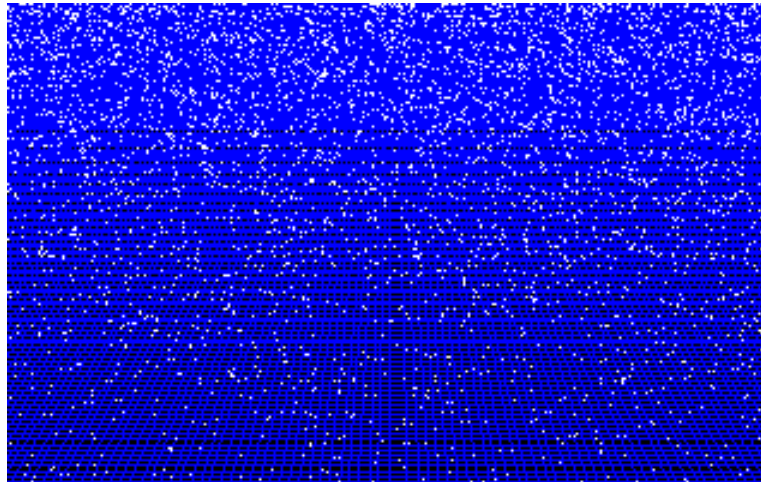


Kernenergie

FEW cursus



Jo van den Brand en Roel Aaij

www.nikhef.nl/~jo/energie

2 april 2012

Overzicht van de eerste lezing

Waar gaat deze cursus over?

Logistieke details

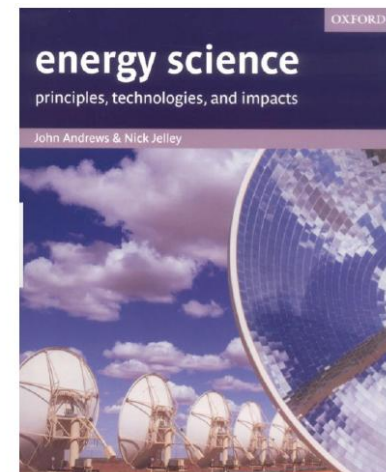
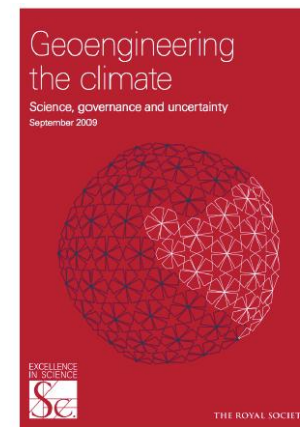
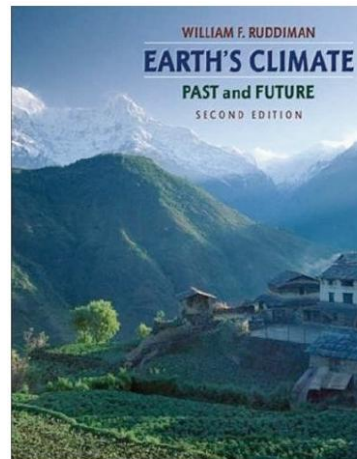
- Boeken die nuttig kunnen zijn
- Huiswerk: elke week; inleveren tijdens volgend college
- Website: presentaties, huiswerk, achtergrond-informatie
- Dictaat en handouts

Wat is energie?

Persoonlijke benadering

Tentamen

Uitdiepen van een onderwerp



Deze boeken zijn niet perse nodig, maar geven goede achtergrond informatie



Inhoud

- **Jo van den Brand**

- Email: jo@nikhef.nl URL: www.nikhef.nl/~jo/energie
- 0620 539 484 / 020 598 7900, Kamer T2.69

- **Roel Aaij**

- Email: raaij@nikhef.nl

- **Dictaat**

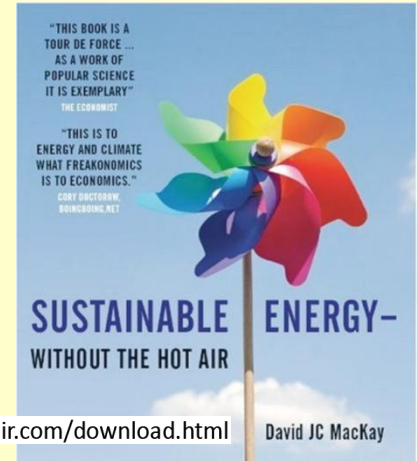
- **Werk in uitvoering**

- **Boeken**

- **Energy Science, John Andrews & Nick Jelley**
- **Sustainable Energy – without the hot air, David JC MacKay**
- **Elmer E. Lewis, Fundamentals of Nuclear Reactor Physics**

- **Inhoud van de cursus**

- Week 1 Motivatie, exponentiële groei, CO2 toename, broeikaseffect, klimaat
Energieverbruik: transport, verwarming, koeling, verlichting, landbouw, veeteelt, fabricage
- Week 2 Kernenergie: kernfysica, splijting
- Week 3 Kernenergie: reactorfysica
- Week 4 Kernenergie: maatschappelijke discussie (risico's, afval), kernfusie
- Week 5 Energie, thermodynamica
Entropie, enthalpie, Carnot, Otto, Rankine processen, informatie
Energiebronnen: fossiele brandstoffen (olie, gas, kolen), wind, zon (PV, thermisch, biomassa), waterkracht, geothermisch
- Week 6 Fluctuaties: opslag (batterijen, water, waterstof), transport van energie, efficiëntie
Energie: scenario's voor Nederland, wereld, fysieke mogelijkheden, politiek, ethische vragen, economische aspecten



<http://www.withouthotair.com/download.html>

David JC MacKay

Gratis te downloaden

Aard van de cursus

- De cursus verschilt iets van de standaard fysica college's
 - De meeste fysica die we nodig hebben is eenvoudig. Zaken blijken toch complex te zijn als we alle interdisciplinaire aspecten (techniek, scheikunde, aardwetenschap, etc.) in beschouwing nemen
 - We zullen leren om goede schattingen te maken op basis van eenvoudige berekeningen. We beoordelen ook de betrouwbaarheid van de schattingen
 - We zullen de discussie over ethische, economische en politieke aspecten van het onderwerp niet uit de weg gaan
 - Het is college is helemaal nieuw: jullie zijn proefkonijnen (excuses...)
 - Geef aub feedback: te snel of te langzaam, vergeten aspecten, niet objectief
 - Laten we het college verbeteren!
-
- Energie en duurzaamheid zijn belangrijke en actuele onderwerpen van discussie. Het gaat ons allemaal aan. Een wetenschappelijke benadering kan bijdragen tot het vinden van realistische oplossingen. We trachten om ons de komende weken te verdiepen in de feiten, zodat we op een verantwoordelijke manier de zaak benaderen en zinnige oordelen kunnen vormen.



Een snelle quiz

- Het soort vragen dat we willen beantwoorden...



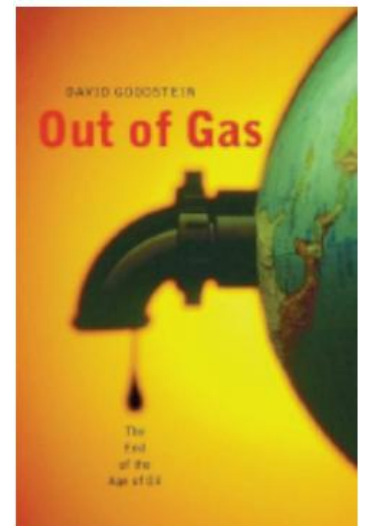
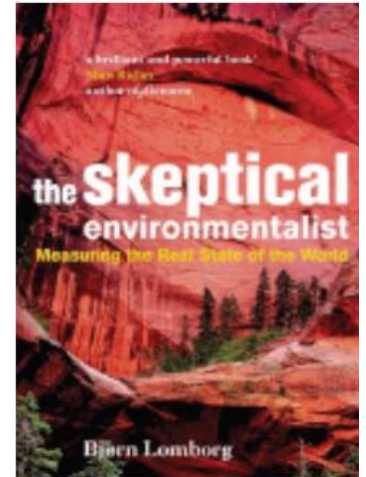
Welke auto is het meest energie -efficiënt?

- A. Toyota Prius (hybrid)
- B. Waterstof/brandstofcel BMW
- C. Mijn 10 jaar oude Saab 9.5
- D. Een VW Polo (Blue motion)



Global warming

- A. Global warming bestaat niet. Feitelijk wordt de planeet steeds kouder
- B. Global warming bestaat, maar wordt niet door menselijke activiteit veroorzaakt
- C. Global warming bestaat en wordt door menselijke activiteit veroorzaakt
- D. Global warming bestaat niet. Binnen de meetnauwkeurigheid blijft de oppervlakte-temperatuur van de Aarde constant



Vogels en windmolens

Welke van de volgende drie mogelijkheden is de meest waarschijnlijke doodsoorzaak van vogels:

- A. Doodgereden door een auto
- B. Opgegeten door een kat
- C. Een klap krijgen van een van de draaiende bladen van een windmolen



Transport

Wat is de duurzaamste manier om van Amsterdam naar Parijs te gaan?

- A. Een groot vliegtuig (jet met >300 passagiers)
- B. Een kleine turbo-prop vliegtuig (80 passagiers)
- C. Trein
- D. Auto



Energieconsumptie

Wat vormt de grootste energieconsumptie in het leven van een gemiddelde Nederlander?

- A. Voedsel
- B. Transport en reizen
- C. Verwarming
- D. Elektriciteit



Wat is energie?

- Een fysische grootheid die beschrijft hoeveel arbeid er door een kracht kan worden verricht.
 - Energie kan niet 'geproduceerd' worden, we kunnen energie slechts omzetten van de ene vorm naar de andere
 - Bijvoorbeeld een slinger: kinetische energie gaat over in potentiële energie en vice versa
 - Verschillende vormen van energie
 - Mechanische energie
 - Chemische energie
 - Elektrische energie
 - Thermische energie
- The image consists of two square photographs placed side-by-side. The left photograph shows a close-up, low-angle view of a white wind turbine against a clear blue sky. The right photograph shows a lit candle with a bright yellow flame, set against a dark background.
- Voorbeeld – een windmolen: mechanische energie van de luchtmoleculen wordt omgezet in elektrische energie
 - Voorbeeld – een kaars: chemische energie van de was wordt omgezet in thermische energie van de luchtmoleculen rond de vlam



Omzetten van energie

- Vaak wordt gesteld dat 1 kWh elektrische energie equivalent is aan 2.5 kWh olie (chemische energie)
- Deze conversiefactor is gebaseerd op het feit dat een standaard elektriciteitscentrale (efficiëntie van 40%) 2.5 kWh olie nodig heeft om 1 kWh elektriciteit te produceren
- Uiteraard werkt deze conversiefactor niet in beide richtingen
 - We hebben waarschijnlijk 5 kWh elektrische energie nodig om chemisch 2.5 kWh aan olie te synthetiseren
- Vergelijkbare voorbeelden kunnen bedacht worden voor alle combinaties tussen thermische, mechanische, elektrische en chemische energie
- Het boek van MacKay gebruikt 1:1 voor alle conversies, tenzij uitdrukkelijk anders vermeld

Reken dit eens na



Sinds 2001 is 3 miljoen ton biomassa ingezet om groene stroom te produceren in de Amercentrale in Geertruidenberg, genoeg voor ruim anderhalf miljoen huishoudens

<http://www.duurzameenergiethuis.nl/energie/essent-met-amercentrale-mijlpaal-bereikt-met-bijstoken-biomassa-3406.html>



Nuttige relaties, eenheden

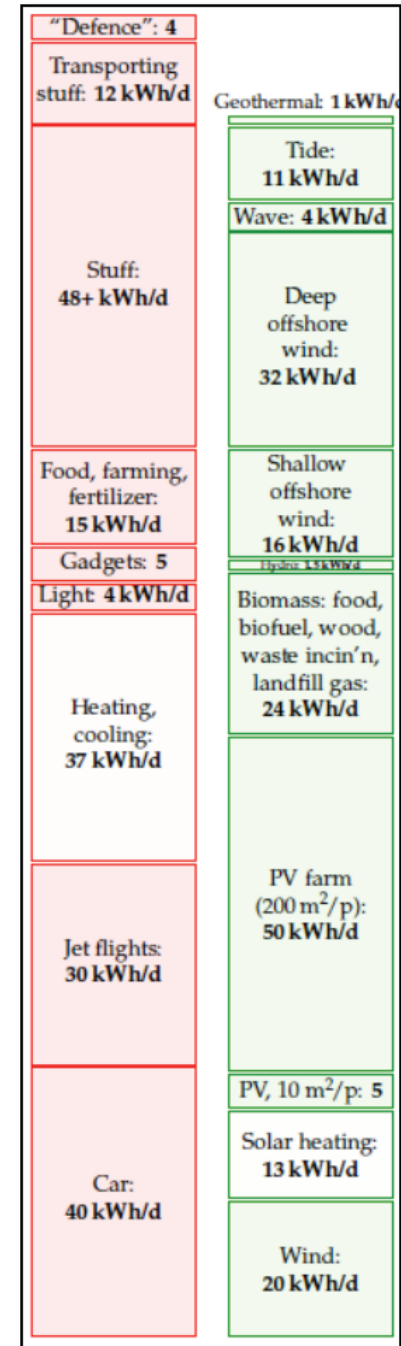
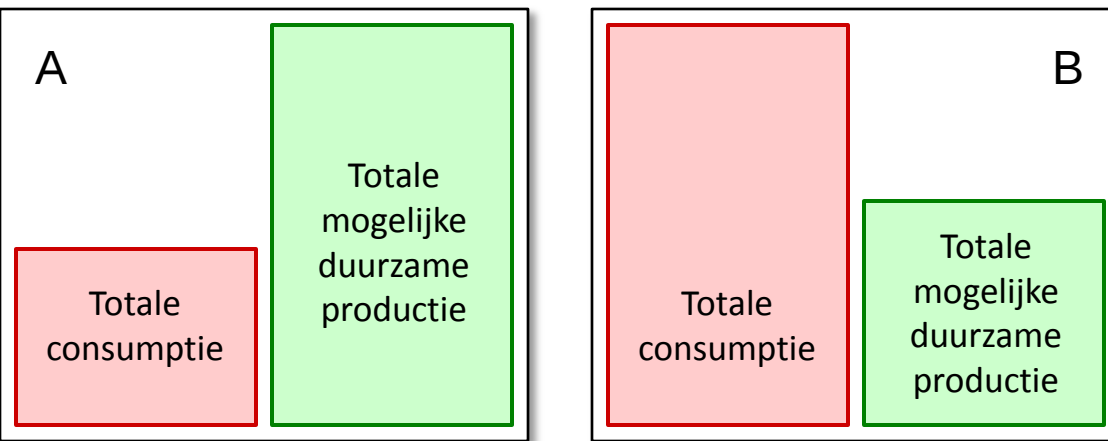
- Onze standaard eenheid voor energie zal de kWh (kilowatt-uur) zijn
- Soms gebruiken de Joule ($1 \text{ J} = 1 \text{ Ws}$)
- Onthoud: vermogen is energie per tijdseenheid. De logische eenheid is kW
- Wij gebruiken echter (in navolging van MacKay) kWh/dag
 - We willen al onze energieproductie en energieconsumptie in betekenisvolle getallen uitdrukken
 - Getallen die we kunnen onthouden en die met elkaar in relatie staan
 - Met kWh/dag krijgen we eenvoudige getallen (tussen 1 en 100) voor de energieconsumptie van de gemiddelde Nederlander per dag
 - Voorbeeld: de energieconsumptie voor autorijden blijkt 40 kWh/dag te zijn
- MacKay ontwikkelt een soort balans: consumptie versus productie (duurzaam)
 - Hierbij laat hij economische overwegingen grotendeels buiten beschouwing
- Wat zullen we ontdekken voor Nederland?
 - Kunnen we in principe onze levensstijl handhaven, maar dan op een duurzame wijze
 - We kijken hierbij even niet naar economische en andere aspecten

Auto
40 kWh/d



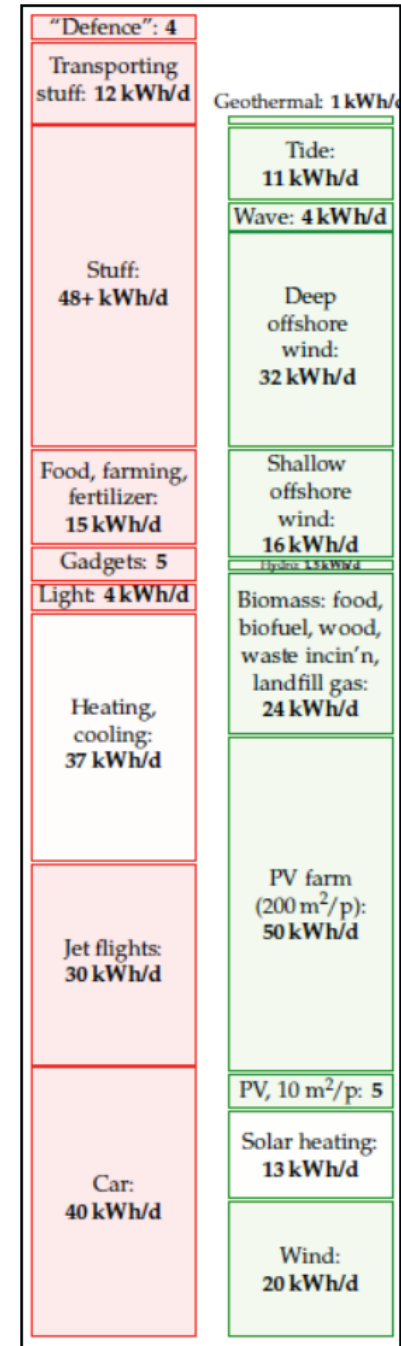
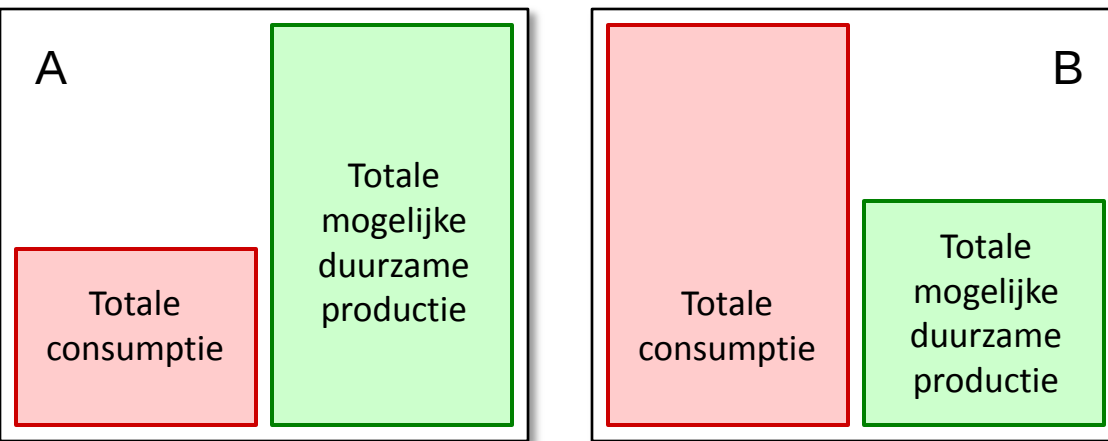
Voorlopige belans

- Wat zullen we ontdekken voor Nederland?
- Scenario A
 - Mooie uitkomst, we kunnen duurzaam leven
 - Bestudeer de economische, sociale en milieukosten
 - Wat verdient de meeste R&D activiteit
 - Als we het goed aanpakken, komt er geen energiecrisis
- Scenario B
 - Economie van duurzame energie is irrelevant
 - Er is gewoonweg niet genoeg duurzame energie
 - We kunnen onze huidige levensstijl niet voortzetten
 - Er is massieve verandering op komst
- MacKays resultaat voor de UK



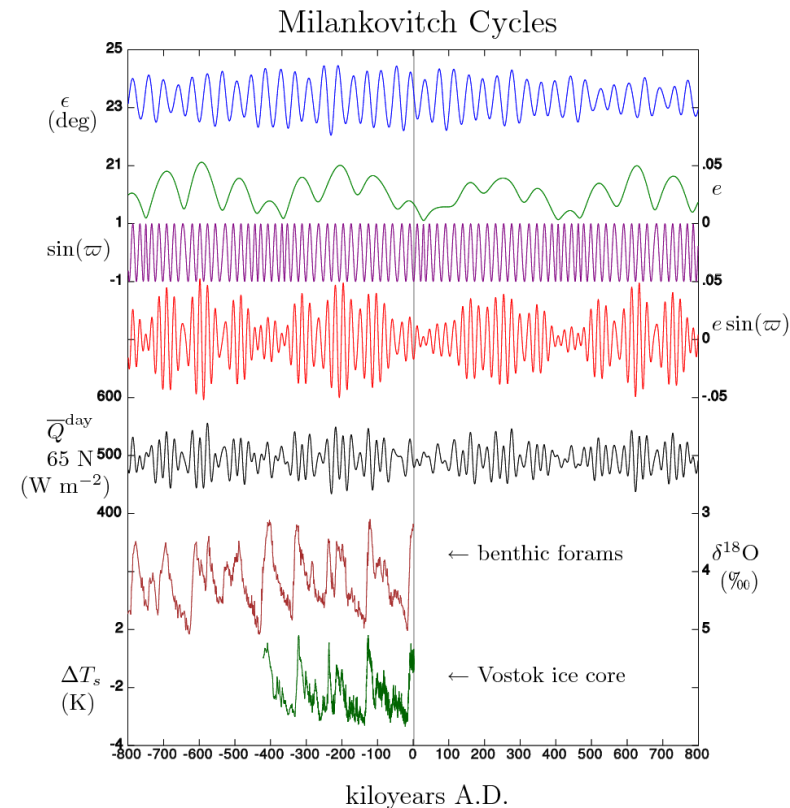
Voorlopige belans

- Wat zullen we ontdekken voor Nederland?
- Scenario A
 - Mooie uitkomst, we kunnen duurzaam leven
 - Bestudeer de economische, sociale en milieukosten
 - Wat verdient de meeste R&D activiteit
 - Als we het goed aanpakken, komt er geen energiecrisis
- Scenario B
 - Economie van duurzame energie is irrelevant
 - Er is gewoonweg niet genoeg duurzame energie
 - We kunnen onze huidige levensstijl niet voortzetten
 - Er is massieve verandering op komst
- MacKays resultaat voor de UK



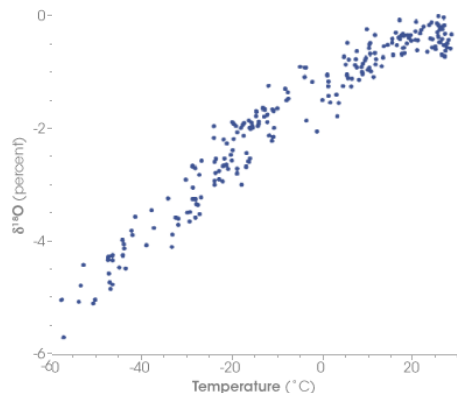
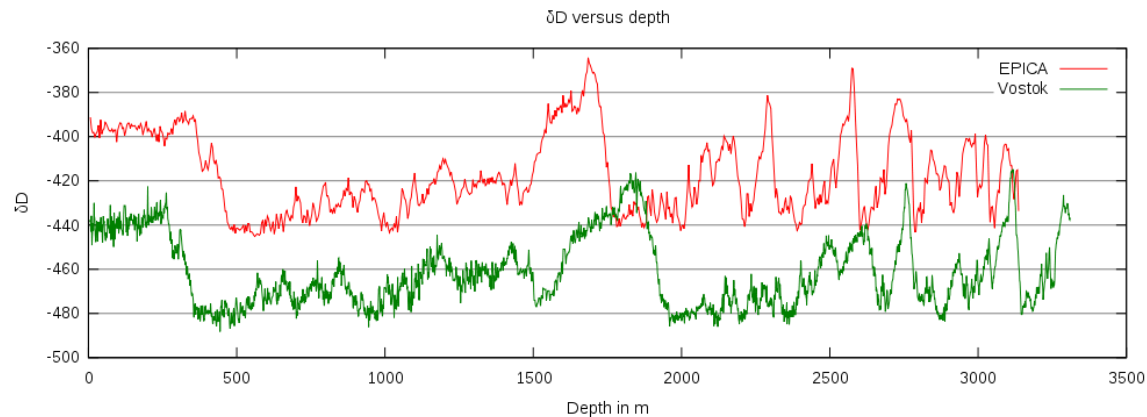
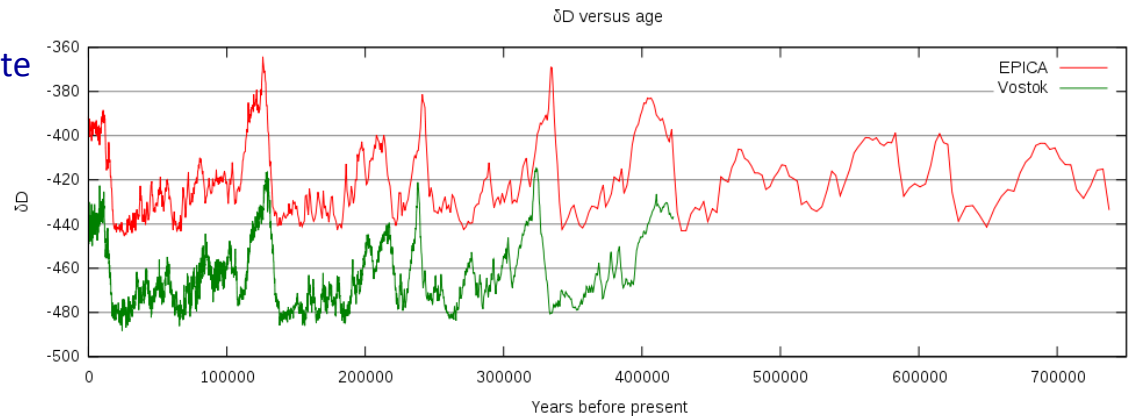
Motivatie

- Klimaatmodellen en broeikasgassen
 - 0-dimensionaal klimaatmodel
 - Broeikasgassen
 - Klimaat respons
 - Terugkoppeling in klimaatsystemen
- Wat is klimaat?
 - “Klimaat is wat je verwacht, het weer is wat je krijgt”
 - Definitie van Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC):
 - Klimaat is gedefinieerd als “gemiddeld weer”, als de statistische beschrijving in termen van het gemiddelde en de veranderlijkheid van relevant grootheden over een periode van maanden tot duizenden of miljoenen jaren. De klassieke periode is 30 jaar en is gedefinieerd door de World Meteorological Organization. Deze grootheden zijn meestal oppervlakte variabelen als temperatuur, neerslag en wind.



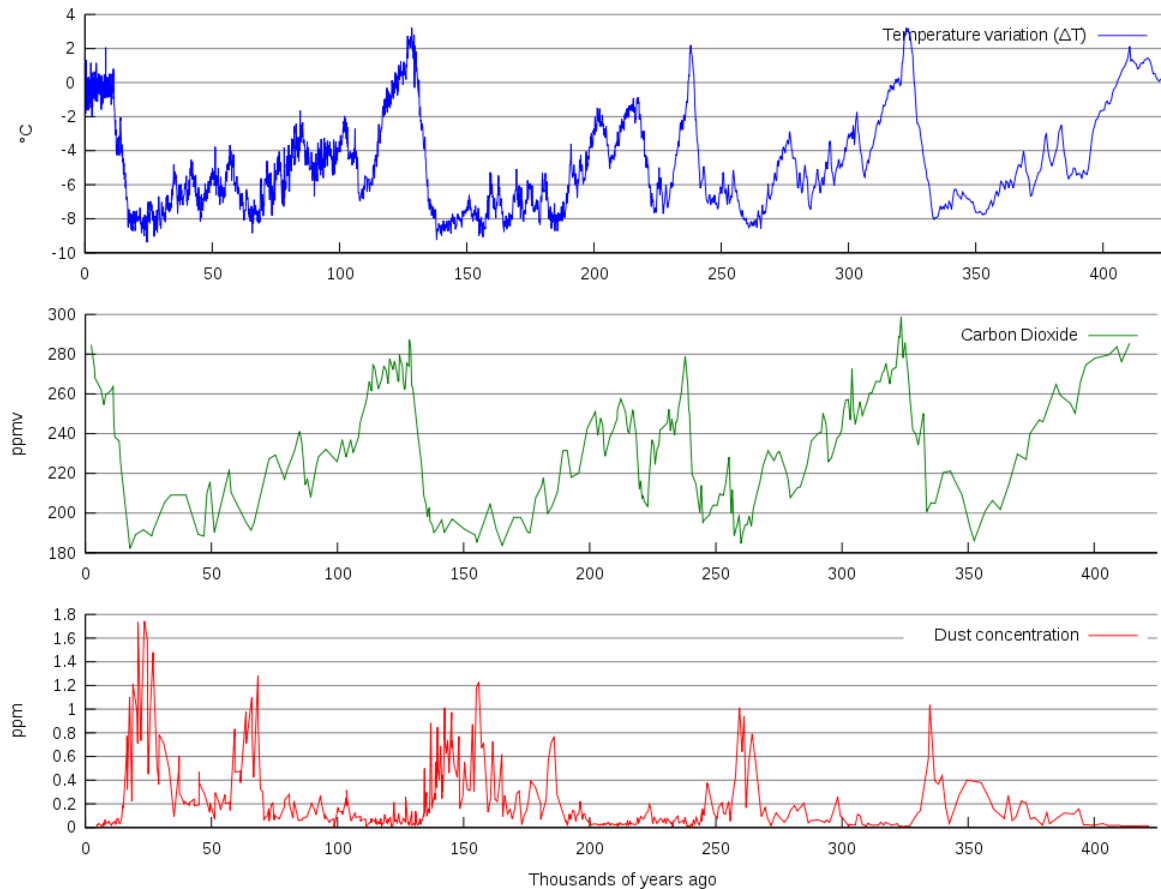
Boorkernen Zuidpool

- Vostok Station
 - Sovjet Unie
 - Diepte tot 3623 m
 - Informatie over de laatste 414.000 jaar (ringen)
 - Terugkoppeling in klimaatsystemen
 - CO₂, CH₄, Beryllium-10
 - Temperatuur uit $\delta^{18}\text{O}$
 - Hoeveelheid neerslag uit laagdikte
- EPICA
 - EU Project voor Ice Coring
 - Laatste 890.000 jaar



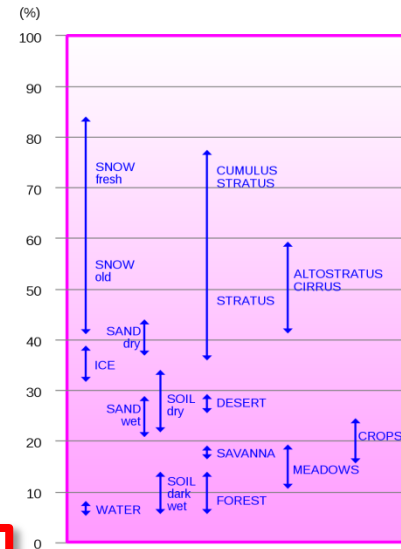
Boorkernen Zuidpool

- Resultaten
 - CO₂, CH₄, Beryllium-10
 - Temperatuur uit $\delta^{18}\text{O}$
 - Duidelijke correlatie tussen CO₂ (ppmv) en temperatuur



0-dimensionaal klimaatmodel

- De Aarde absorbeert energie die door de Zon wordt uitgestraald
 - De Aarde straalt ook energie uit naar het Heelal
- De energie die de Aarde van de Zon absorbeert is



$$E_{\text{absorptie}} = (1 - a) \cdot S \cdot \pi r^2$$

albedo

Zonneconstante

Straal Aarde

- De Aarde zendt energie uit volgens de wet van Stefan-Boltzmann

$$E_{\text{emissie}} = 4 \cdot \pi r^2 \cdot \varepsilon \cdot \sigma T^4$$

Aardoppervlak

emissivity

Stefan Boltzmann
constante

temperatuur

$$E_{n_1, n_2, n_3}(r) = \left(r + \frac{1}{2}\right) \frac{hc}{2L} \sqrt{n_1^2 + n_2^2 + n_3^2}.$$

$$I(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}.$$

$$\frac{P}{A} = \int_0^\infty I(\nu, T) d\nu \int d\Omega$$

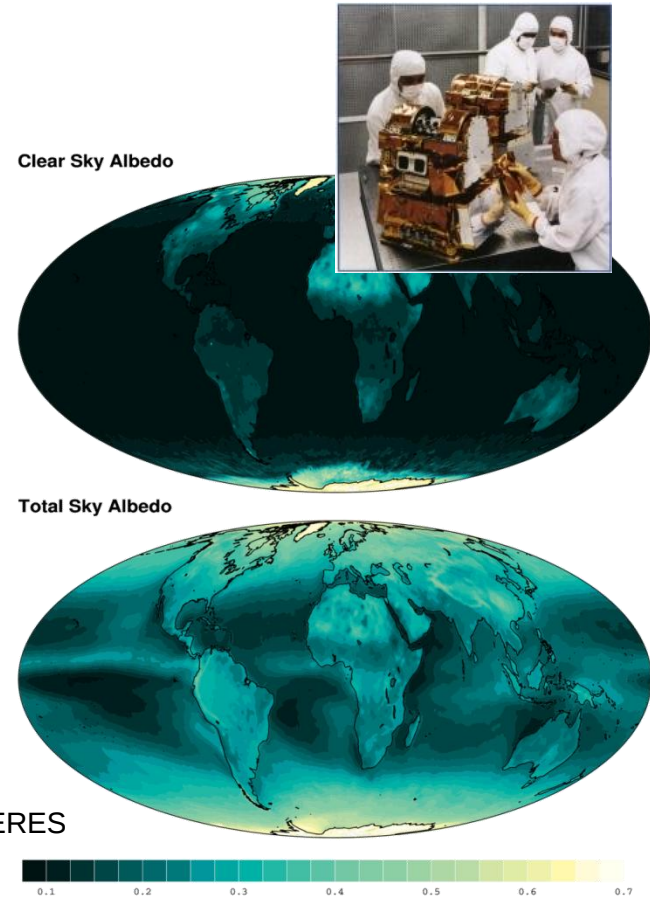
0-dimensionaal klimaatmodel

- Bereken de temperatuur van de Aarde
 - Beschouw evenwichtstoestand

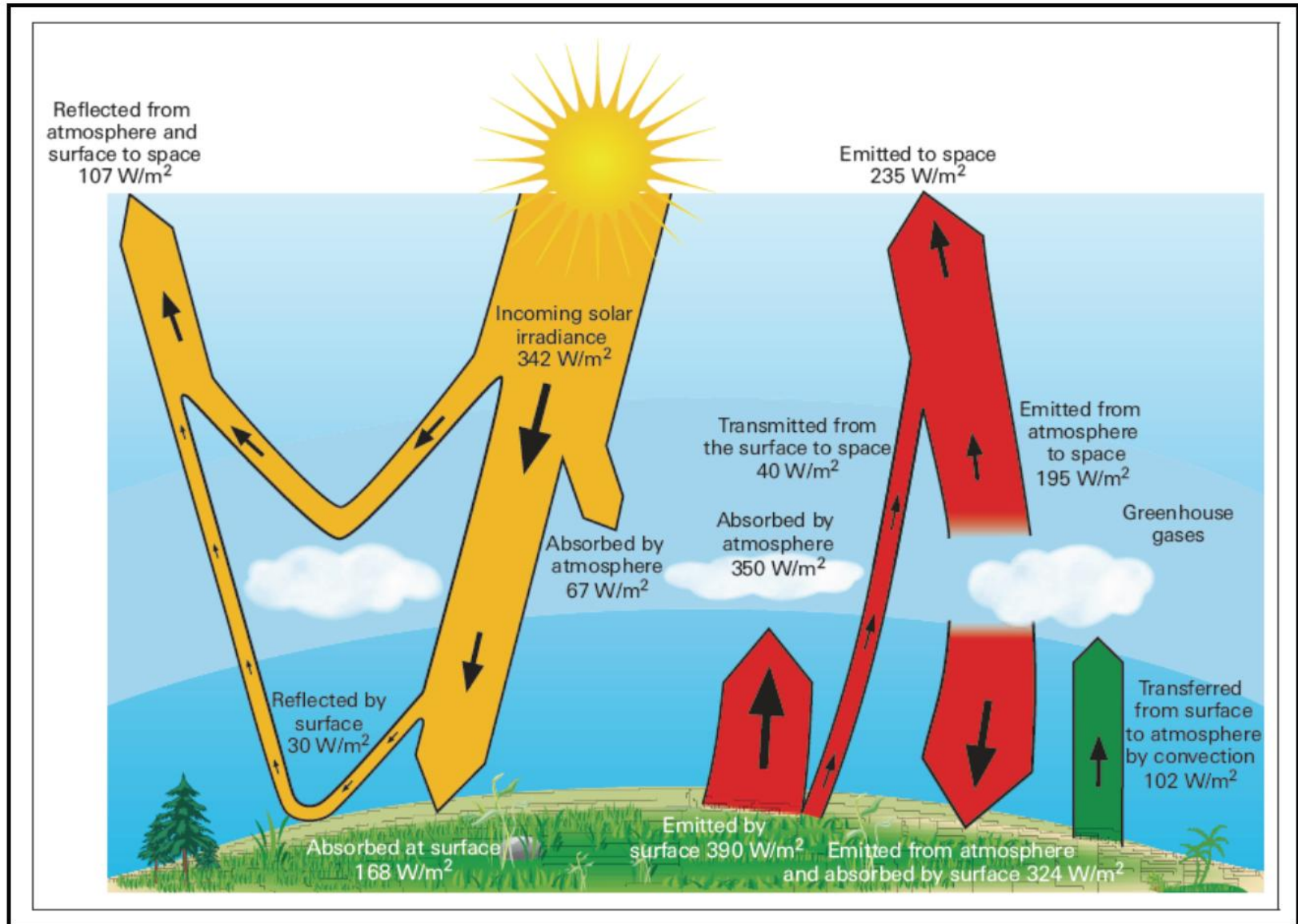
$$E_{\text{emissie}} = E_{\text{absorptie}} \longrightarrow 4\pi r^2 \cdot \varepsilon \cdot \sigma T^4 = (1-a) \cdot S \cdot \pi r^2$$

$$T = \sqrt[4]{\frac{(1-a) \cdot S}{4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma}}$$

- Gebruik parameters
 - Albedo van Aarde = 0.3
 - Zonneconstante = 1367 W/m²
 - Straal van Aarde = 6.371 x 10⁶ m
 - Stefan Boltzmann constante = 5.67 x 10⁻⁸ J/(K⁴m²s)
 - Effectieve emissiviteit = 0.612
- Gemiddelde temperatuur wordt dan 285 K of 15 °C
 - De waarde van IPCC is 255 K of -18 oC voor $\varepsilon = 1$



Een gedetailleerd beeld



0-dimensionaal klimaatmodel

- Wat gebeurt er met de temperatuur als parameters veranderen?
- Met hoeveel procent moeten de parameters veranderen om de temperatuur 1 °C te laten stijgen?

$$\frac{T_{new}}{T_{old}} = \frac{\sqrt[4]{k \cdot S \cdot x}}{\sqrt[4]{k \cdot S}} = \sqrt[4]{x}$$
$$x = \left(\frac{T_{new}}{T_{old}}\right)^4 = \left(\frac{289}{288}\right)^4 = 1.014$$

- Een 1.4% toename van de Zonneconstante of afname van de effectieve emissiviteit veroorzaakt een temperatuurstijging van 1 °C

$$\frac{T_{new}}{T_{old}} = \frac{\sqrt[4]{k(1 - a \cdot x)}}{\sqrt[4]{k(1 - a)}} \quad \left(\frac{T_{new}}{T_{old}}\right)^4 = \frac{(1 - a \cdot x)}{(1 - a)}$$

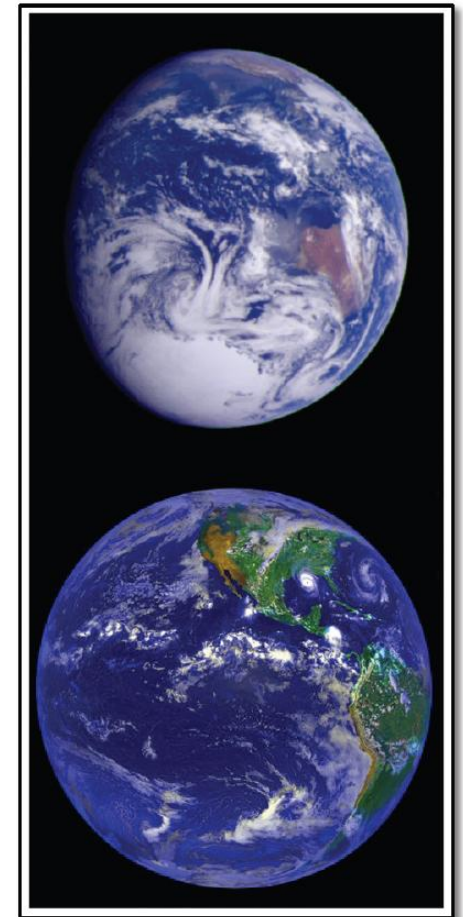
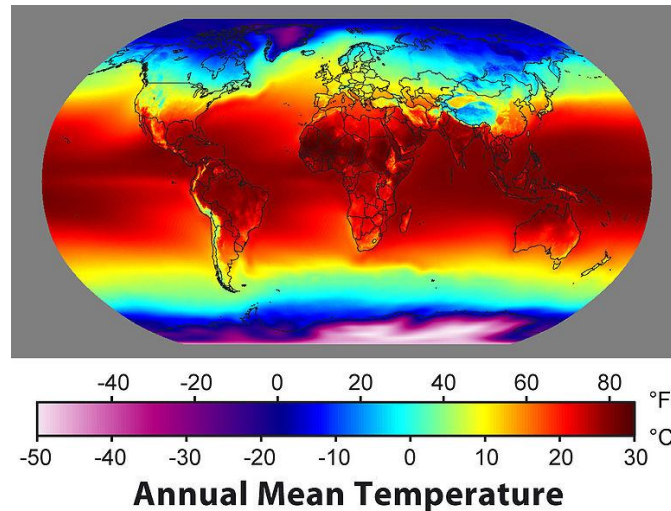
$$x = -\frac{\left[\left(\frac{T_{new}}{T_{old}}\right)^4 (1 - a)\right] - 1}{a} = 0.968$$

- Een 3.2% afname van de albedo leidt tot een stijging van 1 °C



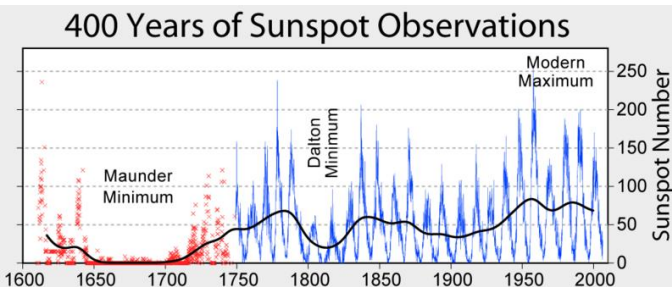
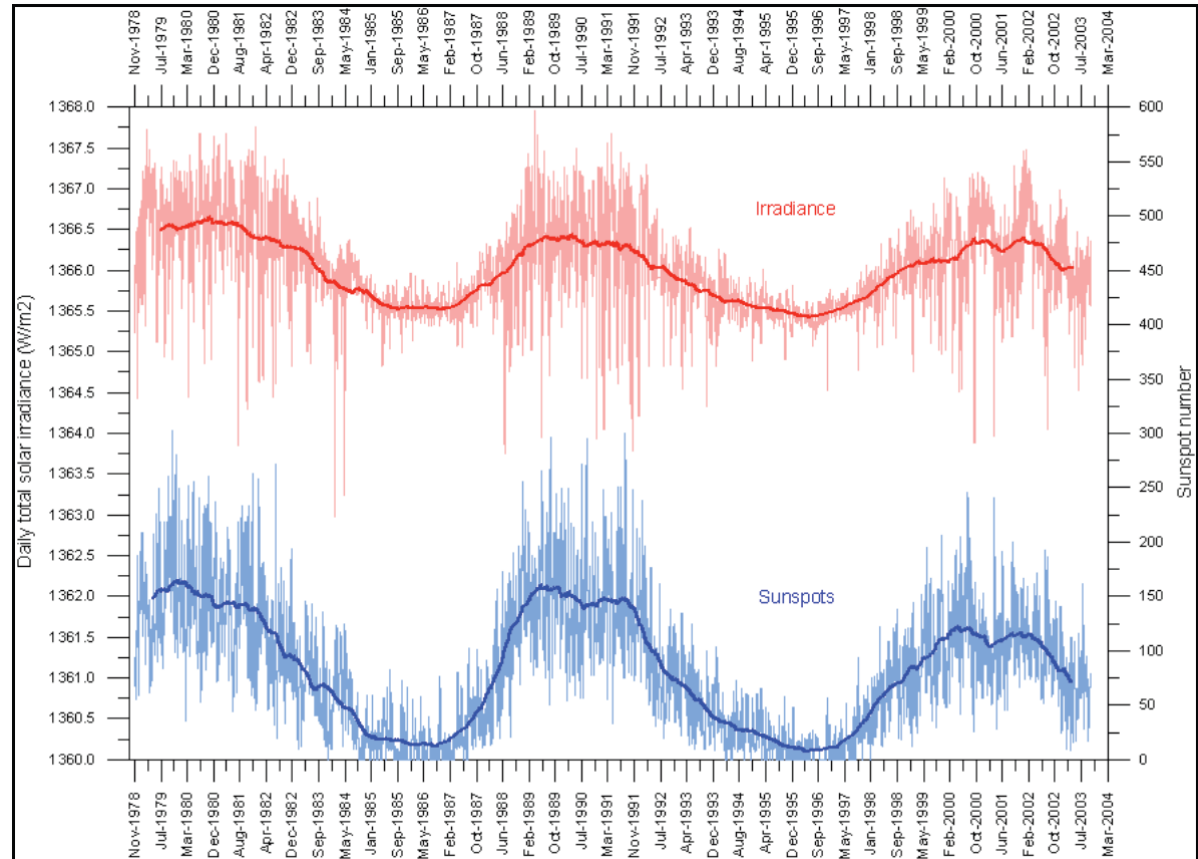
Beperkingen van ons klimaatmodel

- De Aarde is niet homogeen. Het model verwaarloost effecten van
 - Latitude (hoekafstand tot Evenaar)
 - Oceanen, landmassa's
 - Wolken
 - Etc.
- Het model negeert volledig elk energietransport binnen de Aarde en haar atmosfeer



Zonneconstante

- Er is een verband tussen Zonneconstante en het aantal Zonnevlekken (typisch 0.1%)
 - Polen van magneetvelden
 - Temperatuur 3000 – 4500 K (normaal 5780 K)
 - 11 jaar cyclus



Emissiviteit

- De emissiviteit verandert met de bewolking en de concentratie aan broeikasgassen
- De belangrijkste broeikasgassen zijn
 - Waterdamp (36 – 70%)
 - Kooldioxide (9 – 26%)
 - Methaan (4 – 9%)
 - Ozon (3 – 7%)
- De meest voorkomende gassen in de atmosfeer, stikstof en zuurstof, absorberen en emitteren geen thermische infraroodstraling
- Aarde ontvangt UV, zichtbaar en IR straling
- Aarde zendt uit in verre IR



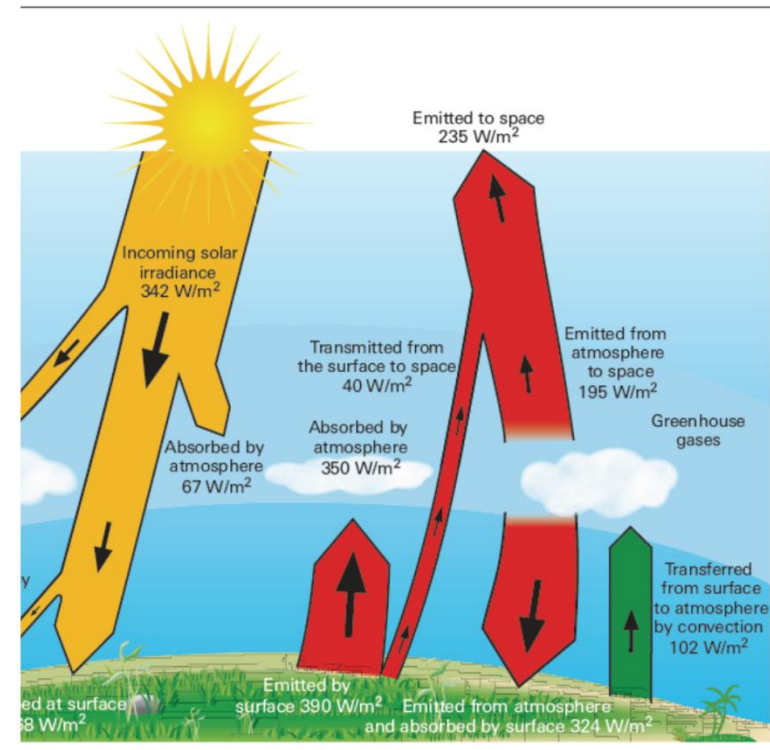
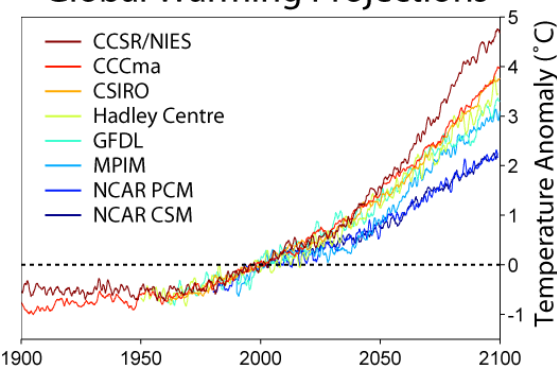
Earth's global energy budget

Kevin E. Trenberth

© 2008 American Meteorological Society

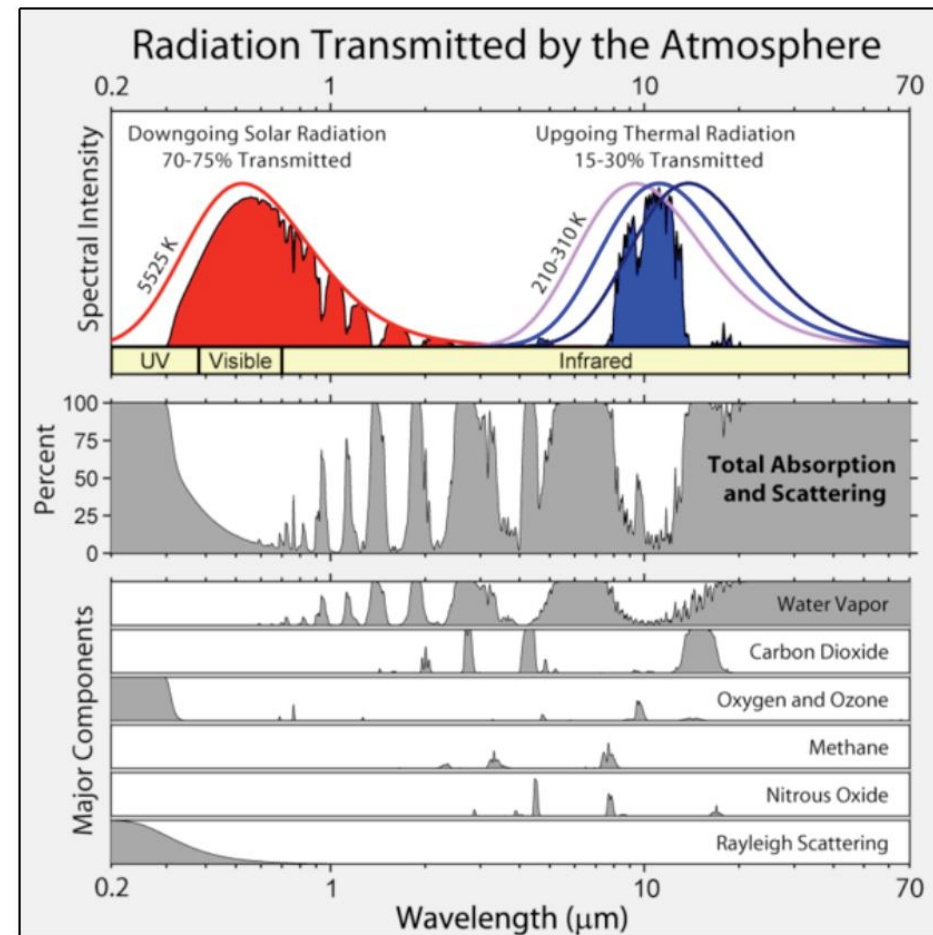
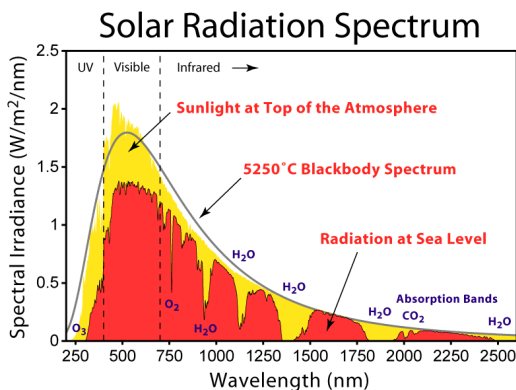
Inbalans $0.85 \pm 0.15 \text{ W/m}^2$

Global Warming Projections



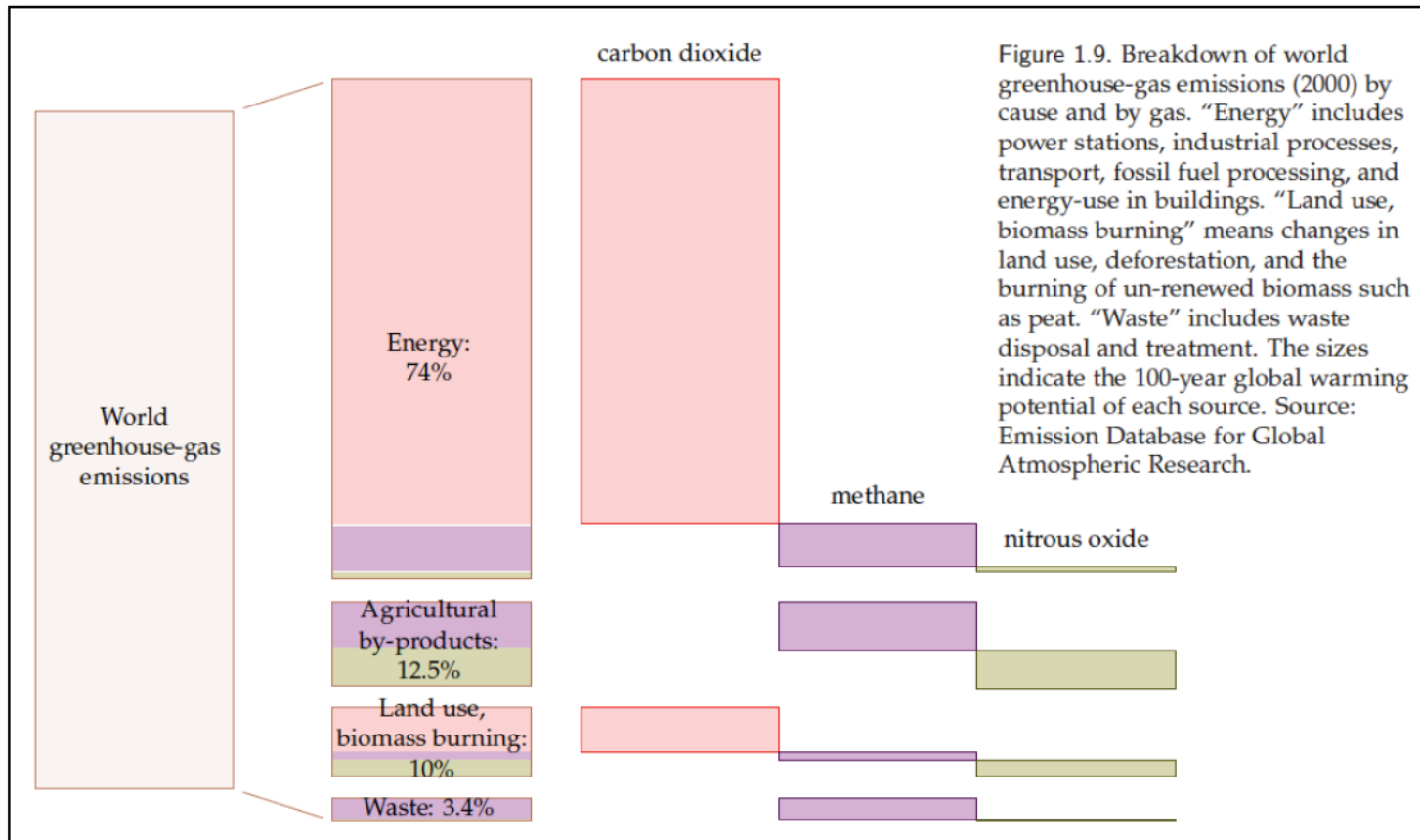
Broeikasgassen

- Fysica van moleculaire vibraties bepaalt het gedrag van deze gassen
 - Dat zouden we kwantummechanisch kunnen beschrijven (maar dat is een ander college...)
- Er zijn sterkte absorptiebanden in het infrarood



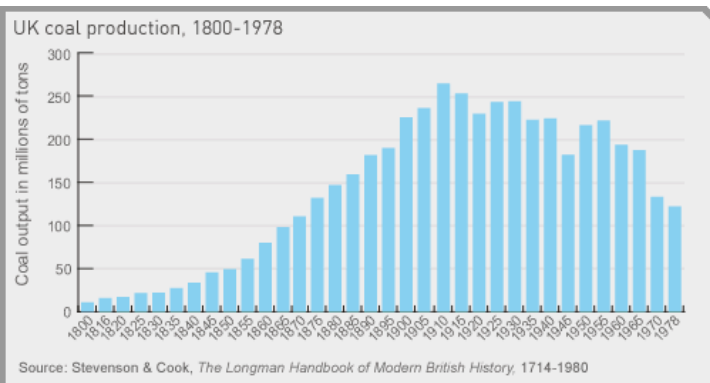
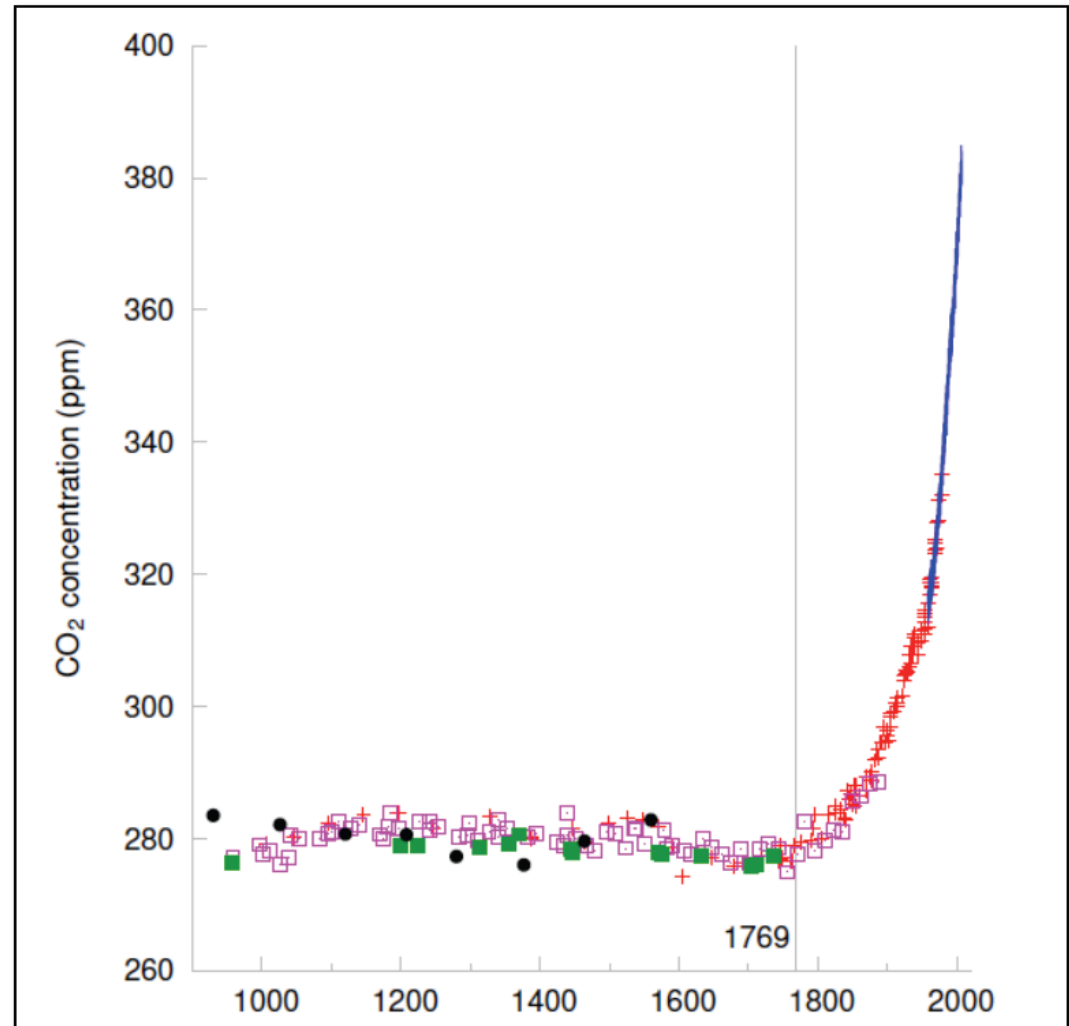
Broeikasgassen

- Kooldioxide is het dominante broeikasgas



Kooldioxide concentratie

- Kooldioxide in de atmosfeer
 - Parts per million
 - Lucht opgesloten in ijs-boorkernen
 - Directe metingen in Hawaii
- De verticale lijn geeft het jaar aan waarin de stoommachine gepatenteerd werd
 - James Watt, 1769
 - Start van de industriële revolutie
- De productie van steenkool kwam toen ook op gang
 - En de CO₂ uitstoot



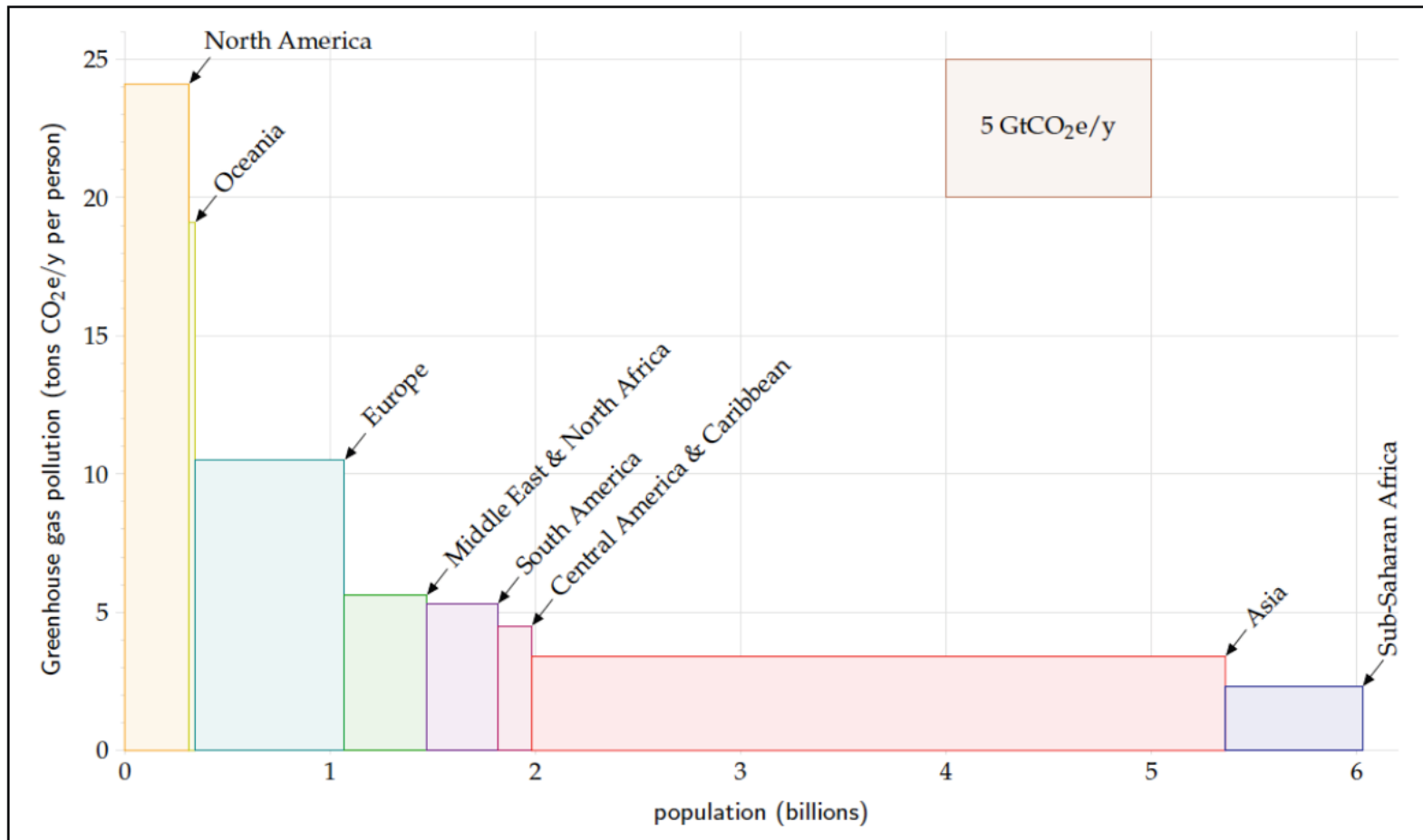
Kooldioxide concentratie

- Wie is er verantwoordelijk?
 - Huidige emissie per continent
 - Huidige emissie per land
 - Historische emissies
- Stel uzelf de volgende vragen
 - Geven de figuren dezelfde impressie?
 - Kun je de presentatie zo doen, dat je de gewenste indruk overbrengt?
- Equivalente hoeveelheden CO₂
 - Niet alle gassen hebben dezelfde eigenschappen
 - Equivalent betekent dat ze hetzelfde globale opwerk-effect hebben over een periode van honderd jaar als CO₂
- Persoonlijk maken
 - In het jaar 2000 was de emissie 34 miljard ton CO₂ equivalent
 - Wereldpopulatie 6 miljard
 - Gemiddeld 5.5 ton CO₂e per jaar per persoon



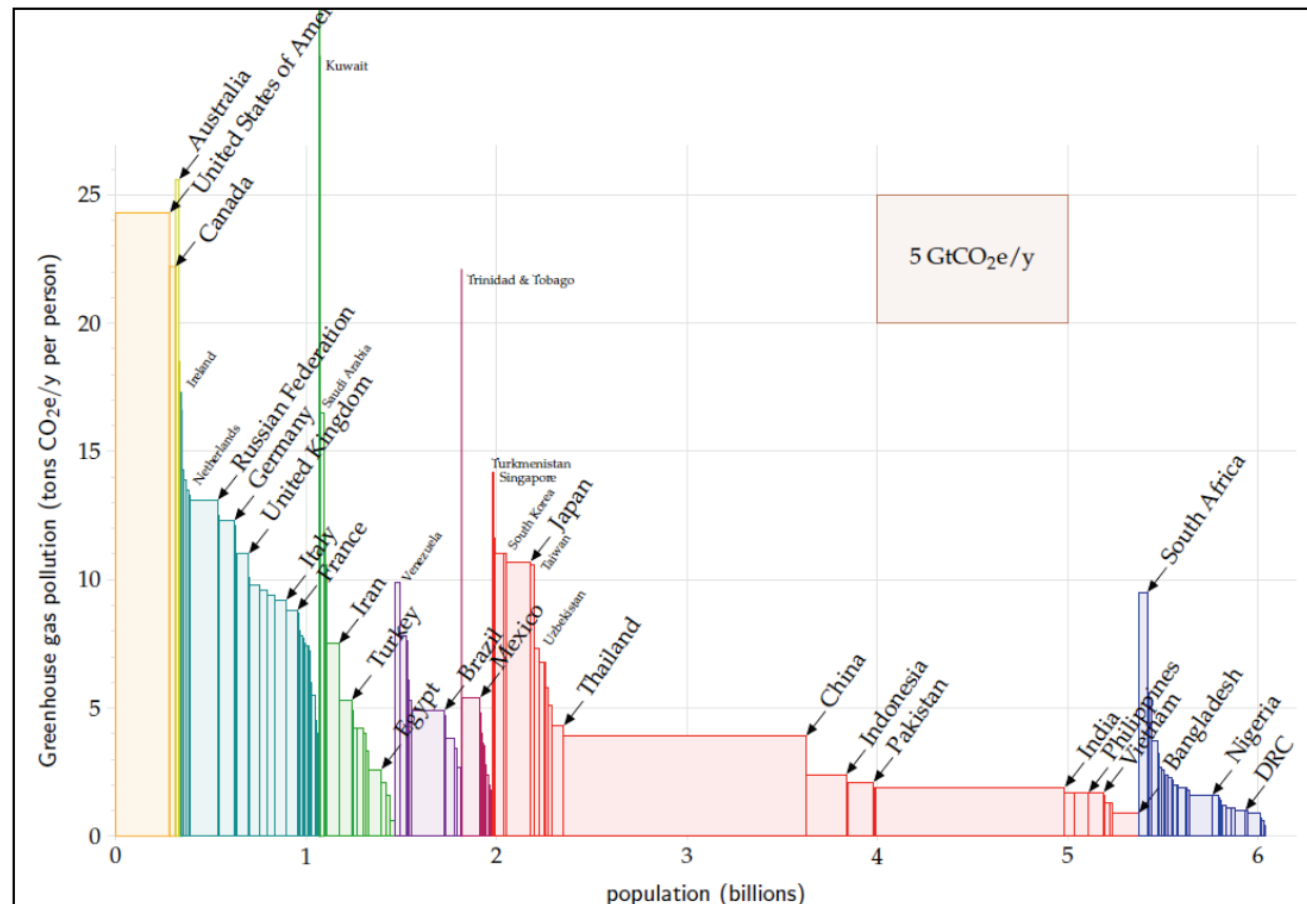
CO₂ emissie per continent

- Merk op
 - Aantal inwoners op horizontale as
 - Emissie per persoon per jaar op verticale as



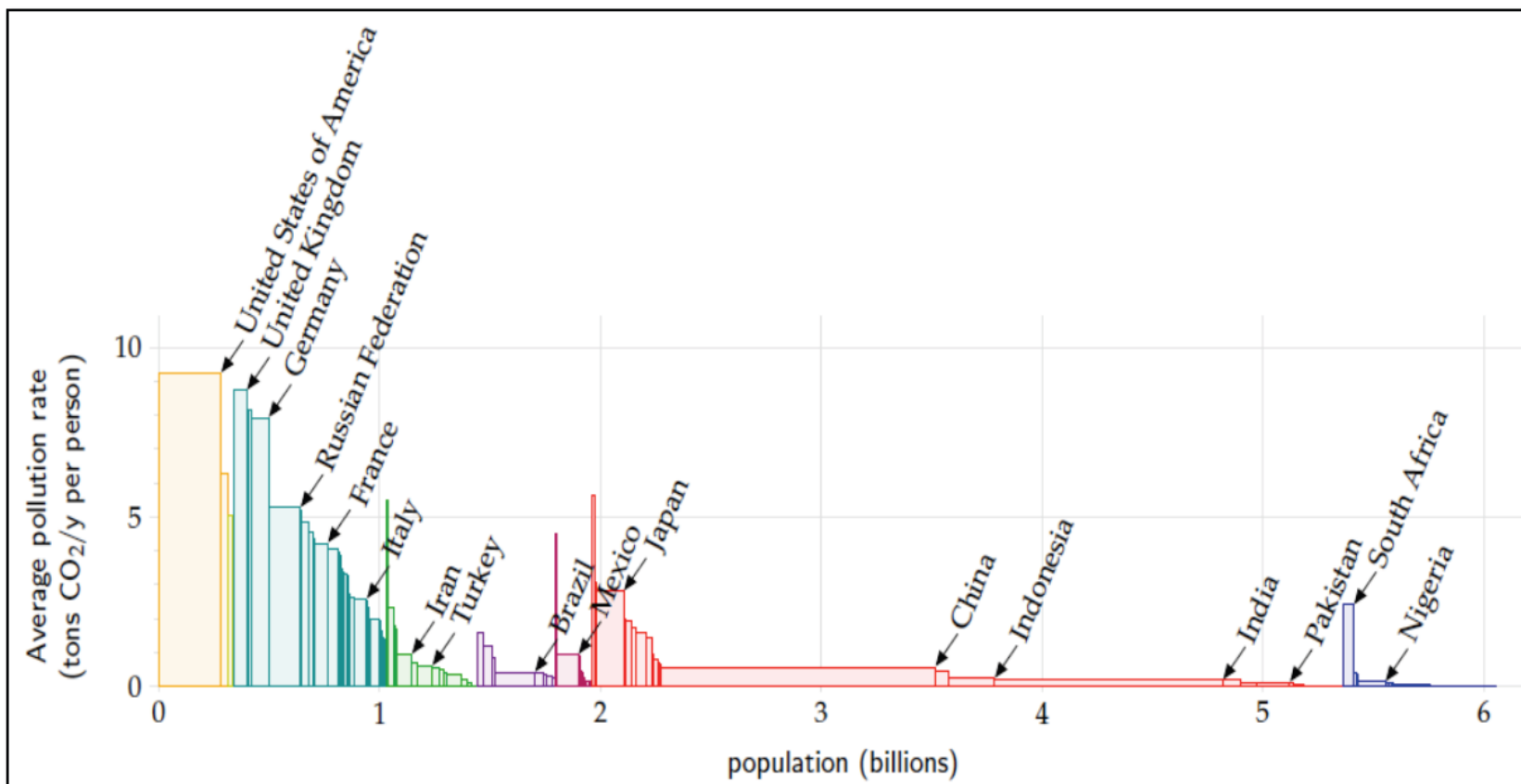
CO₂ emissie per land

- Merk op
 - Hoger Bruto Nationaal Product correleert met hogere emissie
 - China, India zijn lager dan het wereld gemiddelde
 - Veel van onze producten worden daar gefabriceerd



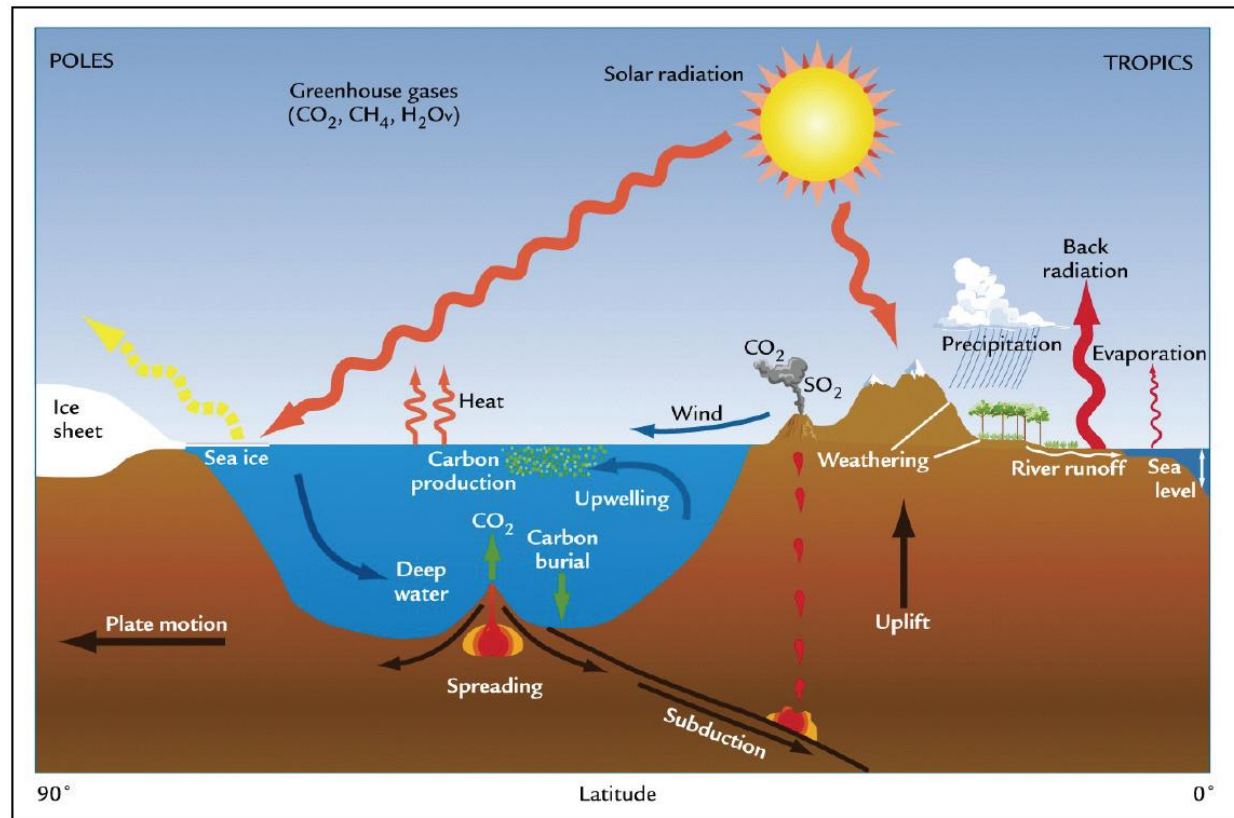
CO₂ emissie historisch

- Merk op
 - Historisch cumulatieve emissies
 - Kooldioxide blijft 50 tot 100 jaar in de atmosfeer
 - De vervuiler betaalt?
 - Wie begint?
 - Wie is het rijkst?



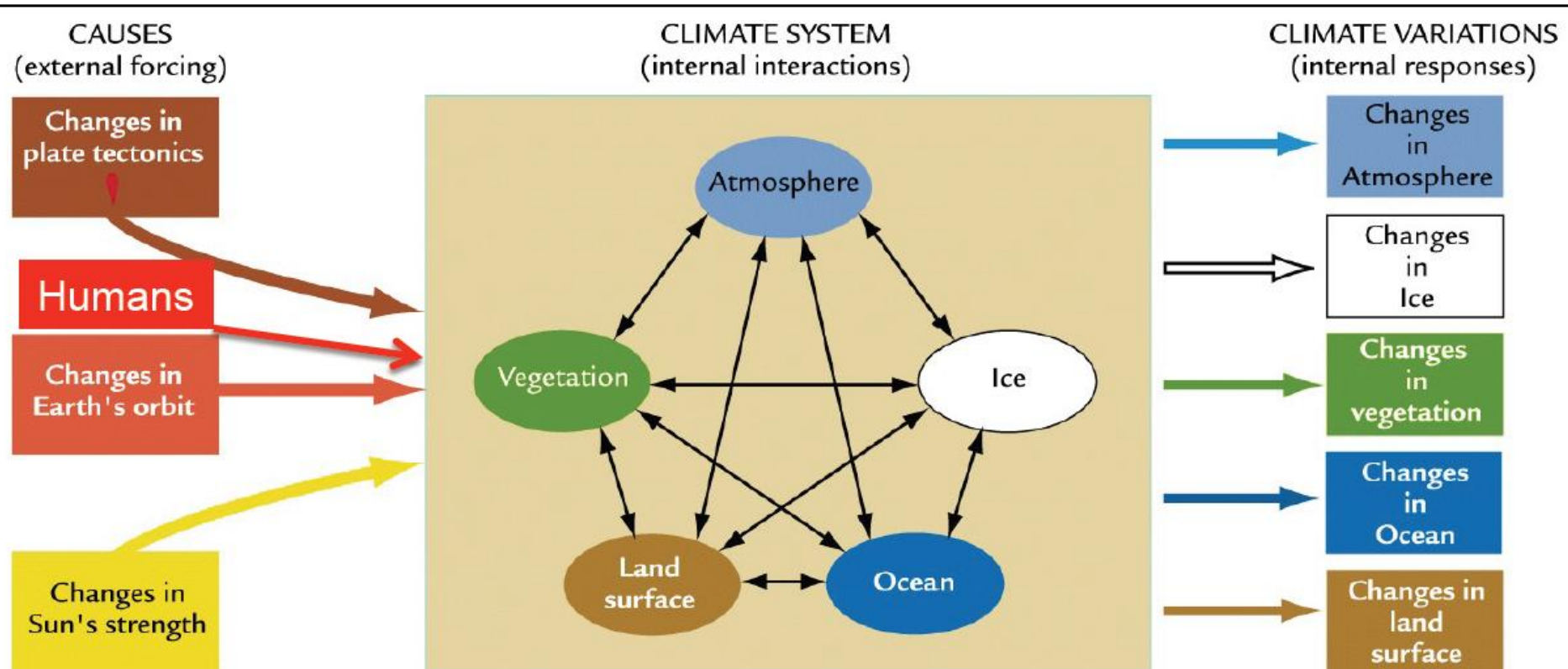
Klimaat: belangrijke processen

- Klimaatmodellen zijn complex
 - Relatief jonge tak van wetenschap
- Tectonische processen
 - Interne warmte van Aarde heeft effect op continenten
- Baan van de Aarde
 - Seizoenen, latitude
- Sterkte van de Zon
- Anthropogene effecten
 - Mens en klimaat



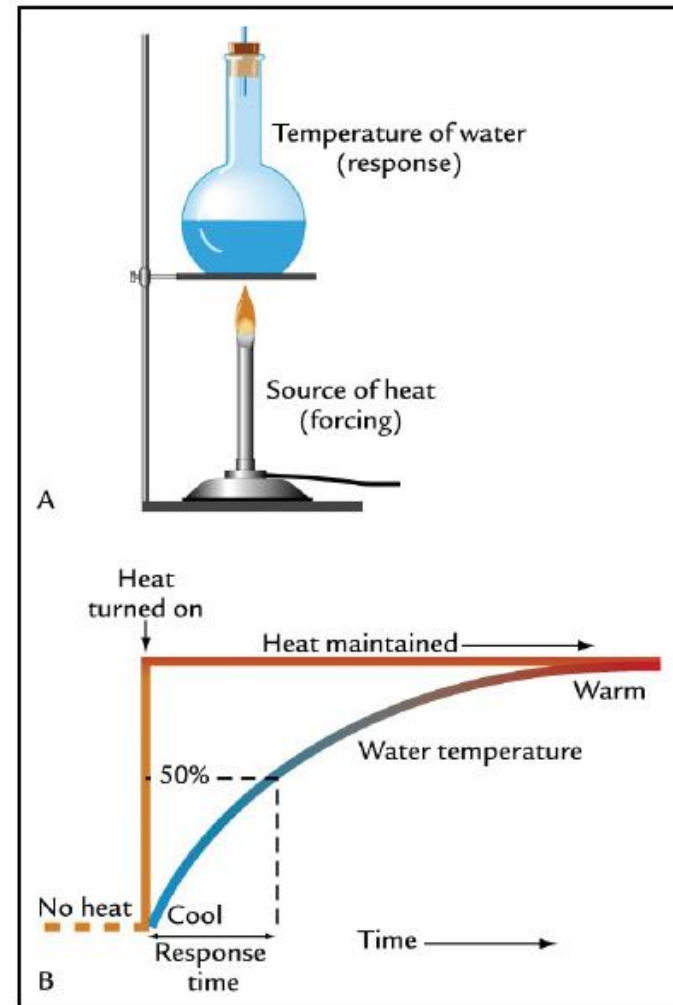
Krachten en response

- Reduceer complexiteit
 - Een klein aantal factoren leidt tot klimaatverandering
 - Deze factoren zorgen voor interactie tussen de interne componenten van het klimaatsysteem
 - Het resultaat is een meetbare verandering: klimaatrespons



Respons-tijd

- De respons is niet instantaan
- Verschillende systemen hebben verschillende responsetijden
- Voorbeeld: een Bunsen burner
- Responsetijd hangt af van
 - Hoeveelheid water
 - Warmtecapaciteit van het water
 - Thermische geleiding van de fles
 - Beweging en menging van de verschillende delen in de fles
 - Etc.



Responsetijd

- Bij een korte respons-tijd kan het klimaatsysteem langzame krachten volgen
- Bij een lange respons-tijd krijgen we een kleine response bij een snelle verandering in kracht
- Bij ongeveer gelijke tijden voor kracht en response zijn er verschillende reacties mogelijk

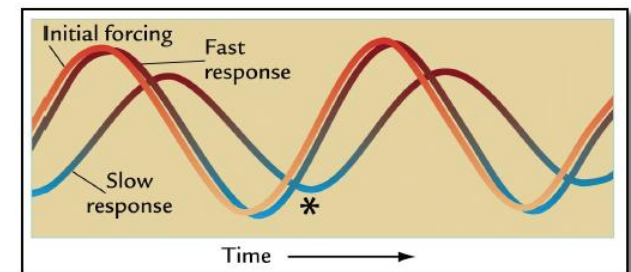
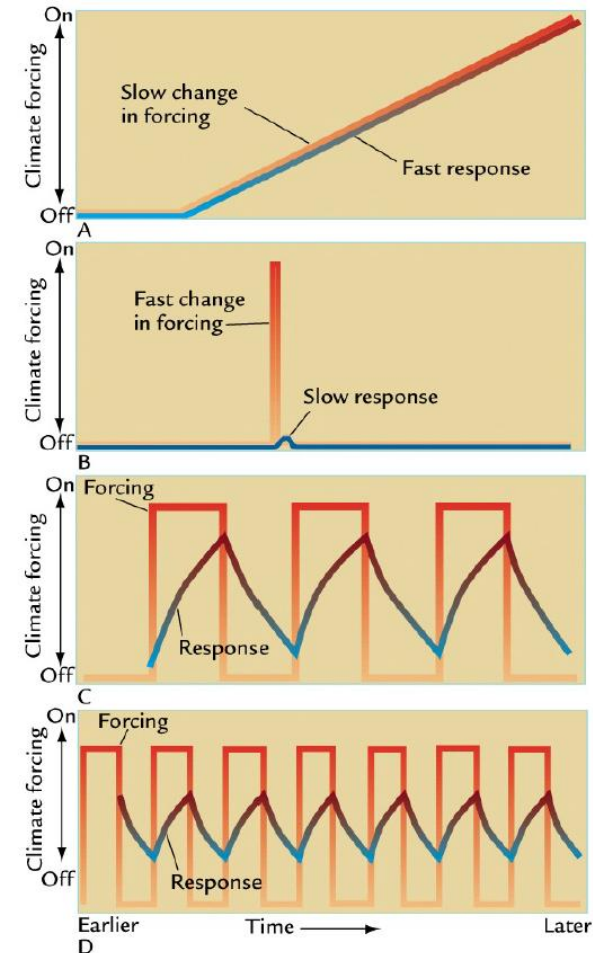
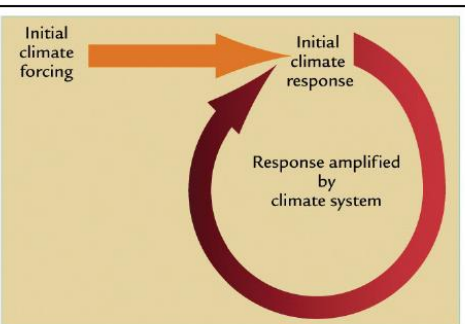


TABLE 1.1 Response Times of Various Climate System Components

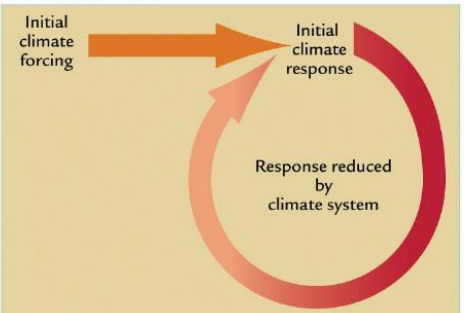
Component	Response time (range)	Example
Fast responses		
Atmosphere	Hours to weeks	Daily heating and cooling Gradual buildup of heat wave
Land surface	Hours to months	Daily heating of upper ground surface Midwinter freezing and thawing
Ocean surface	Days to months	Afternoon heating of upper few feet Warmest beach temperatures late in summer
Vegetation	Hours to decades/centuries	Sudden leaf kill by frost Slow growth of trees to maturity
Sea ice	Weeks to years	Late-winter maximum extent Historical changes near Iceland
Slow responses		
Mountain glaciers	10–100 years	Widespread glacier retreat in 20th century
Deep ocean	100–1500 years	Time to replace world's deep water
Ice sheets	100–10,000 years	Advances/retreats of ice sheet margins Growth/decay of entire ice sheet

Respons en feedback

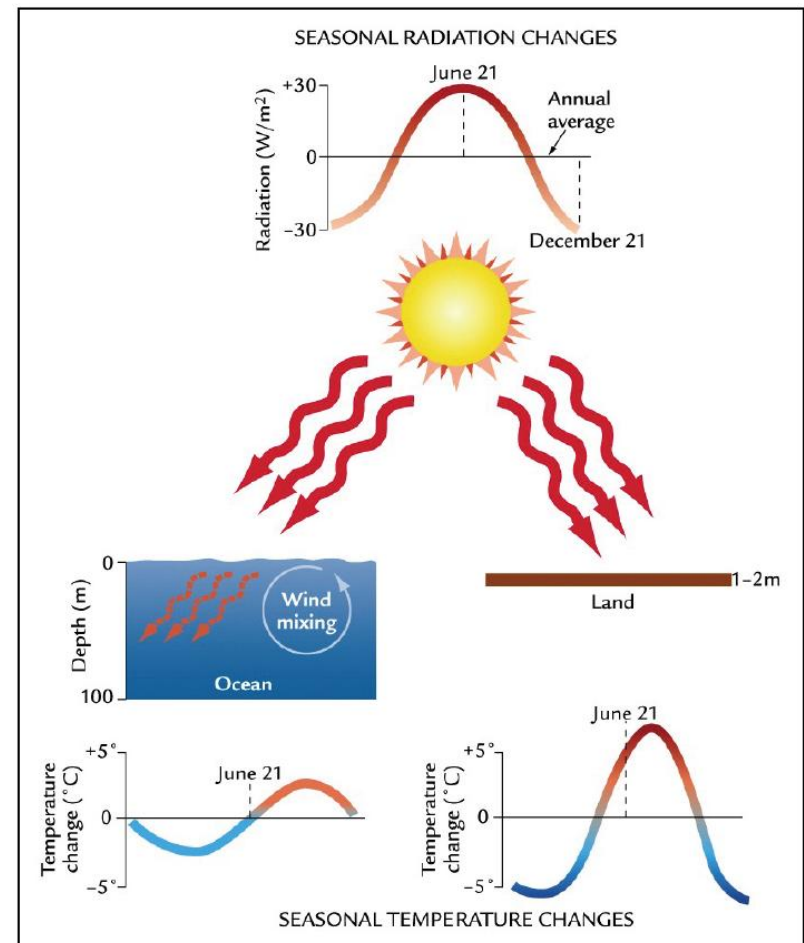
- Verschillende respons op dezelfde kracht
- Klimaat is complex
 - Er kan terugkoppeling optreden
 - Feedback kan positief of negatief zijn
 - Voorbeeld: temperatuur neemt toe, de polen smelten, er wordt minder zonlicht gereflecteerd naar de ruimte, er wordt dus meer warmte geabsorbeerd, temperatuur neemt verder toe, etc.



A Positive feedback

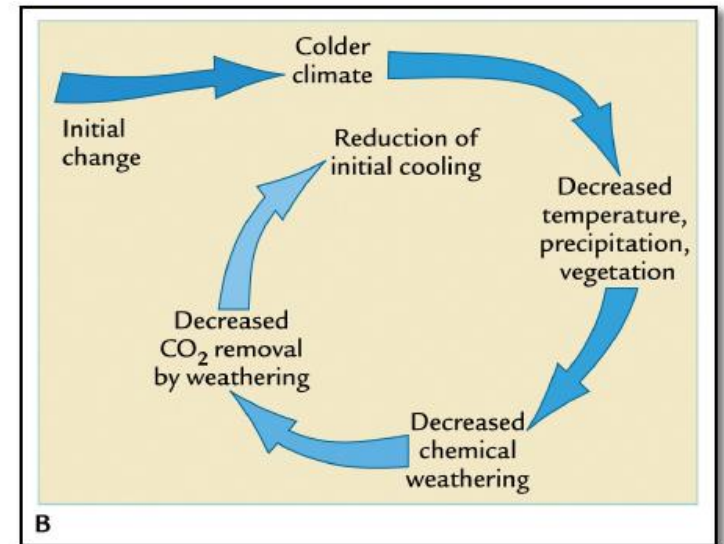
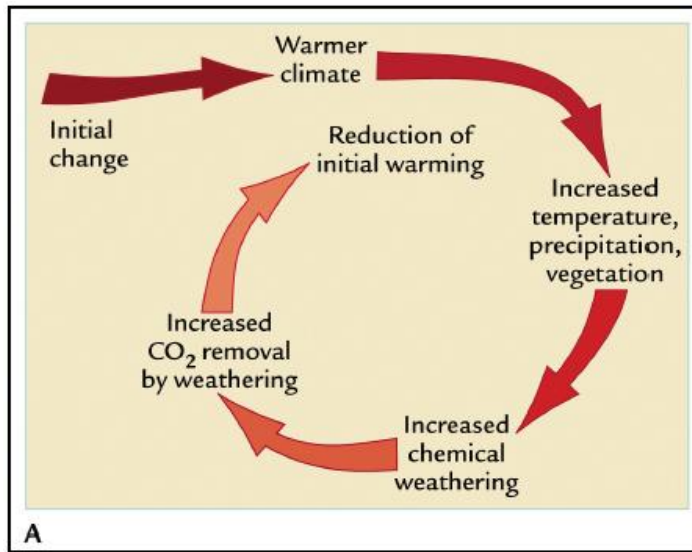


B Negative feedback



Feedback: CO₂ versus waterdamp

- CO₂ werkt als een thermostaat (negatieve feedback)
- Deze feedback is erg traag

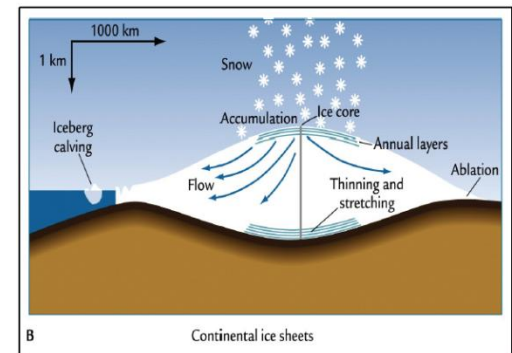
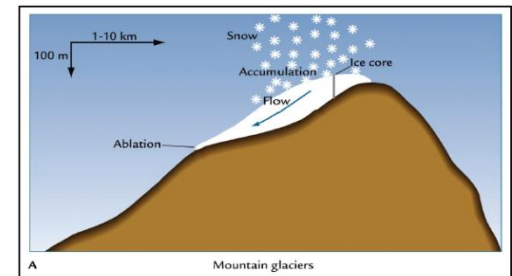
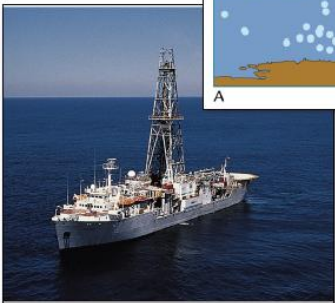
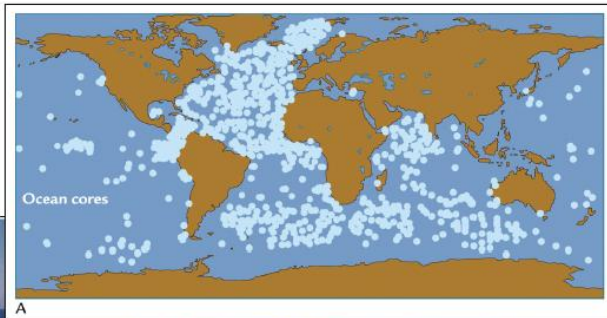
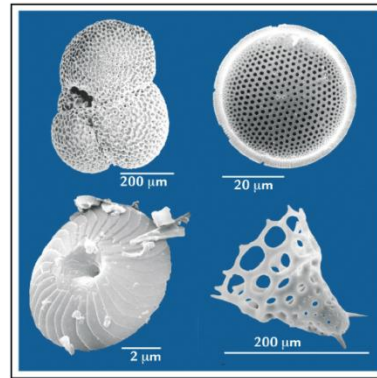


- Waterdamp is een broeikasgas met positieve feedback
 - Klimaat: opwarming
 - Toename waterdamp in de atmosfeer
 - Toename broeikas effect (meer straling wordt vastgehouden)
- Opwarming, etc.



Reconstructie klimaat

- Boomringen
 - Temperatuur in groeiseizoen heeft sterkste invloed
 - Neerslag heeft invloed
- Ijskernen
 - Groenland en Antarctica
 - Ingevroren gasbellen geven direct concentraties broeikasgassen
- Sediment
 - Meren, oceanen
 - Koraal geeft jaarringen van CaCO_3
 - Watertemperatuur
 - Voeding
 - Waterdiepte



Temperatuur

- De $\delta^{18}\text{O}$ waarde

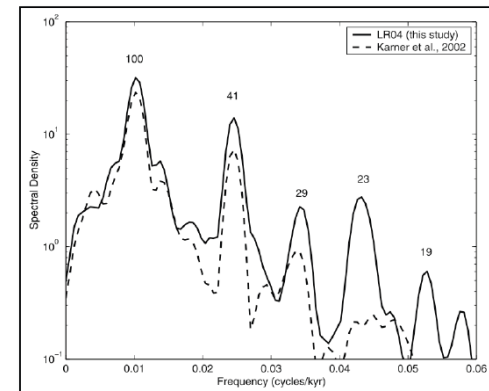
- Verhouding van 2 isotopen zuurstof
- Correleert met watertemperatuur
 - Kookpunt ^{18}O is 0.14 °C lager dan van ^{16}O
 - Dus verdampt ^{18}O minder en regen bevat meer ^{16}O
- Kan gebruikt worden bij alles waar zuurstof in zit
 - Ijskernen, sedimenten (foraminifera), koralen, etc.

^{16}O	^{17}O	^{18}O
15.9949	16.9991	17.9991
99.76%	0.04%	0.20%
Stable	Stable	Stable

$$\delta^{18}\text{O} = \left(\frac{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{sample}}}{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{standard}}} - 1 \right) * 1000 \text{ ‰}$$

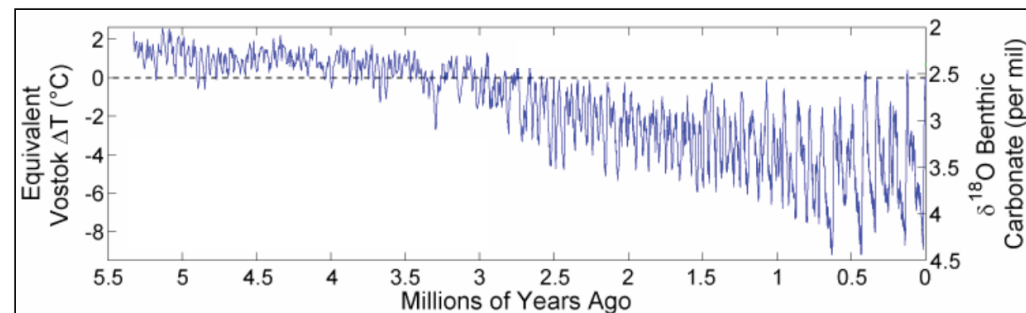
- Temperatuur is bekend voor de laatste 5 miljoen jaar

- Temperatuur van de Aarde was niet constant de laatste paar miljoen jaar
- De gemiddelde temperatuur varieert fors (bijna 10 °C)
- De laatste 3 miljoen jaar waren veel kouder dan daarvoor
- De variatie in temperatuur verandert
 - Langer dan 3 miljoen jaar geleden was de variatie slechts 2 °C
 - De laatste miljoen jaar waren er schommelingen tot 10 °C



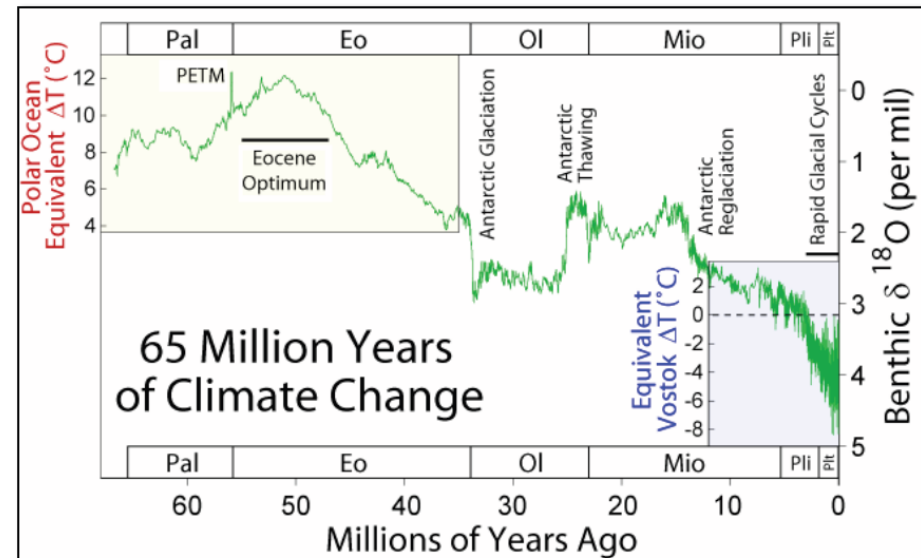
- Fourier analyse

- Perodes van 100, 41, 29, 23 en 18 duizend jaar
- Milankovitsch cycli
 - Eccentriciteit
 - Axiale tilt
 - Precessie



Laatste 65 miljoen jaar

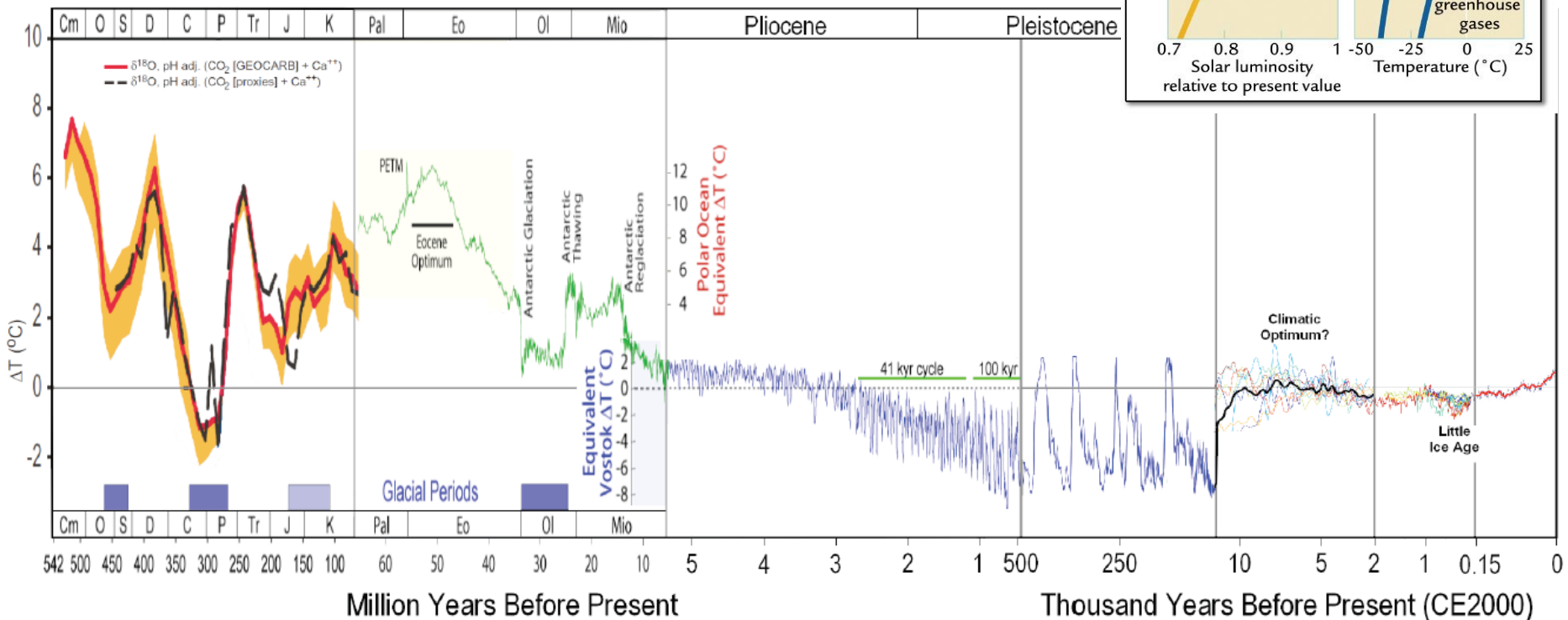
- Temperatuur de laatste 65 miljoen jaar
 - Niet constant
 - Voor het merendeel significant warmer dan nu
 - 50 miljoen jaar geleden was de gemiddelde temperatuur 6 °C warmer dan nu
 - Wat is de PETM piek?
- Paleocene – Eocene Thermal Maximum
 - Focus van klimaatonderzoek nu
 - Wat gebeurde er gedurende PETM?
 - Gemiddelde temperatuurstijging met 6 °C in 20000 jaar
 - Veel soorten uitgestorven
 - Veel nieuwe soorten
 - Door positieve feedback (smelten van ijskappen) was de gemiddelde temperatuur op de polen tussen 10 en 20 °C
 - Door stijging zeespiegel kwamen tropische wouden onder water te staan. Er kwam veel methaan vrij, die converteerde naar CO₂ en leidde tot verdere opwarming
 - Herstel was ook snel: 150.000 jaar
 - De hoeveelheid CO₂ die tijdens PETM vrijkwam is ongeveer equivalent aan wat de mensheid na de industriële revolutie



Carboon

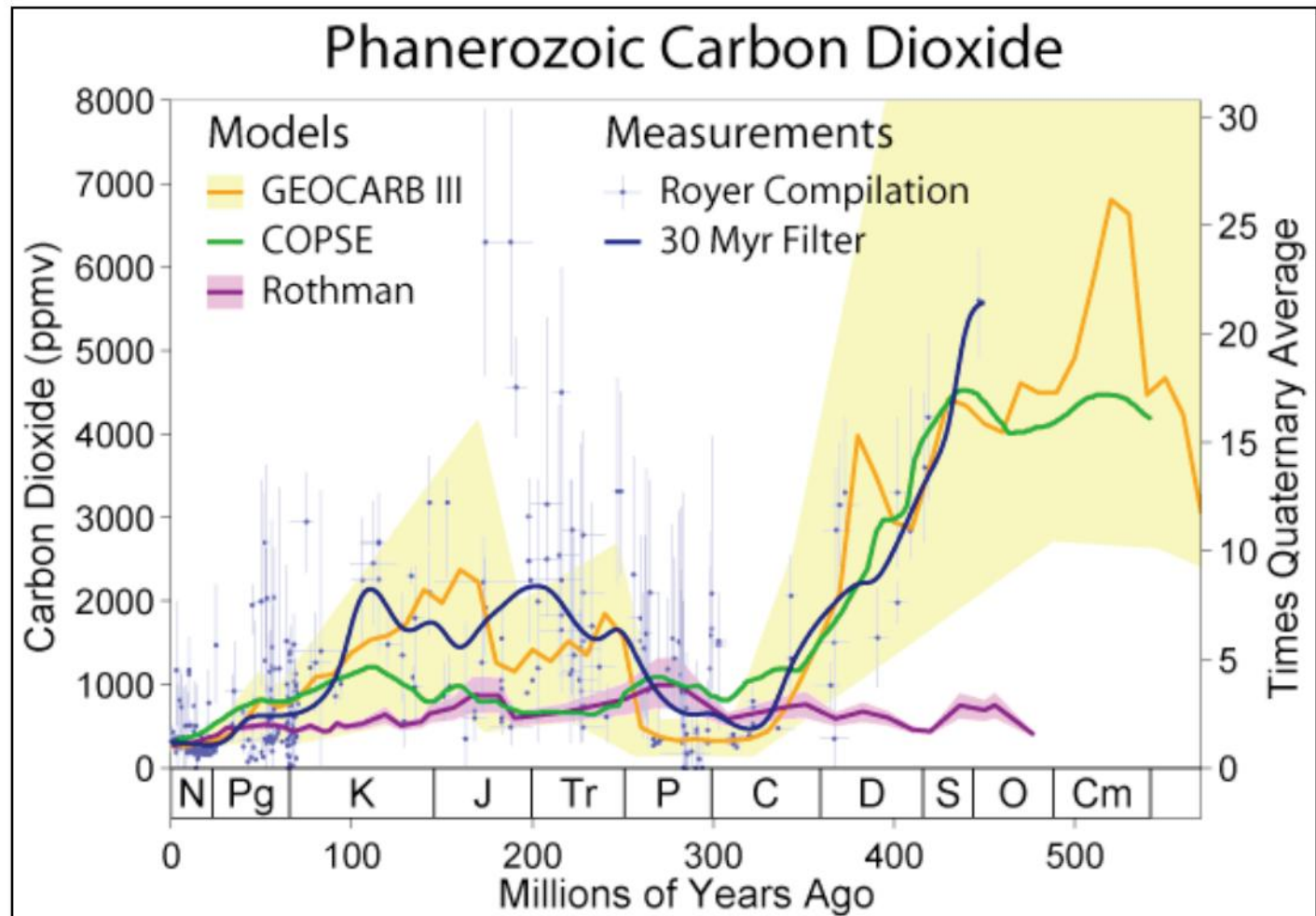
- Tijdens carboon is het merendeel van onze fossiele energievoorraden gevormd
- Sterke reductie van CO₂ in de atmosfeer en sterke koeling
 - Faint Young Sun Paradox
 - De Zon wordt helderder naarmate ze ouder wordt
 - In het verleden moet de concentratie broeikasgas groter zijn geweest

Temperature of Planet Earth



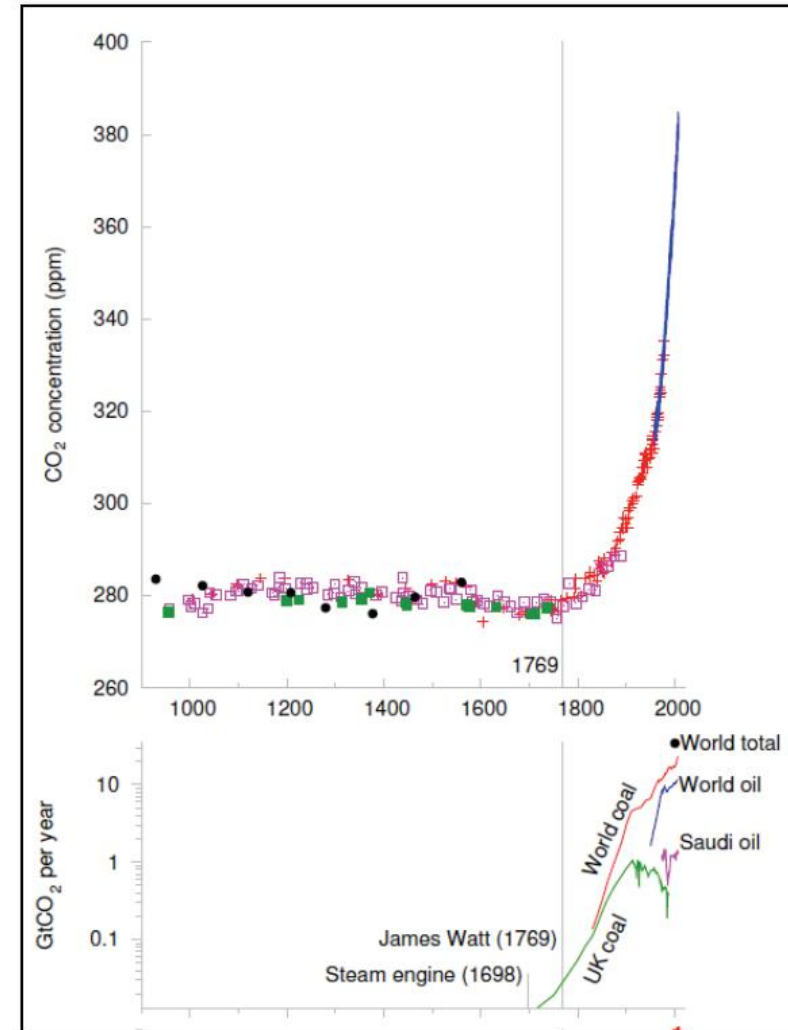
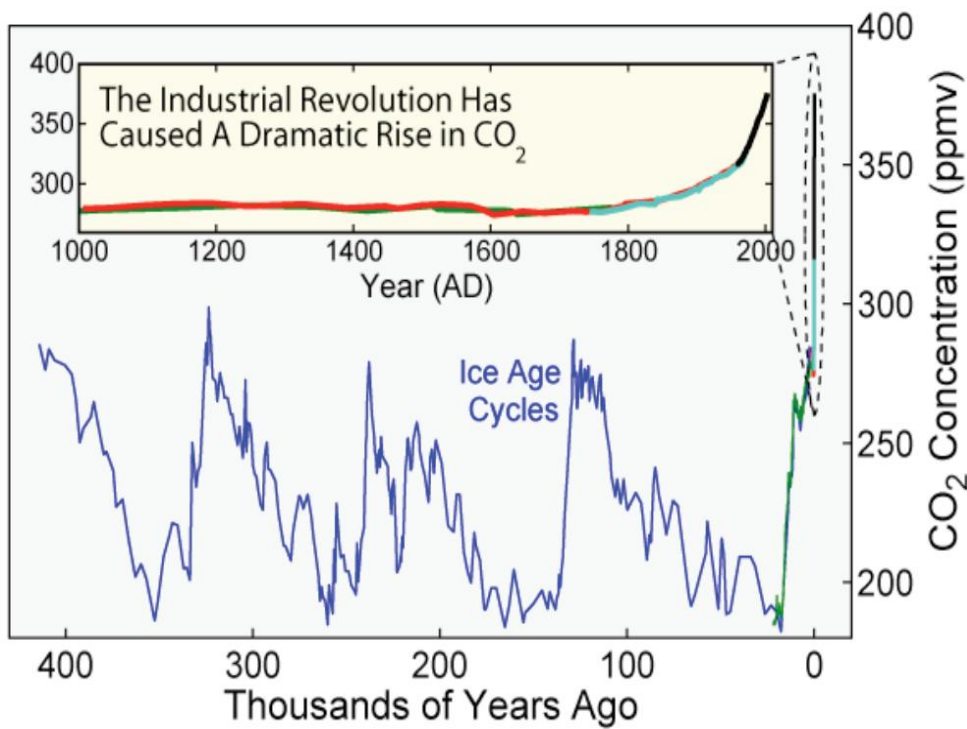
CO₂ concentratie

- Voor de laatste 0.5 miljard jaar
 - Concentratie kooldioxide was in het verleden inderdaad veel hoger



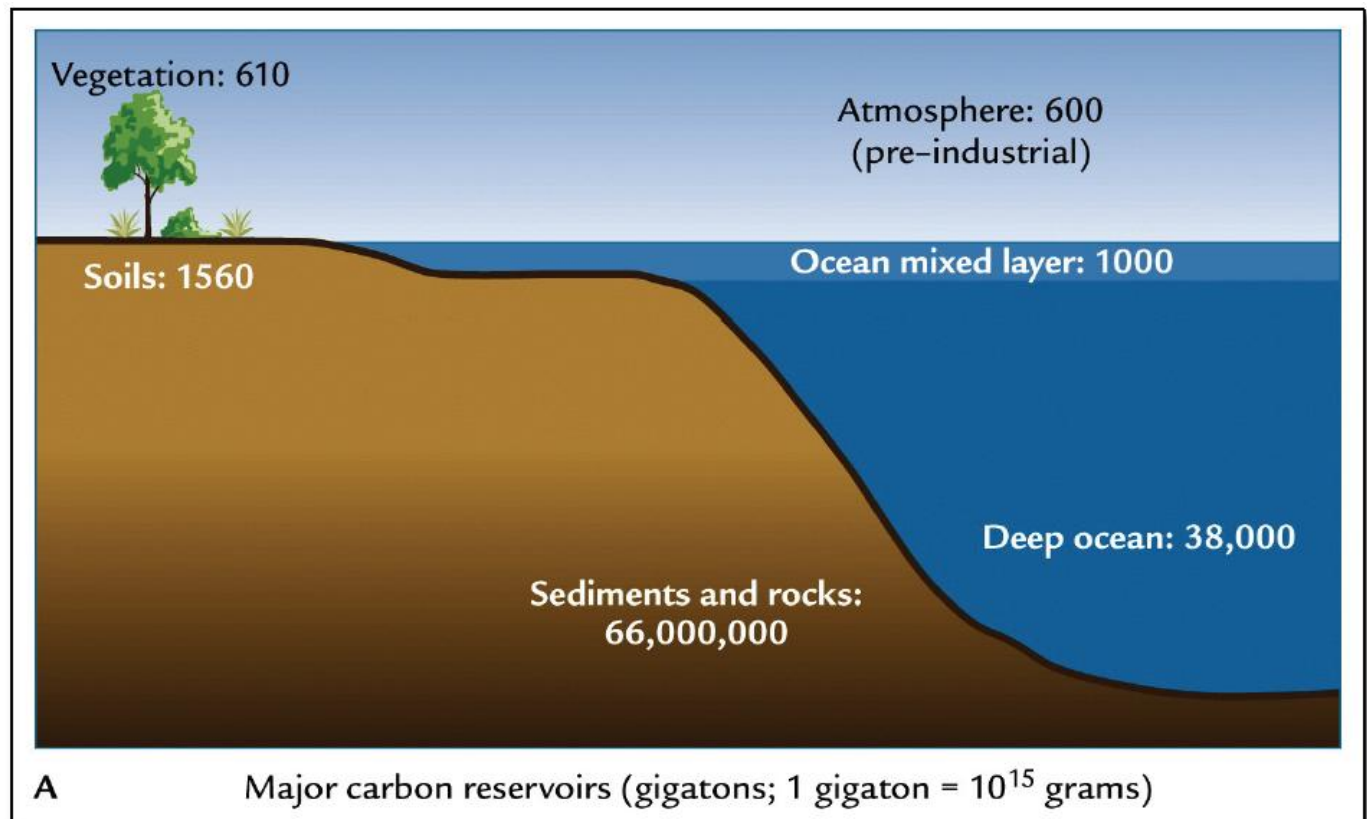
Variaties in CO₂ concentratie

- Concentratie redelijk constant rond 280 ppm tussen 750 en 1750
- Sterke toename de laatste 150 jaar
 - Verbranden van fossiele brandstoffen
 - Industriële revolutie (stoommachine, etc.)
 - Sterke correlatie met temperatuur Aarde



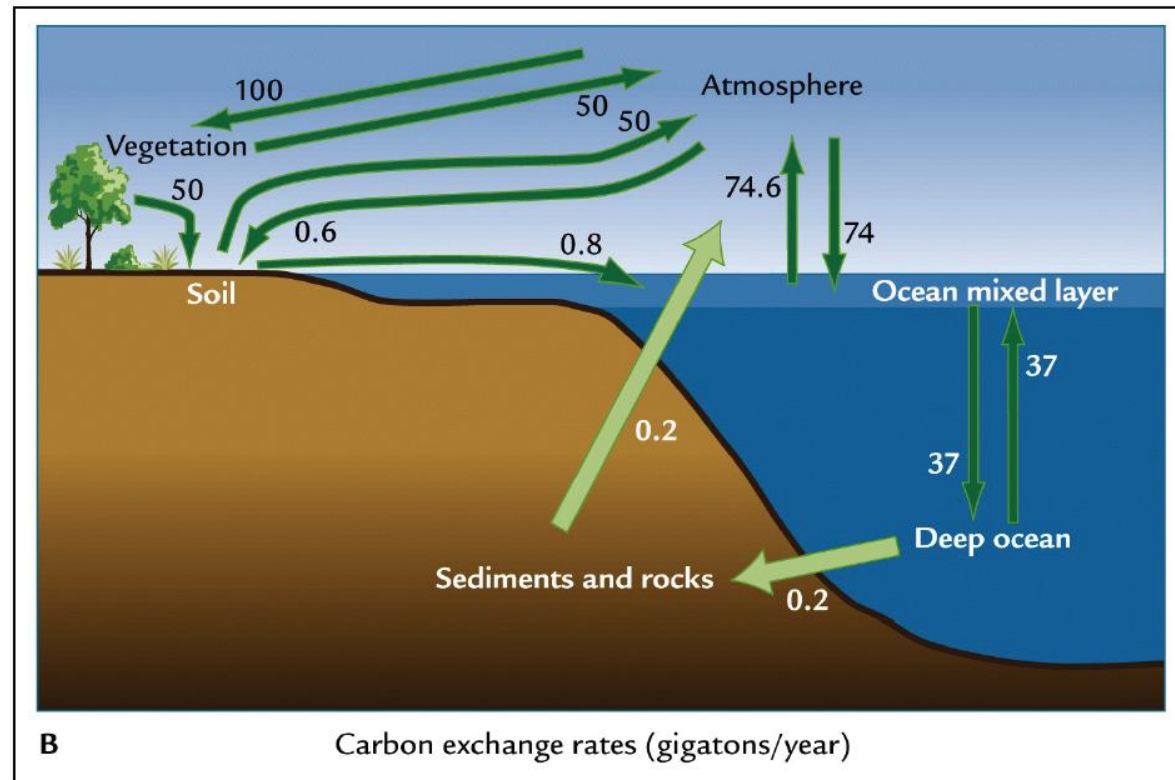
Koolstof reservoirs

- Slechts een fractie van de koolstof bevindt zich in de atmosfeer of in de vegetatie
- Enorme reservoirs van koolstof ten opzichte van onze CO₂ emissie van 34 Gte/jaar
 - Oceanen
 - Sedimenten en gesteente
- Waarom is de CO₂ uitstoot door de mensheid belangrijk?



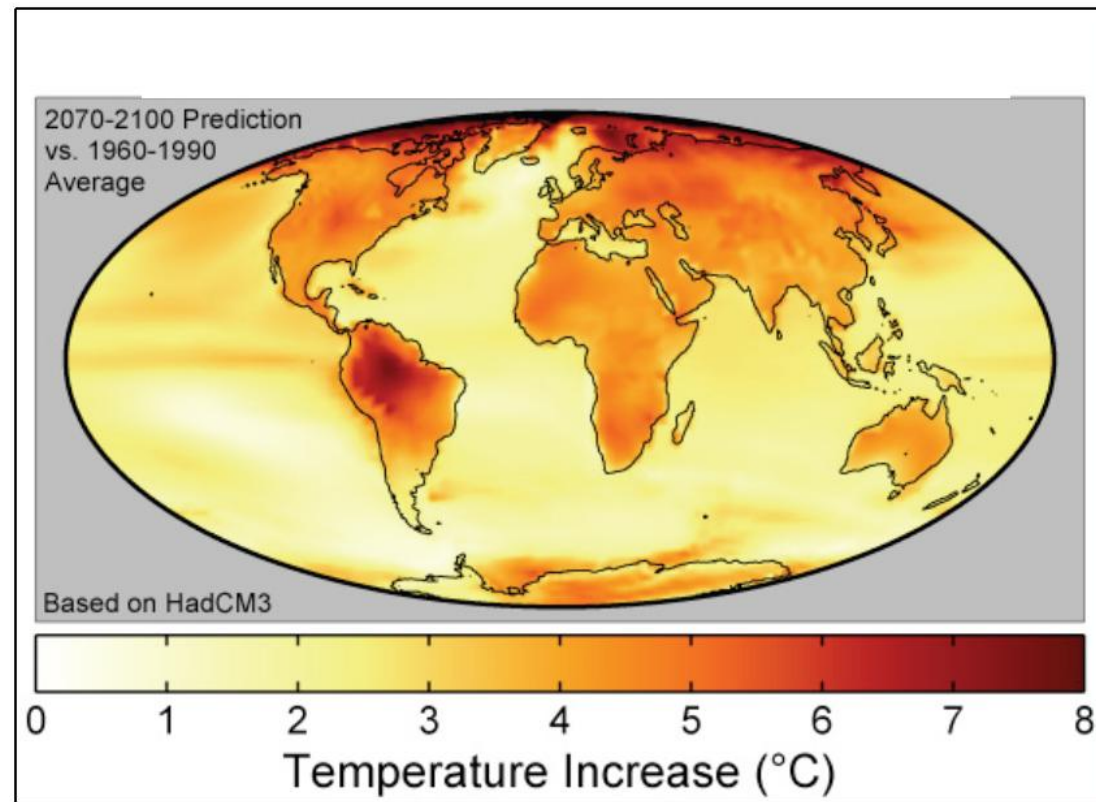
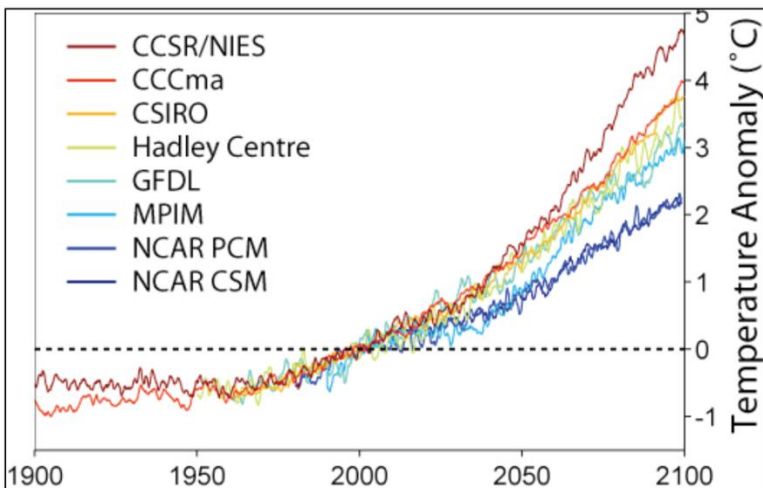
Koolstof uitwisseling

- Trage uitwisseling tussen de koolstof reservoirs
 - Voorbeeld: tijdconstante diepe oceaan: $38.000 \text{ Gt} / 37 \text{ Gt/j} = 1000 \text{ jaar}$
- Vergelijk dit met de CO_2 emissie van 34 Gt/jaar
 - Kooldioxide emissie door mensheid is belangrijke bijdrage
- Stel dat iedereen evenveel uitstoot als de gemiddelde Nederlander
 - NL = $13 \text{ tCO}_2\text{e}$ per jaar
 - 7 miljard mensen: 91 Gt/jaar
 - USA: 168 Gt/jaar
 - In 2100: 15 miljard mensen
 - In 2100: 300 Gt/jaar !



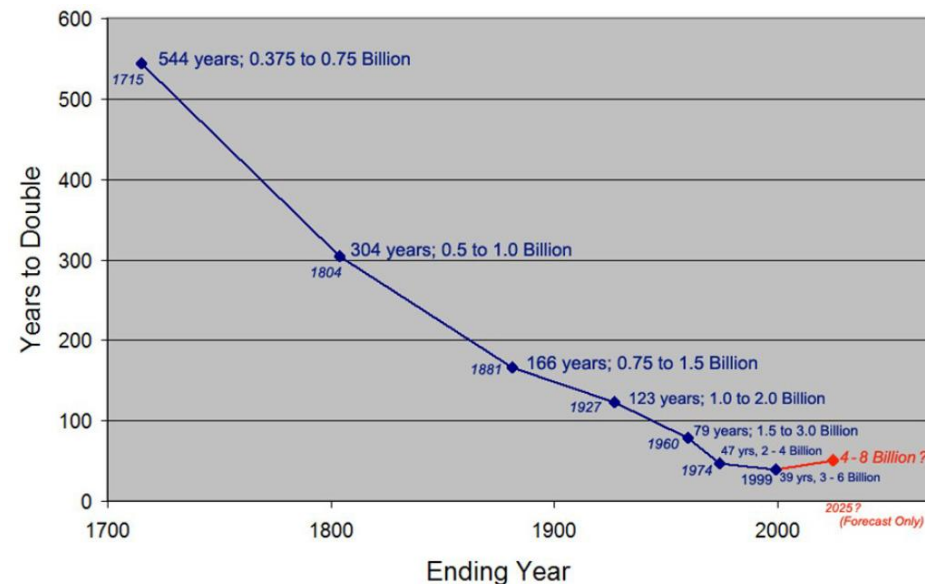
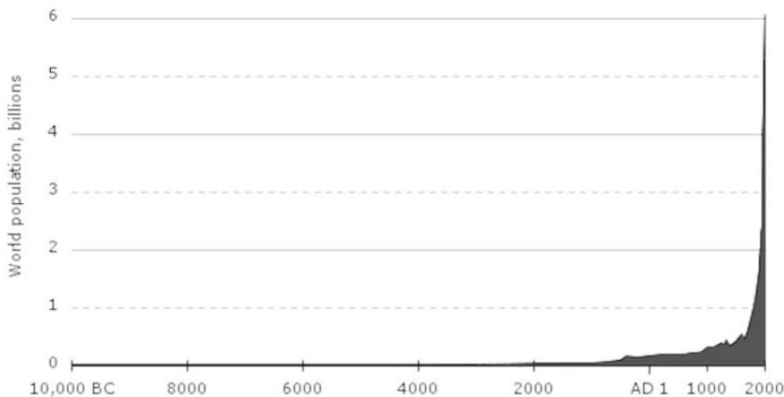
Klimaatvoorspellingen

- Voorspelling voor eind 21ste eeuw
 - Aanneمة “business as usual” (continue economische groei en groei in CO₂ uitstoot)
- United Nations Framework Convention on Climate Change
 - 8 verschillende modellen



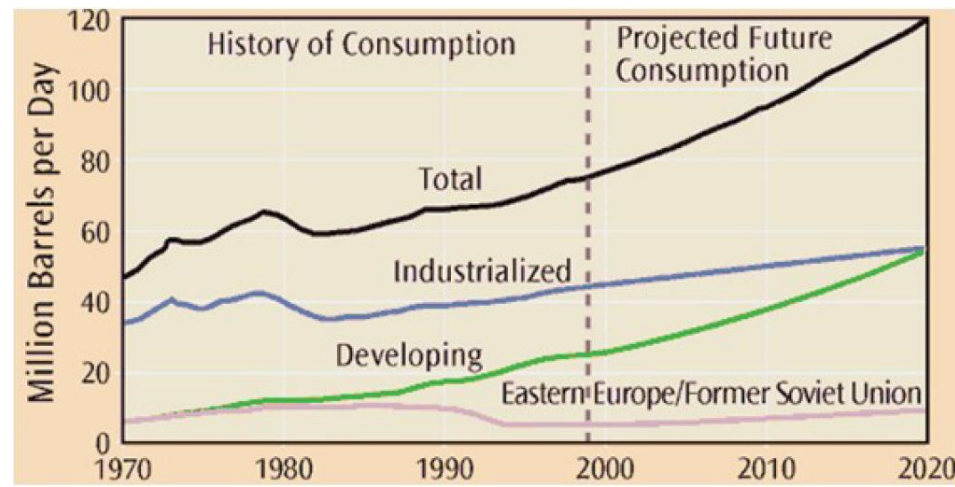
Duurzaamheid

- Aspecten van een duurzame oplossing
 - Bereiken van een situatie met stabiel evenwicht
- Exponentiële groei
 - 2011: 6.9 miljard mensen
 - Groei-index 1.092%
 - Verdubbelingstijd: deel 70 door 1.092 = 64 jaar
 - Komt redelijk overeen met data in figuur
 - Is deze groei (te) groot? Wenselijk? Duurzaam?
- Eenvoudige oefeningen
 - Neem aan dat we “duurzaam blijven groeien”
 - Wanneer is de dichtheid 1 persoon per m²?
 - Wanneer is het gewicht van alle mensen evenveel als het gewicht van de Aarde?



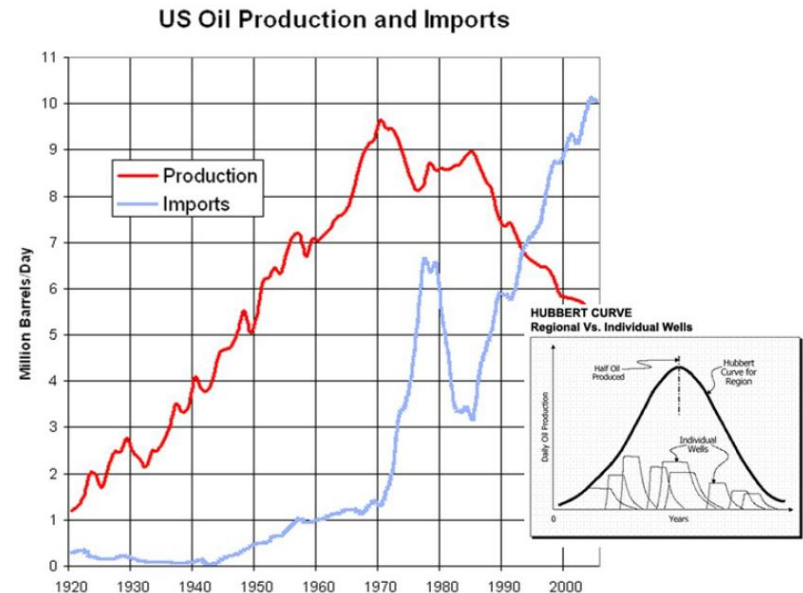
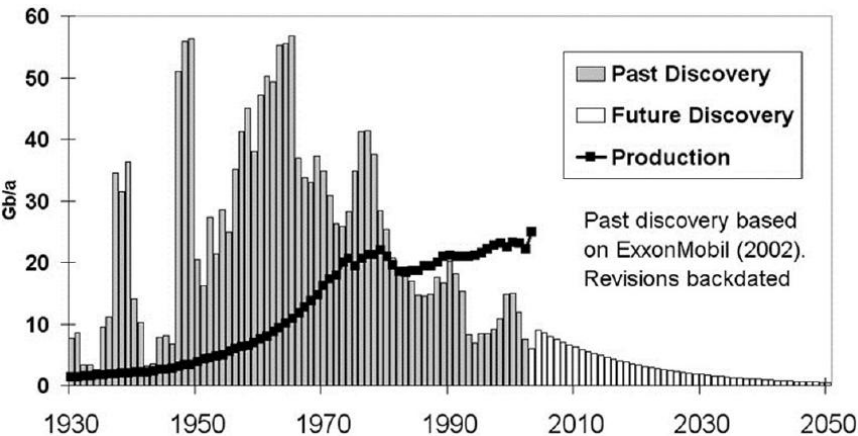
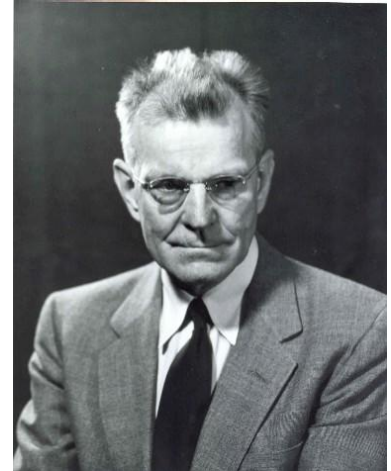
Duurzaamheid

- Energie consumptie
 - 1 exa joules = 10^{18} J
- Consumptie aardolie
 - 80 miljoen vaten (barrels) per dag
 - 1 barrel is ongeveer 159 liter olie
 - Groei-index 3.8% voor periode 1940 – 2006
 - Verdubbelingstijd: $\frac{70}{3.8} = 18$ jaar
- Verdubbelen
 - Fabel van het schaakbord: 1, 2, 4, 8, 16, 32, ...
 - Bij verdubbelen (bijvoorbeeld van 16 naar 32) komt er meer bij (16), dan ALLES wat er tot dan toe gebruikt is ($1 + 2 + 4 + 8$)
- Interessant is de competitie tussen een exponentiële functie en een eindige voorraad (niet echt...)



Aardolie

- Marion King Hubbert (Shell)
 - Voorspelde in 1956 dat de piekproductie van olie in de USA in 1969 zou plaatsvinden
 - De piekproductie was in 1970
 - Daarna moest de USA steeds meer olie gaan importeren
- World Coal Association
 - Aangetoonde reserves voor steenkool, olie en gas zijn 118, 46 en 59 jaar
 - Reserves worden fout ingeschat
 - Dat is bij de huidige consumptie
 - Laatste vat moeilijker te winnen dan het eerste
- Rapportage reserves
 - ExxonMobil (2002)



Voorspellingen aardolie

- Legio modellen (zie peakoil Wikipedia)
 - Department of Energy (DOE) USA in 2005: Hirsch report
 - Binnen 10 jaar wordt piekproductie bereikt
 - Nu maatregelen treffen
- Verhulst vergelijking
 - Aantal op tijdstip t is $N(t)$
 - Groeifactor r
 - Maximale populatie die mogelijk is K

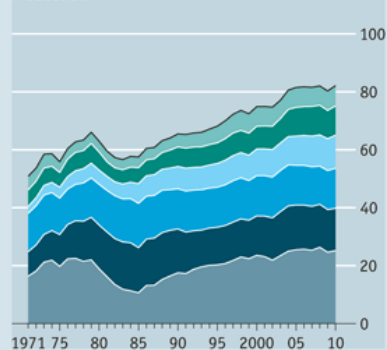
$$\frac{dN}{dt} = rN \left(1 - \frac{N}{K} \right)$$

Oil production and consumption

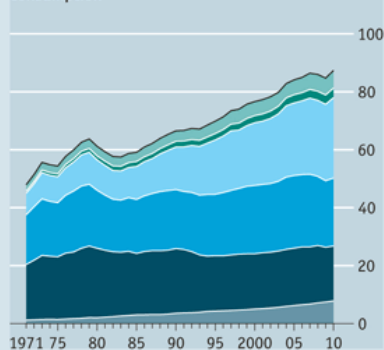
Barrels per day, m

■ Middle East
 ■ Europe
 ■ North America
 ■ Asia-Pacific
 ■ Africa
 ■ South and Central America

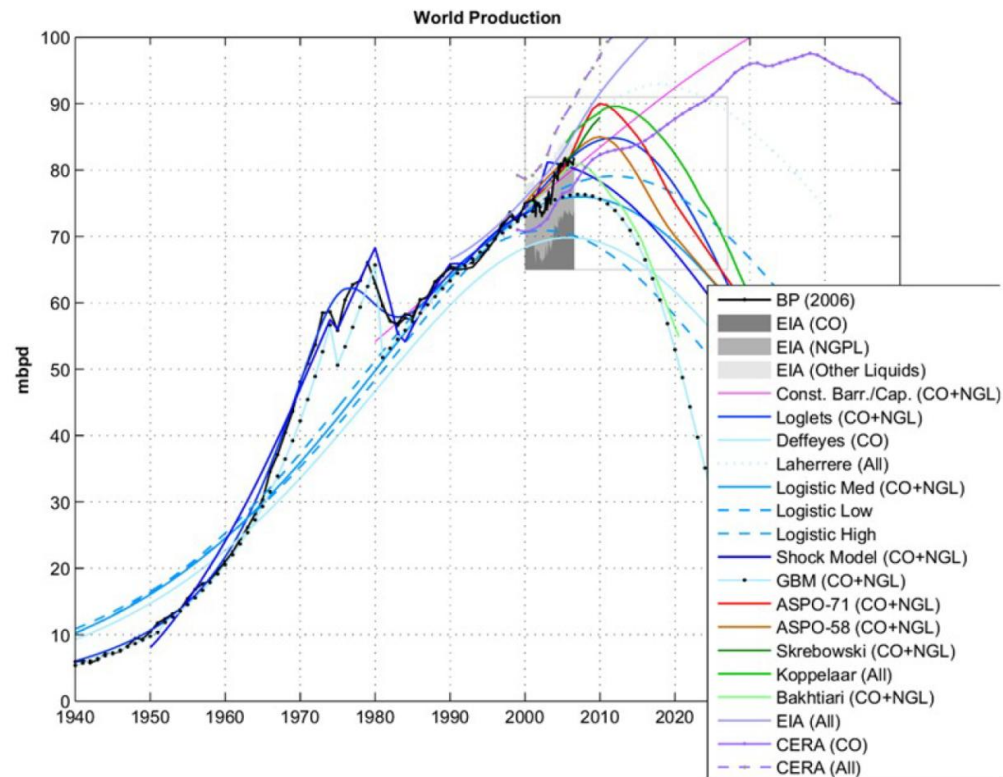
Production



Consumption

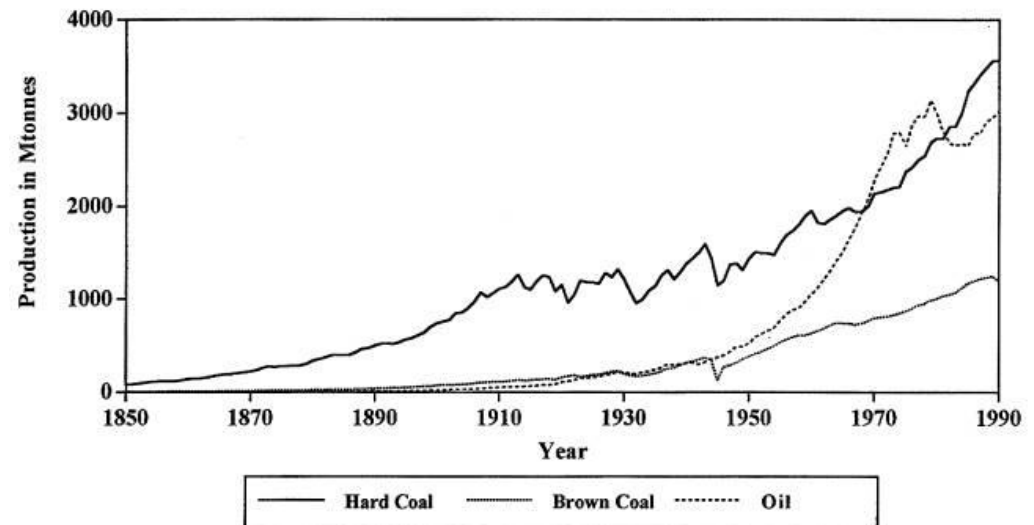
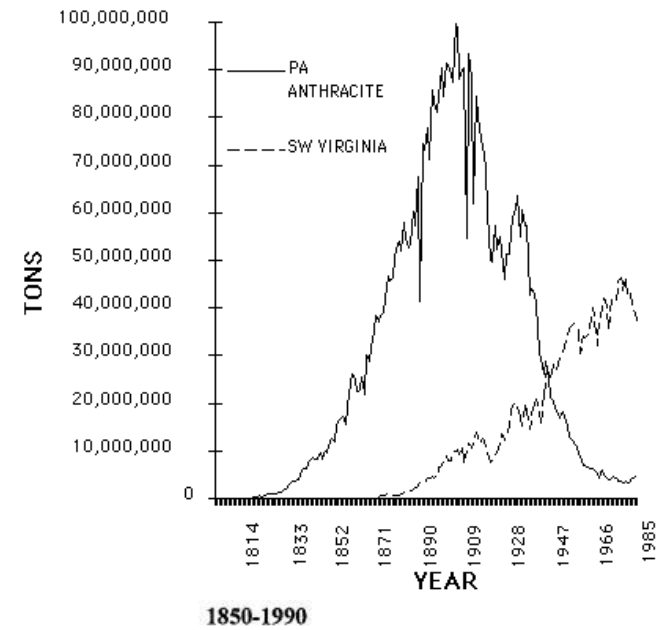
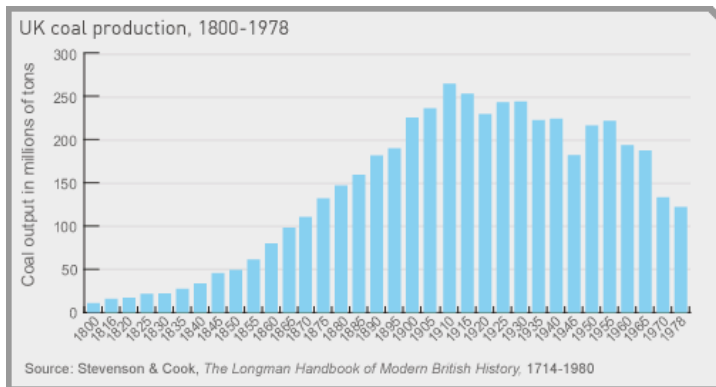


Source: BP Statistical Review



Hubbert modellen

- Exponentiële groei in competitie met eindige grondstof
 - Mathematische zekerheid, geen opinie
 - Steenkool, aardolie en aardgas
 - Kunstmest

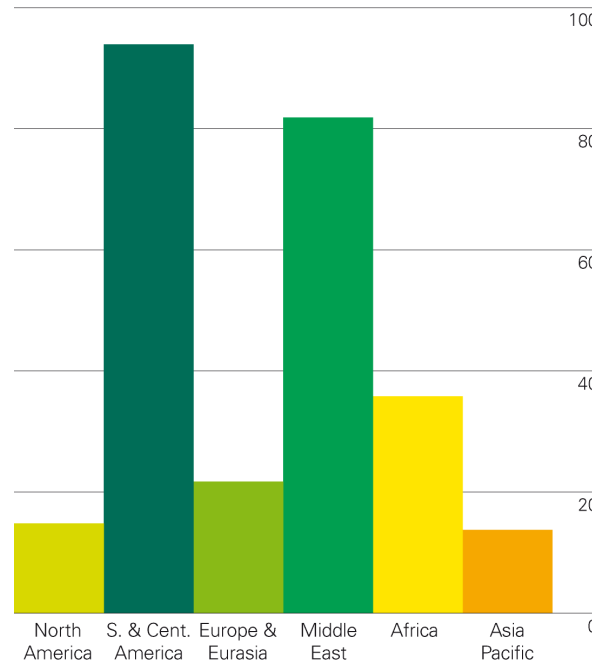


Olíe reserves

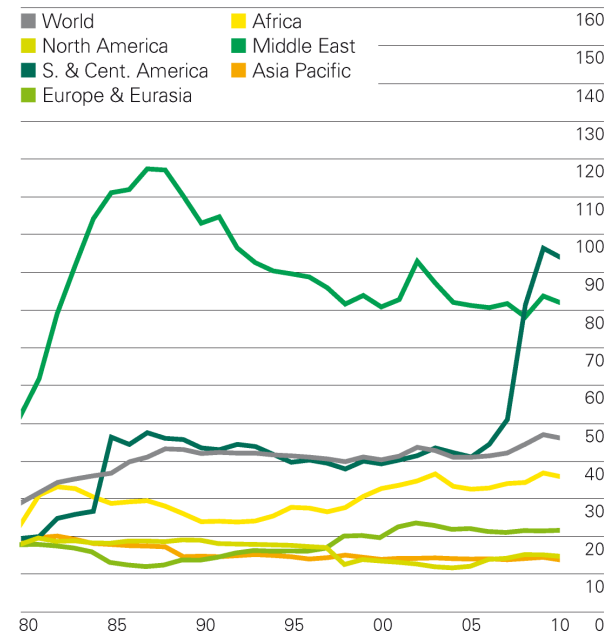
- R/P ratio
 - BP report 2011
 - Gebaseerd op huidige productie
 - 46.2 jaar
 - Minder dan in 2009

Reserves-to-production (R/P) ratios
Years

2010 by region



History



World proved oil reserves in 2010 were sufficient to meet 46.2 years of global production, down slightly from the 2009 R/P ratio because of a large increase in world production; global proved reserves rose slightly last year. An increase in Venezuelan official reserve estimates drove Latin America's R/P ratio to 93.9 years – the world's largest, surpassing the Middle East.

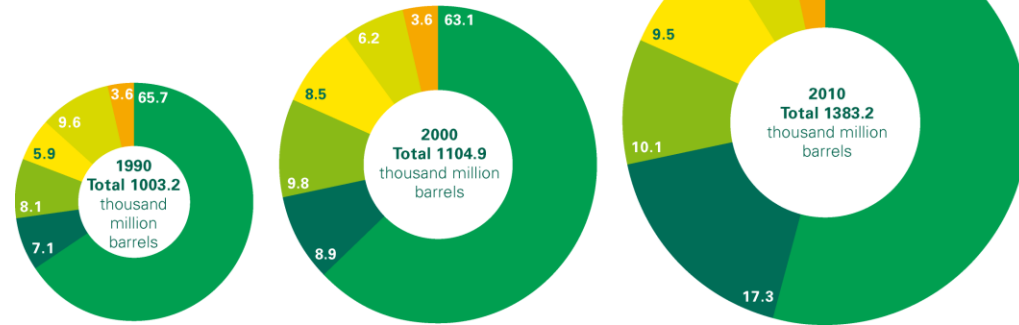


Olie reserves

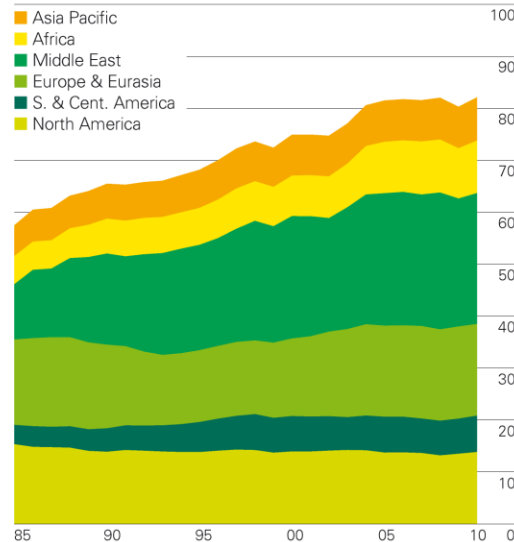
- Verdeling bewezen reserves
 - Totaal 1383.2 gbl
 - Huidig verbruik 88 mbl/d
 - 46.2 jaar (volgens BP)
 - Aandeel Midden Oosten loopt terug
 - Zuid Amerika neemt toe
- Productie 2010
 - Toename met 1.8 mbl/d
- Consumptie 2010
 - Toename met 2.7 mbl/d
 - Dat is 3.1% groei
 - Verdubbelingstijd 22.8 jaar
 - Alles op binnen deze tijd!

Distribution of proved reserves in 1990, 2000 and 2010
Percentage

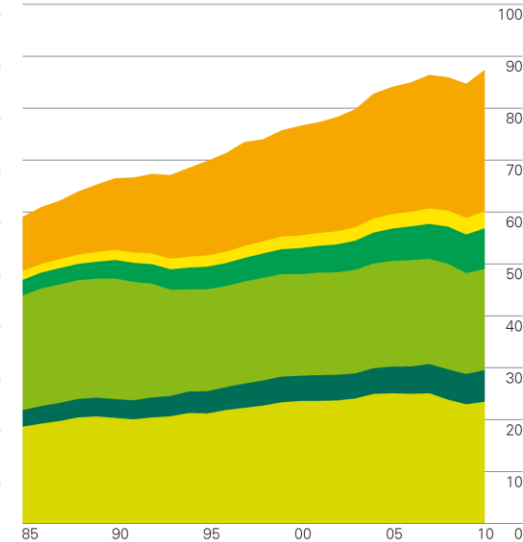
■ Middle East
■ S. & Cent. America
■ Europe & Eurasia
■ Africa
■ North America
■ Asia Pacific



Production by region
Million barrels daily



Consumption by region
Million barrels daily



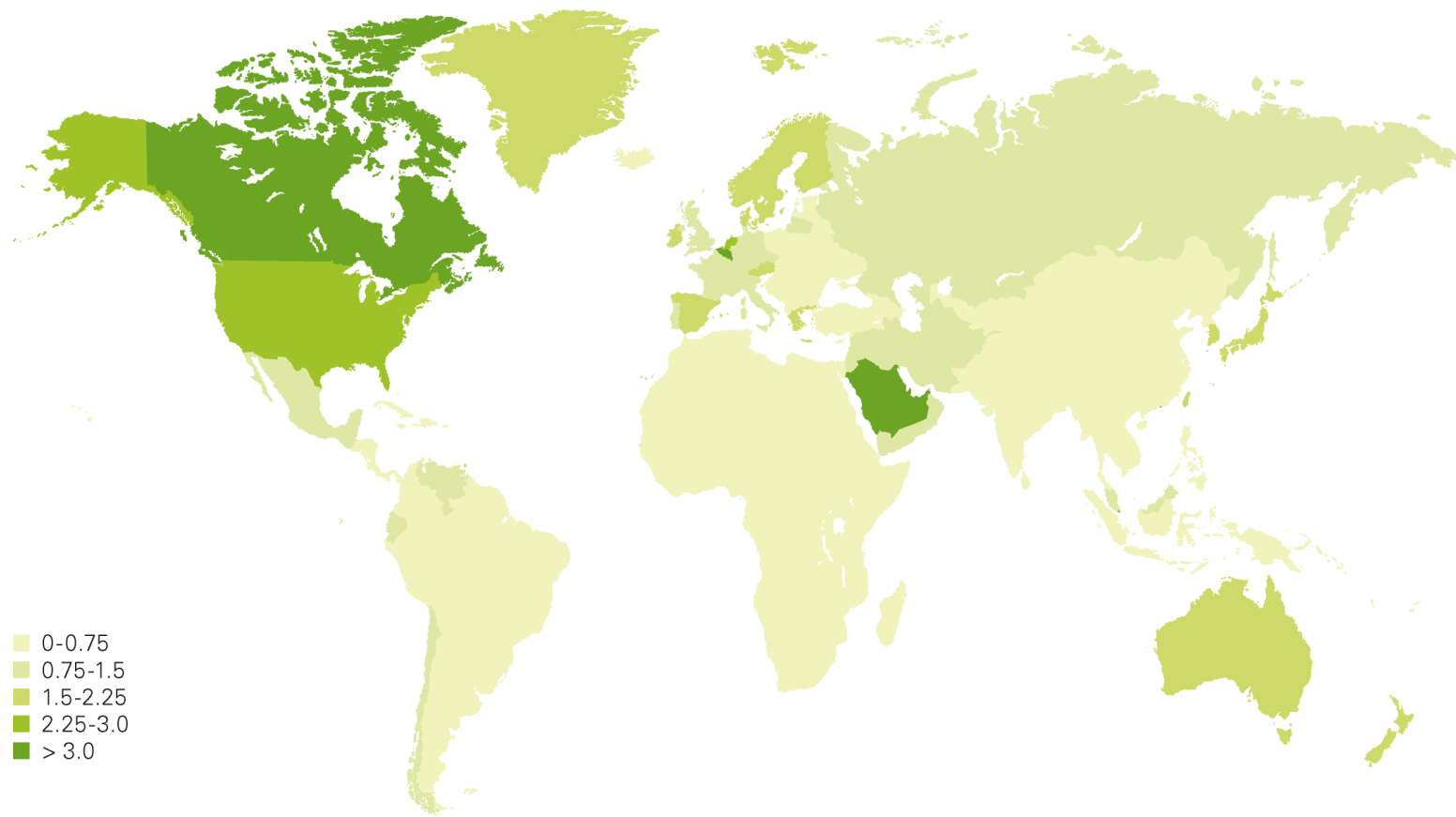
World oil production increased by 1.8 million b/d in 2010; growth was broadly-based, with increases in all regions except Europe & Eurasia. Moreover, growth was broadly split between OPEC and non-OPEC countries. World oil consumption increased by 2.7 million b/d; growth was above average in all regions, although Asia Pacific countries accounted for the majority (54%) of global consumption growth.



Olie consumptie

- Per hoofd van de bevolking in 2010

Consumption per capita 2010
Tonnes



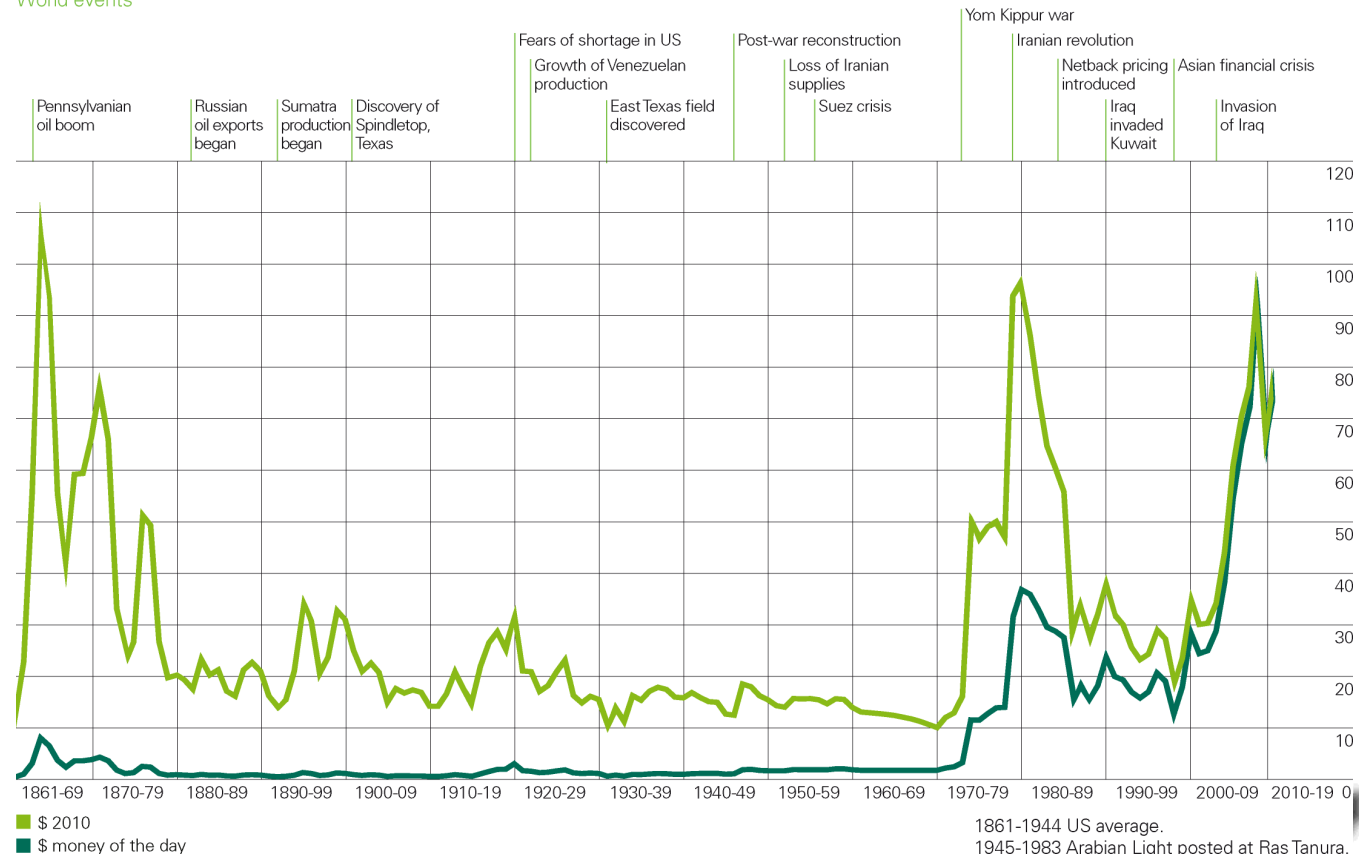
Olie prijzen – historisch

- Prijzen sinds 1861

Crude oil prices 1861-2010

US dollars per barrel

World events

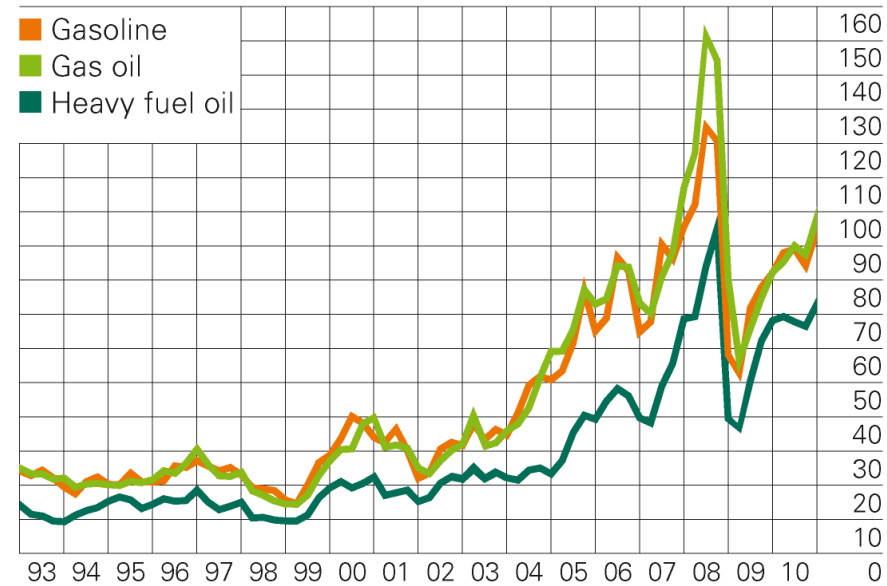


Fossiele brandstofprijzen

- Prijsniveaus olie en gas
 - Elektriciteitsprijs is met 250% gestegen in 10 jaar tijd
 - Idem voor olie en gas
- Redenen
 - Stijgende vraag
 - China en India
 - Gebrek aan reserve productie capaciteit
 - Politieke onzekerheden

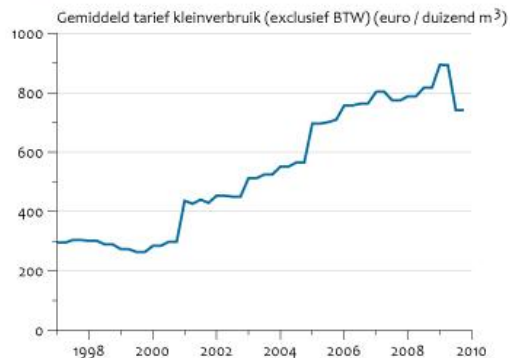
Rotterdam product prices

US dollars per barrel

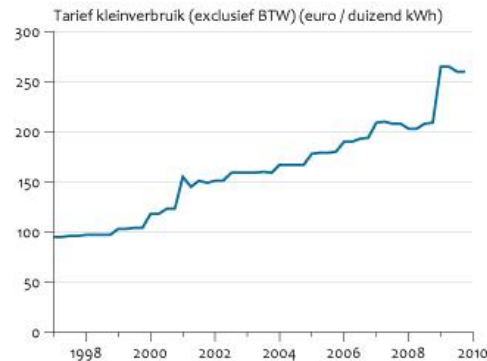


Source: Platts.

Aardgasprijs



Elektriciteitsprijs

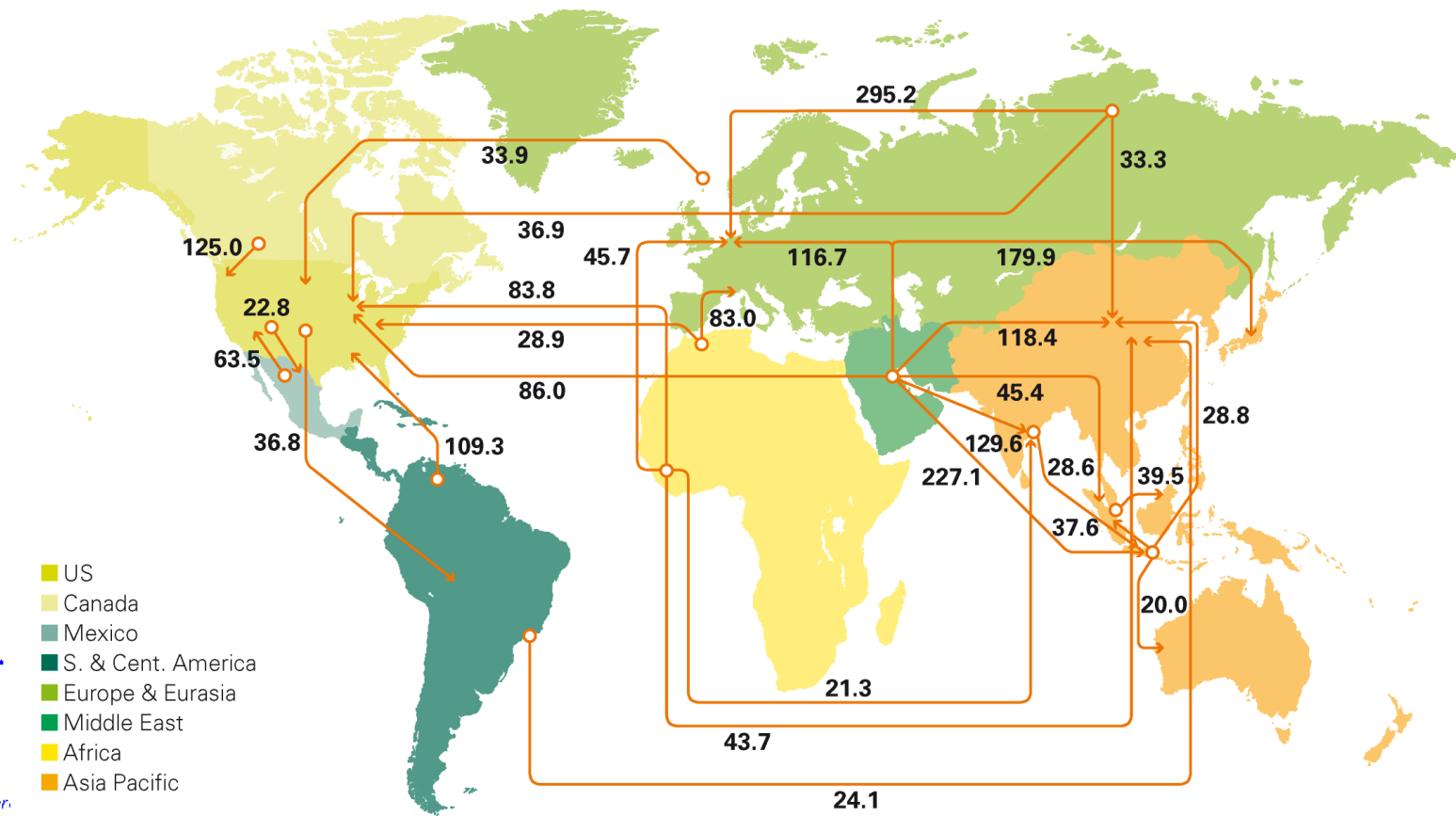


Olie – handelsstromen

- Bewegingen in 2010

Major trade movements 2010

Trade flows worldwide (million tonnes)



Olie – reserve's

World Proved¹ Reserves of Oil and Natural Gas. Most Recent Estimates

Country/Region	Oil (Billion Barrels)	Oil (Billion Barrels)	Oil (Billion Barrels)
	<i>BP Statistical Review</i> ² Year-End 2007	<i>Oil & Gas Journal</i> ³ January 1, 2009	<i>World Oil</i> ⁴ Year-End 2007
World Total	1,238.892	1,342.207	1,184.208

- Energy Information Administration
 - In 2009 naar schatting 1342 Gbl
- United States Geological Survey
 - F95 betekent 95% kans dat minstens deze hoeveelheid olie gewonnen kan worden
 - Totaal (mean) 3021 Gbl (2000 report)



Oil				Gas				BBOE	NGL			
Billion Barrels				Trillion Cubic Feet					Billion Barrels			
F95	F50	F5	Mean	F95	F50	F5	Mean	Mean	F95	F50	F5	Mean

World (excluding United States)

Undiscovered conventional	334	607	1,107	649	2,299	4,333	8,174	4,669	778	95	189	378	207
Reserve growth (conventional)	192	612	1,031	612	1,049	3,305	5,543	3,305	551	13	42	71	42
Remaining reserves*				859				4,621	770				68
Cumulative production*				539				898	150				7
Total				2,659				13,493	2,249				324

United States

Undiscovered conventional**	66		104	83	393		698	527	88	Combined with oil			
Reserve growth (conventional)**				76				355	59				
Remaining reserves				32				172	29				
Cumulative production				171				854	142				
Total				362				1,908	318				

World Total

(including United States)

3,021

15,401

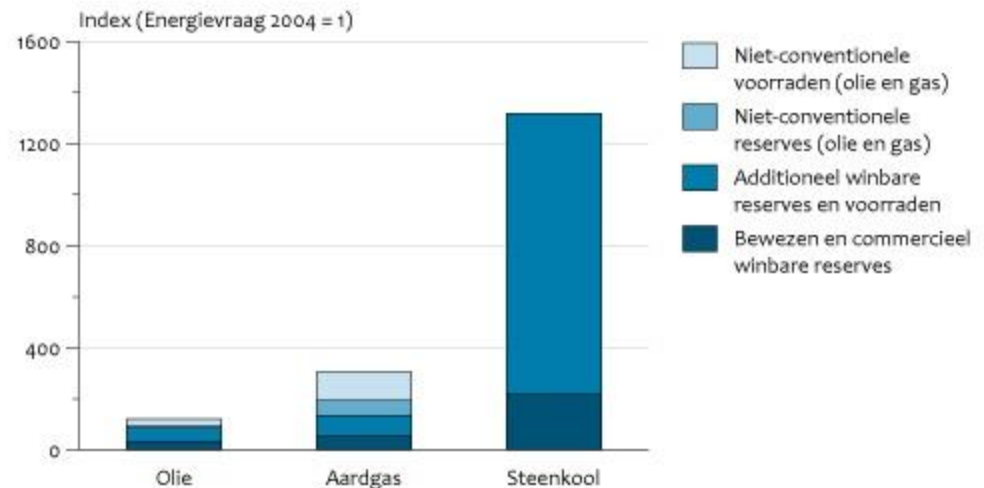
2,567

Fossiele brandstoffen – reserve's

- Site van CBS, PBL en Wageningen University
- Mondiale voorraden
 - Aardolie 150 jaar
 - Gasverbruik 360 jaar
 - Steenkool 1320 jaar
 - Op basis van 2004

Compendium
voor de Leefomgeving

Mondiale voorraden fossiele brandstoffen 2006



Bron: IEA, TNO, MNP, 2006.

PBL/deco6/0051
www.compendiumvoordeleefomgeving.nl



Temperatuurproxy

- Sediment en Vostok boorkernen ijs geven dezelfde afhankelijk van $\delta^{18}\text{O}$

