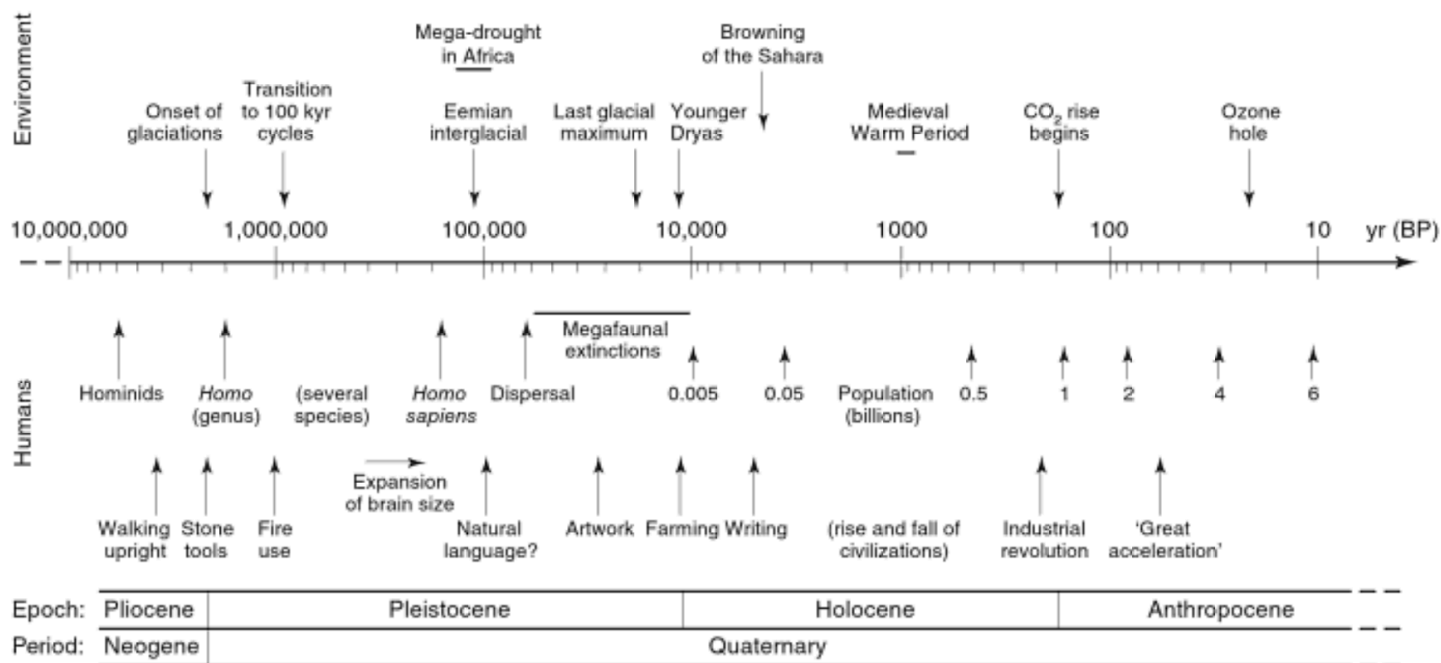
© Per Flensburg

Bretherton diagram



56

5. The 'Bretherton diagram' of fluid and biological Earth processes.



20. Timeline of human evolution set against environmental variability, on a logarithmic scale.

57

ELD, IS OCH GRÄS

- För ungefär 40 miljoner år sedan uppkom stora gräsmarker och under två perioder (för 17 och 6 miljoner år sedan blev de vitt spridda).
- En orsak kan vara bränder, ty gräsmark gör att elden både sprider sig och uppkommer lättare. Täta bränder gör att skogen inte kan återbildas och då har vi en positiv feed-back
- För 2,6 miljoner år sedan (då människans förfäder började gå upprätt) uppkom en serie istider som medförde dels massdöd av växter, men också specialisering för att kunna överleva.
- När människan började använda elden (för 1,5 milj år sedan) gav det helt nya förutsättningar

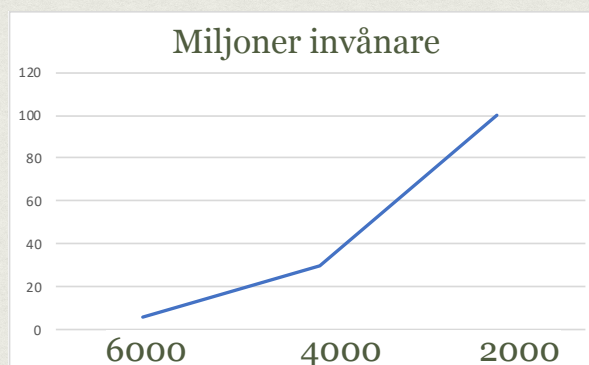
ELD OCH MÄNNISKOR

- När människan började använda elden fick hon mer näringsrik och omväxlande mat. Hennes hjärna utvecklades också.
- När man började använda stenredskap blev det ännu lättare att leva.
- Homo Sapiens kom för ungefär 200 000 år sedan.
- De var så effektiva jägare att flera arter utrotades
- Samtidigt infördes en specialisering och arbetsdelning i boplatserna. Några var bättre stenhuggare än andra medan andra var duktiga på att jaga.
- Men man måste lita på varandra, man måste ha en moral.

© Per Flensburg

JORDBRUK

- De första jordbruken uppkom för ungefär 10 500 år sedan, men slog genom på bred front först för omkring 6000 år sedan.
- Jordbruket gjorde att folkmängden ökade.



© Per Flensburg

JORDBRUK

- Jordbruket var känsligt för klimatförändringar och många civilisationer dog faktiskt ut.
- Jordbruket förbrukade mer energi men producerade också mer avfall.
- Det fanns inget naturligt kretslopp annat än via gödsel
- Platon anmärker på jorderosion
- En hypotes kring romarrikets fall är att det fördes in stora resurser till städerna från den omkringliggande landsbygden, men inget fördes tillbaka.
- Jorden blev utarmad och man kunde inte längre föda alla människor

TIDIG ANTROPOCENE

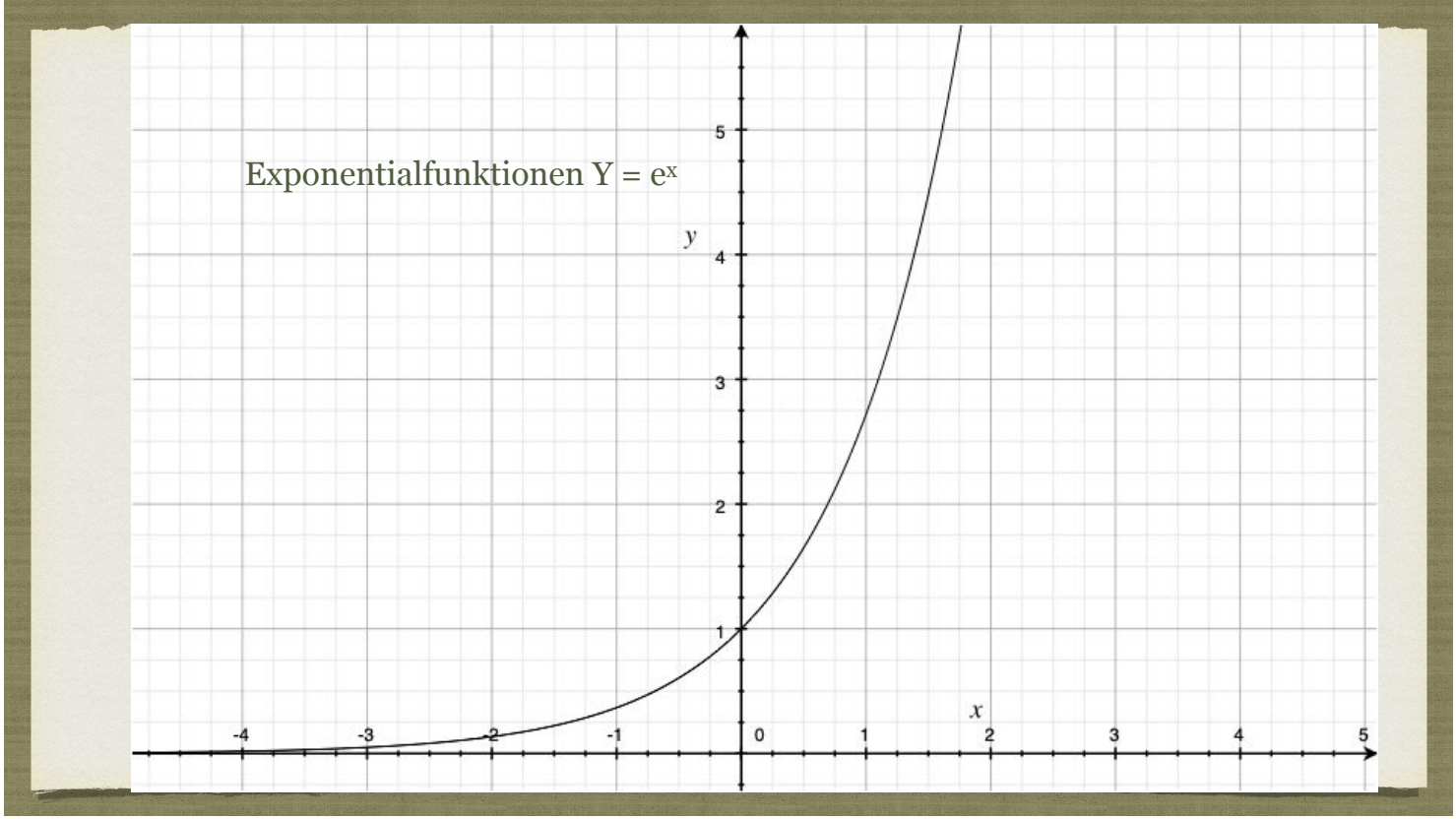
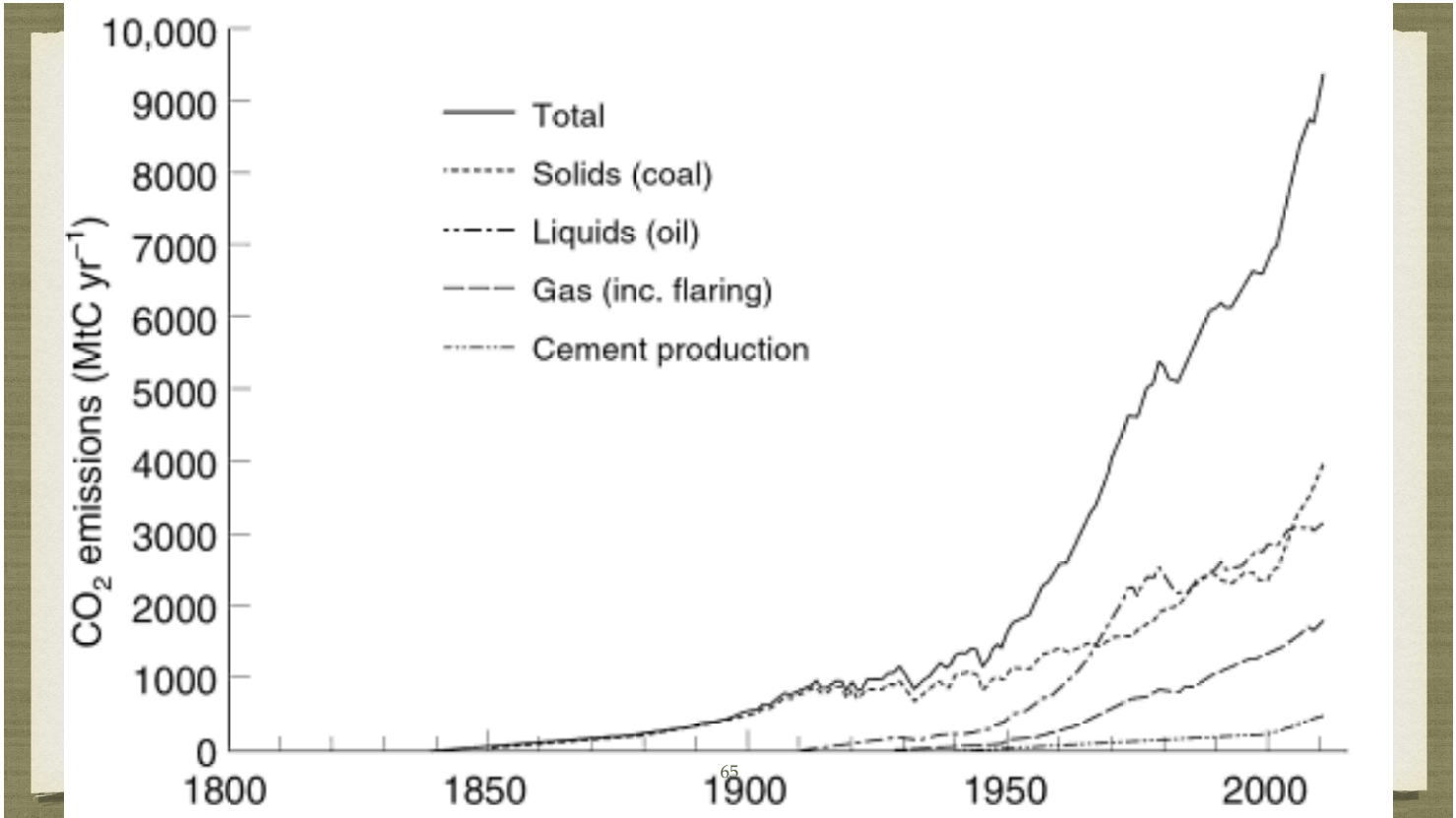
- En del forskare (Bill Ruddiman) menar att Antropocene startade då jordbruket tog fart.
- Man högg ner skog för att både få mark och bränsle
- Det gjorde att CO₂-halten ökade i atmosfären med början för 8000 år sedan
- Bevattning av risfält skapade ökande utsläpp av metan för 5000 år sedan
- Det fanns också naturliga variationer t.ex. på grund av jordens bana, solaktivitet, jordaxelns lutning etc.
- För 6000 år sedan var Sahara grönt, men 1000 år senare var det uttorkat.
- Även detta spädde på CO₂-halten i atmosfären.

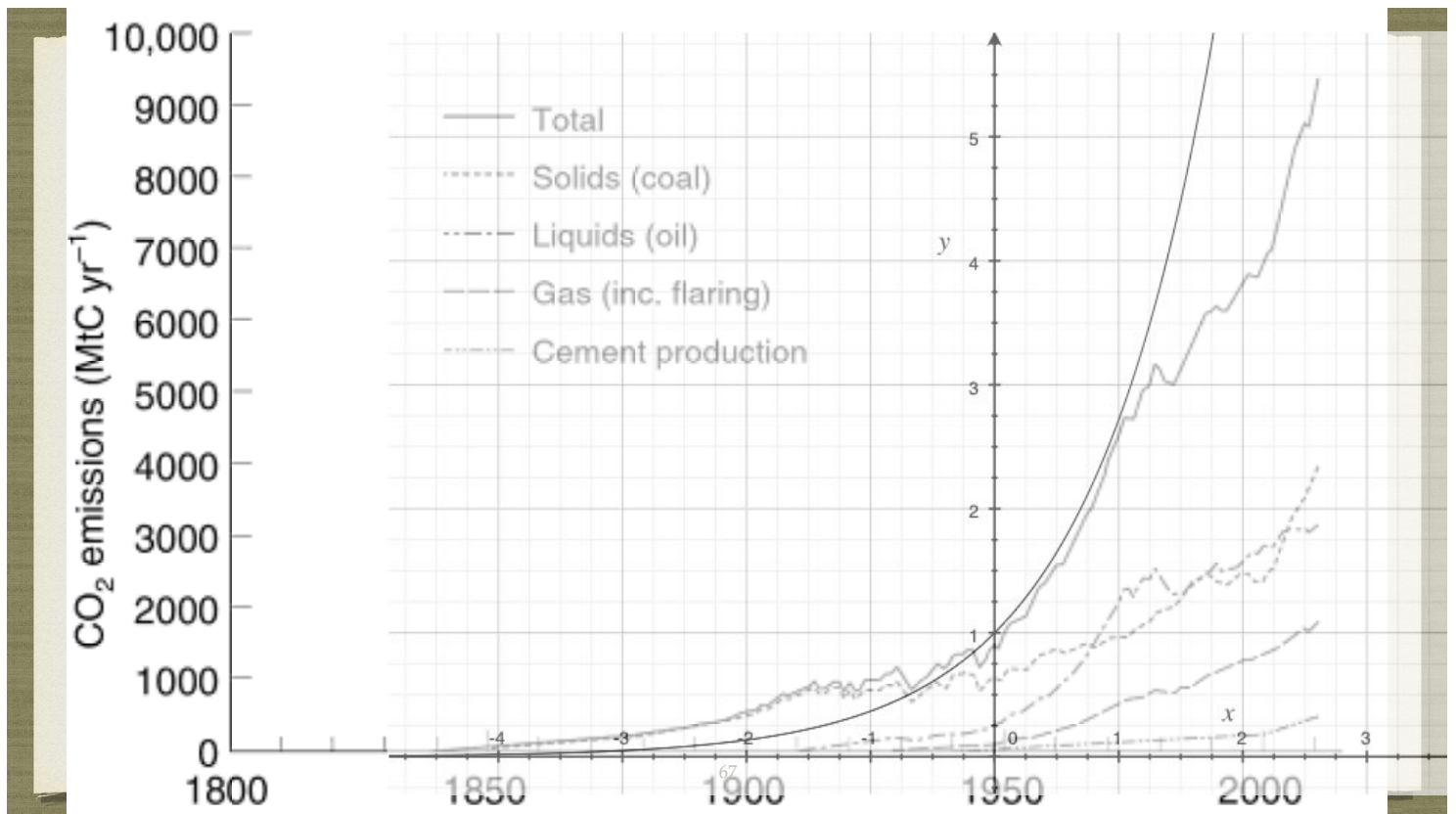
TIDIG ANTROPOCENE

- Vi har en god uppfattning om klimatet de senaste 2000 åren pga dendrokronologi, iskärnor och annat
- Varm medeltid: 950-1250
- Lilla istiden: 1550-1850
- Ruddimans tanke om att människan storskaliga förvandling av jorden började för flera tusen år sedan är kontroversiell. De förindustriella människorna hade inte så stor tillgång till energi att de stora förändringarna kunde komma till stånd.

INDUSTRIALISERINGEN

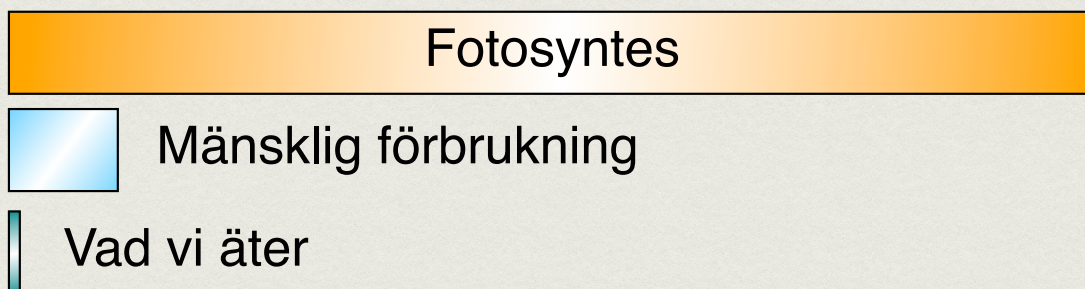
- Förbränning av kol behövdes till ångmaskiner och järnframställning
- Olja behövdes senare till fordon och uppvärmning
- Energiförbrukningen ökade, folkmängden ökade och påfrestningarna på Jorden ökade
- På nästa bild ser vi hur utsläppen ökade. Det är en exponentiell ökning.





ENERGIKONSUMTION

- Staplarna nedan visar relationen mellan den energi som fångas i fotosyntes och den energi vi människor förbrukar
- Den påverkar en hel del av de cykler vi pratat om tidigare



MARKANVÄNDNING

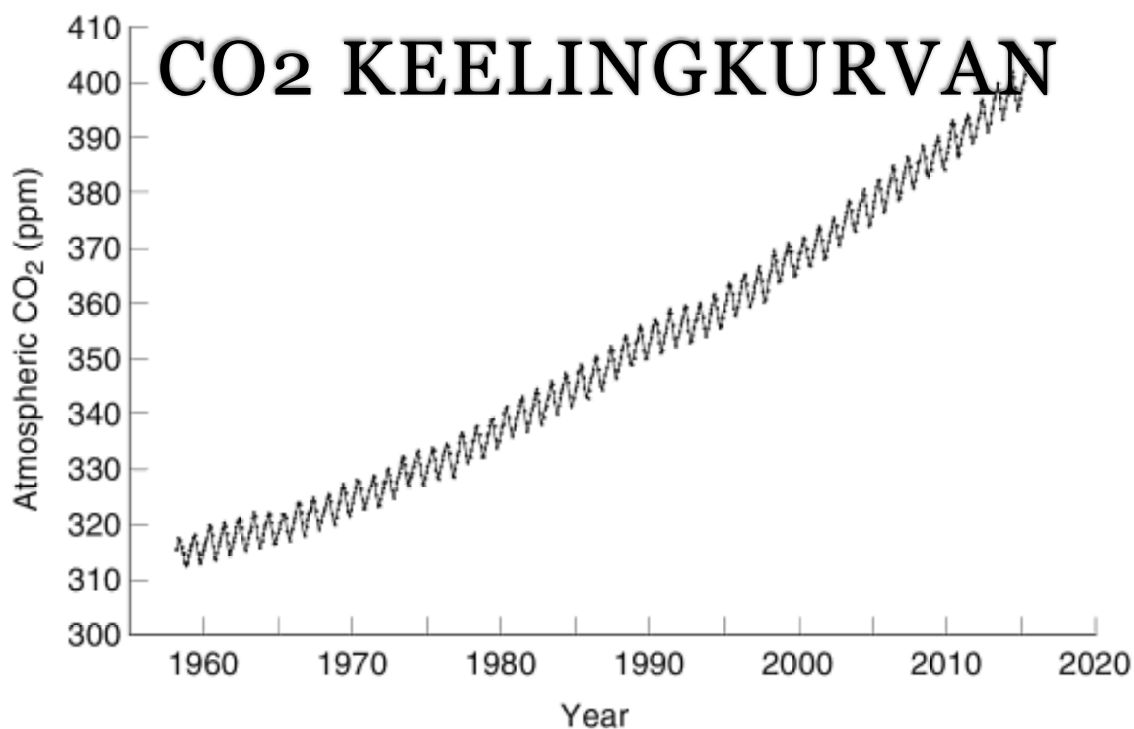
- Den 2:a och 3:e miljarden människor fick mat genom att man utökade mängden odlad mark (traktorer, bevattning, ogräsmedel)
- Den 4:e och 5:e miljarden fick mat genom konstgödning och växtförädling
- Den 6:e och 7:e miljarden får mat genom att tillämpa alla dessa saker samtidigt
- Vi har ungefär 1,4 miljarder hektar odlingsbar mark men däremot 3 miljarder betesmark. Det sista har bidragit väldigt mycket till avskogningen

KVÄVE OCH FOSFORCYKLERNA

- Vi använder fossil energi för att framställa kväve- och fosforgödning
- Detta har fördubblat det användbara kvävet och tredubblat användbar fosfor
- Mycket av detta hamnar i vattnet där gamla cyanobakterier kan slå ut andra livsformer. Vattnet blir syrefattigt och andra livsformer dör
- En del kväve blir till nitrit (som är en växthusgas) och halten har ökat från 272 till 310 ppb
- Även metanutsläppen ökar, från 800 ppb till 1800 ppb

KOLCYKELN

- Innan den industriella revolutionen var CO₂-flödet mellan land och vatten ungefär i balans.
- Därefter började vi dels använda fossilt bränsle till allt möjligt och dels hugga ner en massa skogar för att få betes- och åkermark. Plus industritomter!
- CO₂-halten ökade dramatiskt, se Keeling-kurvan på nästa bild
- Men utsläppen är faktiskt dubbelt så stora, hälften av all koldioxid löses upp i havet.
- I själva verket skulle havet kunna ta hand om all CO₂ om det vore bättre cirkulation och havet inte blev varmare.



KOLSÄNKEN

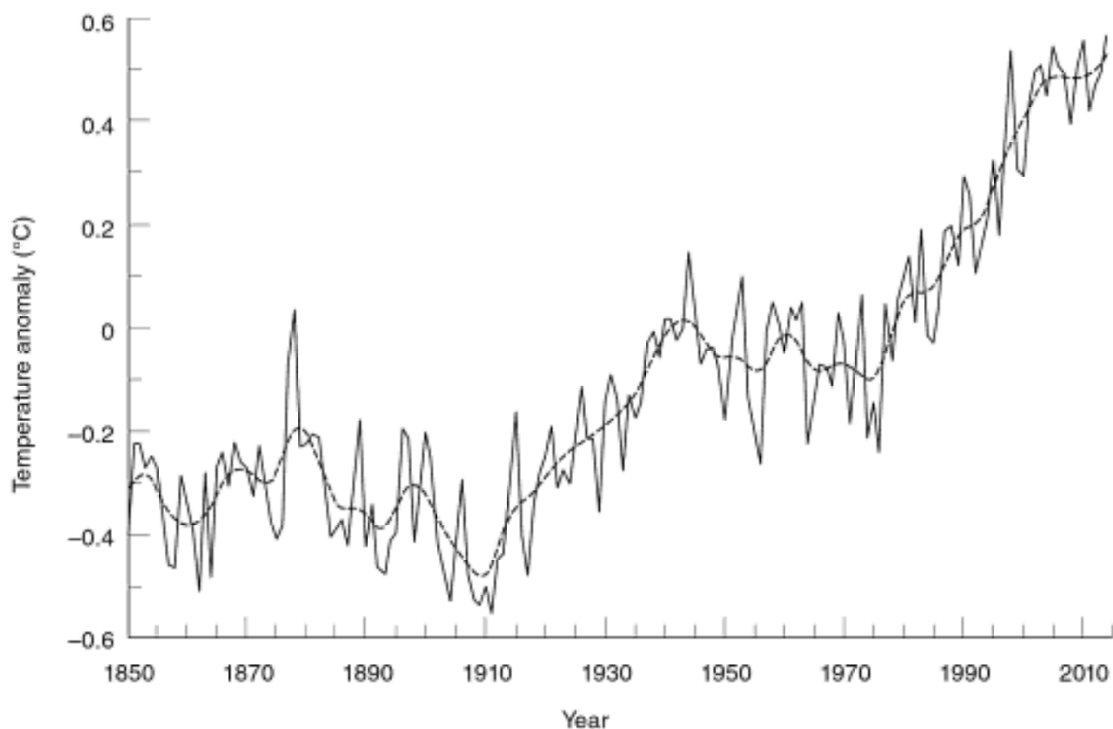
- Haven är den största kolsänkan.
- De nordliga barrskogarna innehåller också mycket kol, men den stigande temperaturen kan vara negativ.
- Det är ett komplicerat samband mellan växtlighet och CO₂-utsläpp och man kan inte generellt säga att all skog binder CO₂. I en del fall är det tvärtom.
- Men vore det inte för dessa kolsänken i hav och på land hade CO₂halten idag varit över 500 ppm.

SVAVELPARTIKLAR

- Små svavelpartiklar i atmosfären från vulkanutbrott eller förbränning av t.ex. brunkol sprider solljuset och reflekterar en del ut i rymden. Det kyler ner jorden.
- Men svavlet gör att regnen blir surare, haven blir surare och marken blir surare. Kapaciteten att ta upp CO₂ minskar då.
- Vattenånga är en potent växthusgas, men den pratar man inte om.
- Den bildar moln som reflekterar värmen och gör jorden svalare, samtidigt som vattenångan gör den varmare. Är det manne balans??

TEMPERATUREN

- I kurvan på nästa bild, som baseras på mätningar sedan 1850 ser vi att temperaturen visat en konstant ökning sedan omkring 1980.
- På 40 år har den stigit $0,5^\circ$. All den CO_2 som orsakat detta finns kvar i atmosfären!
- Även om alla utsläpp går ner till noll, så fortsätter ändå denna stigning om vi inte tar ut CO_2 ur atmosfären. 2060 har vi nått $1,5^\circ$ stigning.
- De minskande glaciärerna och polarisarna gör dock att temperaturen stiger ännu mer (Negativ albedo-effekt)



23. The instrumental global average temperature record. HadCRUT4 data expressed as anomalies from 1961-90: annual mean (solid line), ten-year running mean (dashed line).

VART ÄR VI PÅ VÄG?

77

MODELL AV JORDEN

- För att veta vart vi är på väg måste vi ha en modell av jorden. Det började med väderleken
- Sedan lade man till fler och fler faktorer såsom CO₂-utsläppens påverkan, svaveldioxids påverkan på molnen och människans ändrade användning av jorden
- Modellen testas med befintliga data och den visar att enbart naturliga faktorer kan inte förklara de senaste 50 årens temperaturhöjning. I själva verket hade det varit en liten sänkning om inte människan hade påverkat.
- Det är alltså mänskliga aktiviteter som står för temperaturhöjning, men den har planat ut de senaste 15 åren därför att haven klarar av att ta upp mer värme än man räknat med.

MODELL AV JORDEN

- Det är dock så dyrt att köra dessa modeller att man inte kan göra det för ofta.
- De mest komplexa modellerna har en skala på århundraden och de tar inte hänsyn till de långa processerna
- Så finns det medelkomplexa modeller med tusen till en miljon år
- Och riktigt långa med flera miljoner år
- Till sist har vi modeller avsedda för att simulera beslutsfattande, "integrated assesement models"
- Men: En modell är en förenklad beskrivning av verkligheten framställd i ett visst syfte

BESLUTSMODELLER

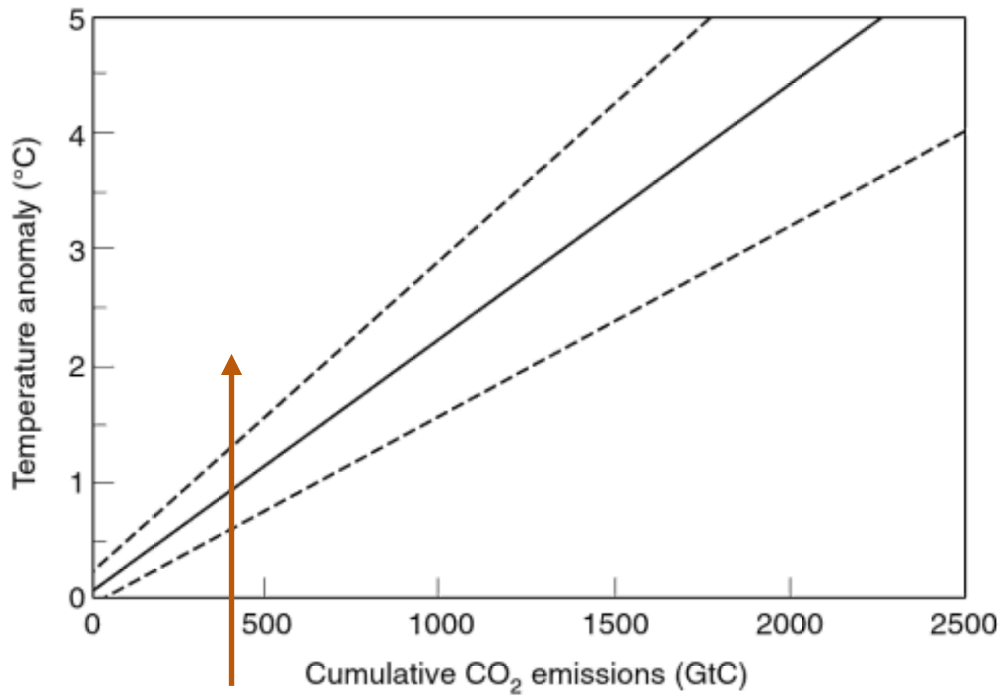
- De är ofta mycket enkla.
- Kan t.ex. handla om vad som händer om man beskattar CO₂-utsläpp.
- De bygger i regel på fullt rationellt beslutsfattande
- Men de kan köras många gånger för att se utfallet vad varje handlingssalternativ och olika antaganden
- Att förutsäga vädret är extremt beroende av initialvillkoren (kaosteori) medan för att förutsäga klimatet är randvillkoren (CO₂-halt, svavelpartiklar etc) viktigare.
- Problemet är att förutsäga människors beteende...

SCENARIER

- Business as usual: CO₂ över 1000 ppm 2100!
- Utsläppen MÅSTE ner till noll. Möjligen kan man i varje fall kortsiktigt acceptera 10% av nuvarande nivå eftersom det är vad flödet ner till djuphavet står för. Då stabiliseras CO₂-halten till 560 ppm.
- Mycket optimistiska prognoser säger 450 ppm
- Men ska vi hålla oss till 2°-målet **måste** vi ta bort CO₂ från atmosfären
- För detta finns ingen affärsmodell och ingen välutvecklad teknik

TEMPERATUREN

- Ökningen av temperaturen beror linjärt av den ackumulerade mängden CO₂ i atmosfären. Figur i nästa bild
- 500 miljarder ton CO₂ ger 1° temperaturhöjning
- Ska vi hamna under 2° höjning får vi släppa ut högst 1 000 miljarder ton CO₂.
- Världens alla kända tillgångar till fossilt bränsle (5 000 miljarder ton) ger en höjning på ca 10°
- Men för de kommande decennierna kan vi inte göra mycket annat än att reducera utsläppen.
- Havens förmåga att ta upp CO₂ varierar och det kan påverka temperaturen



24. Relation of cumulative carbon emissions to global temperature change from a range of recent Earth system models.⁸³

Från DN

KOLDIOXID (2 APR):

421 ppm

+6% på tio år

Läs mer

JORDENS TEMPERATUR:

+1,1 °C

sedan förindustriell tid

Läs mer

HAVEN:

+25 cm

högre än 1880

Läs mer

ARKTIS HAVSIS:

-30%

sedan 1979

Läs mer

ENERGI:

87%

från fossila bränslen

Läs mer

VÄRLDEN MÖTS:

209 dagar

till nästa klimatmöte

Läs mer

UTSLÄPPEN MÅSTE SLUTA HELT OM:

7 år, 263 dagar, 5 timmar, 8 min, 9 sek

Temperaturökning
sedan förindustriell tid

Världen:
+1,20 °C



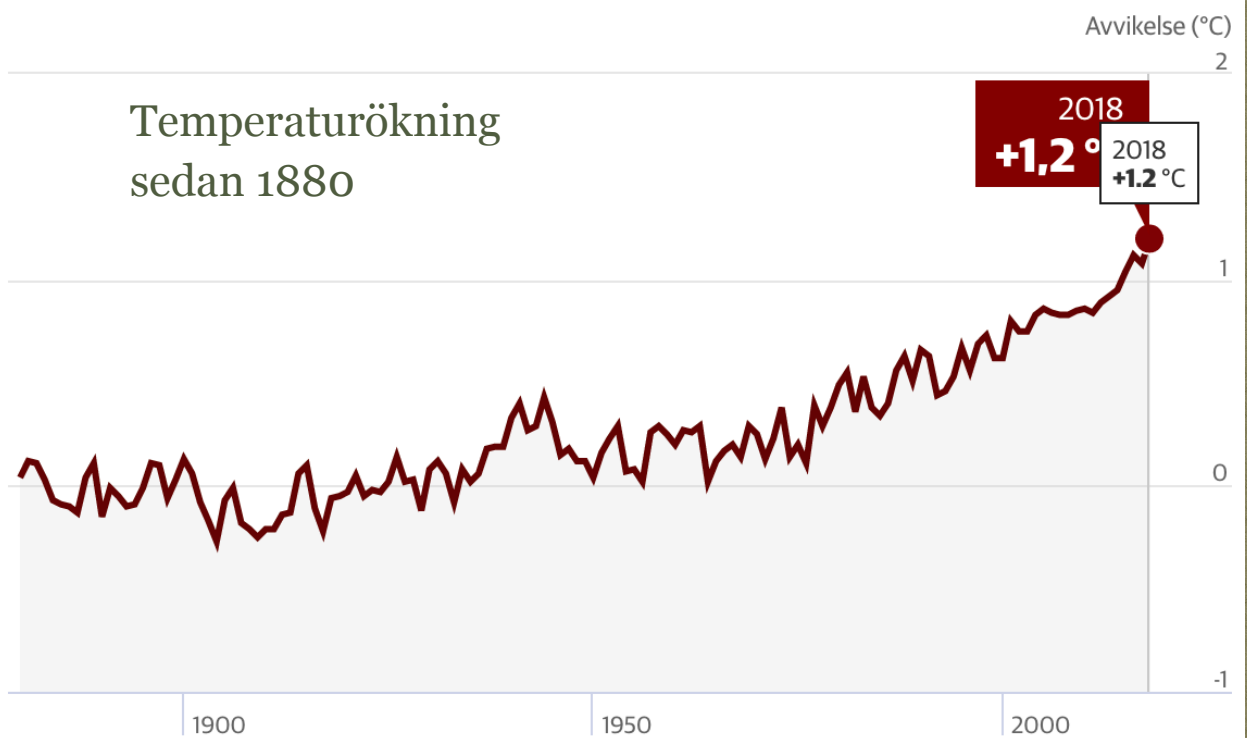
Sverige:
+2,16 °C



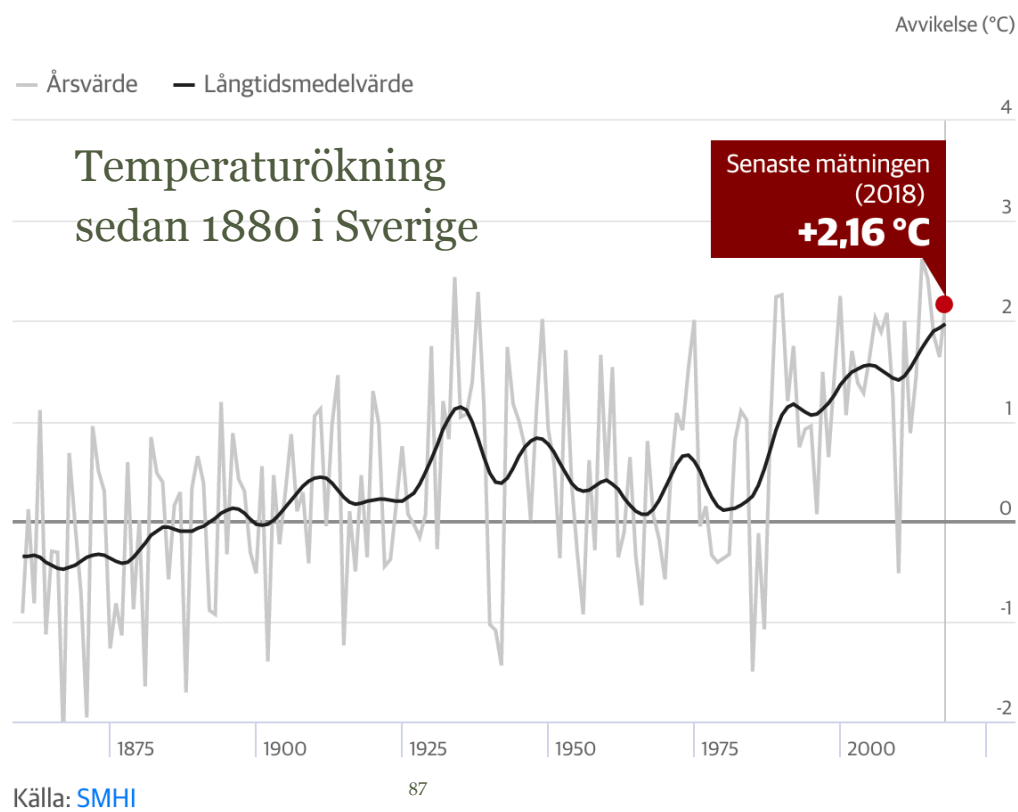
Källa: [EEA/Gisstemp/Nasa](#) och [SMHI](#). Värdet för världen visar den genomsnittliga ökningen för hela planeten, som länderna enligt Parisavtalet helst vill hålla under 1,5 grader.

85

Temperaturökning
sedan 1880



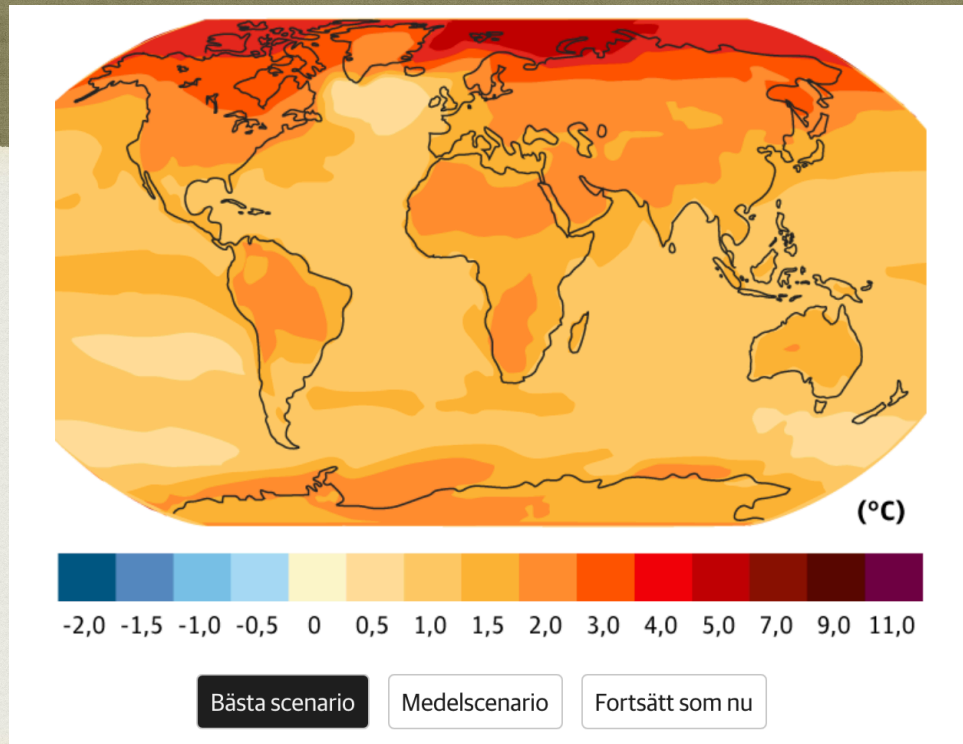
Källa: [EEA/Gisstemp/Nasa](#). Temperatur ⁸⁶ nära ytan, alltså land+hav.



BÄSTA SCENARIO

- Mycket kraftfull klimatpolitik.
- Koldioxidutsläppen kulminerar omkring år 2020. Utsläppen av metan minskar med 40 procent.
- Låg energiintensitet.
- Minskad användning av olja.
- Jordens befolkning ökar till cirka 9 miljarder.
- Ingen väsentlig förändring i arealen betesmark.
- Ökning av arealen jordbruksmark på grund av bioenergiproduktion.
- Utsläppen av koldioxid ligger kvar på dagens nivå fram till 2020 och kulminerar därefter. Utsläppen är negativa år 2100.

PARISSCENARIET



© Per Flensburg

89

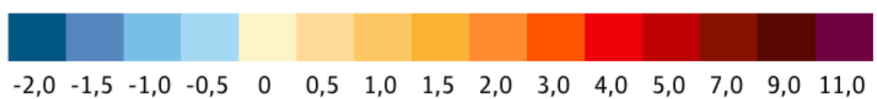
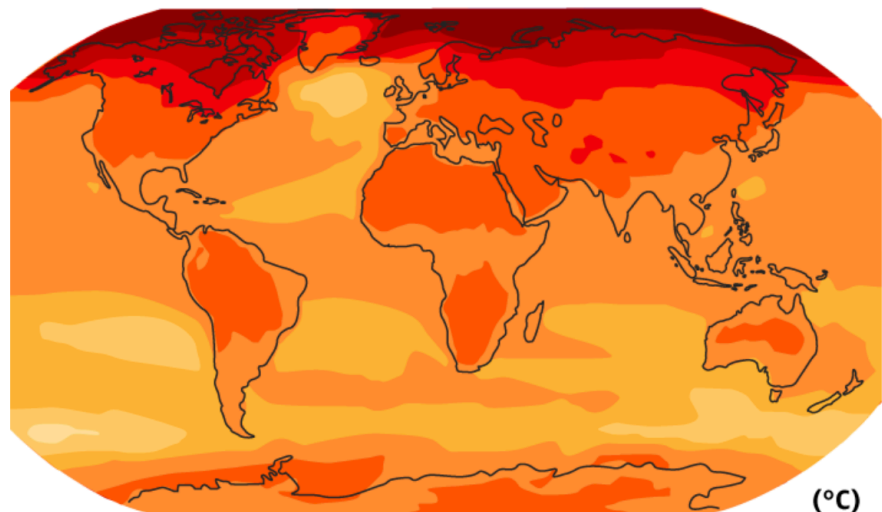
MEDELSCEENARIO

- Kraftfull klimatpolitik.
- Koldioxidutsläppen ökar fram till 2040.
- Lägre energiintensitet.
- Omfattande skogsplanteringsprogram.
- Lägre arealbehov för jordbruksproduktion, bland annat till följd av större skördar och förändrade konsumtionsmönster.
- Jordens befolkning ökar till cirka 9 miljarder.

© Per Flensburg

90

MEDELSCEENARIET



Bästa scenario

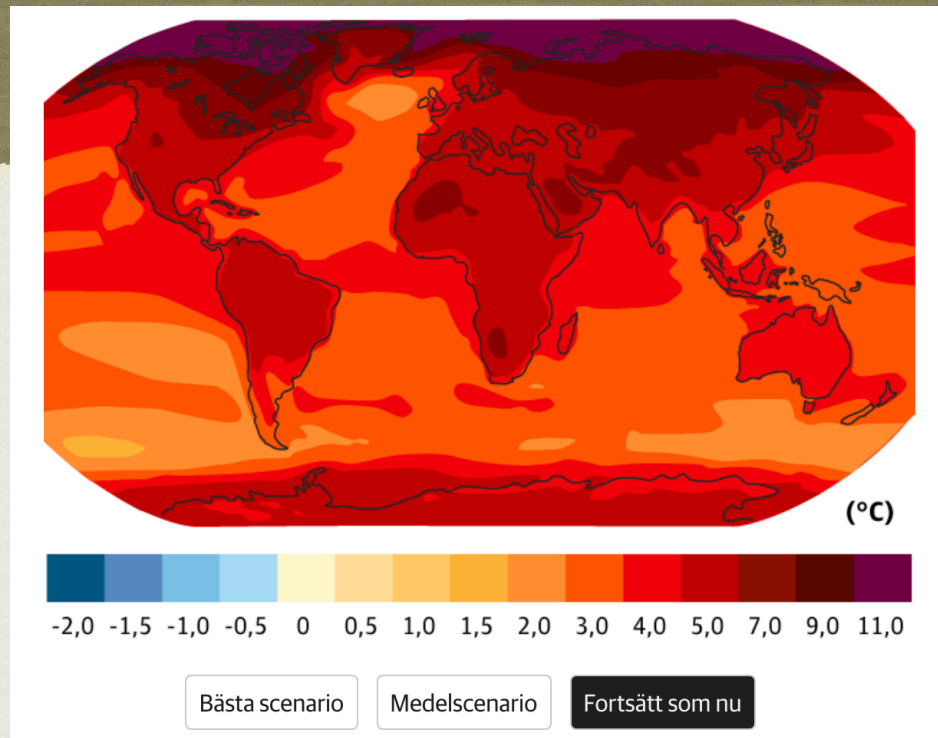
Medelscenario

Fortsätt som nu

FORTSÄTT SOM NU

- Fortsatt höga utsläpp av koldioxid, tre gånger dagens vid år 2100. Metanutsläppen ökar kraftigt.
- Jordens befolkning ökar till 12 miljarder vilket leder till ökade anspråk på betes- och odlingsmark för jordbruksproduktion.
- Teknikutvecklingen mot ökad energieffektivitet fortsätter, men långsamt.
- Stort beroende av fossila bränslen. Hög energiintensitet.
- Ingen tillkommande klimatpolitik.

FORTSÄTT SOM NU

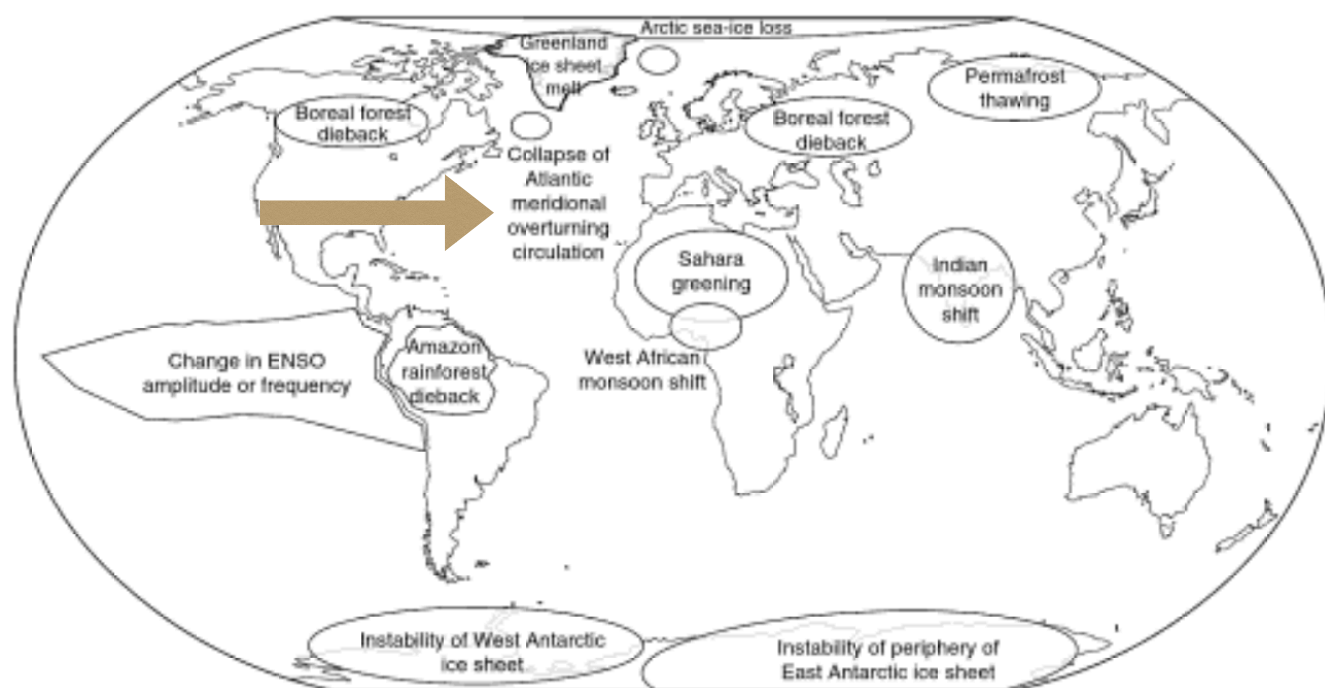


FÖRDELNING AV UPPVÄRMNING

- Uppvärmningen sker inte likformigt. Den är mycket högre i Arktis
- Varmare luft kan hålla mer vatten så klimatet blir överlag våtare
- Samtidigt kommer öknen att sprida sig norrut och medelhavsländerna blir mer eller mindre öknar
- Stora delar av jorden blir obrukbara och vi får stora mängder klimatflyktingar

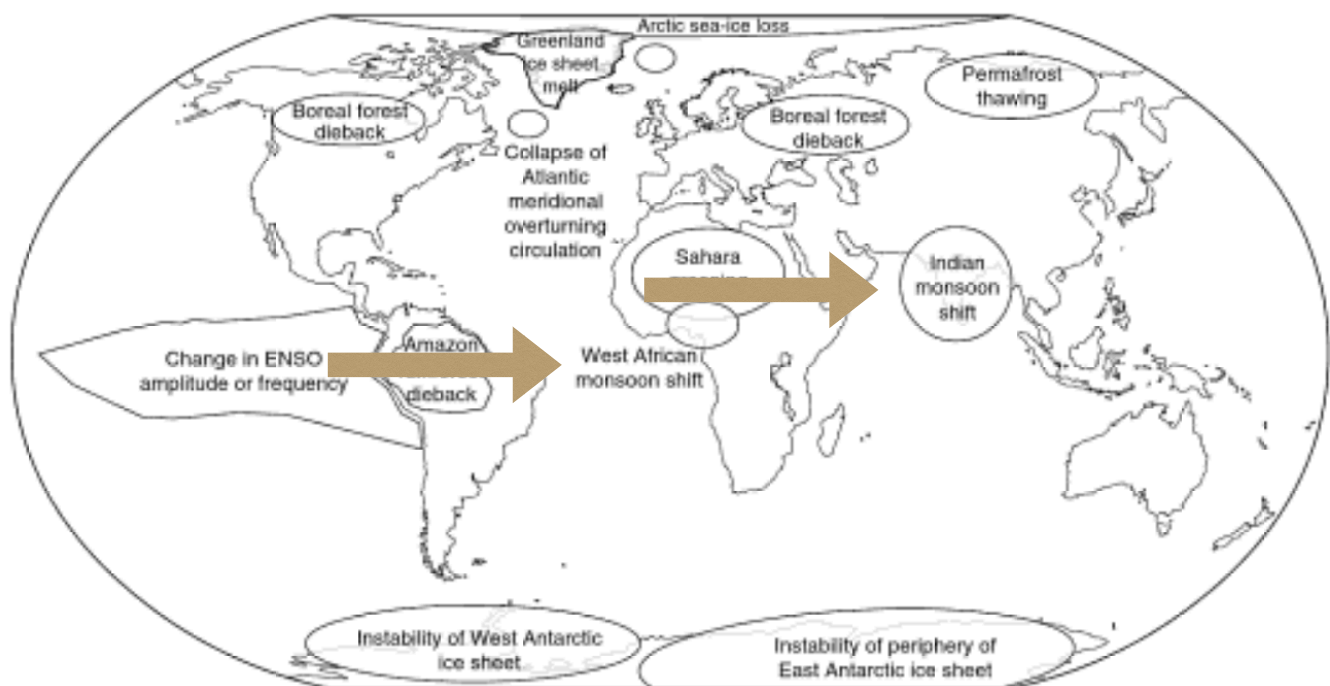
TIPPING POINTS

- I delar av jordsystemet kan det bli så kraftiga positiva feed-backloopar att systemet tippas över i ett nytt stabilt tillstånd
- I planetarisk skala har det funnits snöbollsjordar och deras upplösning
- Men nu tror man att det bara berör vissa delsystem på jorden
- Men verkan kan bli nog så omfattande



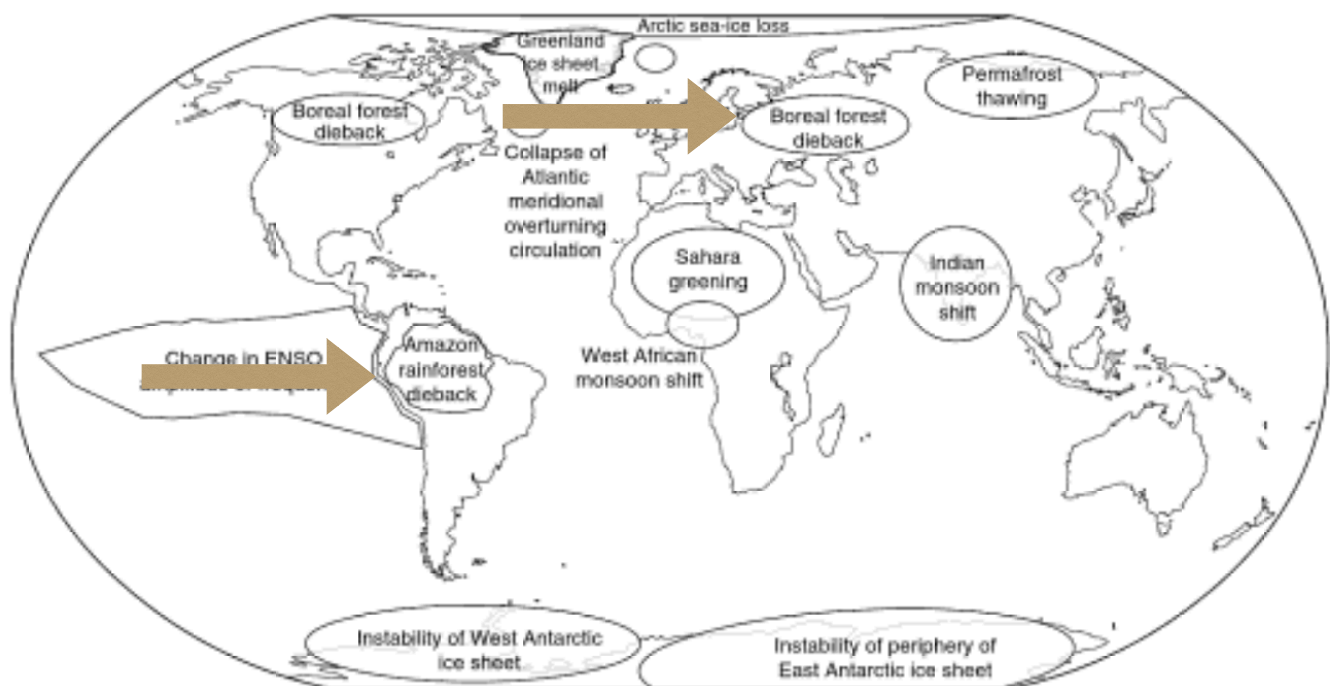
ATLANTEN

- Ytvatten från södra Atlanten flyter norrut, Golfströmmen
- Det tar med sig salt vatten söderifrån och då det blir kallare sjunker det neråt och skapar en undervattenström i motsatt riktning
- Om nu en massa is smälter på norra halvklotet blir vattnet mindre salt och det sjunker inte till botten.
- På så sätt kan Golfströmmen upphöra eller åtminstone försvagas.
- Istiderna kan vara tecken på naturliga variationer i t.ex. nederbörd



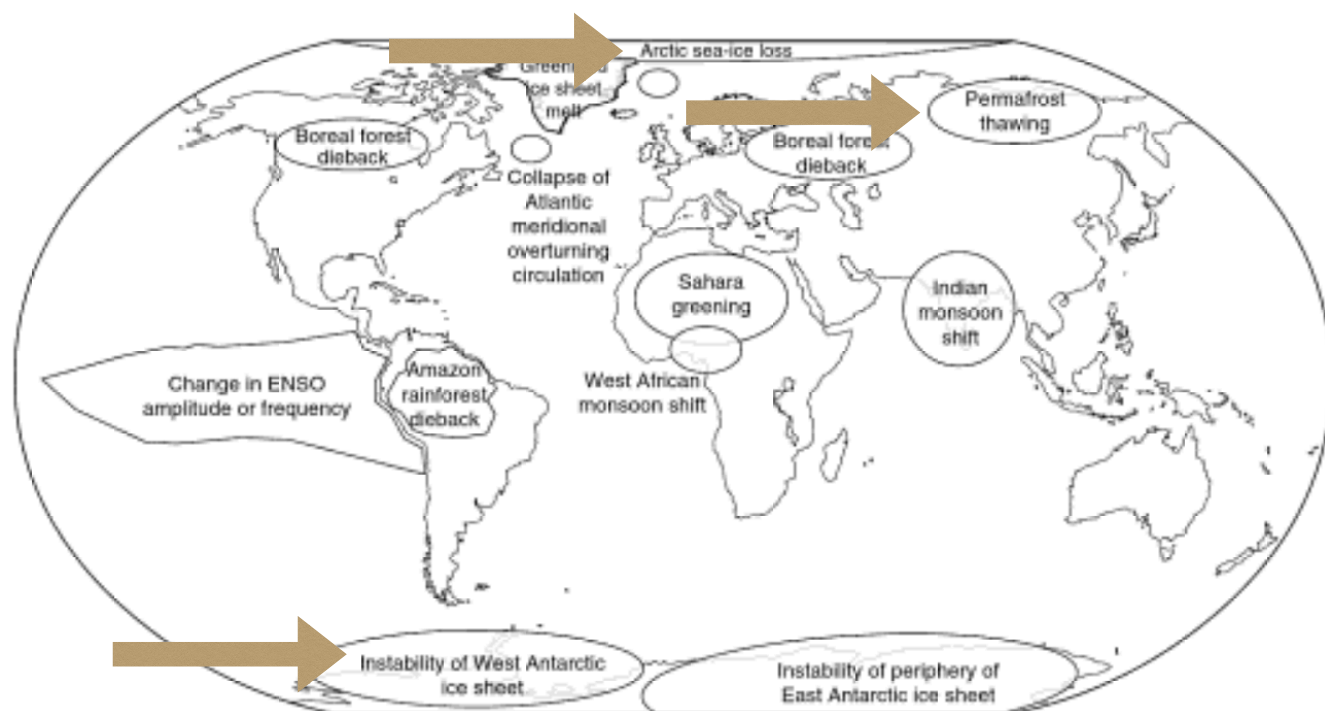
MONSUNER

- Monsuner beror på att luften över land värms mer än över havet. Då kommer fuktig luft in över landet och förorsakar regn.
- Om nu havet blir varmare blir monsunen mindre kraftig och orkar inte så långt in över landet.
- Det gör att vissa regioner (Centralafrika och Indien) kan bli öken



SKOGARNA

- Amazonas sörjer för en stor del av vattencirkulationen på jorden
- Om skogen huggs ner blir det torrare, bränder uppkommer och skogen blir en savann.
- Det kommer att påverka klimatet på hela jorden
- De nordliga skogarna kan decimeras på grund av insektsangrepp och skogsbränder. Gäller även för Australien
- Skogsbränder ökar CO₂-halten men ökningen är förhållandevis liten



KRYOSFÄREN

- Handlar om den kalla delen av jorden. Arktis smälter fortare beroende på en negativ albedo-effekt.
- Grönlands is smälter, den blir lägre och därmed varmare och smälter ännu mer.
- Permafrosten i Sibirien tinar och släpper ut metan. Detta ökar den globala uppvärmningen med omkring 10%
- Även på Antarktis smälter shelfisen och stora isberg ger sig ut i havet.

DE MARINA SYSTEMEN

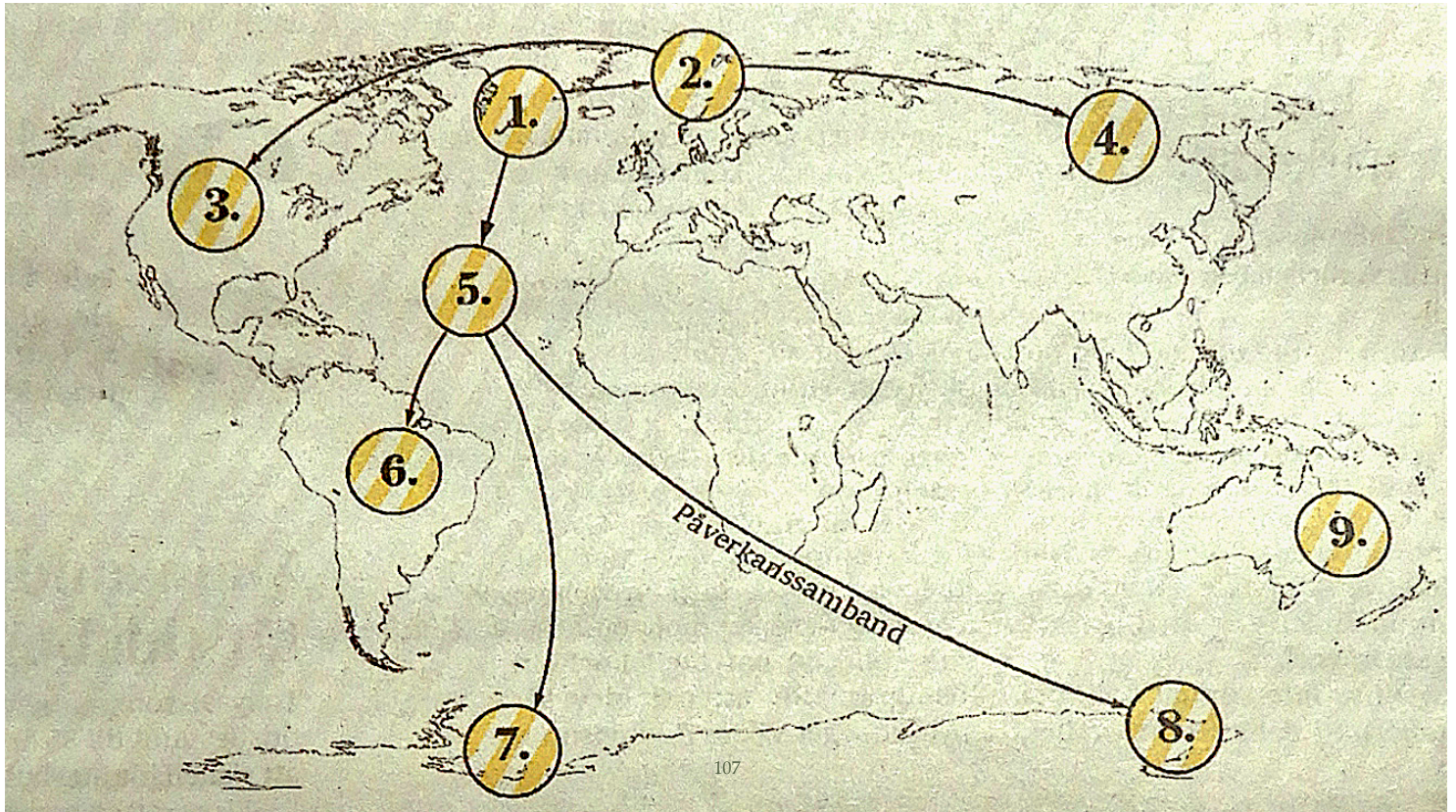
- CO₂ gör vattnet surare vilket försvårar för många livsformer
- Högre temperatur gör att korallreven bleks och dör.
- Under årtusendenas lopp kommer det sura vattnet att sjunka till havets botten och där lösa upp kalkhaltiga sediment.
- Detta gör att havet blir mer basiskt och kan därmed ta upp mer CO₂
- Under hundratusentals år medför bergsvittringen att den CO₂ vi tillsatt atmosfären kommer att bindas i olika bergarter
- Effekten blir att vi får inte fler istider

ÖVRIGA EFFEKTER

- Om vi fortsätter vräka ut kväve och fosfor i vattendragen blir haven så småningom syrefattiga
- Det syrefattiga vattnet löser ännu mer fosfor och ökar produktionen
- När vattnet blir varmare innehåller det mindre syre vilket leder till att haven skiktas sig mera och det saktar ner tillväxten

ROCKSTRÖM (DN 28 NOV -19)

- Uppvärmningen leder till ökad brandrisk i norra barrskogsbältet vilket kan göra att istället för att fånga in koldioxid släpper de ut koldioxid och spår på klimatförändringen,
- Smältande havsis i Arktis gör att havsytan blir mörkare och på så sätt värms upp mer än när den är vit,
- Smältande inlandsis på Grönland innebär att halten sötvatten ökar i haven vilket kan försvaga cirkulationssystemet i Atlanten, Atlantic Meridional Overturning Circulation (Amoc), som i sin tur påverkar nederbördssystemen i Afrika.
- Det innebär att klimatförändringen kan starta en kaskad av förändringar som kan hota existensen av den mänskliga civilisationen, enligt forskarna.



ROCKSTRÖM (SVD 27 NOV -19)

- Lenton menar i en artikel i Nature att det finns 15 olika system som påverkar klimatet
- Slutsatsen i vår genomgång i Nature är dyster. Redan nu har 9 av dessa 15 system börjat röra på sig och ger allt starkare tecken på att närma sig trösklar.
- Det gillar (1) accelererad isavsmältning på Grönland, (2) accelererad avsmältning av havsis i Arktis, (3) bränder och sjukdomar i boreala skogar, (4) smältande permafrost i Sibirien, (5) inbromsning av havscirkulationen i Atlanten inklusive Golf-strömmen, (6) torra och bränder i Amazonas, (7) accelererad is-avsmältning i Västantarktis, (8) accelererad ishavsmältning i östra Antarktis och (9) storskalig koralldöd (50 procent av Stora barriärrevet är dött)

ROCKSTRÖM (SVD 27 NOV -19)

- 9 av 15 kända system med förmågan att förstärka effekter av den globala uppvärmningen har väckts till liv.
- Men detta är inte den viktigaste insikten i Nature-artikeln. Utan det är att vi idag ser alltmer bevis för att dessa tröskelsystem är sammankopplade i ett nätverk, som innebär att de kan utlösa dominoeffekter.
- Tre av dessa är idag kända. Alla startar på vår del av planeten och triggas av att norra halvklotet värms upp dubbelt så fort som resten av planeten.
- Arktis havsis och Grönlands inlandsis smälter snabbt. Planetens yta blir mörkare och absorberar mer värme från solen som därmed påskyndar uppvärmningen

ROCKSTRÖM (SVD 27 NOV -19)

- Första dominokopplingen är att detta bidrar till inbromsningen av värmeutbytet i Atlanten till exempel genom Golfströmmen.
- Det låser i sin tur mer värme i ytvattnet på södra halvklotet, som därmed påskyndar avsmältning av glaciärer på både Västantarktis och Östra Antarktis.
- Den andra kopplingen går också via värmeutbytet i Atlanten, som påverkar regionala vädermönster över Amazonas.
- Det leder i sin tur till mer frekvent torka med allvarligare skogsbränder och minskat upptag av koldioxid som följd.

ROCKSTRÖM (SVD 27 NOV -19)

- Den tredje kopplingen är att den snabba uppvärmningen av norra halvklotet ökar bränder och sjukdomar i borealia skogar och påskyndar avsmältning av permafrost.
- Osäkerheten kring hur dessa dominoeffekter kommer att utspela sig och därmed också riskerna.
- Det vi vet idag är att så länge vi håller oss under 2° global uppvärmning kan vi troligen undvika att falla över dessa trösklar.

HÅLLBARHET

Hur uppnår vi det?

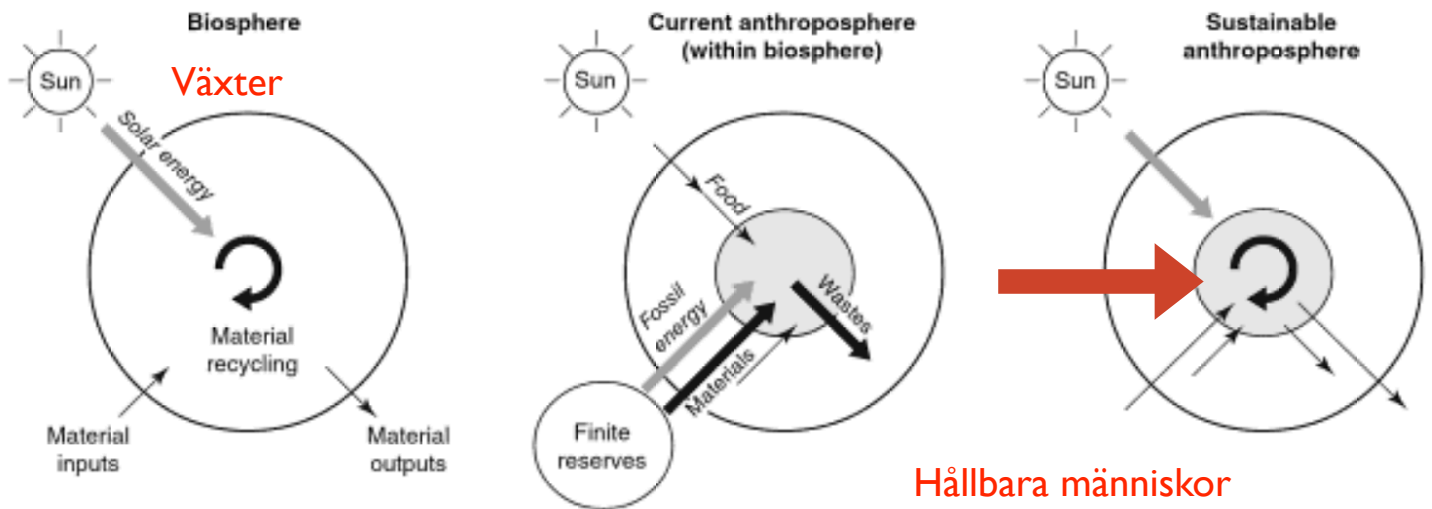
MÄNSKLIGHETEN

- Vi människor har infört något nytt i Jordens historia: Vi är den första arten som medvetet förändrar det totala ekosystemet.
- ESS är den vetenskap som kan tala om för oss hur vi ska göra för att skapa ett hållbart system här på jorden
- Vi kan först konstatera att biosfären har en otrolig motståndskraft. Den har utvecklats i 3,5 miljarder år, trots ett antal snöbollsjordar och hemska vulkanutbrott.
- Den mesta energin fångas genom fotosyntes där växter bygger upp sig av CO₂, fosfor och kväve och blir resan föda åt växtätare som blir föda åt köttätare.

SJÄLVREGLERING

- Hemligheten med livets möjlighet att överleva är de självreglerande mekanismerna: Vittring av berg för att stabilisera temperaturen och de olika kretsloppen.
- Viktigt är den negativa feed-backen som hela tiden för jorden tillbaka till ett utgångsläge.
- Men möjligen finns det nu mekanismer som sätter detta ur spel, som skapar totalt kaos i Jordens system och som kan förgöra allt liv i framtiden.
- Den mekanismen kallas Homo Sapiens, den tänkande människan!

Nutida människor



Hållbara människor

26. Energy and material flows in the biosphere, the human sphere (anthroposphere), and a prospective future sustainable anthroposphere.

115

EXPONENTIELL TILLVÄXT

- Hans Rosling har gjort sig känd för teorin om en minskande befolkningstillväxt
- Men även om vi blir färre människor så konsumerar vi mer, gör av med mer energi och föröder planeten
- Ett antal forskare publicerade 1972 en rapport (Limits to growth) till Romklubben som beskrev tre olika möjliga scenarier.
- Jag ska här gå genom dessa, för det visar vilken knivsegg mänskligheten balanserar på

TILLVÄXTENS GRÄNSER

Rapport till Rom-klubben

117

FAKTORER

- Författarna tog hänsyn till följande faktorer:
 - accelererande industrialisering,
 - snabb befolkningstillväxt,
 - utbredd undernäring,
 - utarmning av icke-förnybara resurser,
 - en försämrad miljö.
- De är inte oberoende och påverkar varandra på ett intrikat vis
- Deras tillväxt är exponentiell

EXPONENTIELL TILLVÄXT

- En kvantitet uppvisar exponentiell tillväxt när den ökar med en konstant procentandel av helheten under en given tidsperiod.
- Sådan tillväxt är vanlig i biologiska, ekonomiska och andra system
- När många sådana kvantiteter är beroende av varandra och växer exponentiellt är det svårt att analysera vad som kommer ut till slut
- Ex: Befolkningen kan inte växa utan mat, livsmedelsproduktionen ökas genom kapitaltillväxt, mer kapital kräver mer resurser, förbrukade resurser blir föroreningar, föroreningar stör tillväxt av både befolkning och mat.

FÖRSTA MODELLEN

- Vi ser enbart på förhållandet befolkning - kapital
- Vi ser på en genomsnittlig befolkning för hela jorden
- Vi ser enbart på långlivade globala föroreningar
- Vi planerar för en generaliserad resurs som representerar de kombinerade reserverna för alla icke-förnybara resurser,
- I denna modell inträffar kollapsen på grund av av icke-förnybart resursnyttjande.

FÖRSTA MODELLEN RESULTAT

- När resurspriserna stiger måste allt mer kapital användas för att skaffa resurser, vilket ger mindre investeringar för framtida tillväxt. Investeringar kan inte fortsätta, och den industriella basen kollapsar och tar med sig tjänste- och jordbrukssystemen, som har blivit beroende av gödselmedel, bekämpningsmedel, sjukhuslaboratorier, datorer, och särskilt energi för mekanisering. Det medför att dödligheten ökar
- Även om vi dubblar ingående mängden kommer föroreningarna att ta kål på mänskligheten.

NY MODELL

- Kärnkraft löser världens energiproblem
- Alla utsläpp minskar med en faktor fyra från 1975
- Avkastningen per hektar ökas till det dubbla från 1975
- Men det går ändå åt helsicke för att
- Överanvändning av mark leder till erosion och livsmedelsproduktion minskar.
- Resurser förbrukas alltmer av en välmående världsbefolkning
- Föroreningar stiger, sjunker och stiger sedan igen dramatiskt vilket orsakar en ytterligare minskning i livsmedelsproduktion och ökning av dödligheten.

BRISTER I MODELLEN

- Modellen visar att tekniska framsteg inte hjälper oss
- Modellen tar bara hänsyn till fysiska förlopp
- Den antar att sociala variabler-inkomstfördelning, familjestorlek, val bland varor, tjänster och mat - kommer att fortsätta som tidigare
- Medan tekniken kan förändras snabbt, förändras politiska och sociala institutioner i allmänhet mycket långsamt. Dessutom förändras de nästan aldrig i väntan på sociala behov, utan bara som svar på ett.
- Fördröjningarna ökar, på grund av den exponentiella tillväxten, trycket på samhället

TVÅ VÄGAR

- Är det bättre att försöka leva inom gränsen genom att acceptera en självpålagt begränsning av tillväxten?
- Eller är det att föredra att fortsätta växa tills någon annan naturlig gräns uppstår, i hopp om att vid den tiden ett annat tekniskt språng kommer att tillåta tillväxten fortsätta längre?
- Under de senaste hundra åren har människan och samhället har följt den andra kursen så konsekvent och framgångsrikt att det första valet har varit stort sett bortglömt.
- Tilltron till tekniken som problemlösare riktar vår uppmärksamhet bort från det mest fundamentala problemet: Tillväxt i ett ändligt system och hindrar oss att vidtaga effektiva åtgärder.

TREDJE MODELLEN

- Befolkningen har tillgång till 100 procent effektiv födelsekontroll.
- Den genomsnittliga önskade familjestorleken är två barn.
- Det ekonomiska systemet strävar efter att upprätthålla den genomsnittliga produktionen per capita på ungefär 1975 års nivå.
- Överskott från industrin används för att producera konsumtionsvaror snarare än att investera i ny produktion
- Att införa detta är en stor utmaning och kräver en fundamental förändring av vår livsstil

JÄMVIKT

1. Kapital och befolkning är konstant i storlek. Födelseföretalen är lika med dödsfrekvensen och investeringar är lika med avskrivningar.
 2. Alla input- och output - födelse, dödsfall, investeringar och avskrivningar - hålls till ett minimum.
 3. Förhållandet mellan kapital och befolkning fastställs i enlighet med samhällets värderingar. De kan medvetet revideras och långsamt justeras när teknikens utveckling skapar nya alternativ.
- Med "kapital" menas service-, industri- och jordbrukssektorn tillsammans

VAD INNEBÄR JÄMVIKT?

- Inte nödvändigtvis stagnation. Utbildning, konst, musik, religion, grundläggande vetenskaplig forskning, friidrott och sociala interaktioner - kan blomstra.
- Men då måste vi ha mer än de mest grundläggande behoven täckta och vi måste ha fritid.
- Tekniska framsteg – inom jämviktens ram – är välkomna.
- Jämvikten hindrar vissa friheter (många barn, överkonsumtion) men kan ge tillgång till många nya: Obegränsad utbildning, tid att ägna sig åt kultur och hobby samt frihet från hunger och fattigdom

TILLBAKA TILL HÅLLBARHET

ENERGIBEHOV

- Energibehovet har ökat från 100 EJ/år 1950 till omkring 500 EJ/år 2010
- Behovet kan vara över 1000 EJ/år 2050
- Fossilt bränsle har höjt temperaturen 10° när allt är uppbränt
- Kärnkraft är också ändlig, om än större än fossil energi.
- Största energikällan är solen och där finns stor potential eftersom fotosyntesen, som är den största källan idag, endast har en verkningsgrad på 1-2%
- Solceller har t.ex. en verkningsgrad på ca 20%
- Total solenergi $2,5 \cdot 10^{16} \text{W}$
- Människans konsumtion: $1,5 \cdot 10^{13} \text{W}$ alltså mindre än en tusendel

ENERGIBEHOV

- Vi måste avsätta en del jordytan (max 1/1000) för att fånga solenergi
- Vi måste kunna lagra energin
- Vi måste kunna transportera energin
- Finns många sätt att lagra energi, men det måste vara effektivt
- Transporter kräver i princip väl utbyggt elnät

ÅTERVINNING

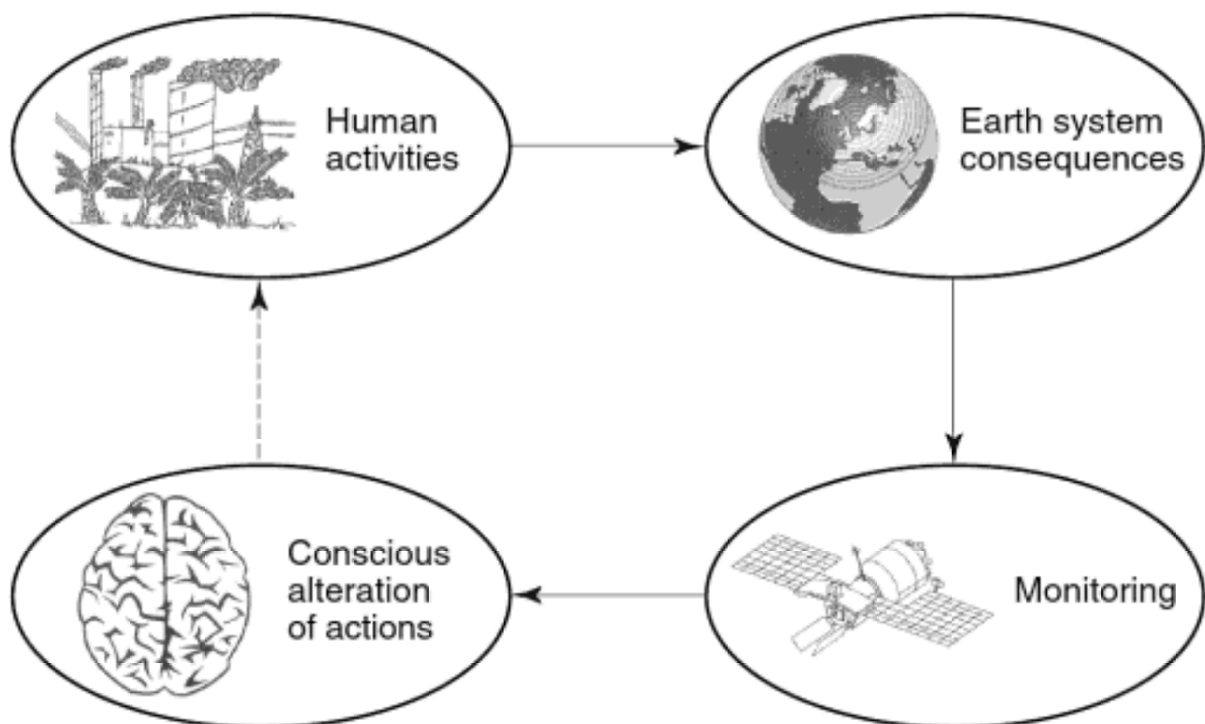
- Vi tar upp en massa material från jordskorpan (järn, aluminium, fosfor, kväve, jordartsmetaller etc), använder dem och kastar sedan bort dem när de inte kan användas mer. Vi måste återanvända mycket mer
- Men återanvändning kräver energi, som vi kan få från solen. Att återvinna järn förbrukar dock bara 25% av den totala energin för att framställa järn från järnmalm
- En del ämnen håller på att ta slut (Neodym, lithium) andra är livsviktiga för oss (fosfor, kväve).
- Fosfor är begränsad men man vet inte hur mycket

PLANETENS GRÄNSER

- Man har föreslagit totalt nio olika gränser: Klimatförändringar, havsförsurning, ozonuttuning, biogeokemiska flöden, biologisk mångfald, dricksvatten, land use change (t.ex. avskogning), partikelutsläpp och övrig föroreningar
- De exakta gränserna är svåra att avgöra och det finns intrikata samband mellan dem
- t.ex. om vi minskar användningen av fosfor behöver vi mer jord för att få tillräckligt med mat och det påverkar den biologiska mångfalden

SAMVETE

- Mänsklighetens medvetande om vad vi ställer till med är en ny sorts feedback baserat på samvete
- Även om Arrhenius redan 1896 konstaterade att CO₂ höjde temperaturen betydde det inte att han hade dåligt samvete. Han tyckte i själva verket att det var bra.
- Vi måste veta vad som händer, vi måste veta vad vi gör och vi måste veta vilka konsekvenser vårt handlande får
- Här finns fortfarande massor att göra.



28. The concept of teleological feedback within the Earth system.

TIDIGA VARNINGSSIGNALER

- Ett system som håller på att förlora sin stabilitet blir alltmer känsligt för störningar och behöver allt längre tid för att stabilisera sig
- I en del fall, som t ex freoner som tunnar ut ozonhålet har man lyckats hejda förloppet genom att gå till källan med förbud
- Med CO₂ går inte detta utan man får istället förstärka de negativa looparna genom att t.ex. plantera skog, producera biokol, krossa berg för att öka vittringen etc.
- Andra djärvare försök handlar t.ex. om att få Sahara att grönska igen. Det kan ske med skogsplanteringar (VI-skogen)
- Ännu djärvare är s k geoengineering, där man på olika sätt försöker påverka solstrålningen

EKONOMI

- Stabila system förutsätter altruistiskt samarbete, men de finns alltid sådana som bara hänger med utan att bidra. Det naturliga urvalet slår ut dem.
- Jordens historia visar att det är ytterst sällsynt att sådana biologiska samarbeten uppkommer. Ett exempel är flercelliga organismer
- Människan är ett annat exempel där det naturliga urvalets brutalitet är satt ur spel
- Men så har vi "allmänhetens tragedi"!

ALLMÄNHETENS TRAGEDI

- Vi strävar alla efter att förbättra vårt personliga välstånd/välbefinnande
- Detta kräver resurser från vårt gemensamma system
- Men en del förbrukar resurser utan hänsyn till de andra eller till planeten
- CO₂ är en sådan resurs, som nu ställs på sin spets.
- Genom att sätta ett pris på utsläppen kan man i viss mån med ekonomiska medel styra människors beteende
- Samma med cirkulär ekonomi
- Men som redan Adam Smith sa: Obegränsad tillväxt är omöjlig!

GENERALISERING

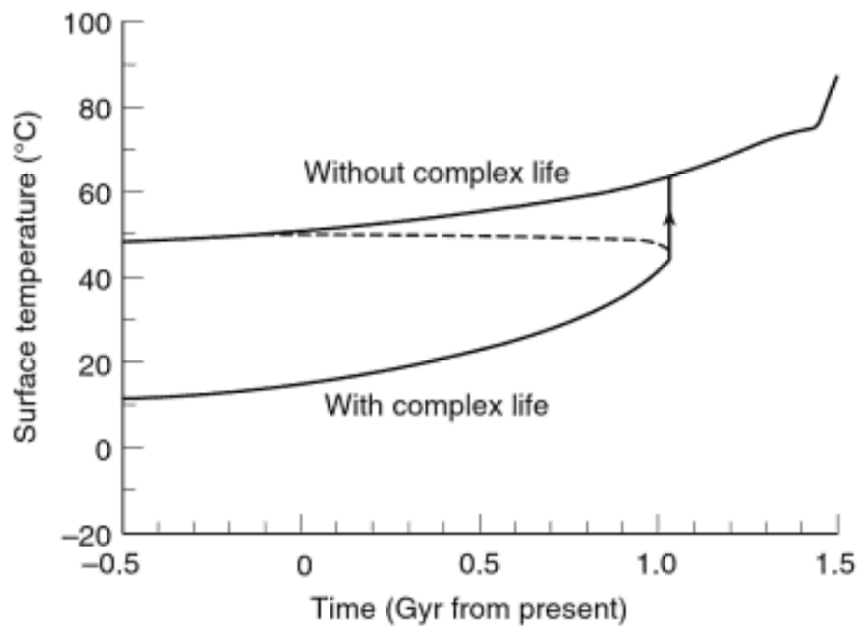
Andra planeter

JORDENS FRAMTID

- Det finns (nästan säkert) andra planeter i universum som hyser liv liknande vårt.
- Människan kan i bästa fall räkna med att finnas här upp till 10 milj år, men 1 milj år mer trolig om vi kommer tillrätta med klimatkrisen.
- Solen ökar sin strålning med omkring 1% per 100 milj år. Detta gör att mer vatten avdunstar och mer värme lagras i atmosfären.
- Vattnet blir varmare, det kan inte hålla något mer avancerat liv och till sist kokar haven bort.
- Vattenångan stiger upp i atmosfären, vattenmolekylen slås sönder av den starka strålningen och vätet försvinner ut i rymden.

FÖRDRÖJNING?

- Bergsvittringen är det som håller temperaturen nere i och med att den minskar CO₂-halten.
- Men kan bli så låg halt av CO₂ att växterna inte kan växa.
- Då kommer jorden att gå in i ett nytt livlöst stadium



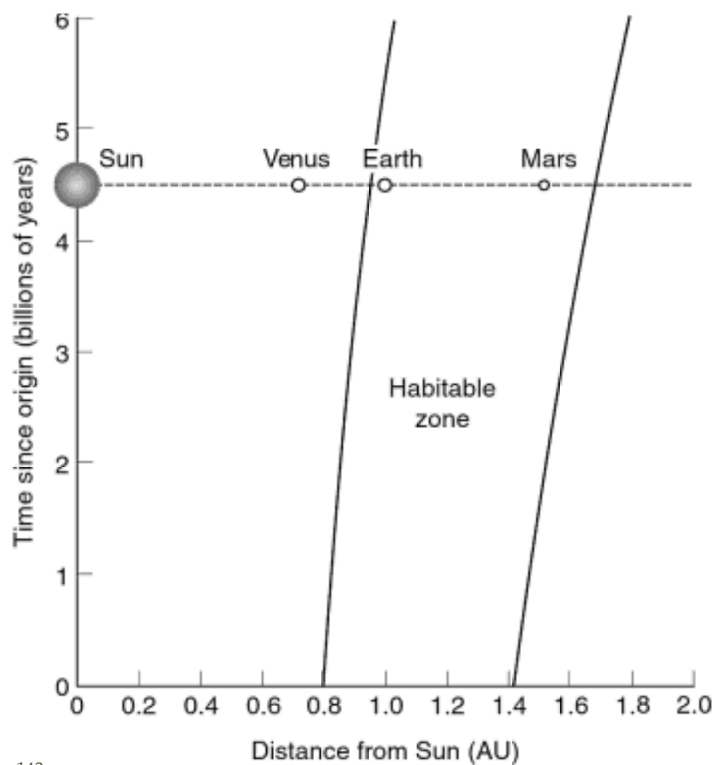
29. A model projection of the lifespan of the biosphere in which complex life overheats and the Earth system switches to a hotter steady state (without biological enhancement of silicate weathering), followed later by a moist greenhouse.

141

BEBOELIG ZON

- Inom en viss zon från varje stjärna kan det finnas liv. Finns det dessutom en eller flera stenplaneter med vatten på och rimlig CO_2 -halt ökar zonen avsevärt.
- I takt med att stjärnan blir varmare flyttas zonen längre ut i solsystemet
- Vid mycket höga CO_2 -halter kommer den p g a Rayleigh-spridningen (den som gör att himla ser blå ut) tar bort mer värme än CO_2 kan binda i atmosfären. Det resulterar i en snöbolls jord

Jorden är väldigt nära den inre gränsen för liv. 1-3% högre solstrålning och det är kört. Livet på jorden tar slut om 100-300 miljoner år!



143

30. Evolution of the Sun's habitable zone over time.

LIV PÅ ANDRA PLANETER

- Ungefär varannan stjärna har en planet inom den beboeliga zonen.
- Men mängden CO₂ och vatten kan variera betydligt.
- Vår närmsta stjärna, Proxima Centauri, på 4,2 ljusårs avstånd har en planet inom den beboeliga zonen. Det är inte helt omöjligt att resa dit.
- I övrigt får man lita på att genom spektrometri upptäcka livstypiska gaser på exoplaneter, som t.ex. O₂ och metan.

KLIMAT PÅ ANDRA PLANETER

- Om en planet har kraftiga strömmar i atmosfären kan den inre gränsen för beboelighet förskjutas kraftigt.
- Likaså om planeten roterar långsamt eller vänder samma sida till solen
- Det beror på att det alltid finns områden med torrare och klarare atmosfär där värmen kan sippra ut.
- Om planeten vänder samma sida till solen kommer det att bildas moln på solsidan. Dessa reflekterar solvärmen och det skapas kraftiga konvektionsströmmar

KLIMAT PÅ ANDRA PLANETER

- Plattekttonik ökar sannolikheten för bergsvittring och "kontroll" av CO₂-halten.
- På större planeter är det på grund av tyngdkraften mindre sannolikhet för fritt berg. Men där kan å andra sidan havet absorbera en del CO₂.
- En röd eller orange stjärna har för låg ljusstyrka för att en fotosyntesprocess ska kunna komma igång. Å andra sidan lever de längre...
- Så största chansen att hitta liv ungefär som vårt är runt gula stjärnor liknande solen. Indikationen är en syrebaserad atmosfär.

LIV PÅ ANDRA PLANETER

- Bergsvittringen på jorden förstärks av den gödning vi tar ut från bergen. Hade vi inte gjort det hade CO₂-halten varit betydligt högre.
- Men det finns många sätt genom vilka en biosfär kan värma eller kyla en planet. Varje sätt skapar en feed-back loop och tillsammans blir det ett komplicerat system
- Liv har en tendens att sprida sig och att försvara sig då fara hotar

